

Konstrukční návrh formy pro výrobu dílu automobilu

Bc. Adam Ondrašík

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. Adam Ondrašík
Osobní číslo:	T21412
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce technologických zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Konstrukční návrh formy pro výrobu dílu automobilu

Zásady pro vypracování

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

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

Seznam doporučené literatury:

STAUBER, R. a L. VOLLRATH. *Plastics in automotive engineering: exterior applications*. Munich: Hanser Publishers, 2007, xv, 407 s. ISBN 978-1-56990-406-0.

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

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.

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 užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na technologii vstřikování od principu tvorby modelu usměrňovače vzduchu až po návrh vstřikovací formy s ověřením funkčnosti. Zaměření teoretické části je na popis vstřikovacích strojů, vlastností polymerů, formy a modelování pomocí počítačem podporovaných systémů.

Praktická část obsahuje popis vytvořeného 3D modelu společně se vstřikovacím strojem a navrženou vstřikovací formou. Ta je v simulačním softwaru Moldflow 2023 podrobena analýzám. Podstatou analýz je porovnání efektivity navrženého horkého a studeného vtokového systému. Získané poznatky a výsledky práce jsou shrnuty v závěru.

Klíčová slova: vstřikování, vstřikovací forma, simulace, modelování, vstřikovací stroj

ABSTRACT

The thesis focuses on the injection moulding technology from the principle of creating a model of the air rectifier to the design of the injection mould with functionality verification. The focus of the theoretical part is on the description of injection moulding machines, polymer properties, moulds and modelling using computer aided systems.

The practical part contains a description of the created 3D model together with the injection moulding machine and the designed injection mould. This is analysed in the Moldflow 2023 simulation software. The essence of the analysis is to compare the efficiency of the designed hot and cold injection system. The obtained findings and results of the work are summarized in the conclusion.

Keywords: injection moulding, injection mould, simulation, modeling, injection moulding machine

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, vstřícnost a čas, který věnoval mé diplomové práci. Mé poděkování patří mé rodině, která mě podpořila při tvorbě diplomové práce stejně jako během studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	12
1.1 CYKLUS VSTŘIKOVÁNÍ	13
1.1.1 pvT diagram	14
1.2 VSTŘIKOVACÍ STROJE.....	15
1.2.1 Průběh plastikace.....	17
1.2.2 Rozložení spotřeby energie vstřikovacím strojem	18
1.2.3 Uzavírací jednotky	20
1.3 POLYMERY	22
1.3.1 Charakteristika polymerů pro vstřikování.....	23
1.3.2 Tuhnutí amorfního a semikrystalického polymeru	23
1.4 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI POLYMERŮ	24
1.4.1 Viskozita.....	24
1.4.2 Tok polymeru	25
1.4.3 Relaxace	26
1.4.4 Vliv orientace vláken	27
2 NAVRHOVÁNÍ A MODELOVÁNÍ DÍLŮ	28
2.1 MODELOVÁNÍ DÍLŮ POMOCÍ CAD SYSTÉMŮ	29
2.1.1 Transformace souřadnic, objektů a bodů	29
2.1.2 Křivkové elementy	31
2.1.3 Základní způsoby modelování	31
2.2 ANALÝZY SOUČÁSTÍ.....	33
2.2.1 Metoda konečných prvků (FEM)	34
2.2.2 Uzly	35
2.2.3 1D elementy	35
2.2.4 2D elementy	36
2.2.5 3D elementy	36
2.2.6 Tvorba sítí	37
2.3 KONSTRUKČNÍ ZÁSADY DÍLŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ	38
2.3.1 Tloušťka stěny.....	39
2.3.2 Rádusy.....	40
2.3.3 Úkosy	41
3 VSTŘIKOVACÍ FORMY	42
3.1 VTOKOVÝ SYSTÉM	43
3.1.1 Studený vtokový systém.....	43
3.1.2 Horký vtokový systém	46
3.2 TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	47

3.2.1	Konvenční a konformní temperační systém.....	50
3.2.2	Temperace obtížně dosažitelných míst	51
3.3	ODVZDUŠŇOVACÍ SYSTÉM.....	53
3.4	ODFORMOVÁNÍ VÝSTŘIKU.....	53
3.4.1	Mechanické odformování bočních otvorů.....	54
3.4.2	Hydraulické a pneumatické odformování bočních otvorů	55
3.5	VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	56
3.5.1	Umístění a rozměry vyhazovacích prvků.....	56
3.5.2	Vyhazovací kolíky a trubky	57
3.5.3	Stírací desky	58
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	60
4	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	61
5	AUTOMOTIVE DÍL.....	62
5.1	VOLBA MATERIÁLU	62
5.2	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	63
6	NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	64
6.1	UMÍSTĚNÍ VTOKOVÉHO ÚSTÍ.....	66
6.2	ZAFORMOVÁNÍ SOUČÁSTI A TVAROVÉ DÍLY	68
6.3	VTOKOVÝ SYSTÉM	70
6.4	TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	71
6.5	ODVZDUŠŇOVACÍ SYSTÉM.....	72
6.6	ODFORMOVÁNÍ DÍLU	73
6.7	TRANSPORTNÍ PRVKY	76
7	OVĚŘENÍ NÁVRHU VSTŘIKOVACÍ FORMY	78
7.1	TVORBA SÍTĚ A JEJÍ OVĚŘENÍ.....	78
7.2	NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK	81
7.3	VÝSLEDKY SIMULACÍ	82
7.3.1	Doba plnění (fill time).....	83
7.3.2	Uzavírací síla (Clamp force)	84
7.3.3	Tlak v místě ústí vtoku (Pressure at injection location).....	85
7.3.4	Studené spoje (Weld lines).....	86
7.3.5	Vzduchové bubliny (Air traps).....	87
7.3.6	Teplota temperačního média (Circuit coolant temperature)	88
7.3.7	Teplota stěny formy (Temperature, mold)	89
7.3.8	Dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature).....	90
7.3.9	Celková deformace (Deflection, all effects)	91
8	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ Z ANALÝZ..... CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.	
	ZÁVĚR	94

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	95
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	101
SEZNAM OBRÁZKŮ	103
SEZNAM TABULEK.....	106
SEZNAM PŘÍLOH.....	107

ÚVOD

Historicky byla snaha nahrazovat staré materiály za nové a tento trend zaměňování pokračuje dodnes. Primárně se většina původních materiálů v současnosti zaměňuje za polymery. To je zapříčeno technickým pokrokem ve zpracovatelském odvětví. Příkladem může být výroba plastových dílů, které nahrazují součásti kovové ve všech průmyslových odvětvích. Tím se dosáhne snížení výsledné hmotnosti a také celkové zlepšení vlastností. Zmíněná hmotnost dokáže ovlivnit spotřebu pohonných hmot. [11]

Nejvíce ovlivněným odvětvím je automobilový průmysl. Díky širokému zastoupení automobilů v životě lidí je oblast automotive lukrativním výrobním odvětvím. K rozvoji tohoto sektoru napomáhá i fakt, že dochází neustále k nárůstu propojení zemí celého světa. Tím se zvětšují nároky na transport zboží a osob. S cílem zvýšení efektivity dopravních prostředků se musí zvyšovat i jakost jednotlivých dílů. Zlepšováním kvality dochází ke zdokonalování nástrojů pro zpracování polymerů. [58]

Mezi nejpoužívanější zpracovatelské metody se řadí vstřikování polymerů. Touto technologií lze vyrábět tvarově komplikované díly i s vysokými estetickými nároky. [10] Polymery se vstřikují do speciálně uzpůsobeného nástroje a tím je vstřikovací forma. Pro každý vstřikovaný výrobek existuje unikátní forma. [11] Komplikovanost jednotlivých forem je hlavním důsledkem jejich neustálého vylepšování. Nová inovativní řešení navyšují limity této technologie. Kromě inovací forem se vylepšují i technologické postupy výroby jednotlivých komponent. Příkladem mohou být pokusy o výrobu tvarových součástí aditivními nebo nekonvenčními technologiemi. Tím se takřka smazala pomyslná hranice limitující tvarovou složitost součástí na výrobu. Nejvíce ovlivněným systémem je temperace formy. Jednotlivé otvory se již nemusí navrhovat s ohledem na konvenční technologie. [20]

I. TEORETICKÁ ČÁST

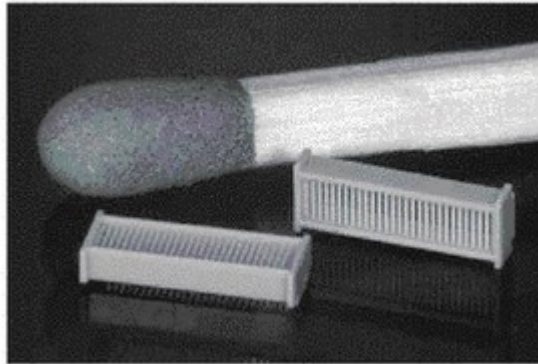
1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování je nezastupitelnou technikou pro zpracování polymerních materiálů. Výrobní postup se dá upotřebit kromě termoplastů i na reaktoplasty a elastomery. Univerzálnost vstřikování zapříčinilo jeho zastoupení mezi technologiemi pro zpracování polymerních materiálů, které činí v globálním měřítku více než třetinu.[10] Se vstřikovanými výrobky se člověk setkává na každém rohu.[11] Podstatou je vstřikování polymeru v plastickém stavu do vstřikovací formy. V závislosti na použitém polymeru dojde ve formě k jeho ochlazení nebo zahřátí, a tím se zafixuje tvar. Metodika vstřikování je popsána vstřikovacím cyklem.[10]

Podle celkových rozměrů a předepsaných tolerancí se vstřikováním vyrábí i specifické typy komponent. Jedná se o rozměrově přesné díly, tenkostěnné výrobky a mikro součástky. [10]

- Přesné díly – se liší oproti dílům vyrobených konvenčním vstřikováním větší rozměrovou přesností. Také i samotný proces vstřikování je stabilnější. Stálost procesu je díky širší kontrole nad jednotlivými nastavitelnými parametry. Oproti výrobě přesných dílů nenabízí konvenční vstřikování takový dozor.[14]
- Tenkostěnné díly – jsou komplikované na výrobu. Aby se jednalo o tenkostěnný výrobek, tak jeho rozměry musí splňovat určitá kritéria. Jedná se o maximální tloušťku stěny, plochu a tokovou dráhu polymeru. Díky těmto rozměrům trpí materiál na teplotní degradaci. Nárůst teploty je způsoben smykovým napětím, kterého tavenina dosahuje při zaplňování formy s maximální tloušťkou dutiny do 1 mm. Kromě vysoké teploty ovlivňuje jakost i zmíněná toková dráha. Poměr L/D má být minimálně roven 100. V kombinaci tohoto poměru a maximální tloušťky stěny nemusí být dutina formy dostatečně zaplněna. Stejně jako je komplikovaná výroba, tak i simulace jsou ve vývojovém období problematické. Výpočetní software vyhodnocuje zkrácené výsledky díky nastaveným materiálovým parametrům. S tenkostěnnými výstřiky se lze setkat o elektrotechnické průmyslu.[10]
- Mikro součástky – kromě klasické výroby součástí v makroskopickém měřítku se vstřikování vyrábí i mikroskopické díly. Díky malým rozměrům vstřikované součásti se snižuje spotřeba materiálu. Stejně jako u ostatních plastových výrobků, tak i tyto díly mají jednorázové použití. Výzkumné práce na vstřikování mikro součástek započaly v roce 1985 a již mezi lety 1995 a 2000 byly vyvinuty první vstřikovací jednotky. Před uvedením prvních vstřikovacích strojů určených pro tento typ výroby,

se vstříkovalo na strojích, kterým se upravila uzavírací síla na maximální velikost 50 tun. Minimální hmotnost vystříknutého dílu se pohybuje na hranici několika miligramů. I mikroskopické součástky jsou vyvíjeny na základě neustále se zmenšujících ostatních produktů.[12] I přes malé rozměry je technologie uzpůsobena pro více komponentní vstříkování.[13]



Obrázek 1 Mikroskopický výstřík [15]

Díky velkému množství parametrů, které lze nastavit při procesu vstříkování nemusí dojít k vytvoření dostatečně kvalitního dílu. Jistou výhodou poskytují obecné znalosti a zkušenosti této technologie. Kromě parametrů nastavených na vstříkovacím stroji je jakost výrobku ovlivněna i materiálovými parametry.[10]

1.1 Cyklus vstříkování

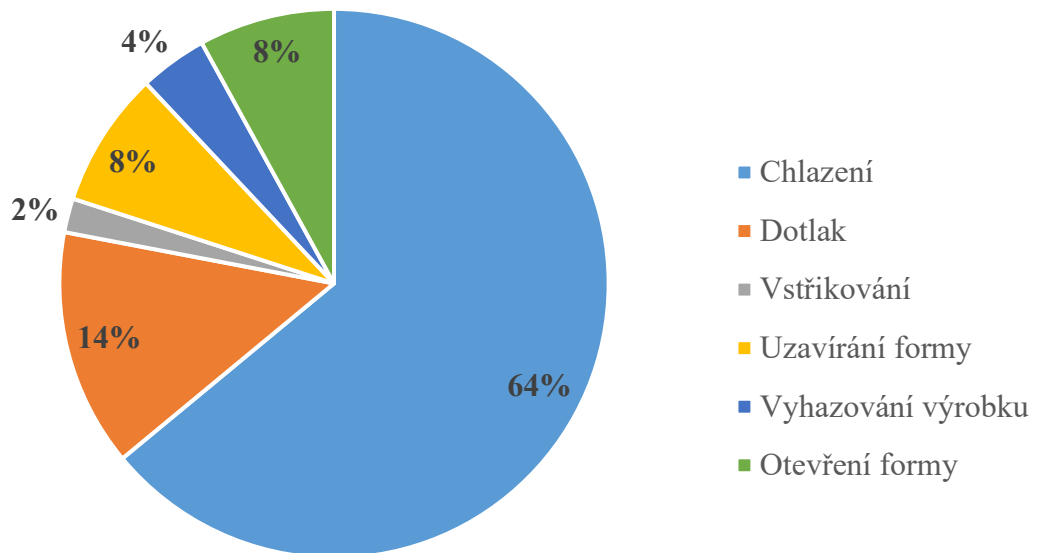
Metodika vstříkování se popisuje vstříkovacím cyklem. Jedná se o postupný sled operací od přeměny zpracovávaného materiálu na taveninu až po vyhození finálního výstříku z formy. Tento cyklus lze rozdělit do několika fází. Každá z těchto fází je rozdílně časově náročná.[19]

- **Plastikace** – Zajišťuje fázovou přeměnu. Podrobnější průběh tohoto procesu je popsán v bodě 1.2.1 „*průběh plastikace*“
- **Vstříkování a dotlak** – Vstříkování je první fází vyplňování dutiny formy. Dopředný pohyb šneku v plastikační jednotce začne generovat tlak a tím se překoná tokový odpor a materiál začne vyplňovat dutinu formy. Množství materiálu vstříknutého do formy tvoří přibližně 95 % objemu výstříku.

Dotlak následuje bezprostředně po vstříkování, jedná se druhou fází, kdy se vyplňuje dutina formy. Materiál zaplní zbylý objem dutiny. Do vstříkovacího cyklu je zařazen pro snížení vlivu objemového smrštění. V momentu zamrznutí toku přestává šnek

generovat konstantní tlak a fáze končí. Jedná se o fázi cyklu, kterou v některých případech lze vynechat.

- Chlazení a vyhození výstřiku – Zujímá nejdelší část vstřikovacího cyklu, materiál ve formě tuhne a začíná být tvarově stálý. Po dostatečné fixaci tvaru je forma otevřena a výrobek je z formy vyjmut s asistencí vyhazovacího systému formy.[26]

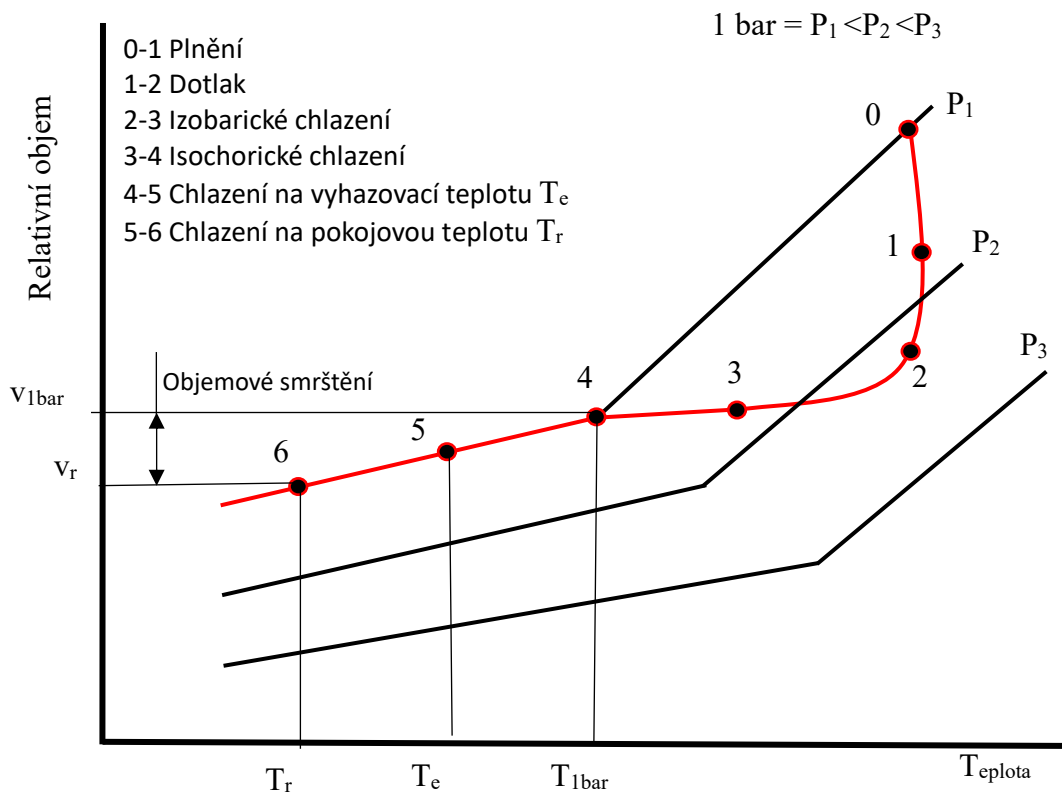


Obrázek 2 Časové rozložení operací vstřikovacího cyklu [19]

1.1.1 pvT diagram

Tento diagram udává závislost mezi tlakem, teplotou a měrným objemem polymeru. Je v něm zaznačen celý cyklus vstřikování, a proto je nápomocen při optimalizaci procesu. Ze zaznamenaných hodnot může být předpovězen stav taveniny ve vstřikovací formě. Díky změnám v objemu polymeru v průběhu vstřikování lze tímto předejít nedostatečnému nebo přespříliš přeplňovanému výstřiku. Pro každý vstřikovaný polymer je tento diagram odlišný.[33]

Při čtení v pvT diagramu je třeba dbát na to, že měrný objem je převrácenou hodnotou. Zvětšující se hodnota tohoto čísla neznamená větší hmotnost vstřikované polymerní hmoty. Z diagramu je patrné, že při zvyšování tlaku se více stlačuje tavenina, a zároveň klesá její objem. Kromě objemu nastává i změna teploty fázové přeměny. Větší působící tlak posunuje tyto hranice až o desítky stupňů do vyšších hodnot.[36]



Obrázek 3 p-vT diagram [34]

1.2 Vstřikovací stroje

Vstřikovací stroj je zařízení složené z několika jednotek. Na trhu se vyskytují stroje s jejich různou konfigurací. Kromě odlišnosti v orientaci se tyto stroje liší i typem plastikační jednotky. V současnosti je nejpoužívanější horizontální uspořádání se šnekovou plastikační jednotkou. Hlavními funkčními částmi plastikační jednotky jsou násypka, šnek a temperovaný pracovní válec. Jednotlivé vstřikovací stroje se liší parametry jako je maximální objem materiálové dávky, uzavírací síla a velikost prostoru k upnutí vstřikovací formy. Několik rozdílů je popsáných v následujících bodech.[15]

- Uzavírací síla – jedná se o parametr značící maximální velikost síly, kterou je schopen stroj vytvořit v průběhu vstřikovacího cyklu. Uzavírací síla neguje vliv vstřikovacího tlaku. Tento tlak v případě nedostatečné velikosti síly způsobuje pootevření vstřikovací formy. V technickém listě se uzavírací síla udávána v tunách.
- Maximální zpracovatelná dávka – udává množství polymeru, které lze převést do taveniny. Zpracovatelnost lze podpořit rychlostí šneku a zvýšením teploty válce.

V případě nevhodně nastavených otáček šneku nebo teplotě, nemusí dojít k roztavení granulátu a ten opouští plastikační jednotku v tryskajícím proudu zrn. Tato hodnota se zapisuje v kilogramech za hodinu.

- Poměr délky a průměru šneku – je důležitým poměrem pro fázový proces přeměny polymeru. Při zvětšující se hodnotě tohoto poměru se zlepšuje homogenita taveniny. Vůle mezi šnekem a pracovním válcem se snižuje, a proto nedochází k úniku granulátu touto mezerou směrem k výstupnímu pásnu. Granulát, který unikne nemusí plně přejít do taveniny.
- Maximální objem výstřiku – je veličina vztažená ke standardnímu polystyrenu. Díky nevhodné hustotě polystyrenu (GPPS) se od tohoto přirovnávání upouští. Místo určování objemu pomocí standardního polystyrenu se začíná převod vztahovat na dutinu pracovního válce. Takto se předchází nejasnostem mezi finální hmotností výstřiku. Tato veličina určuje maximální hmotnost výrobku, kterou může přístroj na jeden výstřik udělat.[21]

Koncept obsahující pístovou plastikační jednotku byl používán v počátečních fázích vývoje vstřikovacích strojů, poté pozvolna došlo k jeho nahrazení za plastikační jednotky šnekové. Při vstřikování je šneku umožněn dopředný i zpětný pohyb, takže dokáže plnit i funkci pístu. Používané šneky jsou rozděleny na tři pracovní pásma, ale také se lze setkat se šneky o dvou pracovních pásmech. Takto modifikovaný šnek je použit společně s odvětrávacím ventilem pro únik chemický výparů nebo vlhkosti z taveniny polymeru. V plastikační jednotce je šnek umístěn v pracovním válci. Vzniklá polymerní tavenina se akumuluje za zpětným ventilem, který je umístěn na konci šneku. I přes snahu o zabránění zpětnému toku taveniny do pracovního válce, tak při vstřikování dojde k malému zpětnému průniku do tavícího válce. Toto množství odpovídá přibližně až 5 % nahromaděného objemu taveniny.[22]



Obrázek 4 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 520 H [53]

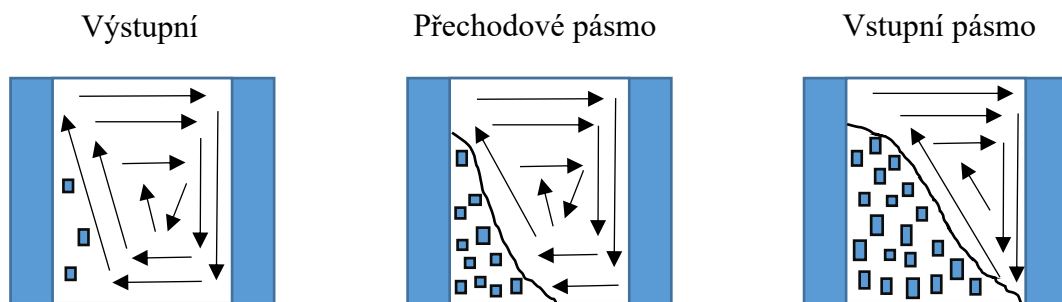
1.2.1 Průběh plastikace

Celý proces přeměny polymeru na taveninu začíná plněním násypky stroje. V závislosti na úhlu, který svírá dno násypky může docházet k nerovnoměrně rozloženému dávkování polymeru do pracovního válce. To je způsobeno trychtýřovým tokem. V moment, kdy materiál opouští násypku se dostává do první části pracovního válce. První pracovní sekcí ve válci je vstupní pásmo. V místě vstupu polymerního materiálu do pracovní komory se provádí temperace. Tím se předchází předčasnému tavení materiálu, zároveň se tak zabraňuje i kondenzaci vodních par v tomto místě. Hlavními částmi plastikační jednotky je pracovní válec a šnek.

Přeměna polymeru na taveninu je způsobena zvýšenou teplotou. K ohřevu se používají topná tělesa a ta jsou rozmístěna po celé délce pracovního válce. K zajištění dostatečného přestupu tepla jsou tato tělesa upnuta na pracovním válci s nulovou vůlí. Kromě zvýšené efektivity přívodu tepla se zvyšuje touto montáží i životnost těles. Aby nedocházelo k přehřívání válce, tak se mezi tělesy vytvoří mezery. Dalším jevem, který podporuje tavení polymeru je tření. Vzniklé tření má až 80 % vliv na průběh tavení. Zbylé procenta zastupuje

přestup tepla od vyhřátého válce. Ke tření dochází přitlačováním polymerní směsi ke stěně válce zvětšováním průměru šneku. Proces tavení probíhá v přechodovém pásmu.

Poslední pracovní sekci šneku je výstupní pásmo. Vůle mezi šnekem a válcem je v této části nejmenší. Na konci je šnek vybaven o zpětný ventil. Jak již bylo uvedeno, tak za ním se nachází tavenina v homogenním stavu.[17]



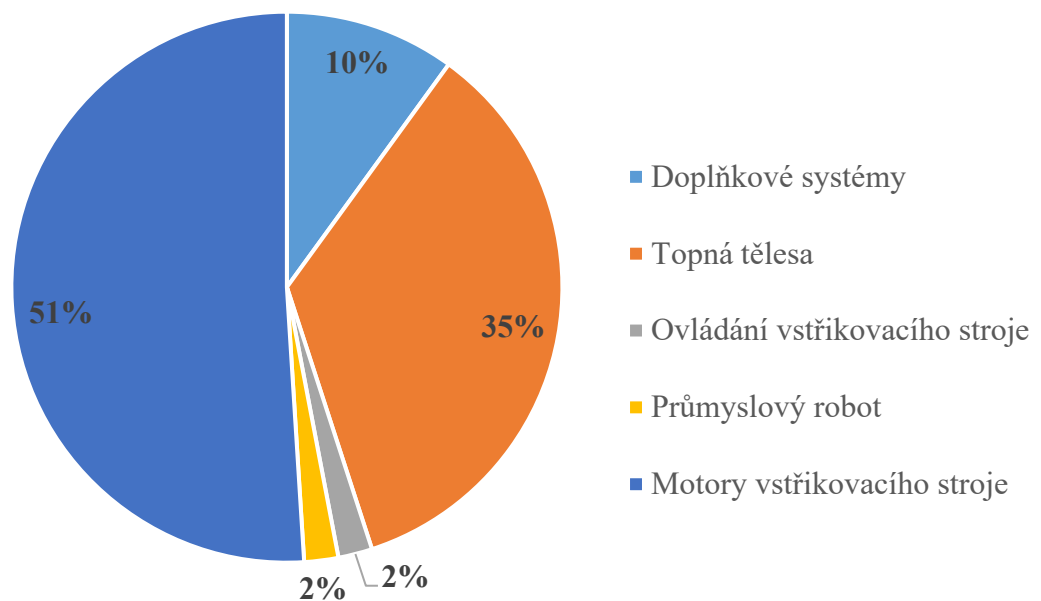
Obrázek 5 Tavení polymerní směsi ve šnekové plastikační jednotce [17]

1.2.2 Rozložení spotřeby energie vstříkovacím strojem

Díky neustále se navyšujícím cenám energií dochází v průmyslovém odvětví zpracování polymerních materiálů k výrazným změnám. V časovém horizontu třiceti let došlo ke značnému snížení energetické náročnosti vstříkovacích strojů. Toto snižování bylo podpořeno v období po roce 2003, kdy docházelo k pokrokům ve vývoji aditivních technologií a výpočetních softwarů.

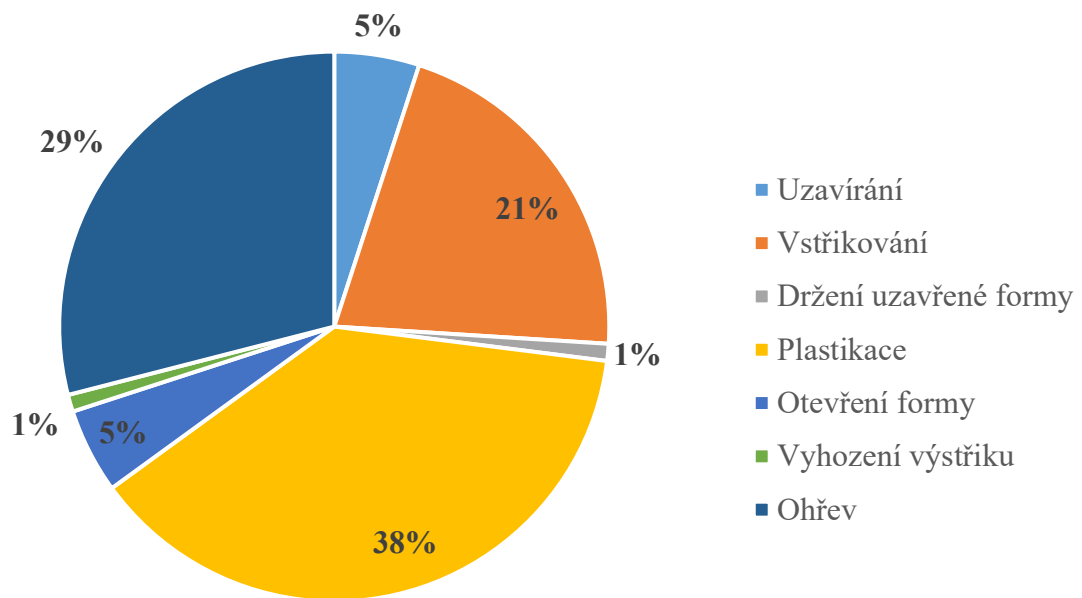
I přes značný pokrok v odvětví zpracování plastů vstříkovacími stroji připadá přibližně 90-95 % energie pro chod samotného stroje. Zbylé množství připadá na zpracovávaný materiál. Případná záměna polymeru energetickou bilancí stroje příliš nezmění.

Ve vstříkovacím stroji vykazuje největší spotřebu energie jeho motor. Kromě pohonu je další energeticky náročnou částí proces temperace. V závislosti na vybavenosti vstříkovacího stroje jsou jednotlivé poměry mírně odlišné. Tyto hodnoty zkresluje opomenutí přičtení externě zapojených systémů.[18]



Obrázek 6 Energetická bilance vstřikovacího stroje [18]

Také se lze zaměřit na energetickou bilanci samotného vstřikovacího cyklu, jedná se o poměrně složitě měřitelný proces. Kromě současně prováděných operací cyklu je pohled na energetickou spotřebu ovlivněn výkonnostními výkyvy jednotlivých operací. Hlavně se jedná o problematiku dlouhodobě měřeného systému. Se zvyšující dobou pozorování výkonnostní špičky mnohdy značí přesný opak mezi celkovou spotřebou energie pro danou operaci a maximální naměřenou spotřebou. I když jsou některé fáze cyklu prováděny současně, tak největší spotřeba připadá na převod polymerní směsi na plastickou taveninu.[18]

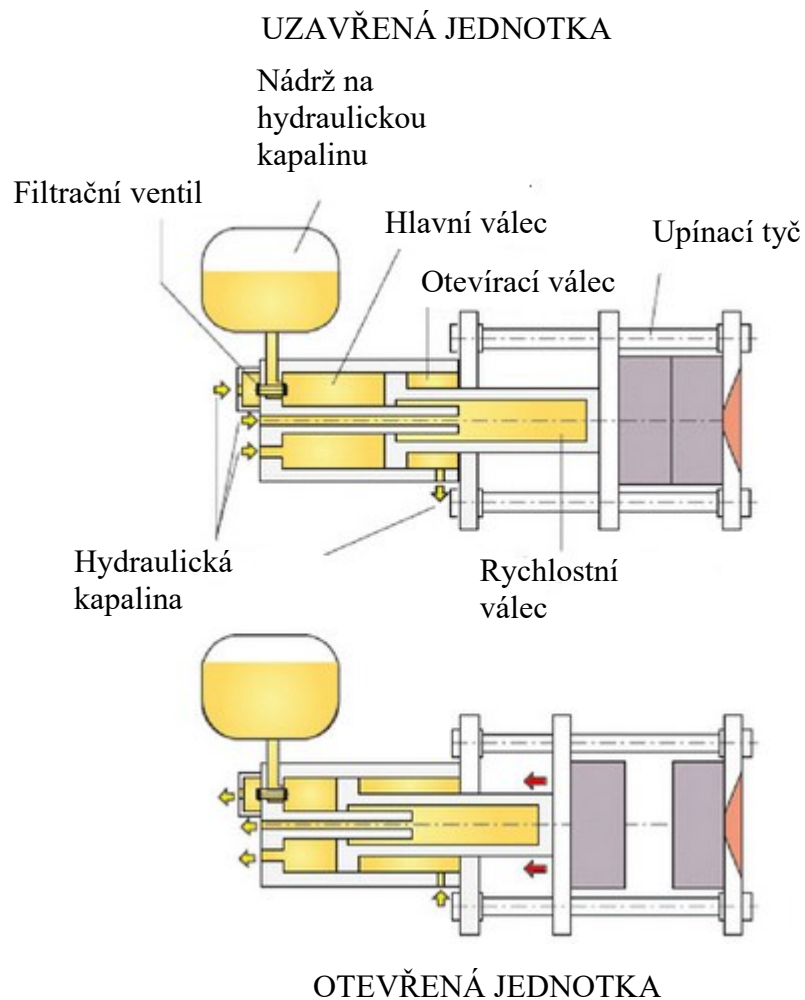


Obrázek 7 Rozložení spotřeby energie vstřikovacího cyklu [18]

1.2.3 Uzavírací jednotky

Tyto jednotky manipulují se vstřikovací formou, konkrétně se jedná o otevírání a zavírání formy. Pohyb formy je zajištěn jedním ze dvou pohyblivých mechanismů. První je čistě pístový systém a druhý typ využívá kloubový mechanismus. Účelem uvedených systémů je udržet formu uzavřenou při jejím plnění taveninou. Jednotkou vygenerovaná síla tak působí proti vzniklému tlaku, který má tendenci formu otevírat.

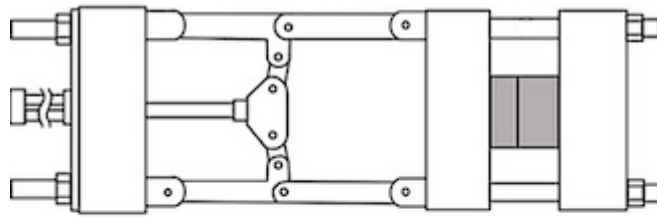
Uzavírací jednotky jsou poháněny dvěma typy zdrojů. Pístový systém je ovládán čistě hydraulicky. V případě kloubového systému dochází v závislosti na typu pohonu i ke kombinacím s pístovým členem. Hybnost kromě hydrauliky u kloubového mechanismu se zajišťuje i elektrickým pohonem.[37]



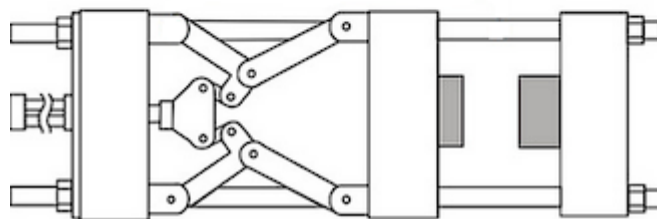
Obrázek 8 Hydraulická uzavírací jednotka [39]

Každý z těchto typů mechanismů má své výhody a nevýhody. Prvním rozdílem mezi hydraulickým a kloubovým uzavíracím systémem je v působení síly. To je způsobeno rozdílnými pozicemi upínacích míst s upínací deskou pro formu. U hydraulických jednotek působí síla primárně ve středu upínací desky, kdežto kloubový mechanismus ji rozkládá do okrajů upínacího členu.[17] Hydraulické jednotky na úkor vysokých provozních nákladů a nižší rychlosti se dokáží pohybovat po delší trajektorii bez výrazného tření a jsou skoro bezúdržbové. U kloubových uzavíracích jednotek je přesný opak ve vzdálenosti, do které mohou otevřít formu. Tato dráha je relativně krátká a pohyb mechanismu je poměrně nepřesný. Zato dosahuje větších rychlostí. Pro dobrou funkci kloubního mechanismu vyžaduje tento systém časté údržby.[33]

UZAVŘENÁ JEDNOTKA



OTEVŘENÁ JEDNOTKA



Obrázek 9 Kloubová uzavírací jednotka [39]

Na funkci uzavírací jednotky má vliv i rozměr vstřikovací formy. U velkých forem nemusí dojít k jejich plnému otevření. Případně se samotná forma může porouchat společně i s ostatními perifériemi. Poškození formy hrozí i při upínání příliš malých forem do velkých jednotek.[17]

1.3 Polymery

Současný trend výroby polymerních materiálů je založen na ropném průmyslu. S pokrokem v oblasti zpracování plastů docházelo k jejich širšímu zapojení při výrobě nových dílů. K zajištění poptávky po odolnějších materiálech bylo vyvinuto mnoho typů polymerů s rozdílnými mechanickými a chemickými vlastnostmi. V počátcích výroby se jednalo o polymerační reakce různých substancí primárně tvořených vodíkem a uhlíkem. Mnoho vlastností těchto panenských materiálů se dá podpořit adekvátními přísadami. Zakomponování jednotlivých přísad zajišťuje technologický proces kompondace. Kromě přísad upravující mechanické vlastnosti jako jsou plniva (vláknová, prášková), tak polymery obsahují i barviva.[41]

V závislosti na jednotlivých vlastnostech se vyráběné polymery rozdělují do čtyř aplikačních skupin. V oblasti automotive jsou nejpoužívanější polymery spadající do skupiny komoditních a technických polymerů. Tyto skupiny polymerů jsou mechanicky více odolné. Oproti komoditním polymerům je cena technický polymerů skokově rozdílná. [40]

1.3.1 Charakteristika polymerů pro vstřikování

Typické polymery pro technologii vstřikování spadají do skupiny termoplastů. Výhodou této skupiny je teoreticky nekonečně opakovatelná plastikovatelnost. Teoretická pro to, neboť každý další tepelný proces zhoršuje jejich vlastnosti. Ochlazením termoplasty tuhnou a při tomto procesu může vznikat krystalická struktura. V případě, že nedojde ke tvorbě krystalické struktury, tak se jedná o amorfní polymery. Míru krystalizace ovlivňuje stereoizometrie. Největší míru krystalické složky obsahují izotakticky uspořádané prvky řetězce.

Pro dodatečné úpravy polymerů je dobré znát jejich potencionální energii, která určuje reakční schopnosti polymeru. Vztahuje se k elektronům nacházejících se ve valenční vrstvě atomu. [40]

1.3.2 Tuhnutí amorfního a semikrystalického polymeru

U amorfních polymerů se jejich stav skokově mění při překročení teploty skelného přechodu T_g . Tuto fázovou hranici lze posunout rychlostí ochlazování, a proto lze říct, že se jedná o dynamický jev. S přibližující se teplotou skelného přechodu rychleji ustává pohyb molekul a zvětšuje se množství zamrznání vnitřního pnutí. Zároveň nepodléhají tolik smrštění. [35]

U semikrystalických polymerů dochází při tuhnutí ke vzniku trojrozměrných krystalických struktur. V závislosti na době tuhnutí se mění množství krystalických center. Při pomalejším ochlazováním roste množství krystalické složky.[35] Růst krystalů podléhá difúzi řetězců z polymerní taveniny. Kromě toho, že lépe difundují lineární řetězce, tak míra procesu difuze se snižuje s rostoucí viskozitou polymeru.[40] Semikrystalické polymery mají kromě teploty skelného přechodu T_g i teplotu měknutí T_m . Takže již nedochází k rychlému fázovému přechodu. Proto se změna poměrného objemu děje ve dvou rychlostních stupních.[35]

1.4 Fyzikální vlastnosti polymerů

Fyzikálními vlastnostmi polymerů se zabývá mezioborový předmět zvaný reologie. Pomocí této disciplíny lze nahlédnout do samotné struktury polymerů, jelikož se od ní odvíjí reologické údaje. Reologií se popisují tokové vlastnosti a deformace kapalin. Charakteristickou zkoumanou veličinou je viskozita.[32]

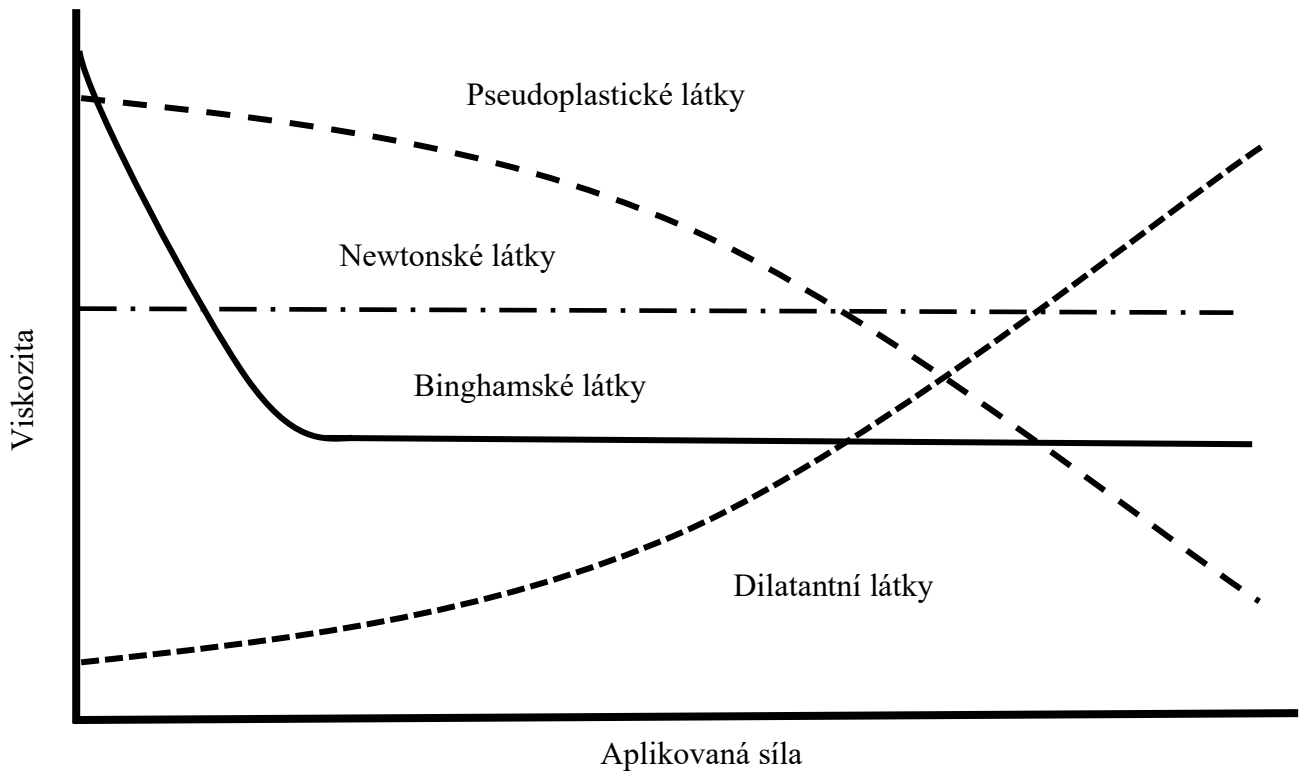
1.4.1 Viskozita

S tímto termínem se lze setkat již od dob Isaaca Newtona. Kromě pojmu viskozita tento slavný fyzik navrhl i termín vnitřní tření. Newton se zasloužil o první formulaci popisující odpor tečení vzniklý v důsledku tohoto tření. Po jeho smrti se fenoménem toku látek zabýval fyzik Claude-Louis Navier a následně i George Gabriel Stokes. Výsledkem jejich výzkumu bylo definování newtonské kapaliny. Matematický zápis definující newtonskou kapalinu v prostoru je uveden v rovnici (1.1).[29]

$$\tau_{ij} = 2\eta D_{ij} \quad (1.1)$$

Každá látka schopná tečení má odlišnou velikost viskozity. Hodnota tohoto parametru může dosahovat i více jak 10 číslicových míst. Jelikož v reálném světě existují i jiné typy kapalin, tak početní vztah (1.1) neplatí vždy. Látky, které nejdou touto matematickou formulací popsat se nazývají kapalinami nenewtonskými. Do tohoto typu kapalin spadají i polymery o kterých se hovoří jako o viskoelastických látkách. Vazkost těchto látek je udávána jako závislost smykového napětí a rychlosti smykové deformace. Kromě smykových účinků lze viskozitu vyjádřit i elongačními účinky. Viskozita je regulovatelná teplotou i tlakem.[29] Demonstraci chování nenewtonské látky lze simulovat sériově nebo paralelně zapojeným pístem s pružinou. Matematický vztah pro sériové zapojení pístu a pružiny je uveden v rovnici (1.2).[31]

$$\tau_{ij} + \lambda \dot{\tau}_{ij} = 2\eta D_{ij} \quad (1.2)$$

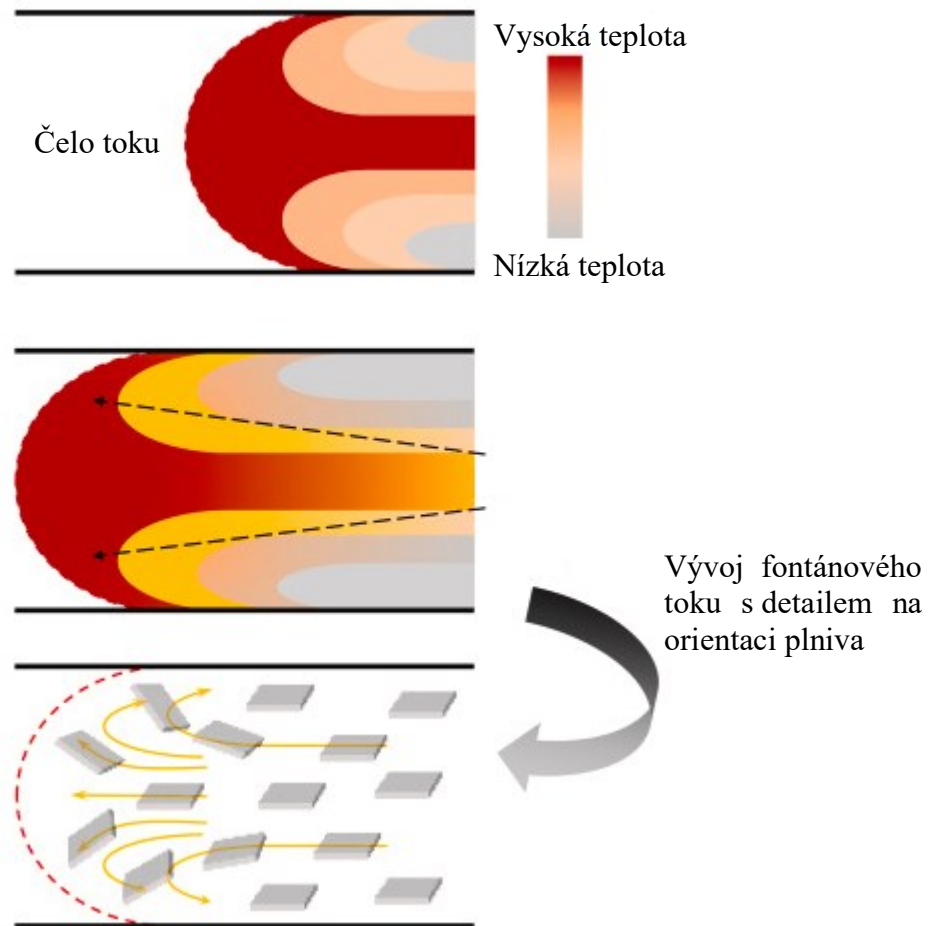


Obrázek 10 Závislost viskozity na aplikované síle [30]

1.4.2 Tok polymeru

Tokové vlastnosti polymerů popisuje reologie. Tato vlastnost je ovlivněna součinností zvýšené teploty a tlaku. Při vstřikování dochází k překonání hranice tokové odporu a díky tomu je umožněno vyplňování dutiny formy. Hlavní roli hraje zvýšená hodnota tlaku. Ten kromě podpory tečení ovlivňuje i způsob, kterým tavenina teče. Nejvíce vhodný je fontánový tok.

Tok polymeru ovlivňuje orientaci makromolekul a plniva. Při fontánovém toku dochází ke smyku. Smykové proudění společně s tlakovým rozdílem určují, do kterých míst se dostane tavenina první. Nejdříve dochází ke kontaktu plastické taveniny se stěnou formy a poté zbytek čela proudu postupuje dále do formy. Prováděná teplota udržuje vstřikovací formu na značně nižších teplotách, než je teplota taveniny v případě vstřikování termoplastů. Díky tomu při kontaktu se stěnou je tavenina prudce ochlazená a v okamžiku zatuhnutá, ale to se neprojevuje uprostřed toku. Začíná zde působit teplotní gradient vlivem špatné teplotní vodivosti polymerů a tavenině je umožněno nadále proudit již zaplněnými částmi. S tímto rozdílným teplotním polem je nutno počítat při odformování výstřiku.[25]



Obrázek 11 Fontánový tok a detail na orientaci plniva [27]

1.4.3 Relaxace

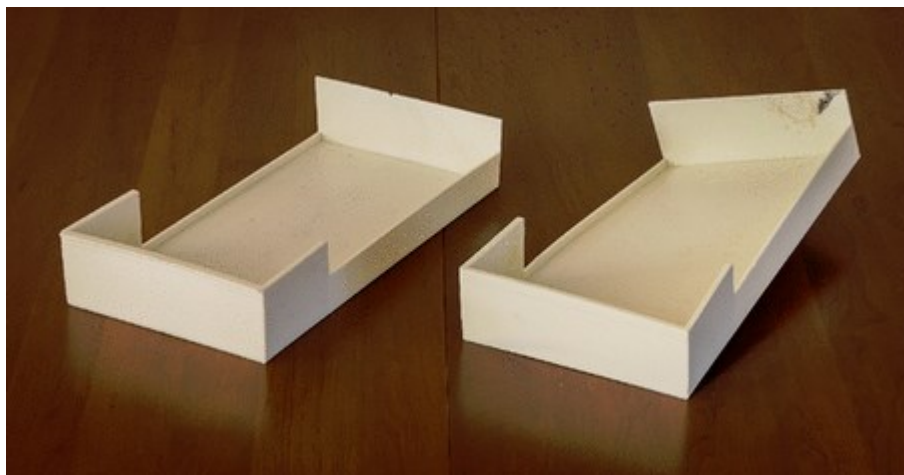
Při práci s jakýmkoliv systémem dochází k jeho fyzikálnímu vyvedení z rovnovážné polohy. Systém se tak stává nerovnovážným a jeho prvotní snahou je opět se dostat do rovnovážného stavu. Tento děj je označován jako relaxace. V oblasti zpracování polymerních materiálů slouží ke snižování vzniklých napětí nebo zmenšování vzniklé deformace. Je závislý na velikosti přebytečné energie, kterou systém získal v průběhu práce s ním. Od této energie se odvíjí i hnací síla jevu.[28]

U vstřikování díky rozdílné době tuhnutí okraje a středu tokového profilu dochází k zamrznutí vzniklých napětí v prudce ochlazených částech. To má negativní dopad na výslednou jakost výstřiku. V místě myšleného řezu nově vystříknutého dílu lze pozorovat morfologicky odlišné chování.[25]

1.4.4 Vliv orientace vláken

Polymery s vláknitým plnivem se v širokém měřítku používají v oblasti automobilového průmyslu. O polymeru plněným vlákny lze hovořit jako o kompozitu. Nejčastěji se jedná o plnivo ze skelných nebo uhlíkových vláken. Takto plněné materiály vykazují větší mechanickou odolnost a nižší hmotnost. Díky rozdílné velikost použitých vláken může výstřik obsahovat v objemu až 10 000 vláken na 1 mm³. Podle délky vláken se tyto materiály dělí na kompozity plněné krátkými vlákny nebo kompozity plněné dlouhými vlákny. O takto vytužených kompozitech platí, že každé vlákno ovlivňuje vlákno jiné. K pochopení interakcí na sebe vzájemného působení vláken se používají empirické vztahy. [24]

Nepříznivý účinek na vstříkovanou část může mít i poškození vláken v průběhu přeměny polymerní směsi na taveninu. K tomuto jevu dochází při nevhodně nastavených otáčkách na šneku a vysoké viskozitě polymeru. Kromě výše zmíněných se na přeměně vláken podílí i samotná geometrie šroubovice šneku. Zdeformovaná vlákna jsou kratší a tím negativně ovlivňují mechanické vlastnosti výstřiku. Příkladem nežádoucího jevu můžou být místa podporující vznik a šíření trhlin nebo celková deformaci dílu. S každým dalším přepracováním polymerní směsi se míra tohoto jevu zvětšuje.[23]

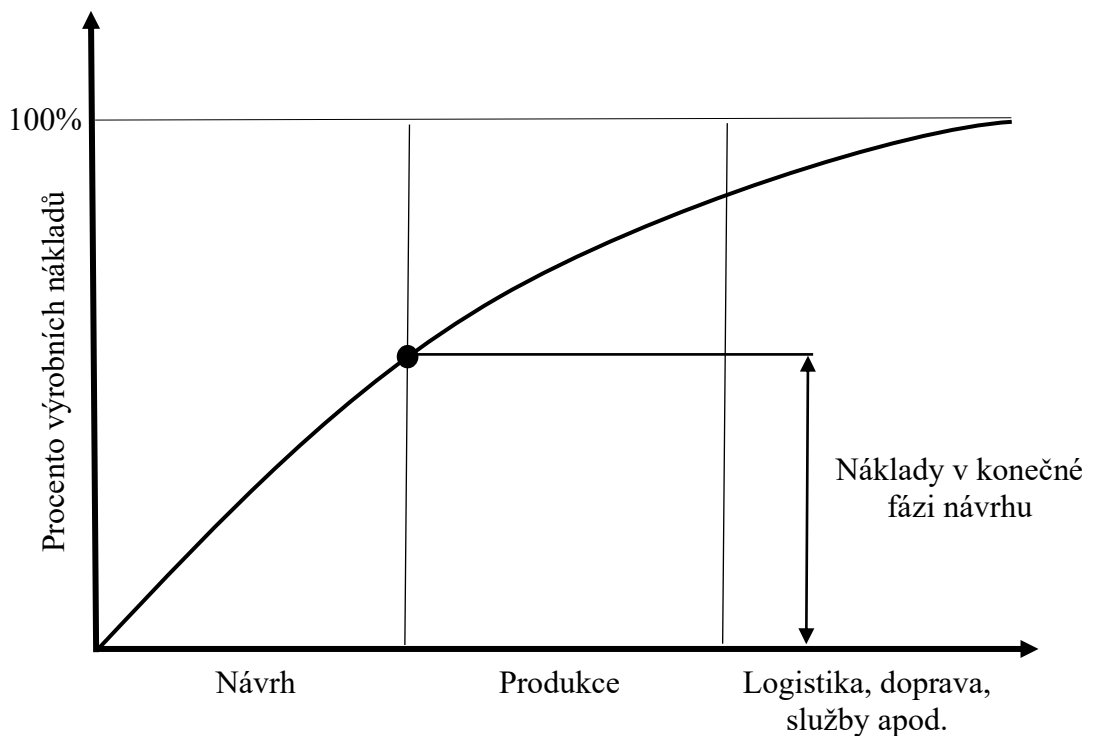


Obrázek 12 Vliv orientace vláken na deformaci výrobku [24]

2 NAVRHOVÁNÍ A MODELOVÁNÍ DÍLŮ

Navrhování a modelování nových dílů je komplexní disciplínou. Nově navržený díl musí splňovat několik požadavků. Cílem je funkční propojení návrhu součásti s materiálovými požadavky a výrobními technologiemi. K těmto účelům jsou využívány CAD a CAE systémy. Jejich aplikace je pro vyhotovení prvotních prototypů v digitálním prostředí. Díky tomu lze efektivně eliminovat většinu nedostatků již v počáteční fázi výroby. Tímto způsobem lze předejít nechtěnému chování, ke kterému by docházelo v praxi. Pomocí virtuálního prostředí lze simulovat většinu mechanických vlastností, nedostatků při vstřikování a funkčnost výrobku. Práce ve virtuálním prostředí umožňuje jednoduché propojení mnoho oborů. Účastníci, podílející se na výrobě nové součásti mohou v závislosti na požadavcích technologičnosti dílu a ekonomického oddělení nezávisle v čase provádět jednotlivé editace součásti.[2]

Virtuální model součásti obsahuje důležité informace o geometrii modelu. Jedná se o tvar součásti, jeho rozměry a hmotnost dílu.[1]



Obrázek 13 Množství nákladů v závislosti na výrobních etapách [2]

Při navrhování nových součástí se postupuje analogicky na základě předchozích zkušeností, a to může být příčinou ztráty některých informací od počátečních návrhů až po referenční údaje. Kromě CAD a CAM systémů lze využít i excelovou tabulku pro provedení jednoduchých výpočtů.[3]

2.1 Modelování dílů pomocí CAD systémů

K modelování součástí v CAD systému lze využít široký okruh jednotlivých modelovacích metod. Nevýhodou je omezenost aplikace těchto postupů. Pro vyhotovení 3D modelu nelze ve většině případů použít pouze jeden postup, a proto se jednotlivé metody vzájemně kombinují. Efektivita jejich sdružování je podpořena v závislosti na zvyšujících se zkušenostech konstruktéra. Při modelování se pracuje v 1D, 2D i 3D prostředí. K vytvoření uceleného modelu je nutné vzájemně propojovat jednotlivé elementy od tvarových křivek až po základní geometrické tvary.[1]

Při tvorbě nového CAD modelu je vhodné postupovat ve čtyřech krocích. Jednotlivé činnosti jsou popsány v následujících bodech.

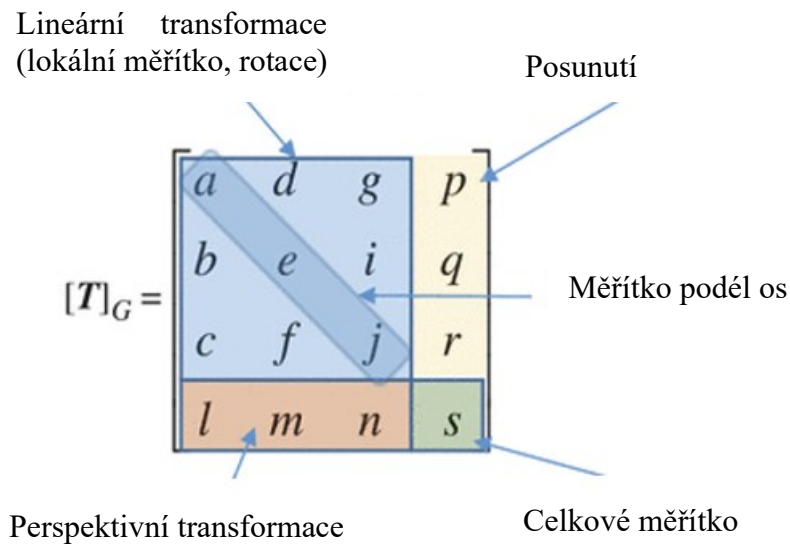
1. Tvorba prvotního modelu, který se podle potřeb bude následně editovat. Vyhotovený model silně omezen aktuálními znalostmi vývojového týmu.
2. V druhém bodě se prvotní model podrobuje jednotlivým zkouškám. Dochází zde k definování jednotlivých vazeb na základě požadavků všech zúčastněných stran.
3. Na základě výsledků provedených zkoušek se prvotní model přepracuje do finální podoby. Jednotlivé analýzy poskytují širší perspektivní pohled na model, a proto zainteresovaní pracovníci mohou provádět změny na návrhu.
4. Poslední krok je vymezen k interpretaci zeditovaného modelu výrobku s využitím barevného spektra jednotlivých předělaných částí.[3]

Využití CAD softwaru je v dnešní době velice rozšířené, ale i přes značný pokrok ve vývoji těchto systémů není zajištěno dostatečné pokrytí všech požadavků jednotlivých průmyslových odvětví.[4]

2.1.1 Transformace souřadnic, objektů a bodů

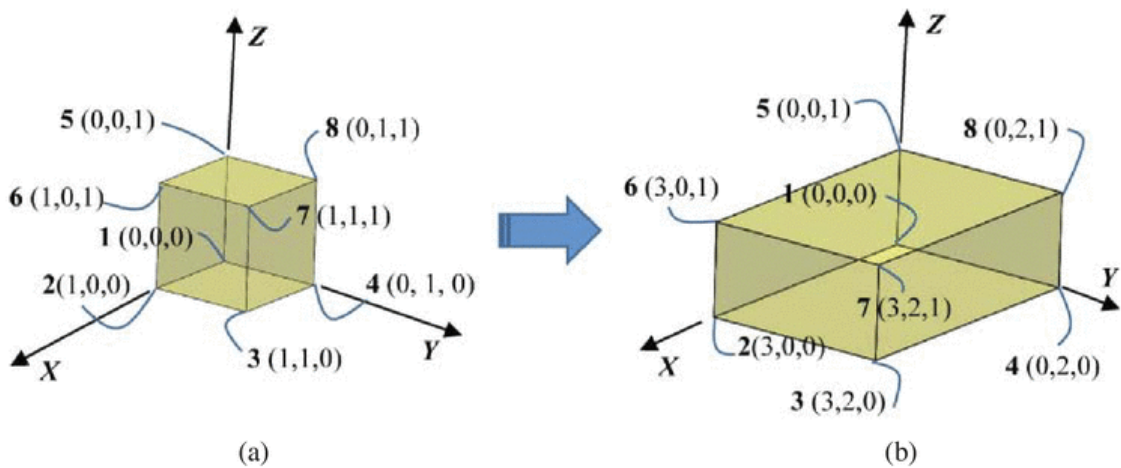
Geometrii objektu nejvíce ovlivňuje poloha a orientace jednotlivých bodů. Pozicování objektů v pracovním prostoru a jeho správné natočení je podmíněno transformací souřadnic. Transformace se provádí zvlášť pro každý bod systému. Nejčastěji měněnými údaji je

posunutí, rotace, zrcadlení a perspektivní vykreslení. Rozdíl mezi body a objekty je v obsažených parametrech. Body mají polohové souřadnice, kdežto objekty jsou definovány jak polohovými souřadnicemi, tak i prostorovými orientačními údaji.[1]



Obrázek 14 Transformační parametry v obecném maticovém zápisu [1]

Jednotlivé parametry transformační matice ovlivňují objekt odlišným způsobem. Parametry a, e, a, j rozšiřují souřadnice x, y a z kdežto hodnoty p, q a r je přesouvají. Pro uplatnění některých transformačních funkcí lze maticový zápis podle potřeb upravit. Příklad aplikace transformační matice je uveden na obrázku 15.[1]

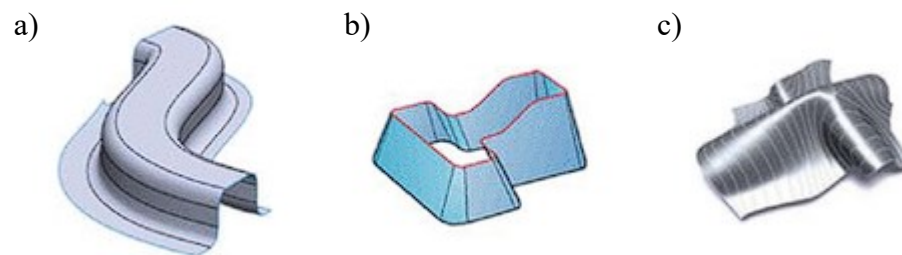


Obrázek 15 Aplikace transformační matice a) před transformací, b) po transformaci [1]

2.1.2 Křivkové elementy

U modelů součástí se lze setkat s různě zakřivenými hranami a plochami. Běžnou praxí je používání křivkových prvků jak v rovině 2D, tak i 3D pro vytvoření plochy. Zápis křivkových prvků lze provádět přímým i nepřímým způsobem s využitím normalizovaného proměnného rozměru. Metodou hledání přibližné hodnoty polynomické funkce lze měřit složitost křivky ve 3D. Podle způsobu generování křivkové plochy se povrchy rozčleňují celkem do tří samostatných skupin.

- Tažená plocha – tento typ povrchu je vytvořený s použitím dvou prvků. Jedna křivka zastupuje roli dráhy, po které se bude táhnout druhá křivka. Tato křivka je označovaná jako křivka hnací a její obrys udává výsledný tvar zakřivené plochy. Oba typy křivek mohou být uzavřené nebo otevřené.
- Plocha vytvořená s pravidly – jedná se o druhý příklad křivkového povrchu. Jeho vznik je podmíněn třemi elementy. Při generování 3D plochy je jedna křivka řídicí a zbylé dvě křivky jsou trajektoriemi.
- Plocha volně vytvořená – taktéž se lze setkat i s označením plastická plocha. Tento druh povrchu vzniká v případě, že analytické metody jsou neaplikovatelné. Jejich popis lze matematicky vyjádřit podobně jako se vyjadřují spline křivky. Jako popisující prvky slouží dvě nezávislé proměnné.[1]



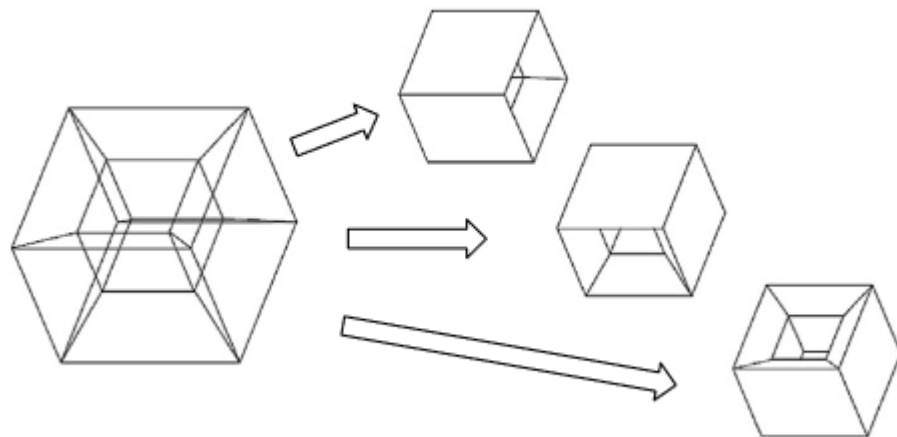
Obrázek 16 Rozdělení křivkových povrchů [1]

a) tažená plocha, b) plocha vytvořená s pravidly, c) plocha volně vytvořená

2.1.3 Základní způsoby modelování

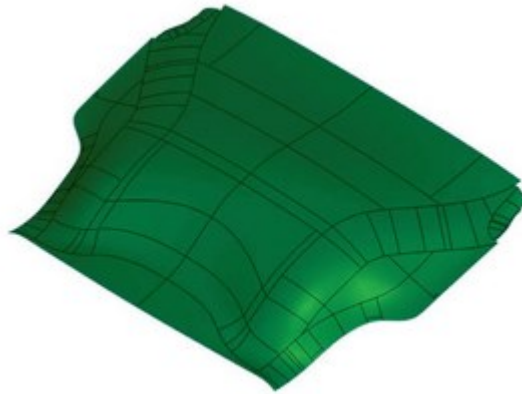
Metodika modelování těles prošla za dobu své existence značným vývojem. Od uvedení nejstaršího způsobu kreslení pomocí drátěného modelu až po současné modelování objemových těles. S pokročilejší technikou modelování těles se dostává konstruktérům větší portfolio informací, se kterými lze lépe ověřit technologičnost a funkčnost výrobku.[1]

- Drátěný model – jak již bylo uvedeno, tak se jedná o nejstarší způsob počítačového kreslení. Základy metodiky drátěného modelu byly položeny v roce 1963 v Lincolnově laboratoři MIT. K práci s drátěným modelem stačí pouze informace pozic odkud začínají jednotlivé křivky a kde končí.[9] Do hlavních nevýhod drátěného modelu se řadí nepřehlednost, ta je způsobena překrývání jednotlivých čar.[1] Dále i neurčitost v jednotlivých plochách, nelze jednoznačně rozeznat, zda se jedná o vnitřní nebo vnější strany. Kromě toho drátěný model poskytuje ze všech modelářských technik nejméně informací o vymodelovaném tělese. Neumožňuje určit objem ani zakřivení ploch. Díky jeho omezeným možnostem se v dnešní době používá jako typ grafického vykreslení tělesa v CAD programu nebo k podpoře ostatních technik modelování. [9]



Obrázek 17 Nevýhody drátěného modelu [9]

- Modelování ploch – je nádstavbou pro drátěný model. Stejně jako drátěný model, tak plochy poskytují informaci o poloze a velikost ohraničujících křivek a bodů. Plochy se dají definovat jako skořepiny. Při práci s plochami lze použít více funkcí programu. Jedná se způsoby vyplňování prostoru mezi jednotlivými křivkami, tažení plochy daným směrem z vybrané křivky a také je zpřístupněna funkce ořezávání povrchu. Pro možnosti definování ploch je toto modelování nezbytnou součástí při tvorbě tvarově složitých prvků ve spojení s objemovým modelování. Při práci s plochami je stále nutné brát na zřetel, že se nejedná o plné objemy.[9]



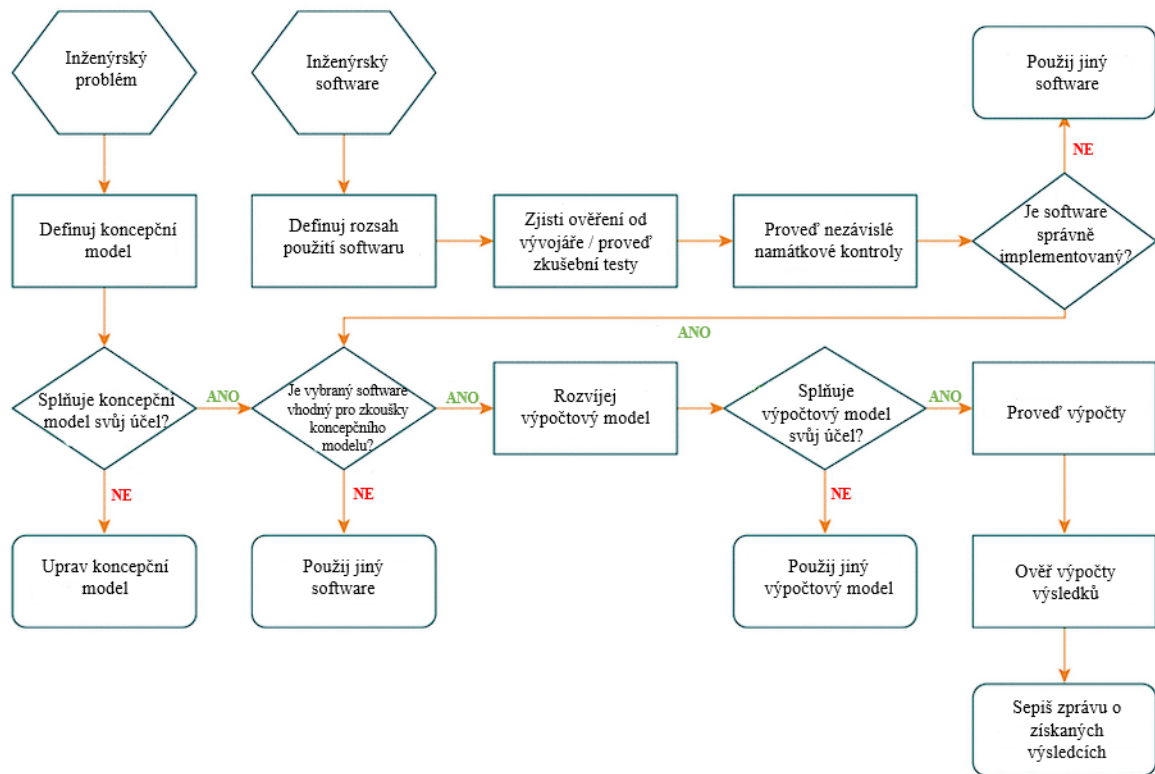
Obrázek 18 Vymodelovaná plocha [1]

- Objemové modelování – spočívá v kombinování a upravování základních geometrických těles. K těmto úpravám obsahují všechny modelářské softwary stejnou sadu nástrojů, jediný rozdíl je při zadávání a definování těchto příkazů. Mezi tyto nástroje patří funkce vytažení, kdy se zvolená skica vytáhne o určitou velikost daným směrem. Další často využívanou funkcí je rotování 2D profilu kolem vybrané osy o stanovený úhel. Kromě funkcí, kdy se vytahují, spojují nebo rotují skici, tak se používají i logické operace (boolean operation). U nich dochází ke sjednocování nebo oddělení dvou těles s průnikem objemů.[1] Objemová tělesa poskytují veškeré potřebné parametry o vytvořeném modelu pro práci se simulačními programy.[9]

2.2 Analýzy součástí

K analýzám modelů navržených dílů se využívají systémy CAE. Výsledky z těchto softwarů napomáhají k optimalizaci výroby a zhotovení konečného tvaru součásti splňující veškeré zadané požadavky. Cesta k optimálnímu výsledku je časově náročná, vyžaduje provedení mnoha simulací.[2] K analyzování součástí se používá metoda konečných prvků (FEM). Vývoj této metody je podpořený zvyšujícím se používáním 3D modelů.[5] Většina softwarů, které jsou používány ke konstrukci dílů obsahují ve svých balíčcích moduly CAD, CAE a mnoho dalších typů, takže lze pracovat v jednom prostředí.[2]

K provedení simulace je potřeba znát materiálová data, díky kterým se definují jednotlivé teploty a pevnost. Dalším důležitým údajem je pvT diagram, pomocí něho se můžou nastavit optimální hodnoty působícího vstřikovacího tlaku a vstřikovací rychlosti. V případě běžných materiálů jsou tato data součástí datových knihoven simulačních softwarů společně i s daty o jednotlivých vstřikovacích strojích [2]



Obrázek 19 Vývojový diagram provádění simulací [7]

2.2.1 Metoda konečných prvků (FEM)

Výpočetní postup je používán k řešení komplexních problémů. Podstatou je aproximace, která zjednoduší zkoumaný jev. Metoda umožňuje odvození okrajových podmínek, ale poskytuje pouze přibližné hodnoty. Již ve starověku byly základy této metody použity k řešení obvodu kruhu. Výsledek se určil aproximováním kruhu mnohoúhelníkem a přesnost výpočtu obvodu se zvětšovala s rostoucím počtem stran úhelníku. Následné použití početní metody bylo v roce 1851, kdy se hledala diferenciální rovnice stanoveného povrchu. Došlo zde k rozdělení zkoumané plochy na soustavu trojúhelníků. Nicméně označení FEM teprve stanovil profesor Clough až roku 1960. Vývoj metody konečných prvků se exponenciálně urychlil po stanovení základních matematických pravidel. K urychlení vývoje přispěl i pokrok ve výpočetní technice. Při použití FEM se řeší parciální derivace a pro praktické problémy lze stanovit až milion stupňů volnosti. Touto početní metodou lze řešit kromě mechanických charakteristik i vedení tepla a dynamika kapalin.

Při řešení tokových vlastností nelineárních / látek se vychází z reologických veličin a k výpočtu je používána Galerkinova metoda. Nicméně je nutné zajistit, aby v oblasti proudění bylo nulové reziduum.[6]

Pracovní postup při metodě konečných prvků zahrnuje tři kroky a těmi je příprava modelu, zvolení výpočetního modulu a poslední částí je zobrazení výsledků. Model je v přípravné fázi převeden na síť složenou z množství elementů a uzlových bodů. V místech jednotlivých uzlů je řešena deformace a působící napětí. Každé z těchto působících polí je složeno z šesti rovnic a ty pokrývají směry x , y a z . Výsledek jednotlivých deformací a napětí se získá vyřešením lineárních algebraických rovnic. Zároveň se pro výpočet, zavádí okrajové podmínky. [2] Podle typu zkoumaného modelu se řídí i typy elementů, které lze použít. Pro 1D modely lze použít pouze 1D elementy. S každým dalším navýšením rozměru aritmeticky roste i množství použitelných elementů.[7]

2.2.2 Uzly

Jedná se o základní prvek v FEM metodě. Uzly mají za úkol spojovat jednotlivé elementy a každý uzel lze zaznamenat v souřadnicovém systému. Na základě jejich souřadnic, které se dají zapsat do kartézského souřadnicového systému jsou prováděny jednotlivé výpočty. Uzly se ve výpočetních programech mohou vytvářet manuálně nebo u komplikovanějších případů se k tvorbě sítě používá jako podklad model z CAD softwaru.[7]

2.2.3 1D elementy

Jedná se o nejjednodušší typ elementů používaných ve FEM. Jejich charakteristickou vlastností je možnost přiřazení specifických vlastností, např. lze elementu definovat tvar jednoduchého profilu. Nejčastěji se 1D elementy vyskytují při řešení průhybu nosníků nebo deformací rámové konstrukce. Délku tohoto elementu ohraničují koncové uzly. Ve výpočetních programech jsou 1D elementy označeny termínem nosník (beam) nebo tyč (bar). Stejně jako mají rozdílný název, tak mají i odlišné vlastnosti. Použití těchto prvků je vhodné pouze pokud je cílem určení momentů a napětí na konstrukci. Podrobnější popis chování tělesa poskytuje síť tvořena 2D nebo 3D elementy.

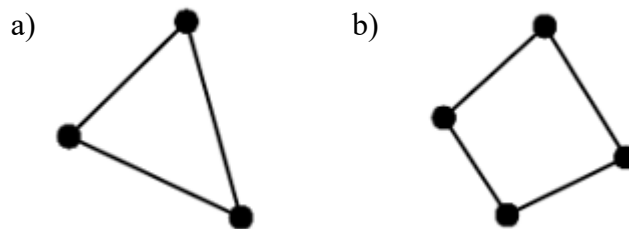
Využití nosníkového elementu je širší než tyčového elementu. Oproti tyčovému prvku jsou v jednotlivých uzlech plně provázané a v těchto bodech mají silové a momentové účinky. Rozdíl u tyčového elementu je absence momentu v uzlovém spoji, a tak je vhodnější ho kombinovat s 2D a 3D elementy. A však v důsledku jedno stupně volnosti u tyčového elementu může docházet k problémům při výpočtu.[7]



Obrázek 20 1D element – přímka

2.2.4 2D elementy

Stejně jako v předchozím případě, tak i 2D elementy mají specifické využití. Aplikovat je lze tam, kde je šířka modelu větší než tloušťka. Příkladem splňující toto kritérium jsou skořepiny. Základními 2D elementy je trojúhelník a čtyřúhelník. Jednotlivé uzly se nachází rozích těchto prvků, ale jejich počet lze navýšit přidáním uzlu do každé ze stran. Dostane se tak prvek obsahující 6 nebo 8 uzlů a vyhotovený výpočet je přesnější. Po provedení úpravy, úloha přechází z lineární na kvadratickou. I přes získání přesnější výpočtů se nejedná o techniku, která by byla vhodná pro všechny typy úloh. Výhodou 2D elementů je možnost určení počtu stupňů volnosti.[7]

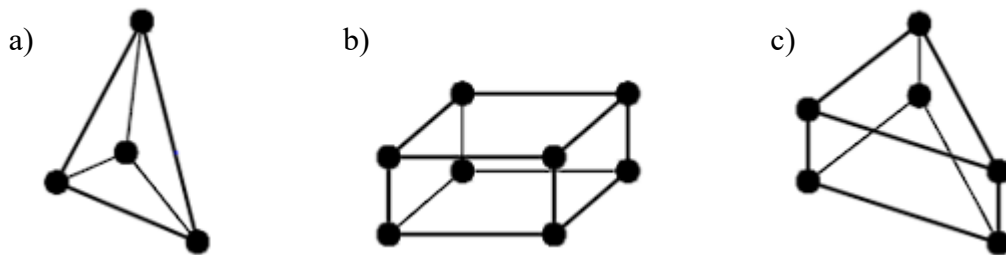


Obrázek 21 2D elementy – a) trojúhelník; b) čtyřúhelník

2.2.5 3D elementy

Tyto elementy jsou specifické tím, že veškeré vlastnosti zkoumaného tělesa vycházejí ze souřadnic jednotlivých uzlů, a proto není potřeba další definování vlastností. Rizikové je používání anizotropních materiálů z důvodu rozdílných vlastností v rozdílných směrech materiálu. Definované 3D elementy tuto orientaci sami nerozeznají a tím pádem vyhodnocené výsledky budou obsahovat chybu hrubého charakteru a budou nepoužitelné. Proto je nutné v případě anizotropních materiálů dbát na orientaci již při zadávání okrajových podmínek. Základní 3D elementy jsou trojstěn, šestistěn a klín. Kromě klasického využití 3D elementů v mechanice, proudění kapalin a dalších odvětví se lze s jeho aplikací setkat i pro modely zabývající se vlastnostmi zemské půdy. V tomto případě je použit tzv. nekonečný prvek a jeho tvar je podobný jako tvar šestistěnu.

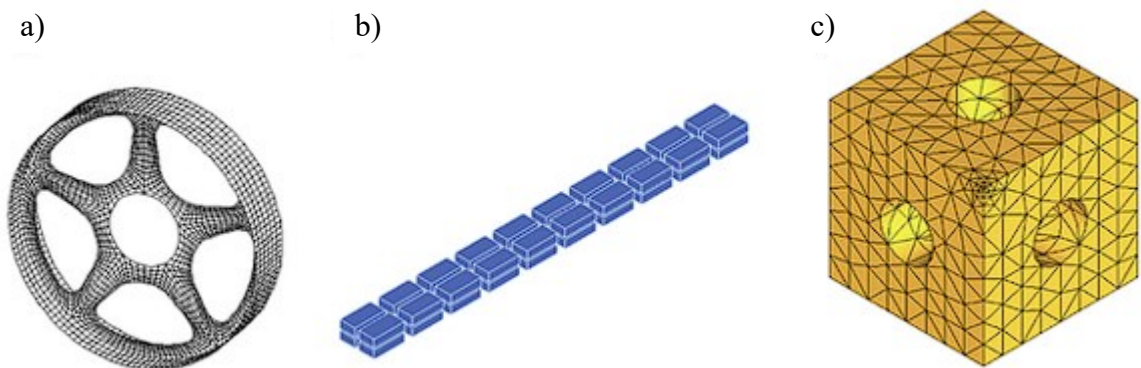
Pro úspěšnou aplikaci prostorových elementů je potřeba již znát tvar modelu, a to může být příčinou pozdějších komplikací. Další limitující vlastností je homogenita materiálu. V případě kompozitní struktury se projeví absence vlivu výztuže na finálním výsledku.[7]



Obrázek 22 3D elementy – a) trojstěn; b) šestistěn; c) klín

2.2.6 Tvorba sítí

Jednotlivé elementy, které byly popsány v předchozích bodech tvoří v metodě konečných prvků sítě. Zkoumaný model se sítí z elementů nahrazuje. Tvorba sítí jde provést celkem třemi způsoby. Nejstarším postupem bylo ruční síťování. S rozvojem výpočetní techniky přibýly další dvě metody. Jedná se o poloautomatické a automatické síťování.[8]



Obrázek 23 Síťovací metody [8]

a) ruční síťování; b) poloautomatické síťování; c) automatické síťování s lokální úpravou sítě v jednom rohu

- a) Ruční síťování – je nestarší metodou. Jedná se poměrně o pracný proces, ale za dobu své existence prošel značným vývojem. Na počátku se síť tvořila spojováním jednotlivých uzlů. Zprvu se pozice každého z uzlů ručně definovala. Následným pokrokem bylo umožnění využití jednoduché geometrie. Již se nemusely pracně

definovat jednotlivé uzly společně s jejich spojování, ale stačilo označit koncové body geometrie a hraniční linie. I přes svou nehospodárnost se s možností tohoto postupu lze setkat v některých simulačních softwarech dodnes. [8]

- b) Poloautomatické síťování – společně s následující technikou síťování se jedná o značně pokročilou metodu. Ke tvorbě sítě je potřeba nejdříve vytvořit skicu, která se nechá vysíťovat 2D elementy. Následně se takto předpřipravená geometrie vysune nebo orotuje kolem osy a tím vznikne trojrozměrný objekt. U poloautomatického síťování není umožněna tvorba složitých objektů. Díky nedostatkům v tvorbě model se stejně jako předchozí síťovací metoda již skoro nepoužívá. [8]
- c) Automatické síťování – je poslední technikou tvorby sítě. V dnešní době je o nejpoužívanější metodou. Oproti předchozím dvěma postupům umožňuje síťování komplikovaných tvarů. Jednotlivé výpočetní softwary automaticky vysíťují model podle specifických požadavků uživatele. Základním parametrem pro program je velikost elementu. Také lze měnit i typ síťovacího elementu, ale stále veškeré změny jsou omezeny dimenzí modelu. Výsledná síť je následně editovatelná za účelem zlepšení její kvality. Kromě úprav vztažených na celou síť se provádí i lokální změny. [8]

I přes veškerou snahu vytvoření nejkvalitnější sítě dochází k odchylkám. Nejčastěji se jedná o deformaci síťovacích elementů. Proto se doporučuje každou vytvořenou síť nechat programem zkontrolovat. Deformované elementy mohou být příčinou chybných výsledků, dokonce nemusí umožnit provedení výpočtu. Oprava detekovaných kritických míst se provádí ručně a často se jedná o velmi časově náročnou operaci. Nejjednodušším způsobem provedení opravy je v místě deformovaného elementu posunutí uzlů. [8]

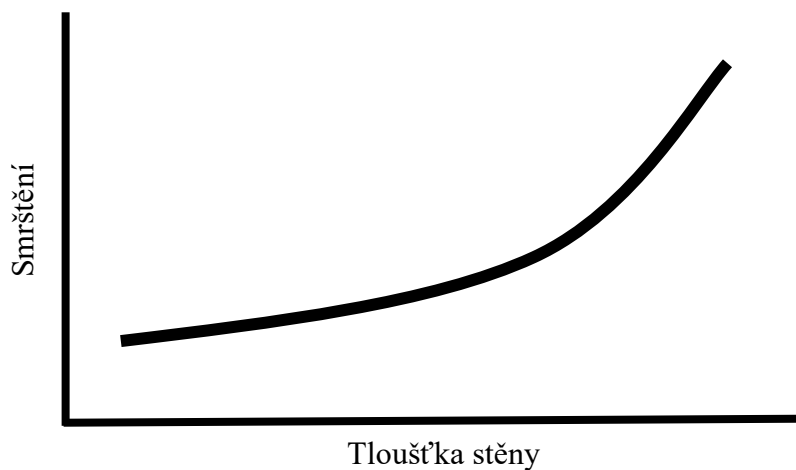
2.3 Konstrukční zásady dílů pro vstřikování

Geometrie dílů se přímo reflektuje do jeho technologičnosti. Nedostatečně optimalizované návrhy vedou k úpadku mechanických, optických i výrobních vlastností. Tato problematika začíná již ve fázi výrobní a ostatní problémy vystupují na povrch s přibývajícím časem.

Proto platí pro navrhování dílů doporučené hodnoty, kterými se má geometrie řídit. Veškerá doporučení se na vstřikovaných výrobcích vztahují k tloušťkám stěn, rádiusům a velikosti úkosů. Dodržením doporučených postupů se předchází pozdějším deformacím výstřiků. [42]

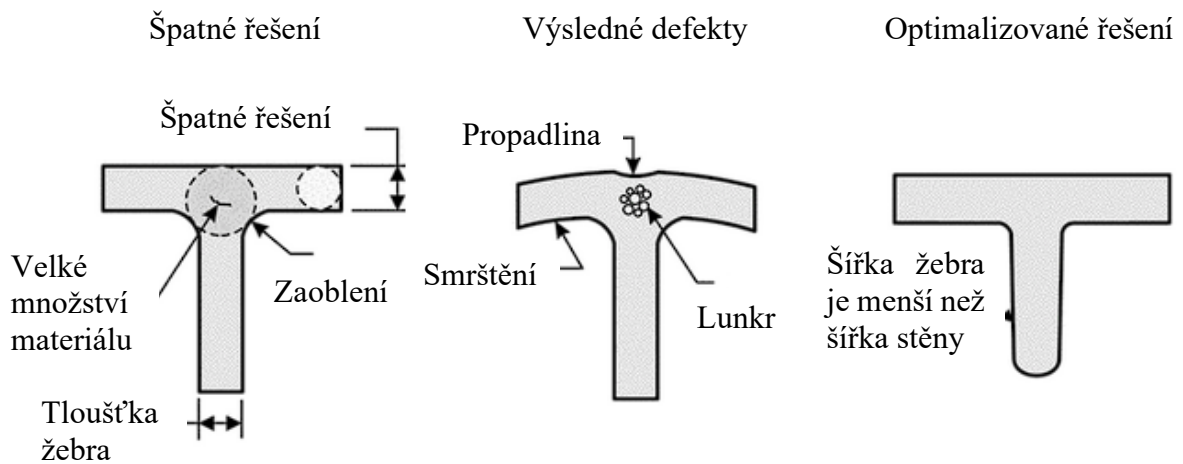
2.3.1 Tloušťka stěny

Problematickým faktorem při navrhování tloušťky stěn je teplotní gradient. Jak již bylo uvedeno dříve, tak chlazení probíhá od vrchních vrstev postupuje do středu stěny. Díky rozdílným fázím, ve kterých se materiál vyskytuje na okraji a ve středu stěny dochází k deformacím tvaru, případně ke vzniku propadlin a prázdných míst. Kromě toho, že se jedná o optické defekty, tak dochází i ke zhoršení mechanických vlastností. Z tohoto důvodu se doporučuje navrhovat stěny s relativně malou tloušťkou a co nejméně přechody na jiné šířky.[43]



Obrázek 24 Závislost smrštění na tloušťce stěny [46]

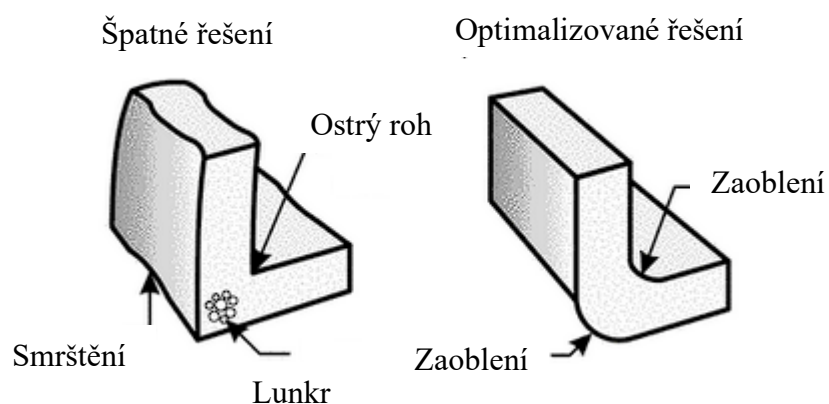
Jelikož tenké stěny mnohdy nedokáží nahradit hodnoty tuhosti a pevnosti, tak se snížení tloušťky kompenzuje přidáním výztužných žebor. Kromě podpoří mechanických vlastnosti, se dá ovlivnit vizuální stav dílu. I přes to všechno se nejedná o východisko, kterým se vyřeší veškeré nedostatky. Příkladem je podpoření vzniku propadlin a vztaženin v místě návaznosti výztužných žebor na stěnou. Optimální šířka žebor by měla činit maximálně 50% hodnoty šířky vyztužované stěny. Zvyšováním tloušťky se více projevují propadliny.[43]



Obrázek 25 Úprava žeber [43]

2.3.2 Rádiusy

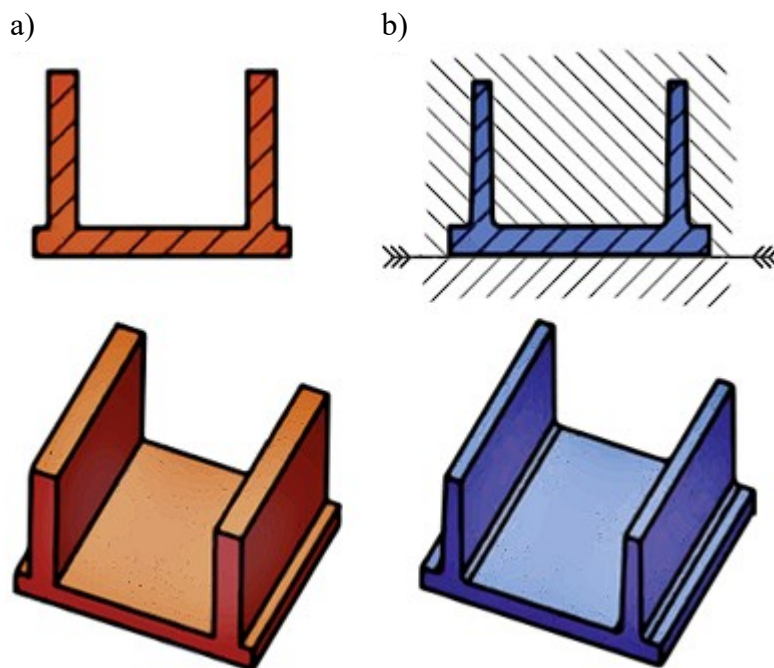
Jakost výstřiku je závislá na napětí vzniklém při procesu vyplňování formy polymerní taveninou. Toto napětí se obvykle rozkládá po celém výstřiku, ale v určitých místech nemusí k jeho rozkladu docházet. Dokonce nastávají situace, kdy dochází k jeho soustředění. Ke koncentrátorům napětí se řadí vruby a ostré rohy. V uvedených místech vznikají napěťová maxima. K popisu jednotlivých případů se používá součinitel koncentrace napětí. Čím více je roh nebo hrana ostrá, tím větších hodnot součinitel dosahuje. Soustředitelům napětí se předchází rádiusy. Jako v případě žeber, tak i špatné zaoblení vnitřních a vnějších hran může být příčinou vzniku lunkrů.[44]



Obrázek 26 Vliv zaoblení [43]

2.3.3 Úkosy

Díly se navrhují s ohledem na odformování. α může způsobit komplikace díky redukci objemu při chladnutí polymeru. Následkem této redukce je smrštění, které bývá v jednotlivých osách různé. Díky tomu je vystříknutá součást natlačena více na stěnu tvarové vložky. Se zvětšující se hloubkou tvarových částí je problematika markantnější. Odformování výstřiku se zkosenými stěnami nepotřebuje tolik generované síly, kromě mechanických členů tomu napomáhá i vzduch, který se pod výrobek může snáze dostat.[45] Podle toho, zda se jedná o vnitřní nebo vnější stěnu výrobku, tak se zvětšují či zmenšují nároky na úhel zkosení. Kromě strany je úhel ovlivněn i použitým typem termoplastu, neboť amorfní a semikrystalické polymery vykazují odlišné hodnoty smrštění. Všeobecně platí zásada, že vnitřní úhel, pod kterým je plocha zkosenena by měl mít větší hodnotu než úhel zkosení vnější strany. Při velké hodnotě smrštění polymeru tato zásada platí více.[43]

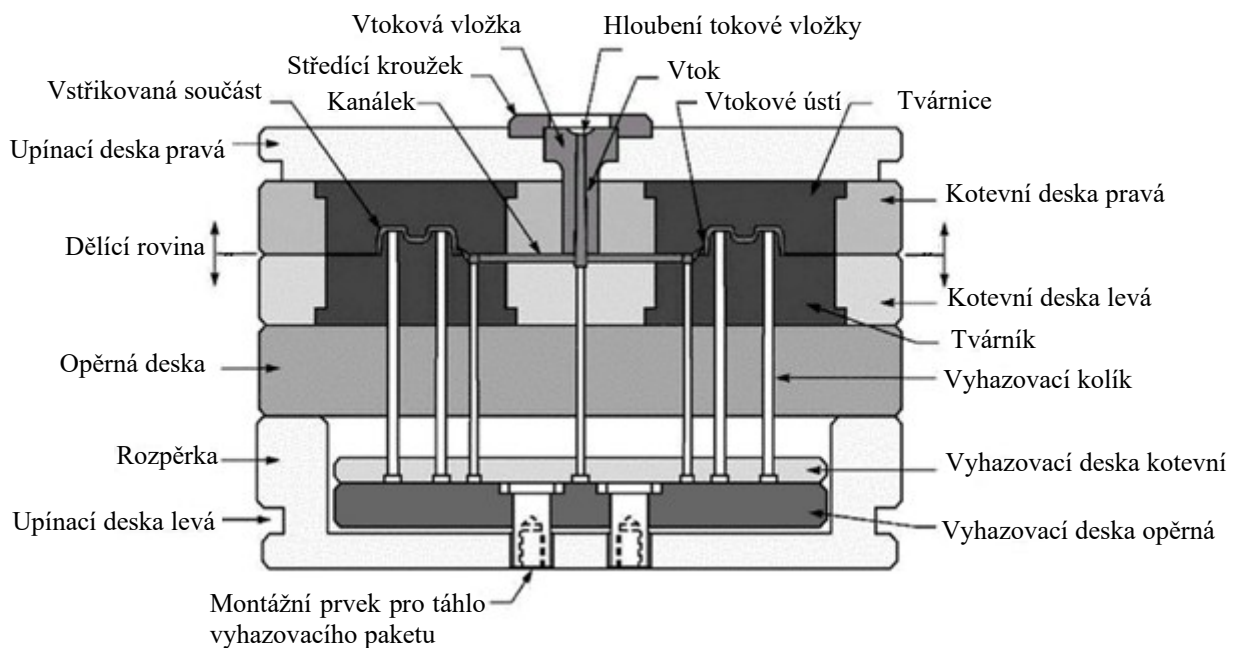


Obrázek 27 Aplikace úkosů a) obtížně odformovatelné, b) snadněji odformovatelné [45]

3 VSTŘIKOVACÍ FORMY

Vstřikovací forma je nástroj pro zpracování polymerů, který je složen několika částí. U forem je vždy jedna část statická a zbylé části pohyblivé. I přes svůj jednoduchý funkční princip se jedná o přesný nástroj, který je v mnoha případech složitě vyrobitelný. Nejkomplikovanější díly na výrobu jsou tvarové součásti. Kromě tvarové komplexnosti se zde klade důraz i na vysokou jakost povrchu. Z toho důvodu se při výrobě uplatňují konvenční i nekonvenční metody obrábění, tepelné úpravy kovů a metody povlakování. V případě nedostatečné úrovně opracování jednotlivých komponent dochází k řadě komplikací při vstřikování. Mezi tyto problémy se řadí třeba problém s přetoky, které vznikají vlivem nedostatečného lícování částí formy v dělicích rovinách. Ve vstřikovacích formách se nachází soustava kanálků pro polymerní taveninu, temperační okruhy, tvarová dutina, systém zajišťující odformování (vyhazovací systém a odformování bočních otvorů, závitů nebo podkosů). Na jeden vstřikovací cyklus lze vyrobit i více dílů zároveň, jejich počet je nastaven násobností formy.[51]

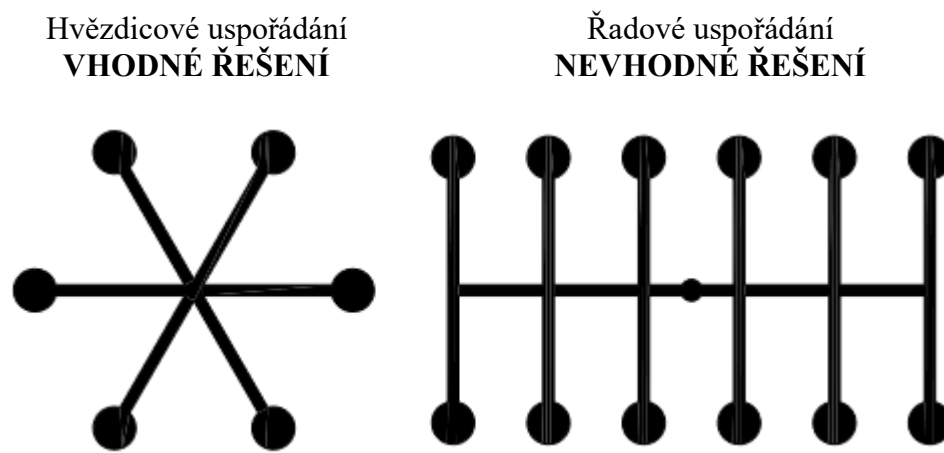
Kromě částí sloužících k udání tvaru polymerní tavenině forma obsahuje i systém vodících prvků, které pomáhají s centrováním jednotlivých desek a pohyblivé poloviny formy se statickou. První a poslední deskou vstřikovací formy jsou desky kotevní, pomocí nich se upínají formy do uzavírací jednotky vstřikovacího stroje.[51]



Obrázek 28 Dvoudesková vstřikovací forma [16]

3.1 Vtokový systém

Vtokový systém určuje, jakým způsobem se bude tvarová dutina formy vyplňovat. Vtokový systém má zajistit dostatečně dlouhý čas k provedení plnicího cyklu. Hlavně aby kompletně proběhl dotlak. Nedostatečně navržený vtokový systém způsobuje řadu komplikací ať již se zmíněným vyplněním dutiny, tak i s tlakovým spádem nebo navýšením ceny jednoho výstřiku nadměrnou spotřebou vstupního materiálu. Kromě výše zmíněným ovlivňuje i jakost vstříkovaného dílu.[39]



Obrázek 29 Uspořádání vtokového systému [52]

3.1.1 Studený vtokový systém

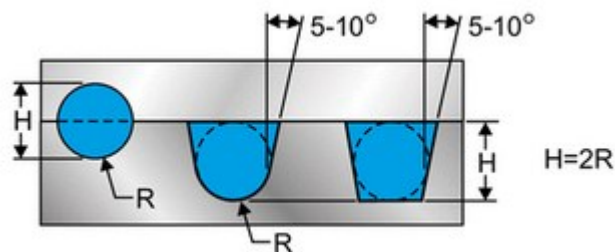
Řešení forem se studeným vtokovým systémem se vztahuje na dvou a třídeskový systém. Pokud je rozvodný systém vedený ve třídeskovém řešení, tak odpadají dodatečné operace pro oddělení vtoku od vstříkovaného dílu. Dvou deskový systém je až na výjimky přesným opakem. Při navrhování vstříkovací formy se studeným vtokem je nutné počítat s materiálovými přídávky, které spotřebuje vtok. Podle velikosti vstříkovaného dílu tento přírůstek může činit stejné množství materiálu jako má samotný profil.[47]

Rozvodný systém polymerní taveniny je obvykle složen ze tří částí a těmi jsou vtoková vložka, vtokový kanálek a vtokové ústí. Vtoková vložka je první částí studeného vtokového systému. Tato vložka je při vstříkování v kontaktu se vstříkovací tryskou plastikační jednotky. Při jejím spojení je nutné zajistit, aby nevznikala vůle ve spoji, jinak nebude tavenina proudit pouze do formy. Stejně tak je nutné zajistit co největší souosost. Proto se na vtokových vložkách ve styčném místě vložky s tryskou dělá sférické vyhloubení. Stále je nutné myslet na to, že konec trysky nemusí lícovat s tímto vyhloubením. Z tohoto důvodu

je styčná plocha vždy větší na vtokové vložce. Kromě vzniklé vůle a nesouososti ovlivňuje vyplňování formy i průměr vtokového otvoru. Proto je důležité vybírat trysky s menším otvorem, než je průměr otvoru na vložce. Vtokové vložky jsou normalizované a dodávají se s úpravami, díky kterým je možno zabránit jejich pootočení ve formě. Délka vtokové vložky se odvíjí od počtu desek, kterými prochází. Její konec je až v místě dělicí roviny.[48]

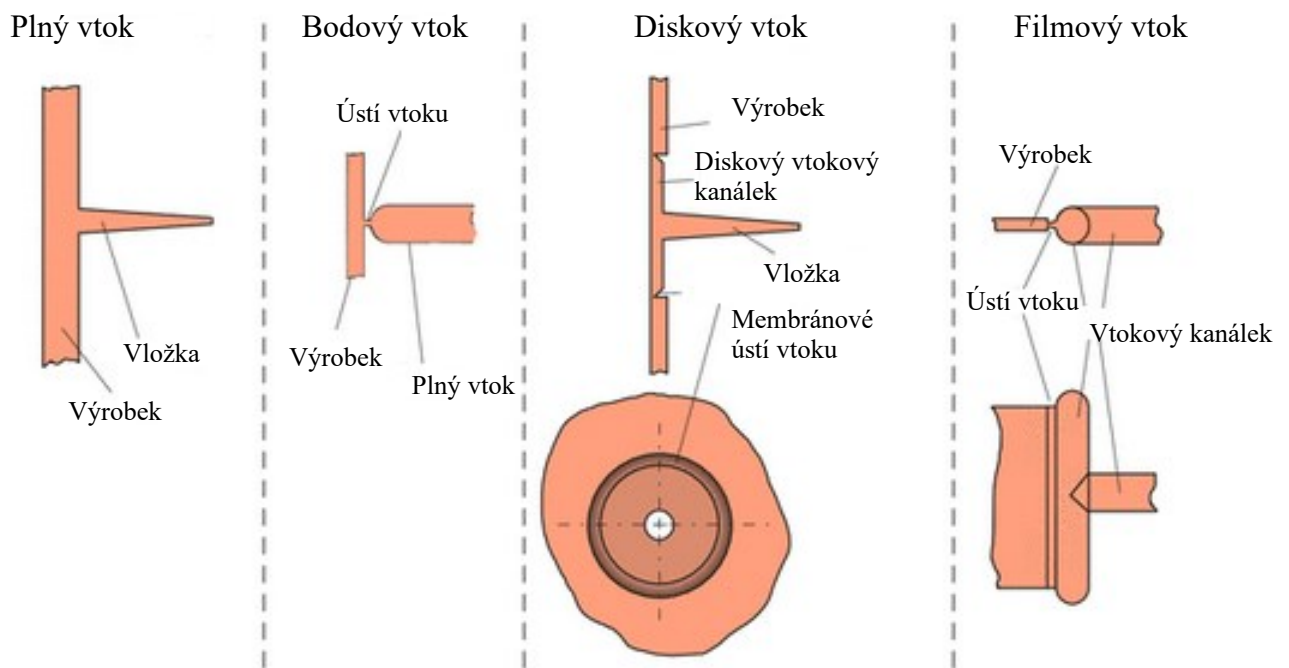
Vtokový kanálek navazuje na vtokovou vložku a vyhotovuje se v několika tvarech. Nejběžnější provedení je s lichoběžníkovým průřezem. Podle toho, jaký tvar kanálku je zvolený, tak stoupají náklady na jeho výrobu. Nejméně ekonomicky vhodným řešením je kanálek kruhového průřezu.[48]

Úkolem kanálku je rovnoměrně rozvést taveninu k tvarové dutině. K tomu je potřeba udržovat konstantní tlak. V závislosti na tvar kanálku se mění spotřeba tlaku. Při zvětšujícím se průřezu roste i spotřeba tlaku. Kromě tvaru ovlivňuje stabilitu průtoku i tolerance, ve které kanálek je vyrobený. Při jeho navrhování se musí dbát na to, aby nedošlo k předčasnému zamrznutí toku díky moc malému průřezu nebo příliš dlouhé dráze toku. Taktéž není dobré mít až moc široké kanálky, zvětšuje se tak doba chlazení.[48]



Obrázek 30 Tvary a rozměry vtokových kanálků [48]

Vtokovým ústím končí rozvodný systém kanálků polymerní taveniny. Toto ústí se zhotovuje v několika typech. Volba tvaru vtokového ústí společně i průměrem otvoru je závislá na typu zpracovávaného materiálu a výrobku. Nevhodně zvolené ústí je příčinou jettingu (volného toku taveniny) nebo předčasným zamrznutím toku. Dimenzováním tokového ústí lze potlačit některé typy vad, stejně tak i upravit dobu jednoho vstřikovacího cyklu. Zajímavostí je to, že průměr otvoru má vliv převážně pouze na objem materiálu, který lze protlačit ústím než na velikost tlaku.[50] Kromě klasických designů tokových ústí existují i speciální typy provedení, díky kterým lze vtoky automaticky oddělit i ve dvou deskovém systému. Jedná se o tunelový a banánkový vtok. V druhém případě se zvyšuje tvarová složitost řešení.[48]



Obrázek 31 Typy studených vtoků [39]

Konstrukční řešení třídeskové vstřikovací formy je specifické v rovinách, ve kterých se forma otevírá. Dvoudesková vstřikovací forma se otevírá v jedné rovině, kdežto třídeskový systém má ještě jednu otevíratelnou rovinu. Pro tento účel jsou na tyto formy montovány přídržovače, které dovolí roviny otevírat postupně. Silové účinky vyvolané uzavírací jednotkou při otevírání formy oddělí výstřik od přídrženého vtokového systému. I když se jedná o provedení, díky kterému odpadají dodatečné operace, tak jeho funkčnost není vždy 100 %. Kromě toho je finančně náročnější na pořízení.[47]

Pro zlepšení průběhu toku se do míst, kde dochází k jeho rozložení do dvou a více dalších kanálků, umísťuje přídržovač. Ten zachytí čelo taveniny, které v něm ihned začne chladnout, mezitím co zbytek taveniny pokračuje dál rozvodným systémem. V těchto místech se nachází i vyhazovací kolíky, které po ukončení cyklu odformují vtokový systém pryč ze vstřikovací formy. Pokud nebude tavenina dostatečně zatuhlá před otevřením formy, tak vystříknutý tokový systém podlehe destrukci a materiál ulpěný v přídržovači vtoku se zasekne. Tento čas se může projevit na zvýšení doby jednoho cyklu díky delší době potřebné k ochlazení na vyhazovací teplotu. Volba typu přídržovače závisí na zpracovávaném polymeru.[43]

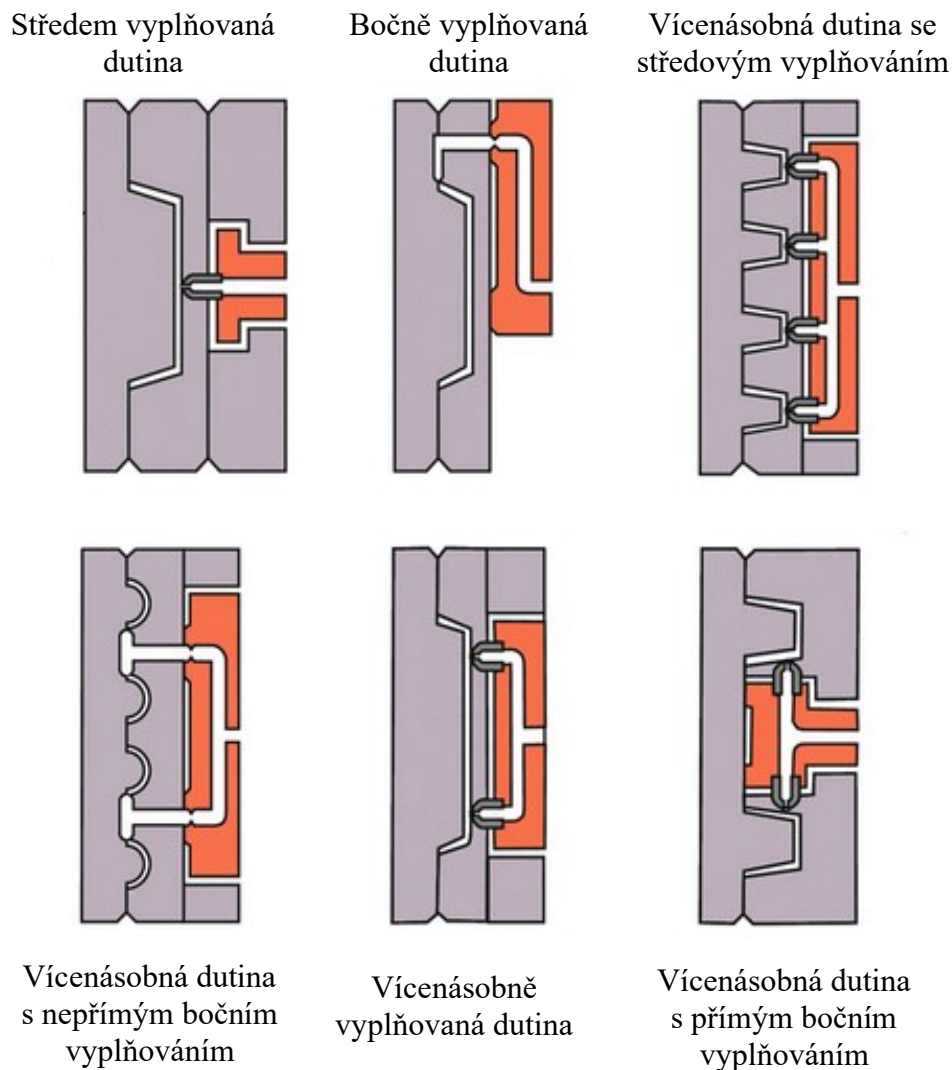
3.1.2 Horký vtokový systém

Horký vtokový systém, stejně jako studený vtokový systém dopravuje polymerní taveninu do dutiny formy. Rozdílná je ovšem teplota, pod kterou se tento proces děje. U horkého vtokového systému je rozvodný kanálek temperován. Vtok je zajištěn elektricky napájeným horkým blokem a podle typu modelu obsahuje jednu a více trysek. Současné horké bloky jsou relativně snadno demontovatelné, a tak výměna poškozených komponentů již není tolik časově náročná.[49]

Transport taveniny do tvarové dutiny je zajištěn tryskami. Ty se vyhotovují v široké škále průměrů a délek. Nejmenší průměr těchto trysek dosahuje až 16 mm. Kromě přívodu taveniny mohou trysky zajišťovat dodatečnou homogenizaci polymerní směsi. To se děje díky torpédovým hrotům. Kromě běžných materiálů umožňuje horký vtokový systém zpracovávat i vysoce plněné polymery. Plnivo zaujímá v těchto polymerech minimálně 40 % objemu.[49]

Předností horkých vtokových systémů je mnoho, avšak jejich pořizovací náklady jsou vysoké. Z tohoto důvodu převažuje na vstříkovacích formách studený vtokový systém. Za zvážení **stojí** tento systém aplikovat při výrobě dílů z cenově nákladných polymerů. Důvodem je nulový materiálový přírůstek, který by spotřeboval vtokový systém. Dále jsou tlakové ztráty lepší než v případě studených vtoků, stejně tak se zlepšuje i vzhled výstřiku. Horký vtokový systém nezanechává stopy po ústí vtoků na výstřiku.[49] Aby byl zajištěn konstantní teplotní profil, tak ohřev probíhá externě i interně. Kromě zmíněného ohřevu se provádí i temperace v okolí horkých bloků díky možnému teplotnímu vlivu na samotnou formu teplem vysálaným z horkého bloku.[39]

Metodika vyplňování dutiny se děje dvěma způsoby. V prvním případě dochází k zaplňování ze všech trysek současně. Druhou metodou je postupné vyplňování dutiny. Poté co jedna tryska vyplní část dutiny, tak se otevře další tryska a takto to postupuje, dokud není tvarová dutina zaplněná celá. Tento způsob je označován jako kaskádové vstříkování. Výhodou je částečné eliminace studených spojů.[2]



Obrázek 32 Řešení přívodu taveniny horký vtokový systémem [39]

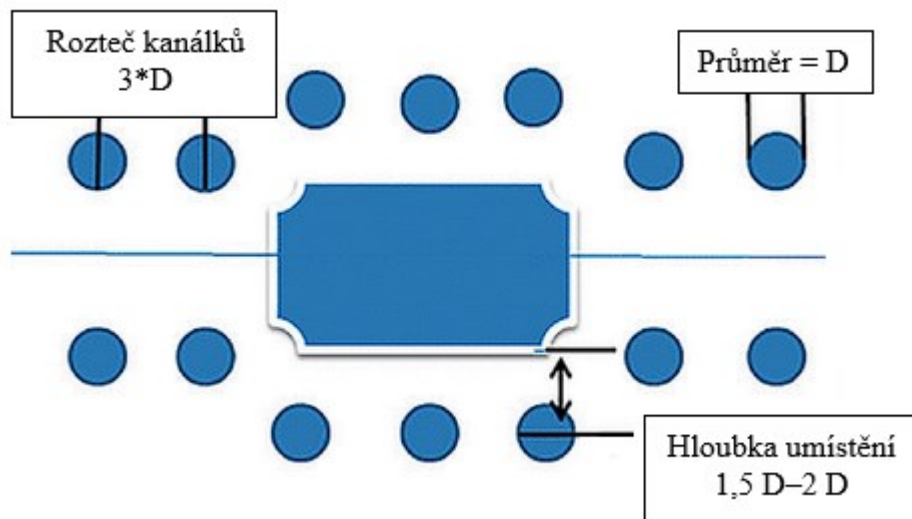
3.2 Temperační systém

Temperace vstřikovacích forem nejvíce ovlivňuje jakost vstřikovaného dílu. Působí na dobu chlazení, a tedy i délku vstřikovacího cyklu. Snahou je dobu chlazení co nejvíce zkracovat při zanechání stejné kvality výstřiku. Vlivem teplotního gradientu dochází k dodatečným deformacím po vyjmutí vystříknutého dílu z formy. Vznikající napětí způsobené chladnutím mimo formu je příčinou defektů.[36] Vhodně navržená temperace snižuje cenu výrobku a také neovlivňuje tuhost formy.[55]

Temperační systém tvoří soustava kanálků, kterými teče temperační médium. Efektivita odvodu tepla se zvětšuje turbulentním prouděním. Oproti laminárnímu proudu vykazuje rovnoměrnější teplotní profil po celém průřezu kanálku. U laminárního toku dochází

k rozdílným teplotám na okraji a ve středu průřezu. Typ proudění lze rozlišit pomocí Reynoldsova čísla (Re). Jeho hodnota se mění v závislosti na viskozitě kapaliny temperačního média. Ke změně viskozity dochází změnou teploty. Z tohoto důvodu je dobré nastavovat rychlost proudění kapaliny na hodnoty, při kterých Reynoldsovo číslo dosahuje hodnoty 10000 Re . Dosažení rovnovážného teplotního pole je relativně komplikovanou záležitostí díky složitosti vstříkovaného dílu.[36] Při návrhu se nesmí opomenout i značně omezený volný prostor, kterým můžou být vedeny temperační kanálky. Forma by měla obsahovat co nejméně samostatných okruhů. Zredukuje se tak náklady na externí zařízení a zároveň se sníží riziko špatného zapojení připojení vstupů a výstupů obsluhou vstříkovacího stroje.[55]

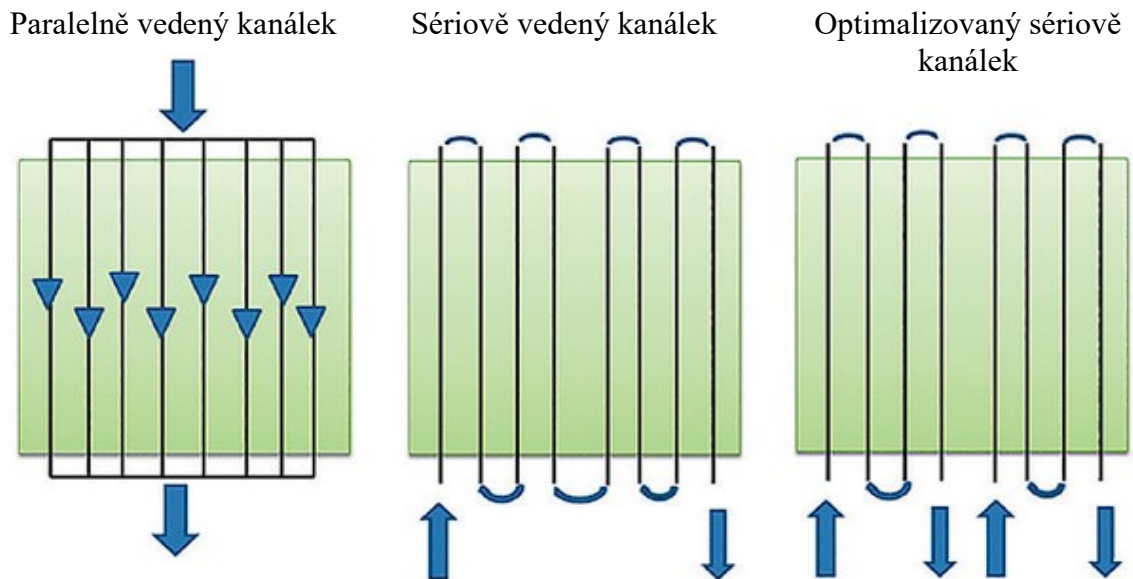
Volba průměru kanálku musí být taková, aby nedocházelo k tlakovým ztrátám a zároveň se zajistilo turbulentní proudění. Zvolený průměr nesmí být příliš malý nebo velký. Kromě fyzikálních vlastností jsou relativně omezujícím kritériem i rozměry normalizovaných dílů chladících systémů. Dále při dimenzování kanálek je důležité zohlednit vzdálenosti, ve kterých se umístí od tvarové dutiny formy. Hloubka jejich polohy se zvětšuje v závislosti na velikosti tlaku taveniny. Takto se předchází snížení životnosti tvarových dílů vlivem únavy materiálu vzniklé koncentrací napětí. Naproti tomu ale jde efektivita odvodu tepla. Ta se pro změnu snižuje s rostoucí vzdáleností mezi kanálkem a tvarovou dutinou. Společně s hloubkou se řeší i vzdálenost mezi jednotlivými kanálky. I zde platí, že při zvětšující se vzdáleností klesá efektivita odvodu tepla. Rozteč mezi kanálky se odvíjí od konkrétních případů vstříkovaných dílů. Zmenšování této vzdálenosti se snižuje velikost teplotního gradientu a tím se zlepšuje rozměrová stabilita výstřiku. Pro běžnou praxi jsou vytvořeny tabulky, obsahující doporučené hodnoty průměrů kanálek společně i s minimální doporučenou vzdáleností od dutiny formy.[55]



Obrázek 33 Rozložení temperačních kanálků [17]

Temperační okruhy bývají různě tvarově složité. Skoro ve všech případech formy obsahují více jak jeden samostatný temperační okruh. Aby byla co nejdělejší kopírovaná dutina, tak se vytváří velké množství kanálků, které je následně nutno vzájemně propojit. Systém otvorů se propojuje buď paralelně nebo sériově. Tyto dva typy propojení mají své výhody i nevýhody. Jedná se o složitost propojení a zajištění průtoku všemi určenými dutinami a finální rozdíl teplot média na vstupu a výstupu. Podle způsobu propojení kanálků se reguluje i množství propojovacích prvků v prostoru vstřikovací formy.[55]

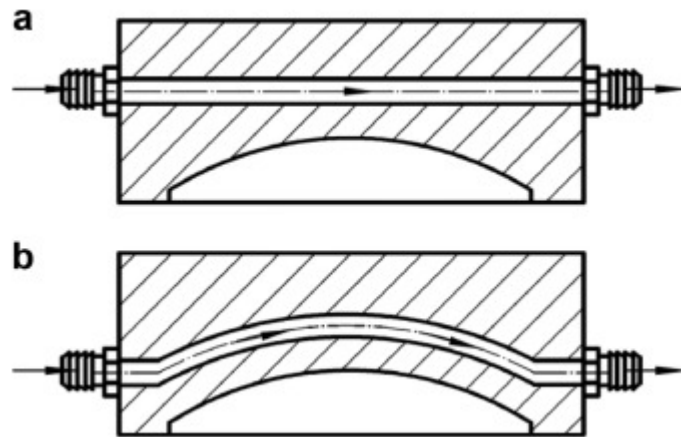
Teplé pochody v temperačních kanálkách zajišťuje temperační médium. Zpravidla se jedná o dva druhy kapalin. Hranice jejich použitelnosti vytyčuje maximální teplota, na kterou lze tyto kapaliny vytemperovat. První kapalinou je voda, která se dle potřeb dodatečně upravuje. Ta je omezena svou teplotou varu. Pro vybrané polymery s potřebou vyšších teplot formy se používají oleje. Ty oproti vodě přesahují teploty více jak 100°C. [11]



Obrázek 34 Metody vedení kanálků [17]

3.2.1 Konvenční a konformní temperační systém

Konvenční temperace je značně omezena výrobní technologií. Výroba klasického temperačního okruhu spočívá ve vyvrtávání jednotlivých kanálků. Aby došlo k vytvoření funkčního systému, tak se jednotlivé kanálky kříží. V místech křížení se ucpávkami izolují přebytečné otvory a tím vznikne jeden kompletní kanálek, který co nejvíce kopíruje dutinu formy. Při vkládání ucpávek se musí dbát na to, aby nikde nevzniklo slepé místo, kde nedojde k toku média. Slepým místům se předchází dodržením jednosměrnosti systému. Počet samostatných okruhů lze snížit tím, že se použijí překlenovací prvky. Zmenší se tak počet periferních zařízení.[11] Nástup konformní temperace nastal při rozvoji aditivních technologií. Nicméně z počátku se i tento druh temperace vyráběl konvenčními technologiemi. Příkladem je temperační systém CONTURA. Kdy temperovaný díl je složený z několika samostatných dílů, ve kterých se konvenčně vytvoří kanálek. Následně se tyto části spojí do jedné celistvé součásti.[49] Trajektorie kanálků se v současných konformně temperovaných dílech vede cik cak nebo ve spirále. Rozdílem mezi nimi je odlišná hodnota tlakových ztrát. Hlavním cílem konformně temperovaných forem je větší zkrácení doby vstřikovacího cyklu než v případě konvenčně temperovaných dílů. Časový rozdíl může činit i více jak o polovinu menší celkovou dobu chlazení.[56]

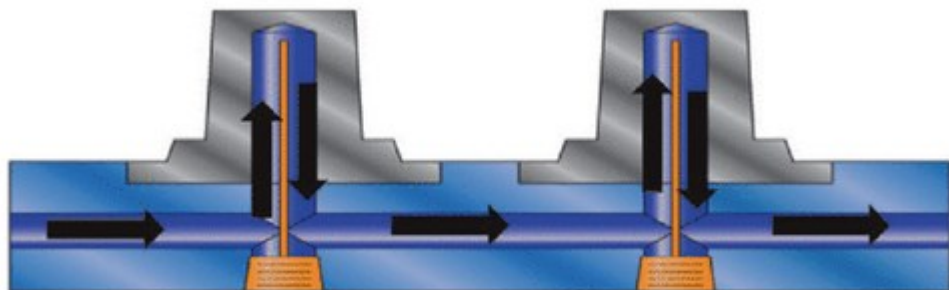


Obrázek 35 Typy temperace – a) konvenční temperace, b) konformní temperace [56]

3.2.2 Temperace obtížně dosažitelných míst

Vytvořit funkční temperačního okruh pro konvenční temperaci není vždy snadno proveditelné. Nejkritičtější je temperace štíhlých tvarových prvků. Z toho důvodu se do systémů zařazují prvky, které dokáží rozdělit jeden otvor na obvod. Případně se jedná o vložky z vysoce tepelně vodivých materiálů.[11]

- Plochá a spirálová přepážka – Cílem přepážek je přívod temperačního média do relativně velké hloubky. Princip vedení média je velice jednoduchý. Tekoucí kapalina kopíruje přepážku kolem její středové osy. Na trhu dostupné přepážky jsou vyráběné ve dvou provedení. Prvním typem je zcela rovná přepážka, mezitím co druhá dostupná přepážka je zakroucena do spirály.[11]



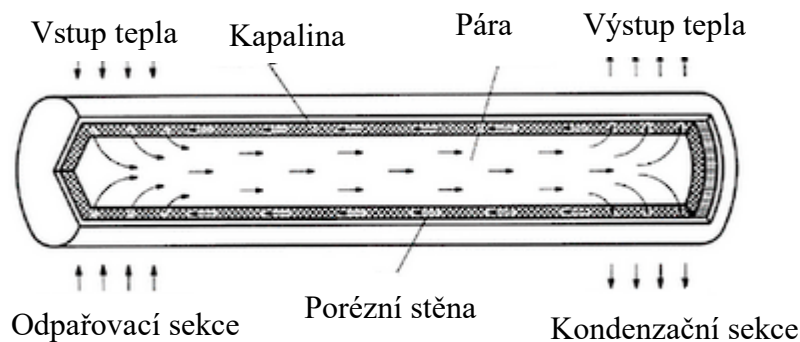
Obrázek 36 Ploché přepážky [17]

- Fontánová přepážka – Obdobně jako plochá a spirálová přepážka převádí vytvořený otvor na obvod. Oproti předchozímu řešení nestačí mít pouze jeden vrtaný kanálek. Aby nedocházelo k cirkulaci již ohřátého média stejným místem, tak temperační okruh pokračuje novým kanálkem. Přidání tohoto kanálku, ale může být velmi obtížné díky značně omezenému prostoru ve formě. Výhodou fontánových přepážek je jejich menší průměr, nicméně výsledná efektivita odvodu tepla je u všech uvedených přepážek skoro stejná.[55]



Obrázek 37 Fontánová přepážka [56]

- Teplotně vodivé vložky – Použití těchto vložek je v případě, kdy výše zmíněné prvky pozbývají možnost montáže. Problematickým rozměrem u těchto dílů je jejich normalizovaný minimální průměr. Teplotně vodivým materiálem používaným u vložek je nejčastěji měď.[26] Existují dva typy vložek, kdy v prvním případě se jedná pouze o kolík, který je umístěn do štíhlého otvoru a v jeho spodní části okolo něj obíhá temperační médium.[11] Jiným případem je tepelná trubice, ta funguje na základě kapilárního efektu. Kapalné médium uvnitř trubice, které se vlivem působícího tepla vypařuje ze stěn. Vzniklá pára se kumuluje ve středu této trubice, kde dojde k její kondenzaci. Vzniklé kapky spadnou na dno tohoto prvku a celý jev se znovu opakuje.[26]



Obrázek 38 Tepelná trubice [26]

3.3 Odvzdušňovací systém

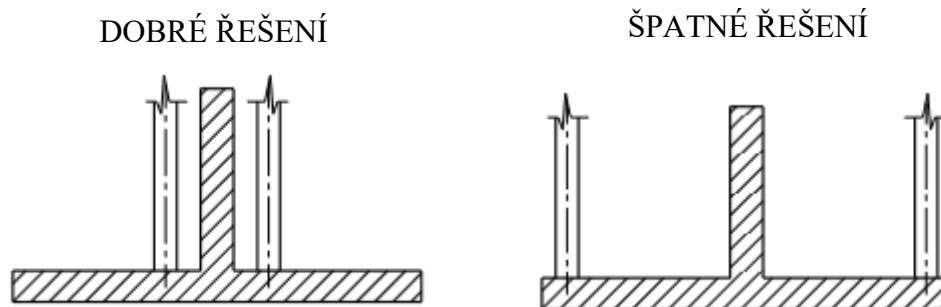
Přítomnost plynů ve vstřikovací formě je příčinou řady problémů od defektů na výstřiku až po snížení životnosti komponentů formy. Plyná složka se z formy odstraňuje skoro ve všech případech pasivně nebo výjimečně aktivně. V případě pasivního odvzdušnění dochází k samovolnému úniku plynů v dělicích rovinách i mezerou mezi vyhazovacími prvky a tvárníkem. Aby vzniklá vůle neovlivňovala jakost výstřiku, tak jejich velikost může činit maximálně 20 μm . Při překročení této hodnoty hrozí vznik přetoků. Aktivní odvzdušnění je primárně určeno pro vstřikování mikro součástek. Dochází při něm k odsání veškerého vzduchu z formy dříve, než se do ní vstříkne tavenina. Zajištění dobrých podmínek pro aktivní odvzdušnění je problematické skrz mnoho mezer, které sestava formy přirozeně obsahuje.[54]

3.4 Odformování výstřiku

Předmětem odformování je dostatečné uvolnění výstřiku při otevírání formy, aby následně mohlo dojít k jeho vyjmutí ze vstřikovací formy. Navržené díly bývají obvykle velmi tvarově komplexní, a aby se dostatečně uvolnil výrobek, tak se do forem montují sestavy pohyblivých zařízení, které se napojují na tvarové vložky. Kromě axiálního pohybu některé komponenty zvládají i pohyb radiální. Díky tomu lze např. odformovat závit, podkoso a celou řadu bočních otvorů.[52]

Umístění pohyblivých komponent bývá nejčastěji na pohyblivé části formy, kdežto do statické poloviny se montují převážně pomocné vodící prvky těchto sestav. Na trhu se lze setkat s mnoha mechanismy, jmenovitě se jedná o posuvné jednotky, hydraulické a pneumatické válce, závitová a rozpínací jádra.[52]

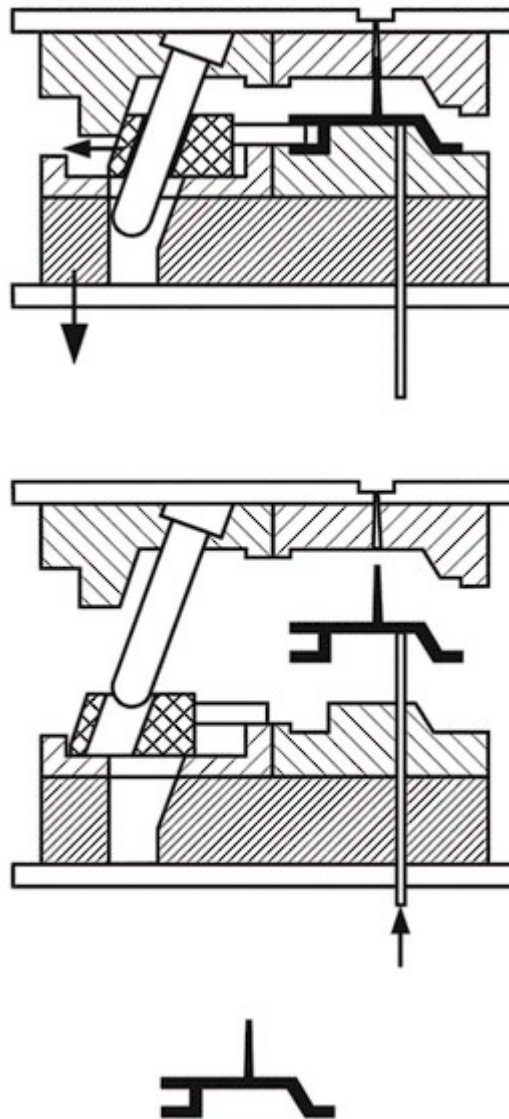
Po uvolnění všech různorodě tvarovaných částí dojde k vyhození výrobku. Toto zajišťuje vyhazovací systém. Aby došlo k uvolnění smrštěného dílu z tvárníku, tak na díl působí vyhazovací prvky. Jejich volba závisí na celkovém tvaru výstřiku. Jejich působení na výstřik nesmí ovlivnit jakost stejně tak se nesmí poškodit samotné vyhazovače. Z těchto důvodů se vyhazují díly pomocí vyhazovacích kolíků, prizmatických vyhazovacích kolíků, trubkových vyhazovačů, stíracích desek a pneumatickými vyhazovači. [52]



Obrázek 39 Umístění vyhazovacích prvků [47]

3.4.1 Mechanické odformování bočních otvorů

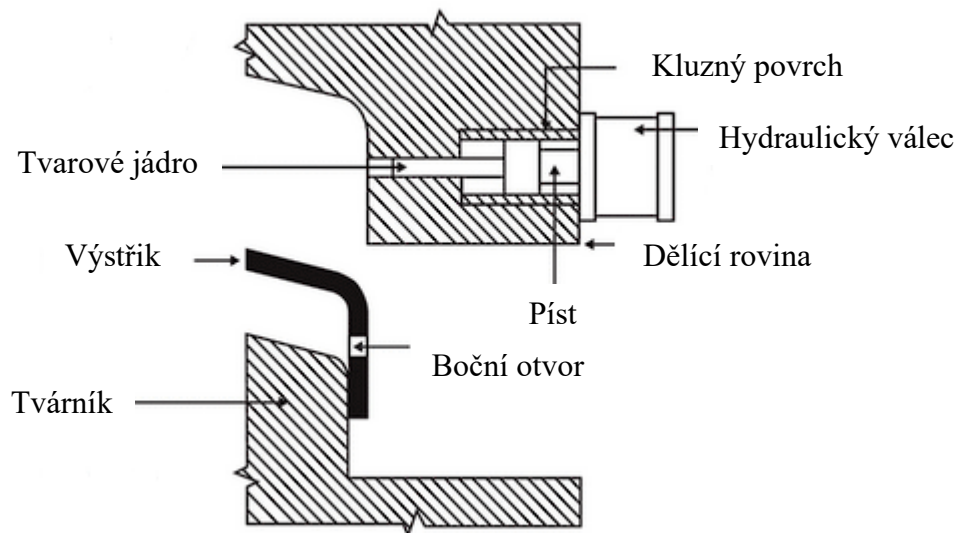
V běžné praxi se lze často setkat s díly, které obsahují rozličné otvory nebo podkosy na bočních stěnách. Jenže problém je ten, že tyto tvarové prvky nelze odformovat pouze prostým otevřením formy. To se řeší posuvnými bočními jádry připevněnými k posuvným dílům. Ty se posouvají po šikmém kolíku. Délka šikmých kolíků určuje maximální dráhu, po které se může sestava jádra a posuvného dílu pohybovat. Velikost kolíku se stanovuje s použitím goniometrických funkcí a výsledná délka se volí tak, aby byla co nejbližší normalizovanému rozměru. [11] Při otvírání formy dochází automaticky k posuvu jader a výrobek se uvolní i z bočních otvorů a podkosů. [57] Při posuvu jsou jádra vedena po kluzných destičkách a mezi vodícími lištami. Aby se předešlo zasekávání výstřiků, tak konec jádra by měl končit 3 až 5 mm za tvárníkem. Jakmile se dostatečně vysune posuvný díl, tak dojde k zajištění jeho polohy aretačními prvky. [47] Mechanicky ovládaná jádra lze také relativně snadno temperovat. [57]



Obrázek 40 Mechanické odformování bočního otvoru [15]

3.4.2 Hydraulické a pneumatické odformování bočních otvorů

Volba odformování hydraulickým nebo pneumatickým válcem připadá v úvahu, pokud je potřeba uvolnit hluboká jádra nebo specifické prvky dříve, než dojde k otevření vstřikovací formy. Pro zmíněné účely je výhodnější používat hydraulický systém pro jeho plynulejší pohyb. K zajištění správné funkce válců je důležité dbát i na dostatečné utěsnění systému. Další nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady. Díky zmíněným negativním vlastnostem se k těmto dílům zařazují monitorovací čidla. Pokles tlaku nebo zaseknutí tahače bývá příčinou poškození zařízení.[57]



Obrázek 41 Hydraulické odformování bočních otvorů [26]

3.5 Vyhazovací systém

Sytém je složen ze dvou desek, šroubů, dorazových destiček, vodících členů a táhla. K opěrné desce je připevněno táhlo a spojení kotevní desky s deskou opěrnou zajišťují šrouby. Tloušťky obou desek se volí v závislosti na působící síle a velikosti vyhazovačů. V případě nedostatečné tloušťky narůstá velikost deformace desek. Následně dochází k vyosení jednotlivých kolíků, které pak začnou působit abrazivně na ostatní desky formy. U kotevní desky je tloušťka primárně závislá na parametrech kolíků.[43]

3.5.1 Umístění a rozměry vyhazovacích prvků

Zajištění dostatečného odvodu vzduchu je první podmínkou rozmístění vyhazovacích prvků. Díky tomu, že vyhazovače po sobě zanechávají stopy na výstřiku, tak je umístění řízeno i požadavkem na optickou kvalitu. Pro stanovení přesného počtu kolíků lze jejich množství stanovit z hodnoty napětí.

Vyhazovače jsou normalizovanými součástmi. Nejmenší normalizované průměry začínají na 0,4 mm podle katalogu normalizovaných dílů z Meusburgeru.[60] Příliš tenké vyhazovače mohou způsobit narušení celistvosti stěn. Se zmenšujícím průměrem klesá i pevnost těchto dílů. Aby nedocházelo k jejich poničení, tak délka by neměla překročit násobek 50 průměru v případě, že se rozhoduje o použití vyhazovačů do průměru 3 mm. Vstřikované díly jsou často tenkostěnné, tak vyhazovače o větších průměrech je obtížné

umísťovat do obvodových stěn. Ale toto je částečně kompenzováno místy, kde dochází ke křížení stěn. Narůstá tak plocha, na kterou vyhazovač může působit. V některých případech je nelze vůbec použít, a proto jejich funkci nahrazují stírací desky.

Neméně důležité při navrhování vyhazovacího paketu je blokace vyhazovačů. Při vstřikování hrozí pootočení vyhazovacích prvků kolem jejich osy, a to je jednou z mnoha příčin závad. Pokud se nejedná o prizmatické vyhazovací kolíky, tak pojištění vůči pootočení zajišťuje obrobení konce vyhazovacích kolíků. Tato úprava se dělá z jedné nebo dvou stran. [47]



Obrázek 42 Úprava kolíků proti pootočení [47]

3.5.2 Vyhazovací kolíky a trubky

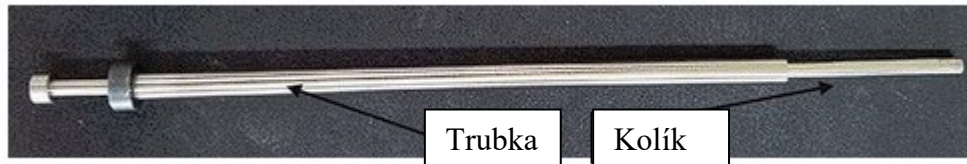
Vyhazovací kolíky mají po celé délce kulatý průřez. Jejich rozměry jsou normalizované a délkou dosahují až 500 mm. Na trhu jsou dostupné kolíky v mnoha průměrech. Životnost kolíků se zvyšuje nitridací, a i přes to se nedoporučuje používat velmi štíhlé kolíky.[55]

Prizmatické vyhazovací kolíky fungují na stejném principu jako vyhazovací kolíky, ale rozdíl je v jejich tvaru. Počátek prizmatického kolíku je v kruhovém průřezu, který pak přechází do průřezu obdélníkového. Tímto přechodem se široký kolík zúží, ale oproti štíhlým kolíkům je více odolný. Otvory pro tento typ kolíku se do desek formy a tvárníku vyhotovují elektroerozivním obráběním.[55]



Obrázek 43 Prizmatický vyhazovací kolík a válcový vyhazovací kolík [26]

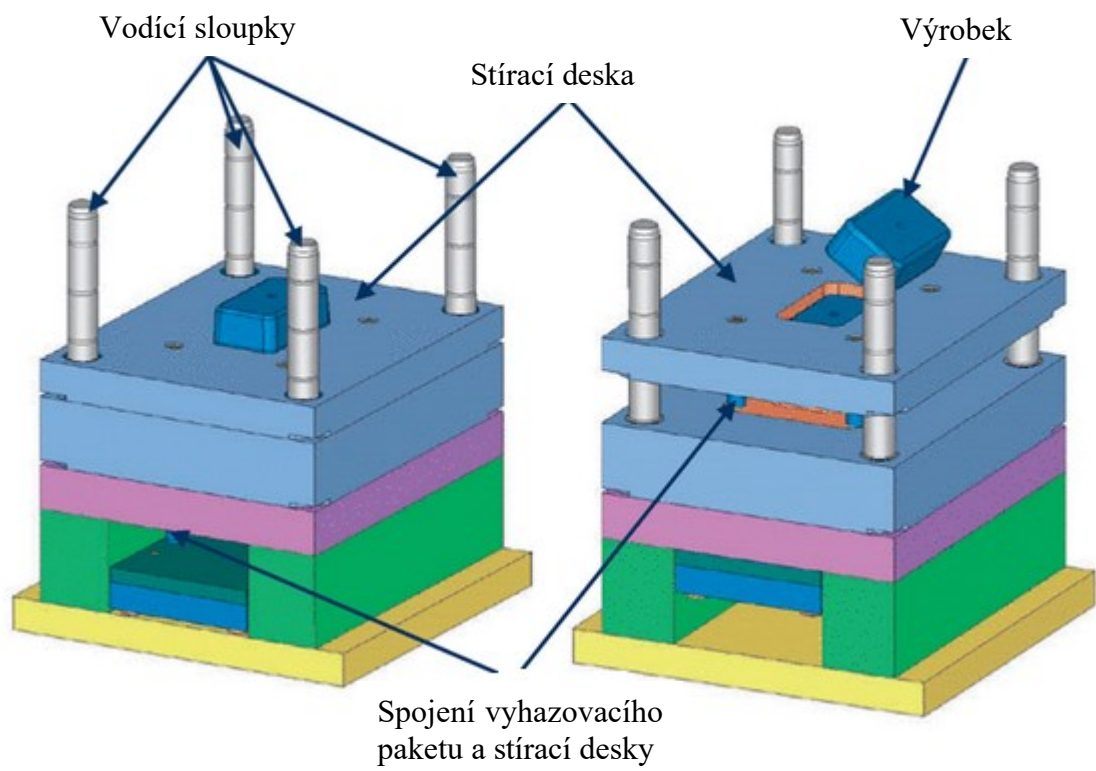
Oproti předchozím dvou typům vyhazovačům jsou trubkové vyhazovače složeny ze dvou částí. Jedná se o sestavu trubky a kolíku. Vyhazovač je umístěn do vyhazovacího paketu i upínací desky pohyblivé části vstřikovací formy. Ve vyhazovacím paketu je umístěna trubka a v upínací desce kolík. I když je tento druh vyhazovače odolnější vůči mechanickému poškození než předchozí dva typy, tak je velmi citlivý na souosost trubky a kolíku.[55]



Obrázek 44 Trubkový vyhazovací kolík [26]

3.5.3 Stírací desky

Stírací desky přináší řadu výhod oproti kolíků a trubkovým vyhazovačům. Zejména se jedná lepší rozložení vyhazovací síly na ploše výrobku. Z výrobního hlediska se jedná o složitější řešení vyhazovače. Je nutno zohlednit komplikovanost tvaru styčné plochy stírací desky. Aby nedocházelo k poničení stíracího elementu tak vůle okolo tvárníku by měla činit 0,25 mm a zároveň by měla být stírací deska plně podepřena. Tím se zvyšuje odolnost vůči působícímu tlaku taveniny. Kromě výše zmíněné vůle se stírací členy vyhotovují i s úkosem. Nejběžnější hodnota úhlu zkosení činí 15°. Aby nedocházelo k mechanickému poškození tvárníku nebo stíracího elementu, tak se do systému zařazují vodící prvky. I přes všechny komplikace se zařazením stírací desky do vstřikovací formy, tak při vyhazování výstřiku nedochází k zanechání stop po vyhazovačích. Zlepšuje se tak pohledový stav výrobku. [47]



Obrázek 45 Princip sírací desky [11]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pro vypracování diplomové práce byly stanoveny následující cíle:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Provedení konstrukci zadaného plastového automotive dílu
3. Navrhnutí 3D sestavy vstřikovací formy pro výrobu zadaného plastového dílu
4. Nakreslení 2D výkresu sestavy a příslušných řezů
5. Ověření návrhu pomocí analýz

Literární studie je cílena na popis technologie vstřikování, navrhování dílů společně s využitím simulačních a modelářských softwarů. Dále je zde popsána vstřikovací forma. V části zaměřené na technologii je rozebrán vstřikovací cyklus a vstřikovací stroj. Popsána je i energetická náročnost vstřikování. Tuto kapitolu zakončuje charakteristika polymerů.

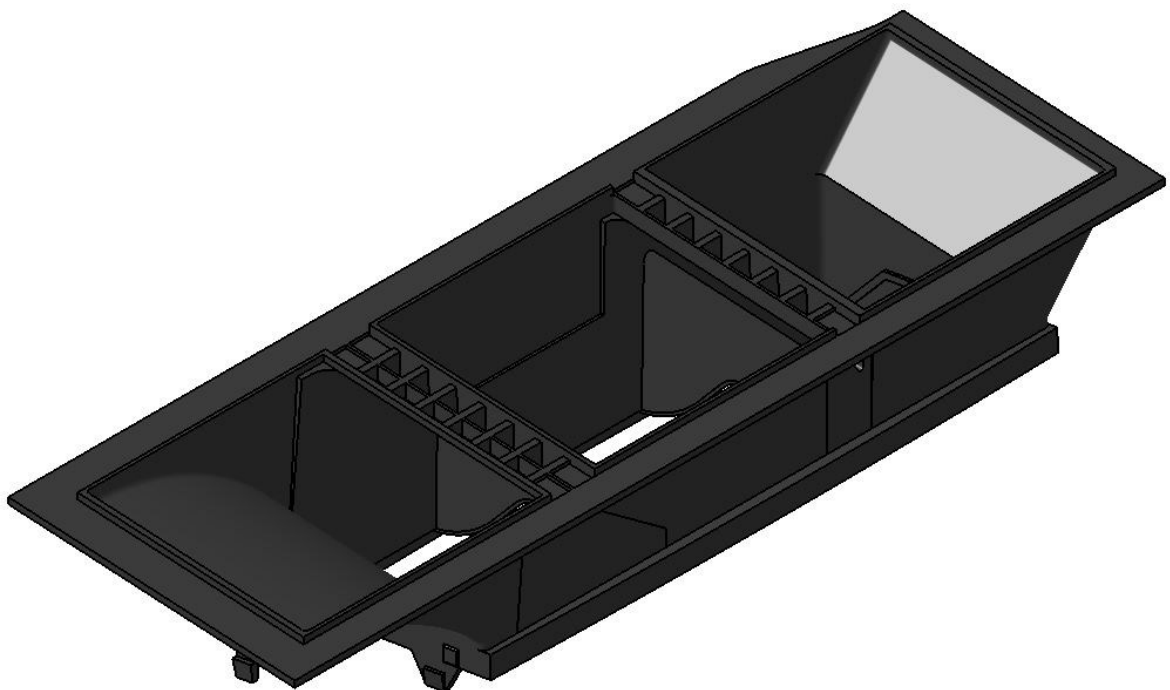
U vstřikovacích forem je vysvětlen vtokový, temperační a odvzdušňovací systém. Dále je zde část věnovaná způsobům odformování a vyhození vstřikovaného dílu z formy.

K vyhotovení praktické části byl použit software CATIA V5-6R20 a Moldflow 2023. První program posloužil k tvorbě modelu zadaného dílu a vstřikovací formy. Kromě modelů zde byl vyhotoven i výkres sestavy vstřikovací formy s několika řezy. Navržená vstřikovací forma byla ověřena simulačním softwarem Moldflow 2023. Výsledkem jsou tokové analýzy popisující chování polymeru ve formě společně i s vlastnostmi temperace a výsledné deformace vstřikovaného dílu. Simulace byly provedeny pro horký a studený vtokový systém.

5 AUTOMOTIVE (AUTOMOBILOVÝ) DÍL

Zadaným dílem je tělo usměrňovače vzduchu. Jedná se o součást ze systému vzduchotechniky, používané k větrání nebo klimatizaci prostorů. Usměrňovače jsou široce využívány v oblasti automotive i průmyslových nebo obytných prostorách. Účelem usměrňovačů je zajištění distribuce vzduchu podle požadavků uživatele, a tak lze dosáhnout konstantního teplotního pole v celém prostoru. Toto šíření se dá podpořit zařazením lamel do systému.

Tělo usměrňovače bývá vystaveno rozdílným teplotám, stejně tak i výparům kapalných látek. Uvedené aspekty se promítly do volby materiálu. Zadaný díl je dlouhý 350 mm, široký 90 mm a vysoký 70 mm. Tloušťka stěn se pohybuje v rozmezí 1 až 2 mm. Hmotnost dílu je 160 g. Prostor k proudění vzduchu je rozdělený do tří samostatných sekcí.



Obrázek 46 3D model usměrňovače vzduchu

5.1 Volba materiálu

Volba probíhala na základě předpokládané aplikace dílu v automobilu. Cílem byl výběr polymeru, který bude nejlépe splňovat tvarovou stálost a chemickou odolnost. Materiál navržený pro zadaný díl je PA66 od společnosti BASF z produktové řady Ultramid. Konkrétní obchodní název je Ultramid A3EG6. Jedná se o polyamid plněný skelnými vlákny o obsahu 30 % a vysokou rozměrovou stabilitou. Veškeré parametry jsou uvedeny v materiálovém listě. [59]

Tabulka 1 Vlastnosti Ultramid A3EG6 [59]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Index toku taveniny (MVR)	30	cm ³ /10min
Teplota taveniny	280-300	°C
Teplota formy	80-90	°C
Smrštění ve směru vstřikování	0,55	%
Smrštění ve směru kolmém	1,02	%

5.2 Vstřikovací stroj

Hlavním parametrem volby vstřikovacího stroje byla vzdálenost mezi vodícími sloupy. Vzhledem k rozměrům formy a dalším parametrům vyhovuje pro uvedený návrh elektrický vstřikovací stroj od firmy Arburg s modelovým označením Allrounder 920 A – 5000 – 1300 (55). Vstřikovací stroj splňuje bezpečnostní podmínku pro vstřikovací tlak i uzavírací sílu, kdy je potřeba tyto hodnoty mít větší o několik procent, než stanoví simulační software. Uzavírací síla musí být větší o 20 % a vstřikovací tlak o 10 %. Stejně tak je dodržena i 10 % rezerva na objem materiálu. Pro tento vstřikovací stroj je stanovený průměr středícího kroužku 200 mm. Veškeré parametry zvoleného vstřikovacího stroje jsou uvedeny v příloze v technickém listě. [53]

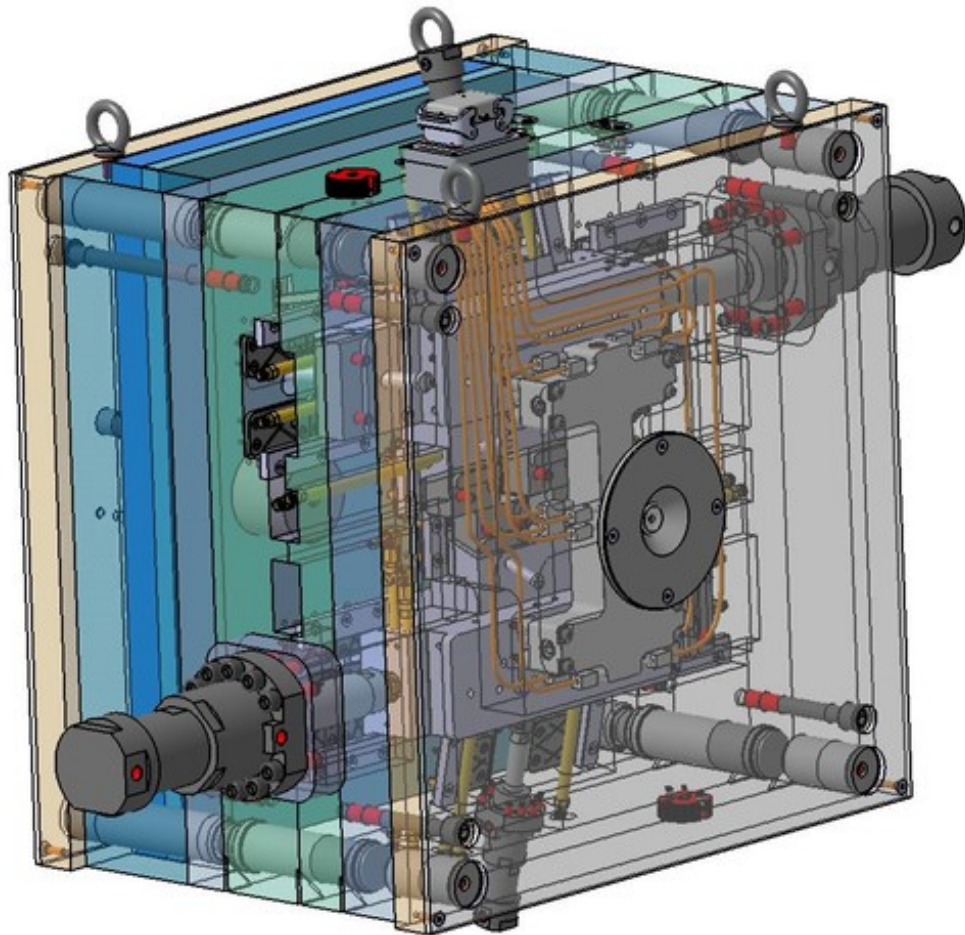
Tabulka 2 Parametry stroje Arburg Allrounder 920 A – 5000 – 1300 (55) [53]

Parametr	Vstřikovací forma	Stroj
Šířka mezi sloupky [mm]	749-796	920-920
Velikost uzavírací síly [kN]	1 181,51	5000
Objem výstřiku [cm ³]	360,2	570
Vstřikovací tlak [MPa]	30,46	238

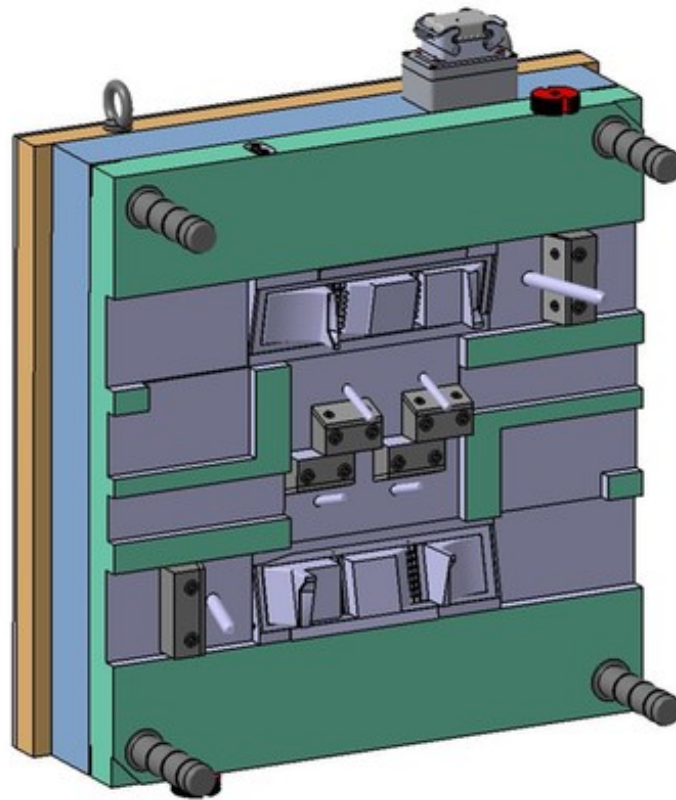
6 NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY

Navržená vstřikovací forma je vysoká 603 mm, dlouhá 796 mm a široká 746 mm. Tyto rozměry byly určeny s ohledem na požadavky odformování dílu. Jedná se o dvounásobnou vstřikovací formu s horkým vtokovým systémem a celkem dvanácti temperačními okruhy. Je složena ze statické části, pohyblivé části, vyhazovacího paketu, horkého bloku a čtyř hydraulických válců. V izolačních deskách jsou na pozicích šroubů a centrovacích pouzder zhotoveny otvory pro zlepšení manipulace s formou.

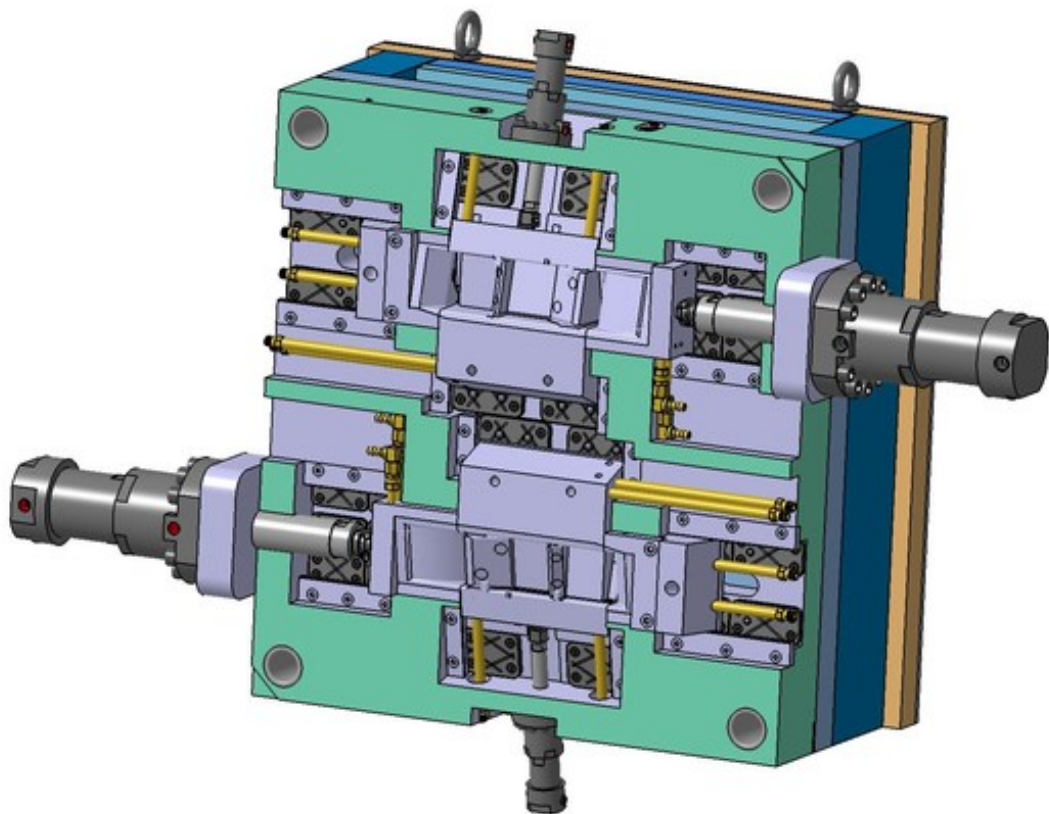
Model formy byl zhotoven za pomoci normalizovaných dílů z databáze firmy Meusburger specializující se na výrobu součástí pro vstřikovací formy. Některé díly byly modifikovány.



Obrázek 47 Sestava vstřikovací formy



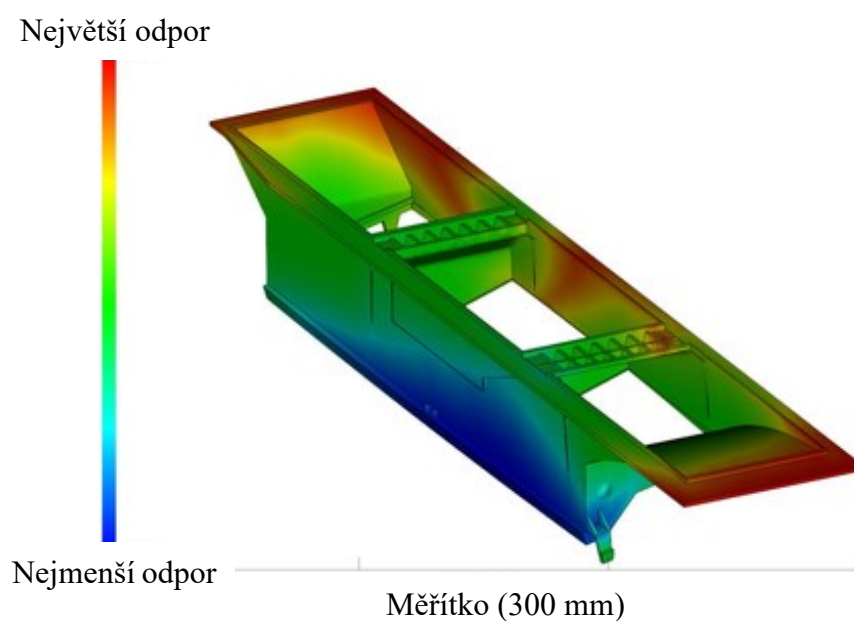
Obrázek 48 Statická polovina formy



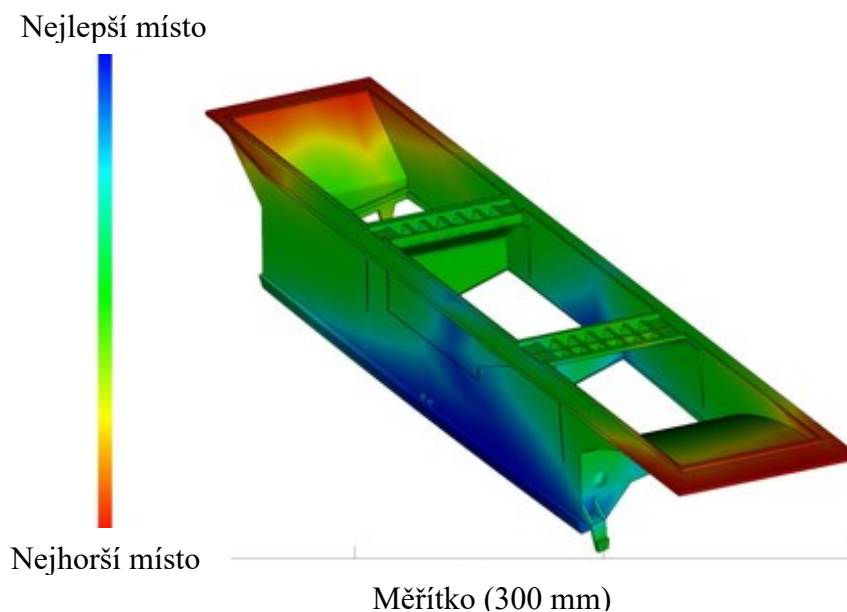
Obrázek 49 Pohyblivá polovina formy

6.1 Umístění vtokového ústí

S určením místa vtokového ústí napomohlo vyhotovení simulace plnění. Výsledkem bylo grafické označení nejvhodnější lokality pro umístění ústí vtoku. Druhou částí simulace je nalezení míst s největším odporem toku taveniny. Oba výsledky neberou v potaz zaformování dílu. Mnohdy nelze umístit vtokové ústí ve vyznačených oblastech. Z tohoto důvodu byla zvolena jiná pozice ústí vtoku.

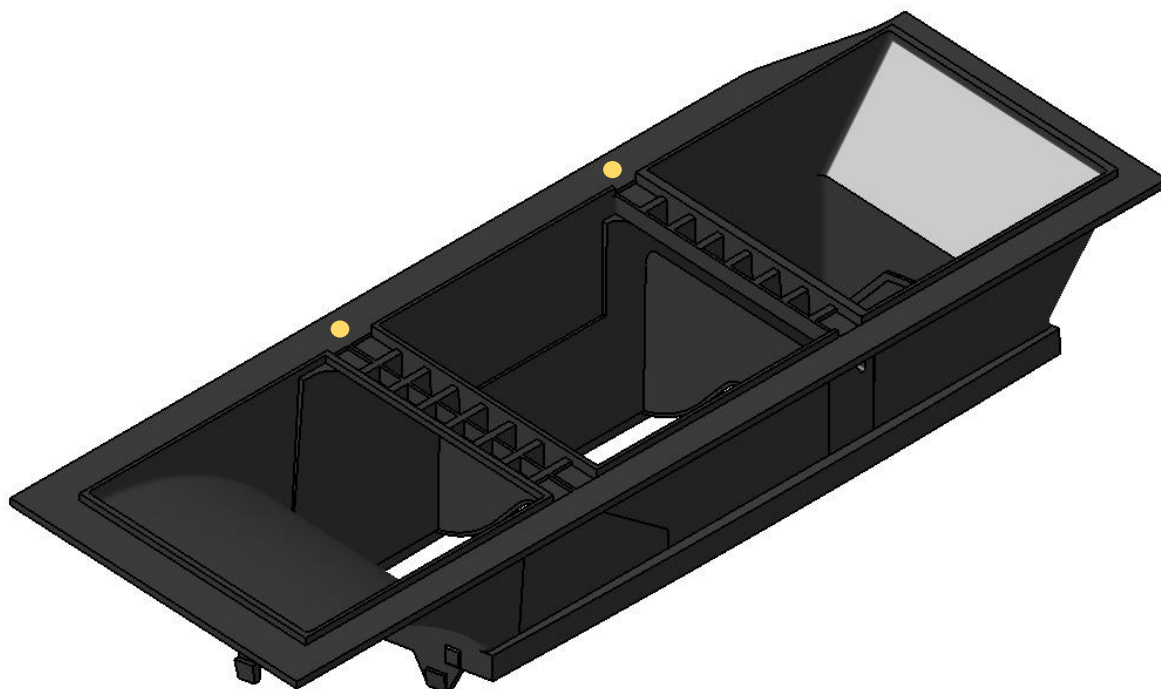


Obrázek 50 Odpor toku polymerní taveniny



Obrázek 51 Umístění vtokového ústí

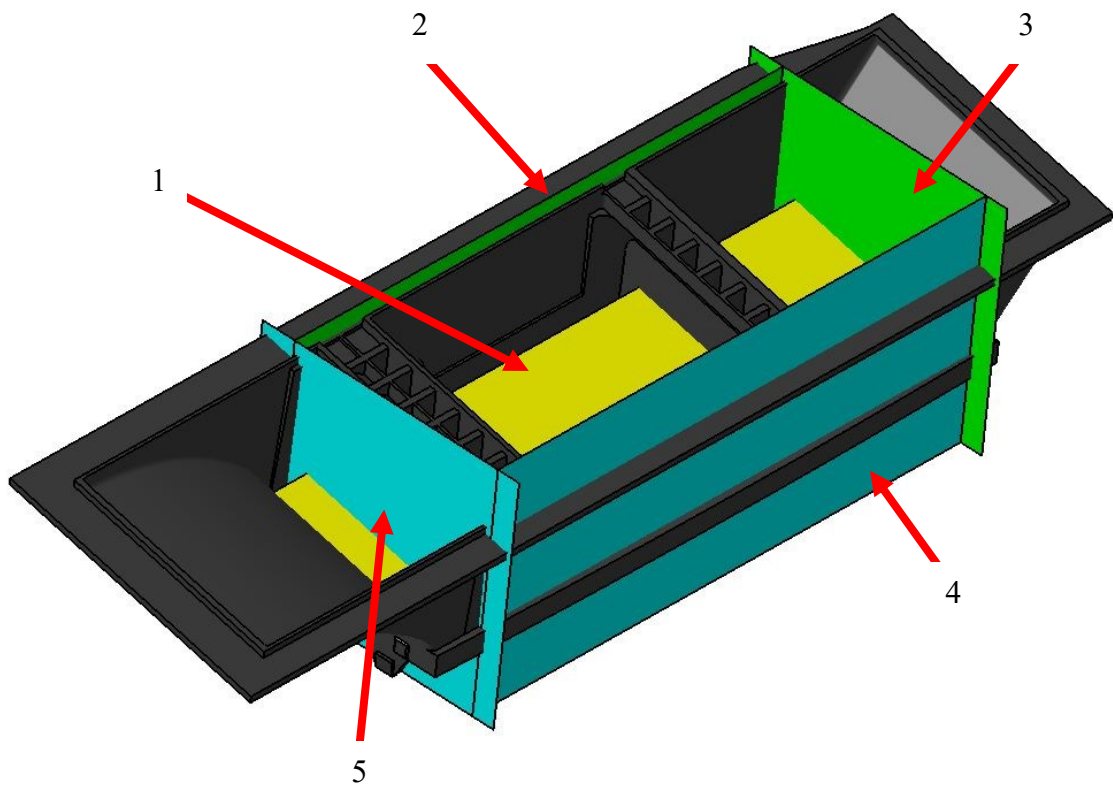
Pro zadaný díly se vybraly celkem dvě lokality k umístění vtokového ústí. Ty jsou vyznačeny žlutými body na obrázku. Plnění pomocí dvou ústí vtoku bylo zvoleno pro zajištění tvorby úplného výstřiku. V porovnání s výsledkem analýzy z Moldflow se jedná o pozice nacházející se v neutrální zelené oblasti.



Obrázek 52 Zvolené umístění vtokového ústí

6.2 Zaformování součásti a tvarové díly

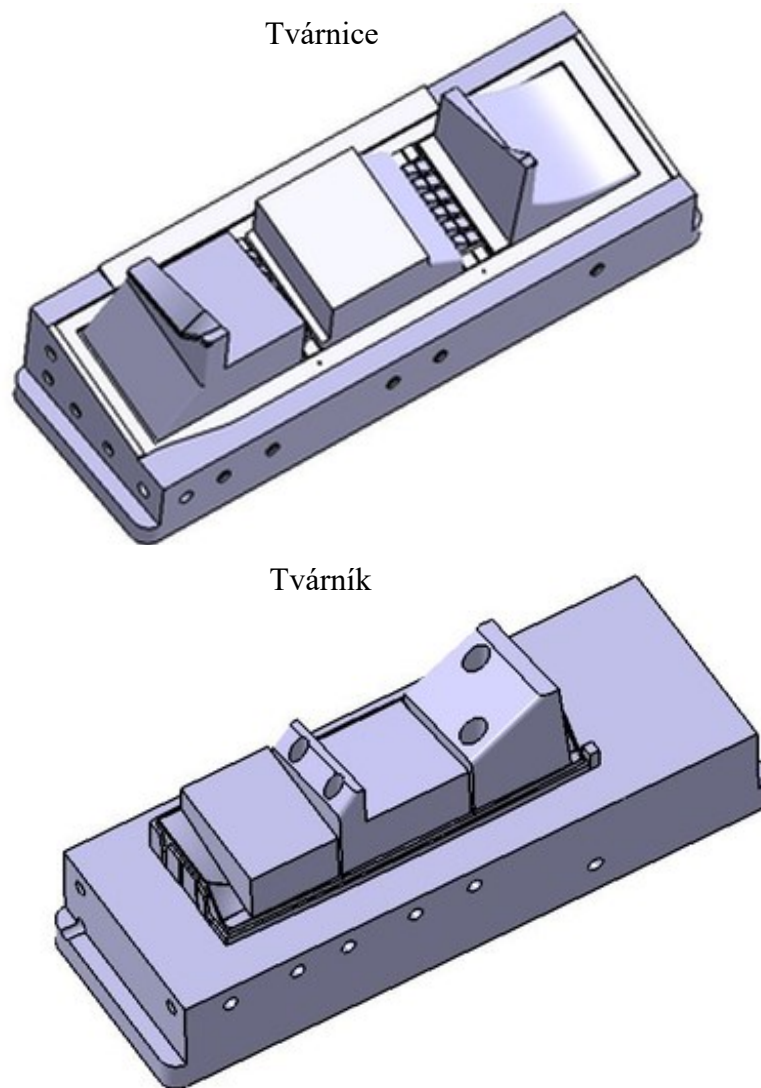
Komplikovaný tvar dílu vyžadoval k zaformování celkem pět dělicích rovin. Jedná se o jednu hlavní dělicí rovinu a čtyři dělicí roviny vedlejší. Jednotlivé roviny jsou vyznačeny na obrázku 52. Žlutá barva značí hlavní dělicí rovinu. Roviny nacházející se pod čísly 2 až 4 jsou vedlejší. V zeleně označených rovinách dochází k odformování pomocí posuvných jednotek, kdežto modrá barva je použita pro čelisti napojeny na hydraulické válce. S ohledem na smrštění použitého materiálu byl před zaformováním vymodelovaný díl zvětšen o 0,5 % ve všech směrech.



Obrázek 53 Hlavní a vedlejší dělicí roviny

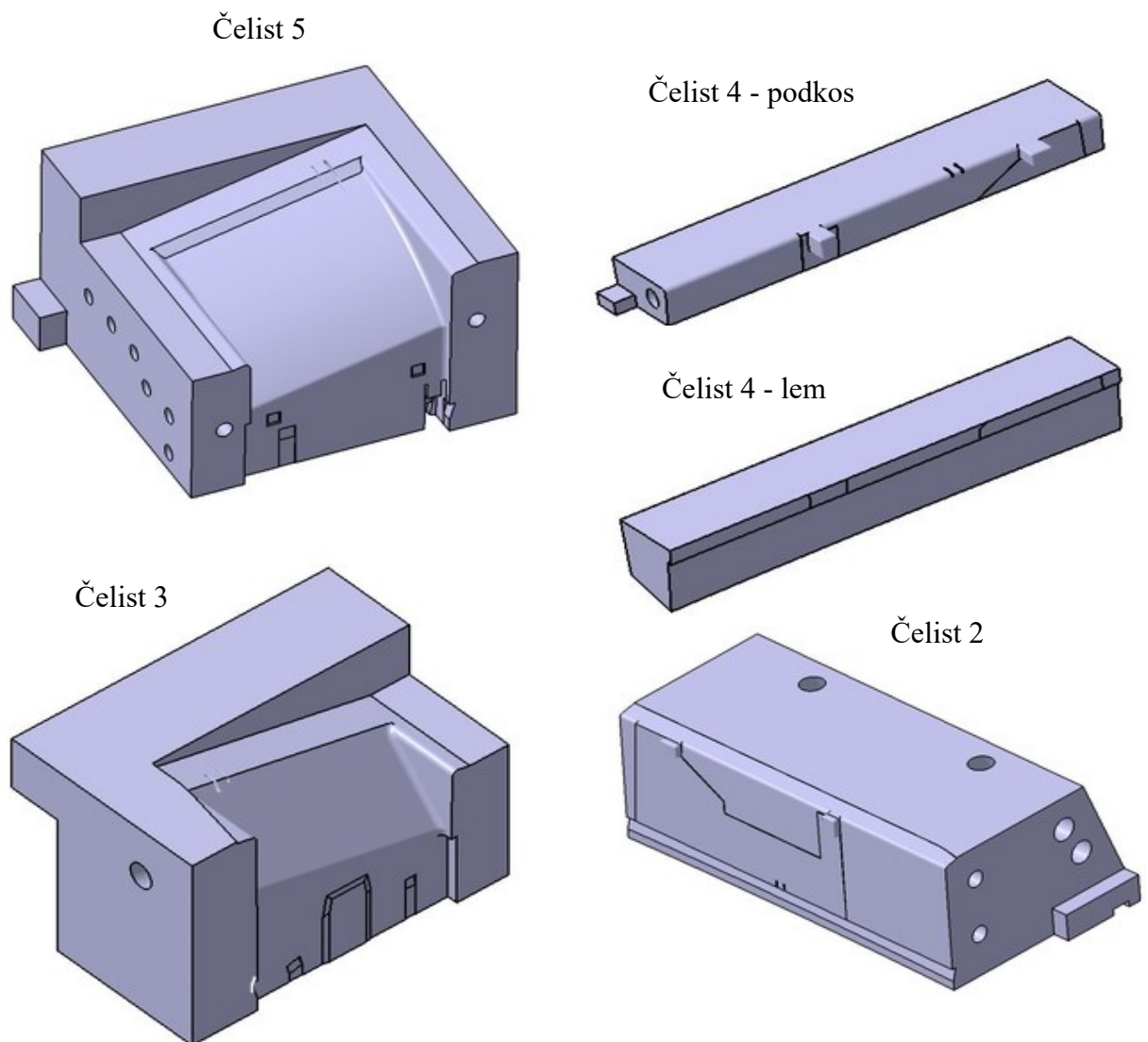
Všechny tvarové části jsou navrženy jako vyměnitelné vložky. Tvárníky s tvárnicemi jsou umístěny v kotevních deskách a před vypadnutím jsou z jedné strany zajištěny úložným otvorem. Na druhé straně je tvárník zajištěný izolační deskou a tvárnice mezideskou, ve které je umístěn horký blok. V případě poškození jsou vložky snadno vyměnitelné. Zároveň

se sníží náklady spojené s cenou nástrojové oceli. Takto se z oceli třídy 19 vyrobí pouze zmíněné vložky a desky již mohou být zhotoveny z oceli konstrukční.



Obrázek 54 Tvárnice a tvárník

Aby bylo možné odformovat díl ve všech vyznačených rovinách, tak se rozdělila čelist vytvořená pro rovinu s označením 4 na dva samostatné díly. První část, která je napojena na hydraulický válec uvolní podkos a druhá část uvolňuje lem. Pohyb takto rozdělené čelisti je ve dvou samostatných osách.

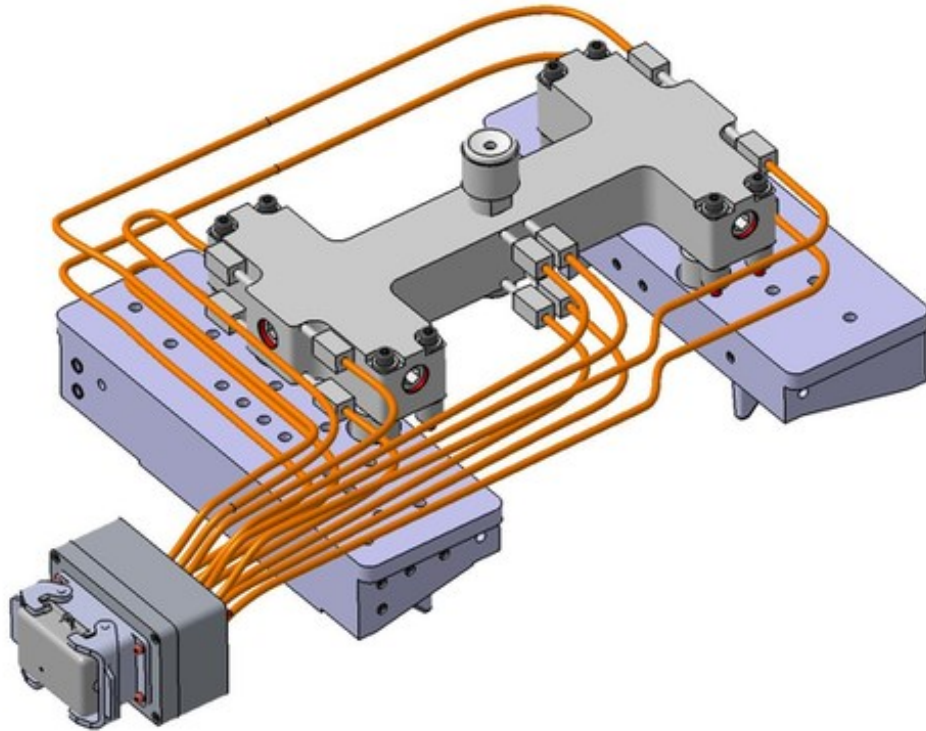


Obrázek 55 Tvarové čelisti

6.3 Vtokový systém

V rámci zadání diplomové práce byl zadán horký vtokový systém. Rozvod taveniny zajišťuje vyhřívaný rozvodný blok s čtyřmi tryskami. Blok je uspořádán do písmene H. Vzdálenost trysek od vtokové vložky je 140 mm a samotné trysky každé polovině bloku mají mezi sebou rozteč 105 mm. Uspořádání rozvaděče bylo zvolena na základě požadovaného rozmístění vtokových ústí na vstříkovaném dílu. I přes navýšení pořizovacích a provozních nákladů na vstříkovací formu byl horký vtokový systém vybrán z důvodu snížené spotřeby materiálu, který by připadl na studený vtokový systém. Zmenšuje se tak

množství odpadního materiálu, který by se opětovně vracel do výroby. Kromě teplotní degradace na zvolený materiál má negativní vliv i změna výztužných vláken opětovným zpracováním polymeru. Tímto se podpoří zachování stejné jakosti dílu.



Obrázek 56 Horký blok a jeho zapojení

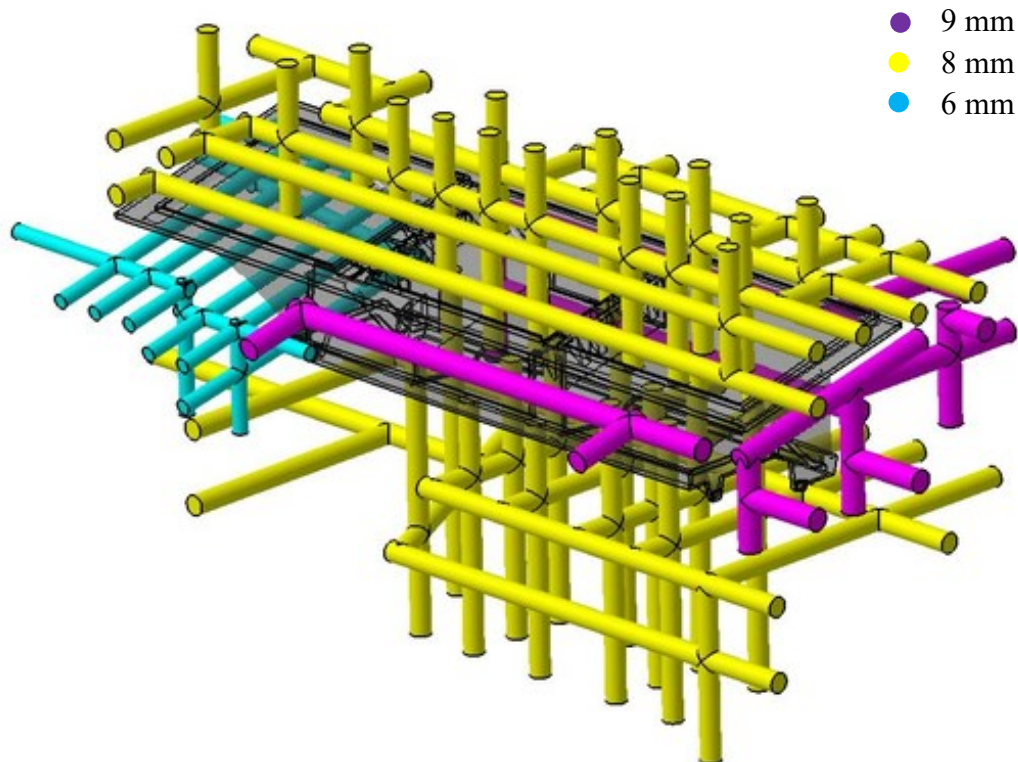
6.4 Temperační systém

Snahou při tvorbě temperačního systému bylo co nejvěrohodněji kopírovat tvarové plochy společně s dodržением konstrukčních zásad navrhování temperačních okruhů. Zároveň všechny okruhy jsou plně vyrobitelné konvenčními technologiemi. K vytvoření temperačních okruhů bylo použito záslepek s O-kroužky, kuličkových záslepek a válcových záslepek. Z důvodu tvarové složitosti dílu se do temperačních okruhů tvárníku a tvárnice zařadily i ploché přepážky. Dosáhlo se tak přivedení média k vnitřním obvodovým stěnám. U tvárníku zaujímají přepážky primární místa odvodu tepla. Kromě výše zmíněných komponentů je provedeno těsnění pomocí O-kroužků u tvárníků a tvárníc v místech, kde dochází ke vstupu a výstupu temperačního média. Cílem je zamezení úniku média do formy.

Vystříknutý díl je temperován celkem šesti temperačními okruhy. Zvolené kanálky jsou navrženy ve třech rozdílných rozměrech, pro jednodušší orientaci jsou na obrázku 57 změny v průměru barevně označeny. V tvárníku s tvárnicí mají průměr 8 mm. Zatímco v čelistech

je průměr kanálků 9 mm. Jedinou výjimkou je odformování v rovině označené číslem 5. Zde má navržený temperační okruh kanálky s průměrem 6 mm.

Zvoleným temperačním médiem je voda, ale díky tendenci zanášení kanálků usazeninami je namíchána s etylenglykolem. Nejkritičtější jsou temperační okruhy s 6 mm kanálky. Poměr jednotlivých složek média činí 80 % voda a zbylých 20 % činí etylenglykol.



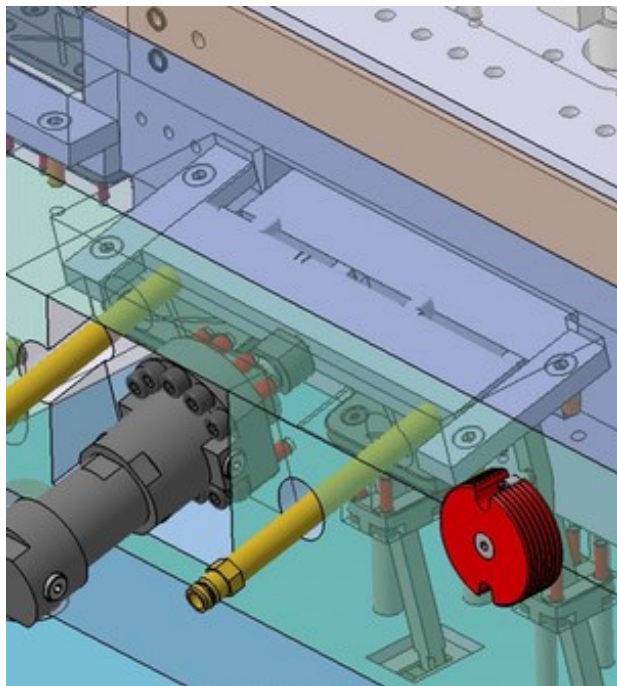
Obrázek 57 Rozložení temperačních okruhů

6.5 Odvzdušňovací systém

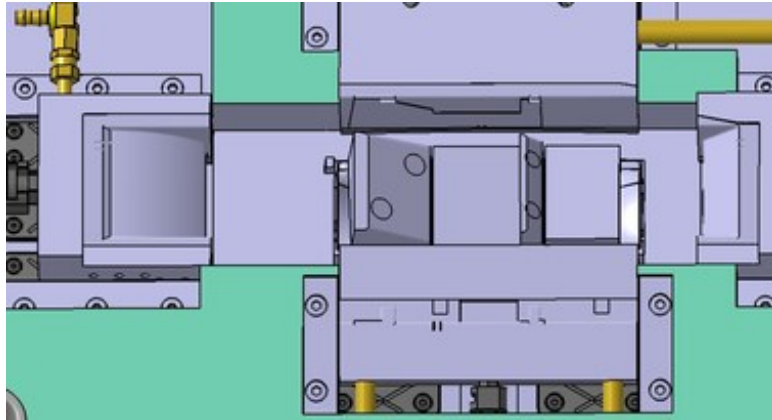
U navržené vstřikovací formy není vytvořen odvzdušňovací systém. S přítomností vzduchu ve formě se zvyšuje riziko vzniku vad. Díky způsobu zaformování dílu je předpokládáno, že vzduch může uniknout vůlemy v dělicí rovině, mezi tvarovými čelistmi i vyhazovači.

6.6 Odformování dílu

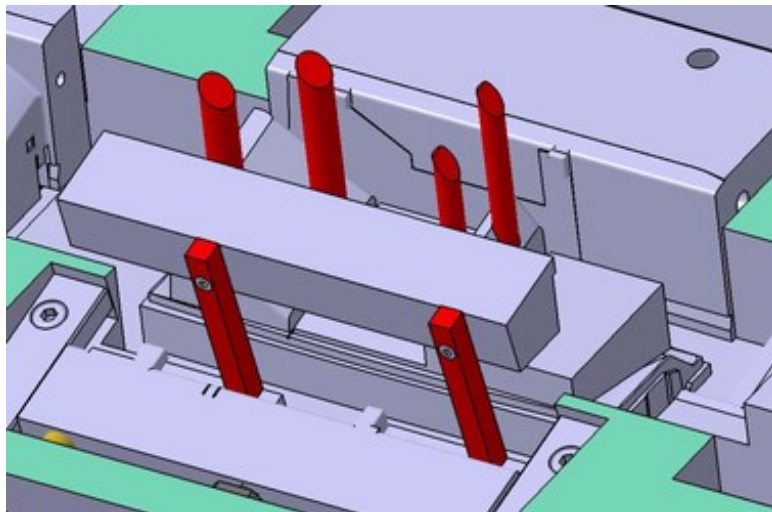
Po zamrznutí 90 % vrstev polymeru na stanovené vyhazovací teplotě se zahájí proces odformování. počátek této fáze cyklu lze posunout. Stačí, aby byl díl dostatečně ochlazen v místě vyhazovačů, ale pak se značně zvýší tvarové změny, ke kterým dojde při ochlazování mimo formu. Před otevřením formy se jako první uvolní pomocí hydraulického válce podkos. Čelist se posune válcem po dráze dlouhé 60 mm. Tato délka byla zvolena k vytvoření dostatečně velkého prostoru k odformování lemu. Poté se již forma může začít otevírat. Po uvolnění i zbylých stran dílu přijde na řadu vyhazovací paket. V tomto paketu jsou kromě vyhazovacích kolíků uloženy i jednotky šikmých vyhazovačů v nich jsou zasazeny šikmé vyhazovače, které ve formě plní funkci táhel. Pomocí těchto vyhazovačů dojde k uvolnění lemu nacházejícím se pod podkosem. Při tom působí na vstříkovaný díl i vyhazovače.



Obrázek 58 Odformování podkosu v uzavřené formě

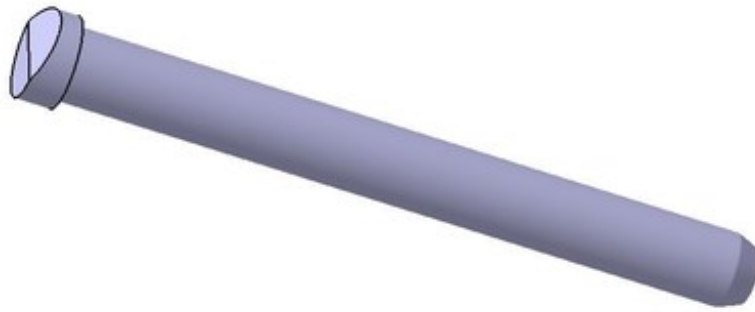


Obrázek 59 Otevření formy a odformování ve zbylých rovinách



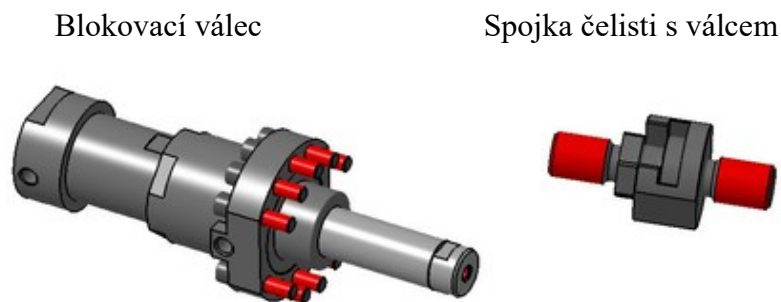
Obrázek 60 Odformování lemu a vyhození výrobku z formy

Volba délky šikmého kolíku pro posuvné díly byla zohledněna minimální potřebnou délkou a bezpečnostní rezervou 5 mm. Výsledná dráha, kterou by měla urazit čelist se dosadila do vzorce goniometrických funkcí, a tak se určila potřebná délka kolíku. Následně se k tomuto rozměru hledal v katalogu normalizovaných součástí odpovídající šikmý kolík. Díky rozměrové omezenosti normalizovaných dílů byl nakonec vybrán kolík s hodnotou nejvíce podobnou té vypočítané. Každá z obou čelistí umístěných v posuvných jednotkách má vlastní průměr a délku kolíku. Ve vedlejší rovině číslo 2 je použito dvou šikmých kolíků o délce 120 mm a průměru 12 mm. Dráha, kterou lze odformovat je 22 mm. Kdežto v rovině 3 je pouze jeden kolík s průměrem 18 mm a délkou 180 mm. Posun čelisti je 43 mm. V obou případech jsou kolíky umístěny pod úhlem 18° .



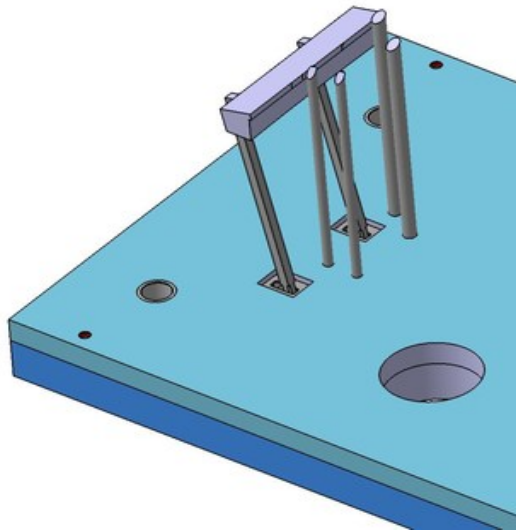
Obrázek 61 Šikmý kolík

Díky relativně velké hloubce, která se odformovává v rovině 5 uvedené na obrázku 53 je použit na tuto tvarovou čelist hydraulický válec. Délka posuvu je rovna 90 mm, a proto se již nejedná o vhodný případ k použití posuvné jednotky s šikmým kolíkem. V katalogu normalizovaných součástí firmy Meusburger jej lze nalézt pod označením blokovací válec v sekci hydraulických systémů. Zvolený válec má maximální zdvih 120 mm. Hydraulický válec k odformování podkosu má zdvih 60 mm. Oba válce jsou k formě připevněny imbusovými šrouby.



Obrázek 62 Blokovací válec a spojka

Ve vyhazovacím paketu vybaveným o dorazové destičky a pouzdra vodících čepů paketu je umístěno osm vyhazovačů s jednostranným zajištěním proti pootočení. Na vystříknutý díl působí dva vyhazovače o průměru 14 mm a další dva s průměrem 10 mm. Dále se zde nachází čtyři šikmé vyhazovače s jednotkami k odformování lemu. Mezi kotevní a opěrnou deskou jsou vloženy dva podpěrné čepy o průměru 100 mm. Na jejich pozicích se vyhotovili do vyhazovacího paketu dva otvory s vůlí 0,5 mm.



Obrázek 63 Vyhozovací paket

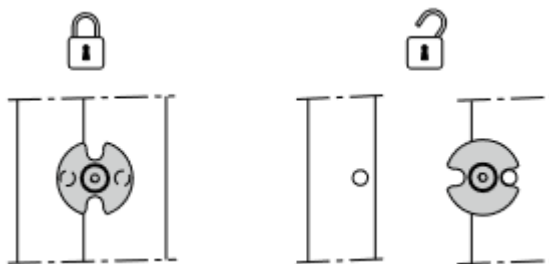
6.7 Transportní prvky

Vstřikovací forma je vybavena čtyřmi závěsnými oky. Řešení zohledňuje rozložení jednotlivých systémů na vstřikovací formě. Konkrétně se jedná o umístění hydraulický válců a pozici kabelového krytu se zásuvkou pro napájení horkého vtokového systému. Transportní oka byla zvolena na základě maximální zátěže, kterou dokáží přenést. Hmotnost vstřikovací formy je 3234 kg a maximální nosnost čtyř ok činí 3440 kg.



Obrázek 64 Závěsné oko

Aby při přemísťování formy nedošlo k jejímu otevření v dělicí rovině, tak je vybavena o dva transportní zámky. Ty jsou složeny ze dvou kolíků, těla zámku a osazeného lícovacího šroubu s pružinou. Tento šroub společně i s tělem zámku se připevní do jedné poloviny formy a k tomu se namontují na stanovené pozice do každé z polovin formy i jeden kolík.



Obrázek 65 Princip funkce transportního zámku [60]

Se zařazením pojistek vyhadzovacího paketu se do vstříkovací formy nepočítalo. I přes fakt, že posunutí paketu při manipulaci s formou je příčinou poničení tvarových dílů nebo vyhadzovačů. Místo pojistek zabraňuje jeho posunutí samotná konstrukce formy. Konkrétně se jedná o kombinaci šikmých vyhadzovačů a tvarové čelisti lemu. Ve stavu uzavřené formy je čelisti zabráněno pohybu a šikmé kolíky, které jsou k ní připevněny a zároveň uloženy i v posuvných jednotkách blokují pohyb vyhadzovacího paketu.

7 OVĚŘENÍ NÁVRHU VSTŘIKOVACÍ FORMY

Konstrukční návrh vstřikovací formy byl ověřen v simulačním softwaru Moldflow 2023. Zhotovené analýzy jsou zaměřeny na typ vtokového systému. Předmětem simulací je rozdíl mezi studeným vtokovým systémem a navrženým horkým vtokem. Pro získání dobrých výsledků se provedla úprava modelu smazáním rádiusů do velikosti R2.

S ohledem na zaformování dílu a temperační okruhy byl pro simulaci studeného vtokové systému zvolen bodový vtok s dvěma vtokovými ústí.

7.1 Tvorba sítě a její ověření

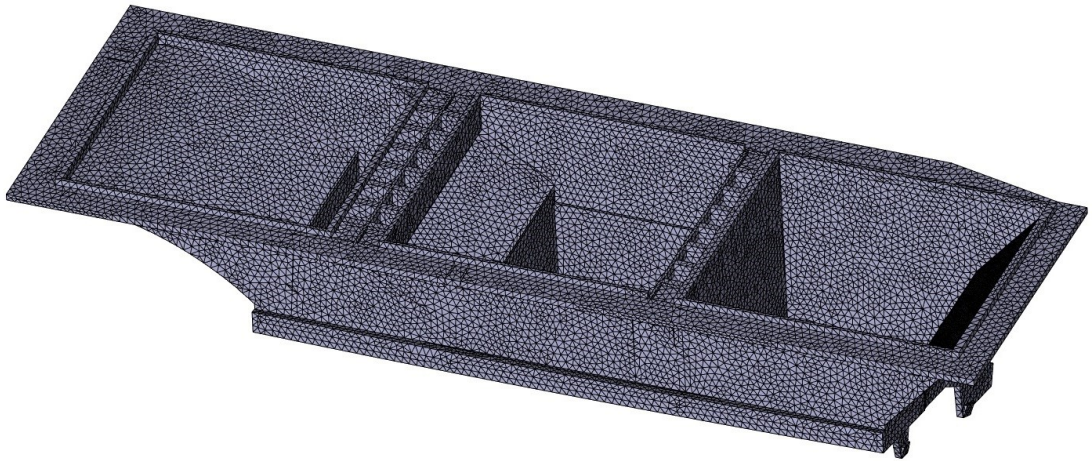
Vložený model byl vysítován typem sítě dual domain. Jedná se o síť s vlastnostmi zkombinovanými s 3D a 2D sítí. I když přesnějších výsledků se dosahuje pomocí 3D sítí, tak předností zvolené sítě je získání výsledků za podstatě kratší časový úsek s relativně velkou přesností. Výsledná dual domain síť je složena z několika na sobě navrstvených 2D sítí. Velikost elementu sítě byl nastavena na 2 mm. Cílem bylo dosažení co největší hodnoty procenta shody (match percentage) a nejmenší hodnoty poměru stran (aspect ratio). V případě nedosažení limitních hodnot těchto dvou parametrů by se změnila velikost elementu nebo provedla lokální oprava sítě. Získané výsledky splňují podmínku doporučených hodnot, v případě procenta shody je hodnota větší o 15,1 % a poměr stran nedosahuje maximální hodnoty 20. Výsledky z kontroly vytvořené sítě modelu je uveden v tabulce 3.

Tabulka 3 Kontrola kvality sítě modelu

Velikost elementu [mm]	2
Procenta shody [%]	95,1
Poměr stran [-]	14,93

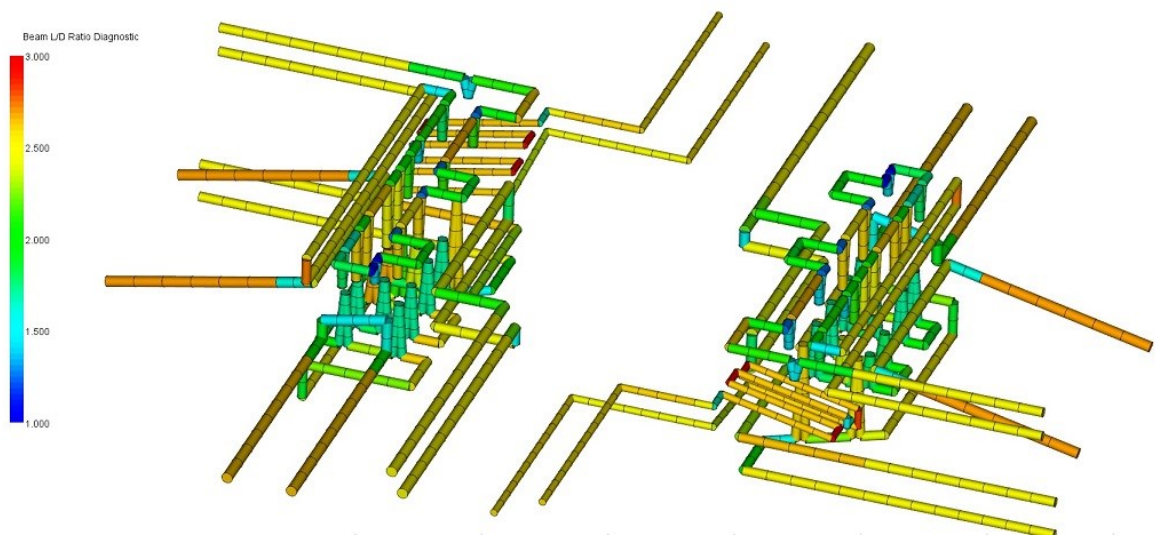
Geometrie horkého vtoku byla vytvořena podle použitého vyhřívaného rozvaděče s tryskami v navržené vstřikovací formě. U studeného vtokového systému došlo k zhotovení zcela nové geometrie. S ohledem na zaformování dílu byl zvolen bodový vtokový systém. Vstřikovací forma by tímto návrhem přešla z dvoudeskové na třideskovou. Pozice vtokových ústí je totožná jako u horského vtokového systému. Rozvodný kanálek je tvořen z kruhového a

lichoběžníkového profilu. Průměr kruhové části je 8 mm a základny lichoběžníků mají 8 mm a 10 mm, výška činí 8 mm. Vtokové ústí přechází z průměru 2 mm na 8 mm.

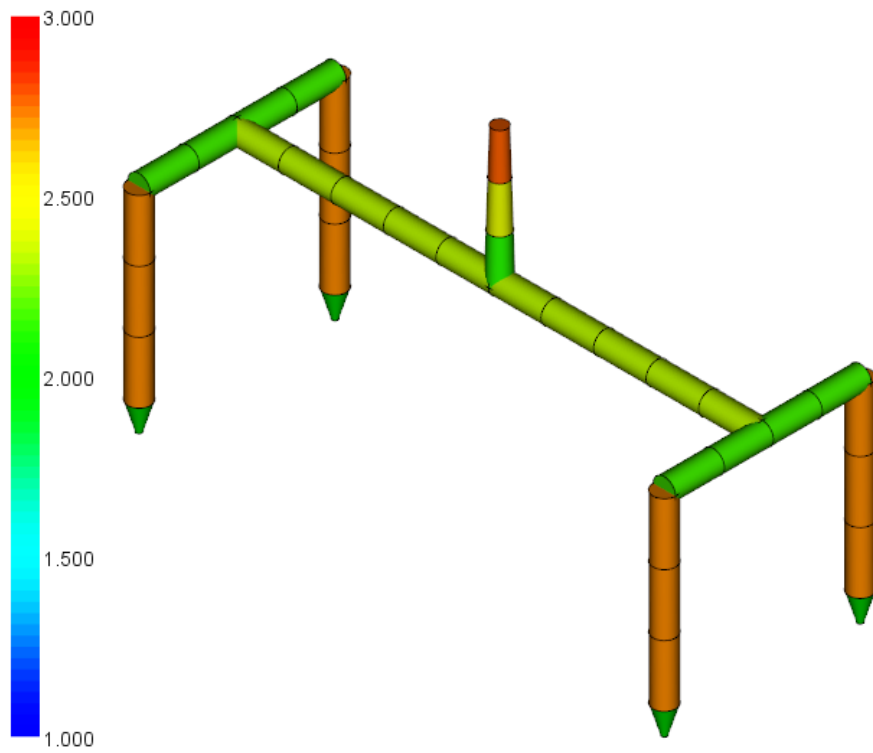


Obrázek 66 Vysít'ovaný model dílu

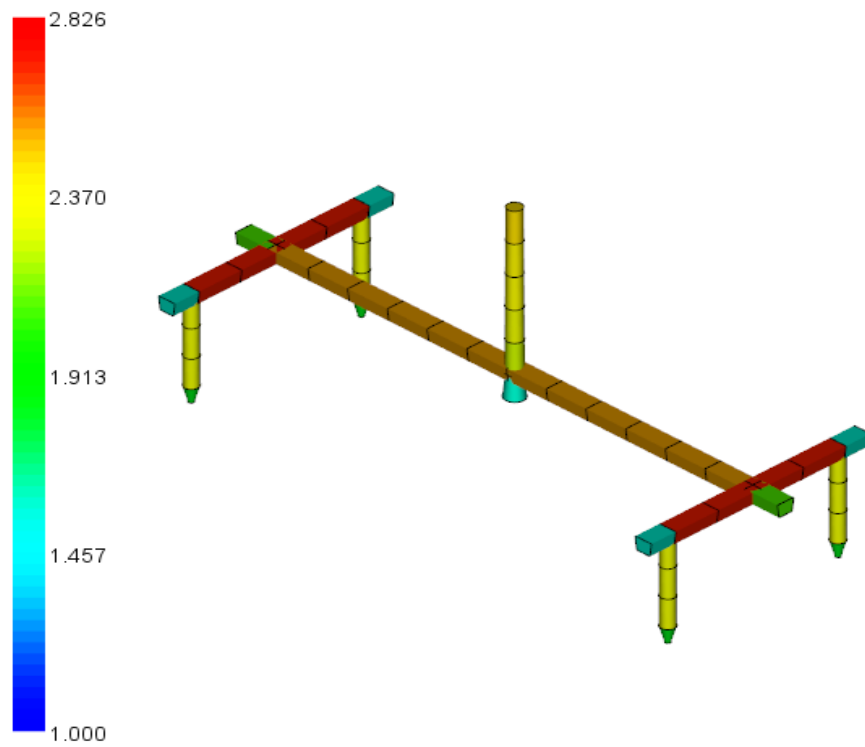
Kromě modelu dílu byl vysít'ován i temperační a vtokový systém. Zde již byla velikost elementu značně navýšena. Kvalita sítě byla kontrolována pomocí poměru L/D. Rozsah by se měl pohybovat na hodnotě 2,5, nicméně této hodnoty nelze vždy dosáhnout. Všechny úseky, které se doporučené velikost poměru neblížily se nechaly přesít'ovat. V některých částech se však jedná o nedosažitelné kritérium. Konkrétním příkladem může být vtokové ústí.



Obrázek 67 Kvalita sítě temperačního systému



Obrázek 68 Kvalita sítě horkého vtokového systému



Obrázek 69 Kvalita sítě studeného vtokového systému

7.2 Nastavení okrajových podmínek

Ověřování probíhalo na základě výsledků získaných z kompletní analýzy. Ta je složena ze čtyř typů simulací. Jedná se o kombinaci cool, fill, pack a warp. Po všech kontrolách sítí se nadeřinoval zvolený polyamid z knihovny polymerů. Dále se zvolil bod, kterým bude vstupovat tavenina do formy. V obou případech vtokového systému byl použit pouze jeden bod.

Obdobně jako v případě vtokového systému, tak i u temperace proběhlo definování míst pro vstup a výstup temperačního média. Po určení všech pozic se nastavil typ média s jeho teplotou a rychlostí proudění. Zvolená hodnota teploty temperačního média byla na základě rozsahu teploty stěny formy z materiálového listu a rychlost proudění se nastavila pomocí Reynoldsova čísla, aby bylo zajištěno turbulentní proudění.

Tabulka 4 Nastavení temperačního média

Typ temperačního média	voda (80 %) + etylenglykol (20 %)
Teplota temperačního média [°C]	82
Rychlost proudění [Re]	10000

Procesní parametry se nastavují ve třech krocích. První částí je definování podmínek chlazení. Teplota taveniny společně i s teplotou stěny formy byly určeny z rozsahu teplot uvedených v materiálovém listě. Doporučená teplota taveniny je 290 °C a nastavená teplota stěny je v uvedeném teplotním rozsahu. Množství zamrzlých vrstev se stanovilo na 90 %, po dosažení této hodnoty je možné odformovat a vyhodit díl z formy k dochlazení mimo formu.

Tabulka 5 Volba okrajových podmínek chlazení

Teplota taveniny [°C]	290
Otevírání formy [s]	5
Teplota stěny formy [°C]	87
Vyhazovací teplota [°C]	130
Minimum zamrznutých vrstev [%]	90

Další částí je nastavení podmínek plnění a dotlaku. Doba plnění je stanovena na 1,3 s. Za tento časový úsek by měla být dostatečně vyplněna dutina formy. Fáze dotlaku je zahájena po vyplnění 98 % dílu a působí po dobu 9 s. Jeho velikost je nastavena na hodnotu rovnou 90 % vstřikovacího tlaku.

Tabulka 6 Volba okrajových podmínek plnění a dotlaku

Doba plnění [s]	1,3
Přepnutí na dotlak po zaplnění objemu [%]	98
Trvání dotlaku [s]	9
Velikost dotlaku [%]	90
Zahrnutí orientace vláken	ANO

Po fázi plnění a dotlaku se nastavují podmínky deformací. Software umožňuje zvolit celkem ze tří deformačních podmínek. V nastavených simulacích jsou zahrnuty všechny dostupné deformační podmínky.

Tabulka 7 Volba okrajových podmínek deformací

Teplotní roztažnost	ANO
Příčné deformace	ANO
Rohové efekty	ANO

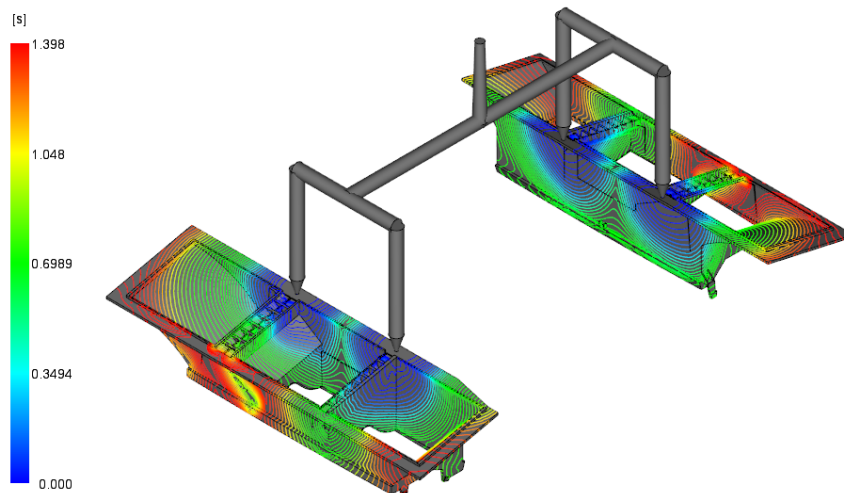
7.3 Výsledky simulací

Výsledky ze simulací jsou zaměřeny na plnění vstřikovací formy, místa se studenými spoji a teplotu temperačního média se stěnou formy. Zakončeny jsou určení míry deformace dílu.

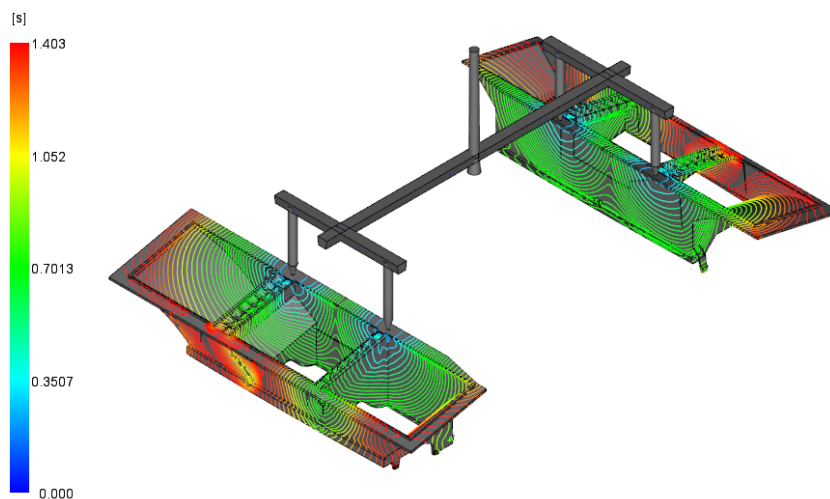
7.3.1 Doba plnění (fill time)

Z výsledku simulace doby plnění lze určit až tři různé výsledky. Kromě času, určeného pro plnicí část vstřikovacího cyklu je umožněno vhodně nastaveným grafickým vykreslení odhadnout i místa vzniku studených spojů a také stav zaplnění dutiny formy při přepnutí na dotlak. Pro tyto účely byla provedena úprava výsledku převedením stínovaného znázornění na vykreslování pomocí vrstevnic. Na modelu lze pozorovat místa, ve kterých je absence vrstevnic. To znamená, že zde v průběhu fáze plnění nedotekla tavenina a tato část bude zaplněna pomocí dotlaku. Kde dojde k přiblížení vrstevnic dvou proudů taveniny, tak vznikají studené spoje. Samotná délka doby plnění je podle výsledku kratší u horkého vtokového systému

Horký vtokový systém



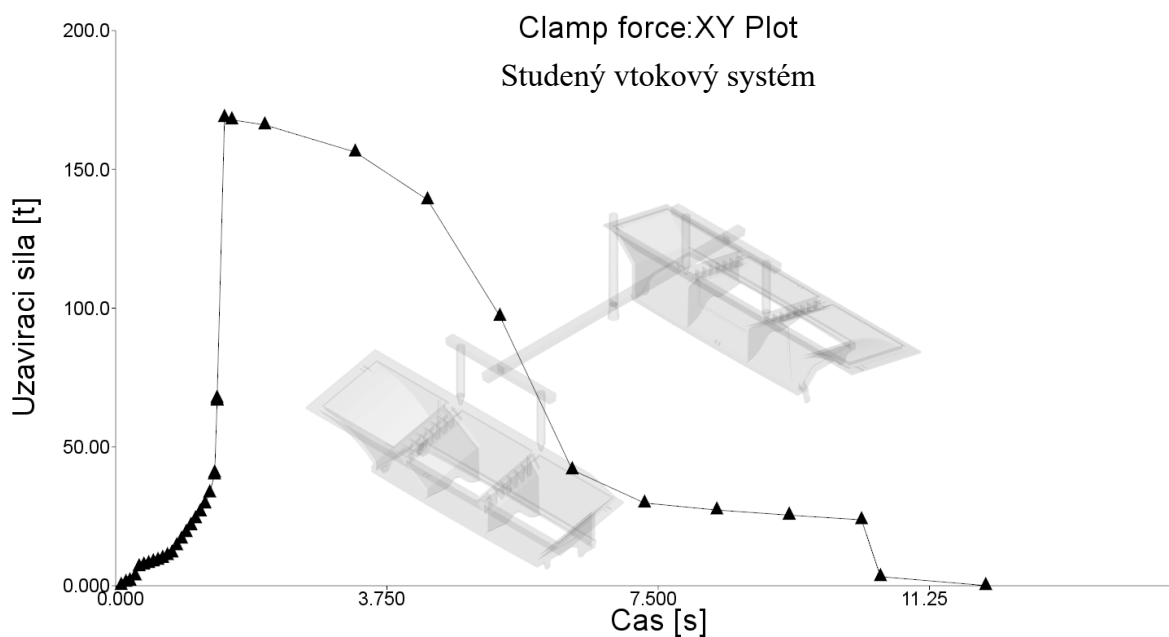
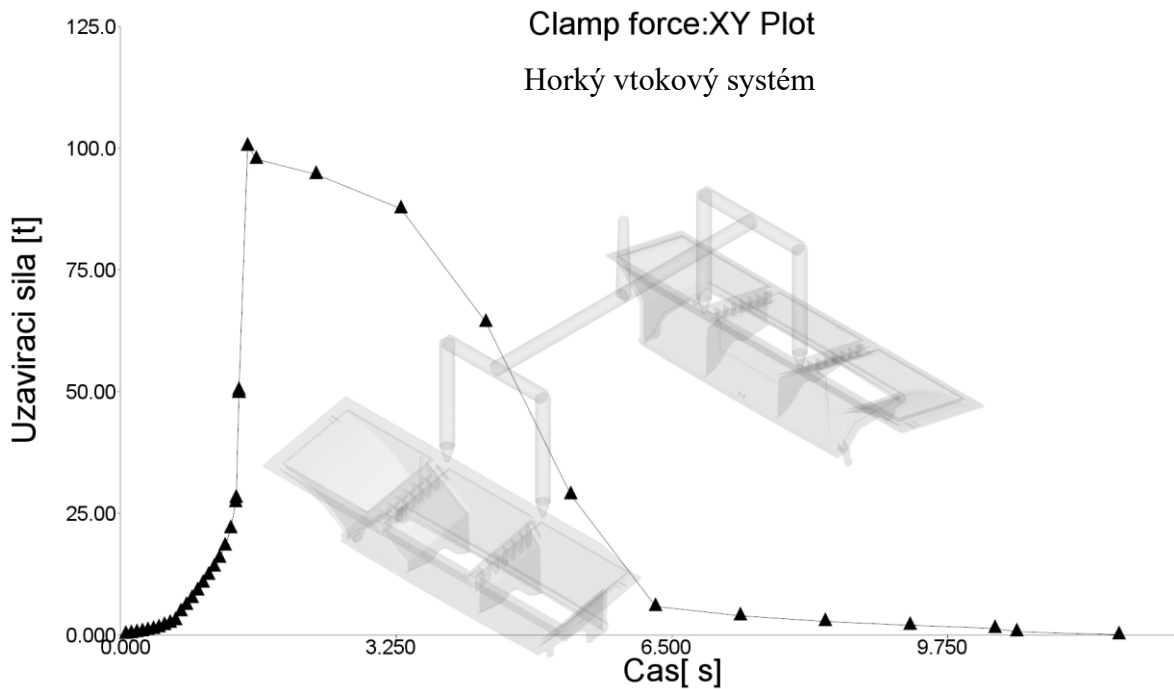
Studený vtokový systém



Obrázek 70 Doba plnění

7.3.2 Uzavírací síla (Clamp force)

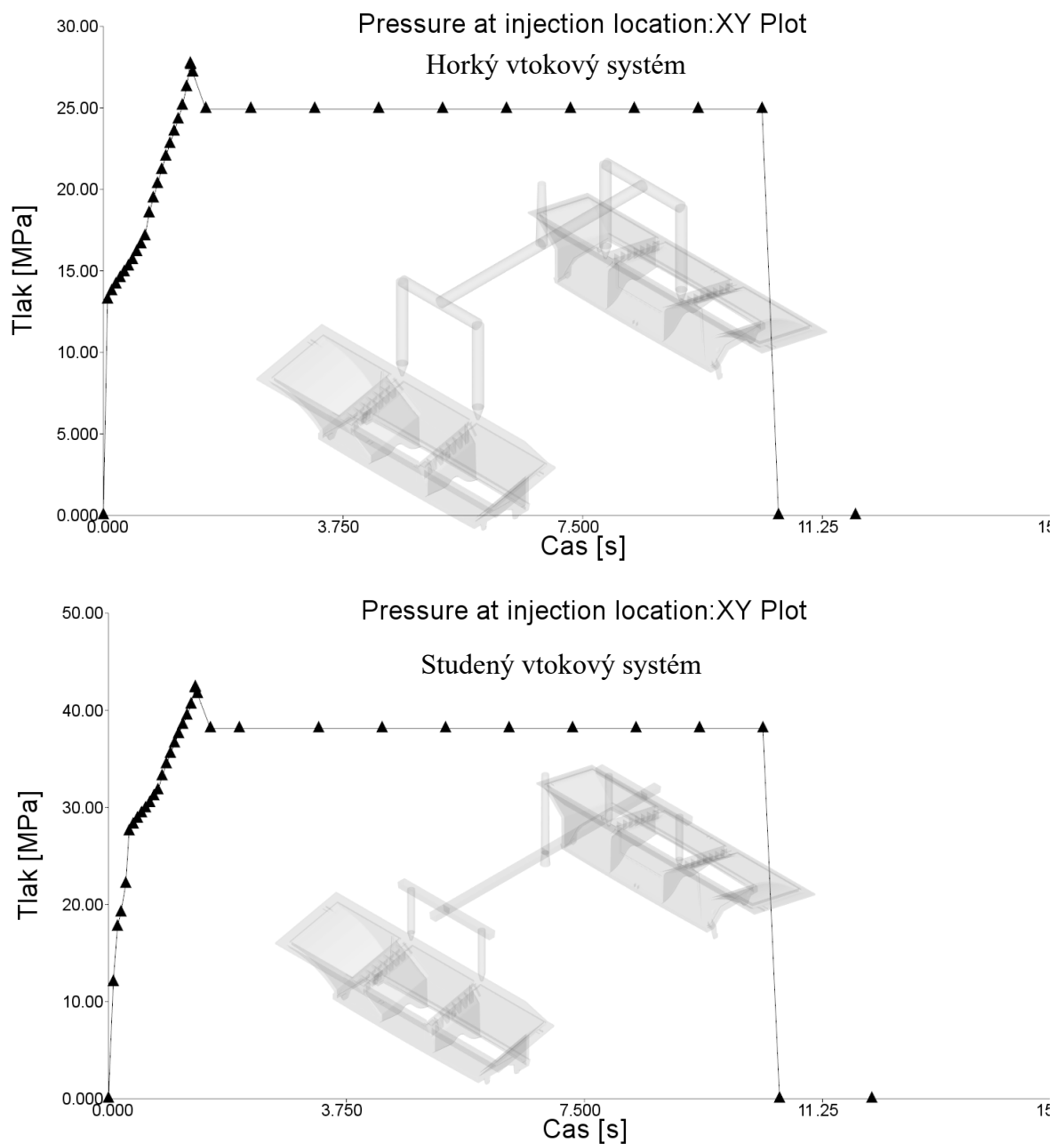
V obou případech vtokových systémů zvolený vstřikovací stroj udrží formu uzavřenou i po započítání bezpečnostního přídatku 20 %. Maximální velikost generované síly mezi horkým a studeným vtokovým je odlišná. U horkého vtoku je síla stanovena na 100,4 t a u studeného vtoku má velikost 168,6 t.



Obrázek 71 Závislost uzavírací síly na čase

7.3.3 Tlak v místě ústí vtoku (Pressure at injection location)

Vstřikovací tlak je stejně důležitým parametrem jako velikost uzavírací síly. Výsledkem simulace je grafické zobrazení průběhu tlaku. Na začátku křivky lze pozorovat nárůst tlaku v průběhu fáze plnění. Oproti studenému vtokovému systému, který potřebuje tlak 42,36 MPa má horký systém nižší hodnotu tlaku, a to 27,69 MPa. K výsledkům není přičtena rezerva 10 %. Po dosažení tlakové špičky dojde přepnutí na fázi dotlaku. Podle nastavené okrajové podmínky dojde k poklesu na 90 % vstřikovacího tlaku. A na této hodnotě tlak setrvává do skončení dotlakové fáze.

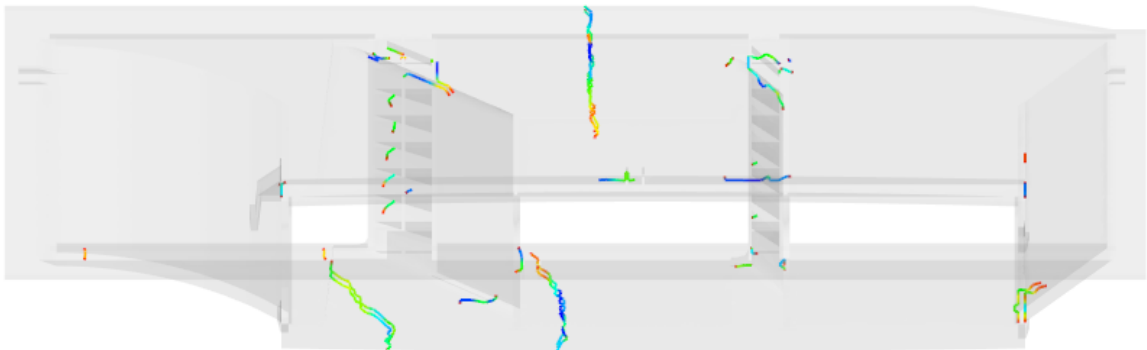


Obrázek 72 Závislost vstřikovacího tlaku na čase

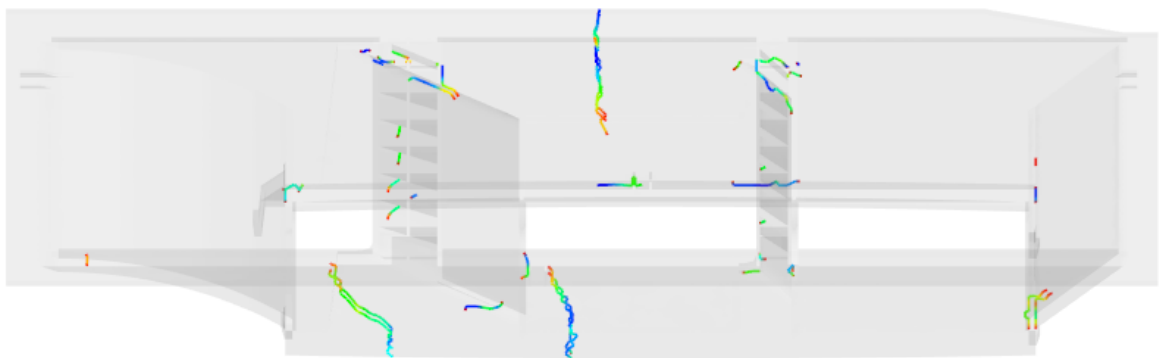
7.3.4 Studené spoje (Weld lines)

U obou typů vtokových systémů jsou vzniklé studené spoje na stejných místech. To je způsobeno totožným umístěním obou vtokových ústí jako i jejich obdobnou geometrií. Největší studený spoj vznikl mezi ústími. V těchto místech vznikne spoj vždy, jelikož se zde setkává více toků taveniny. Další výrazné studené spoje vznikly na protější straně dílu. Zde došlo ke vzniku tří spojů. Taveninové toky byly rozděleny geometrií tvárníku a tvárnice, kdy došlo k tečení po obvodu dutiny a zároveň i tvarový žebrováním, které odděluje vnitřek dílu na tři samostatné komory. Největší vliv na mechanickou odolnost dílu má tak středová komora dílu, kde dochází ke spojení dvou toků na obou protilehlých obvodových stěnách. Díky předpokládanému použití dílu by neměly vzniklé spoje ovlivnit jeho životnost.

Horký vtokový systém



Studený vtokový systém

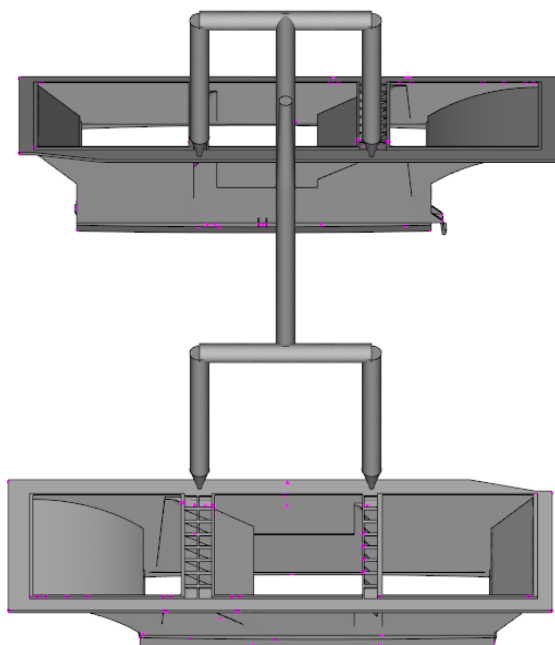


Obrázek 73 Vznik studených spojů

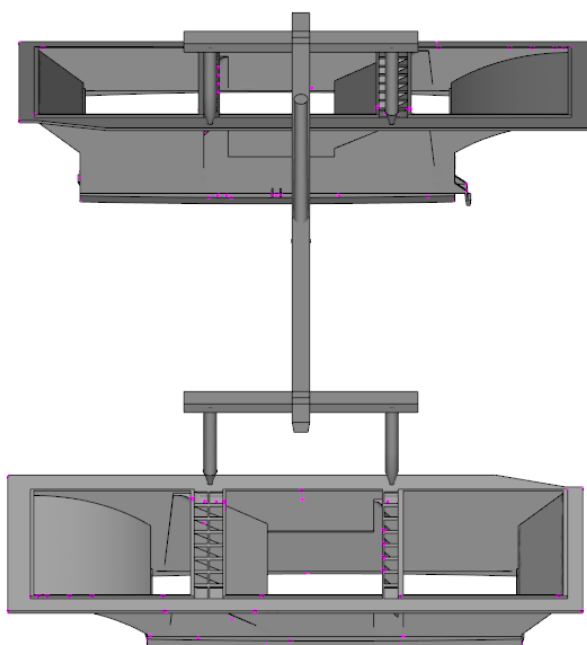
7.3.5 Vzduchové kapsy (Air traps)

Vzniklé vzduchové kapsy mohou zapříčinit diesel efekt a tím následnou degradaci polymeru. Programem indikovaná místa potenciálního zachycení vzduchu jsou vyznačena na dílu fialovými čarami. Studený vtok oproti horkému vykazuje menší množství těchto míst. Tento výsledek je zapříčiněn delší dobou fáze plnění studeným vtokovým systémem.

Horký vtokový systém



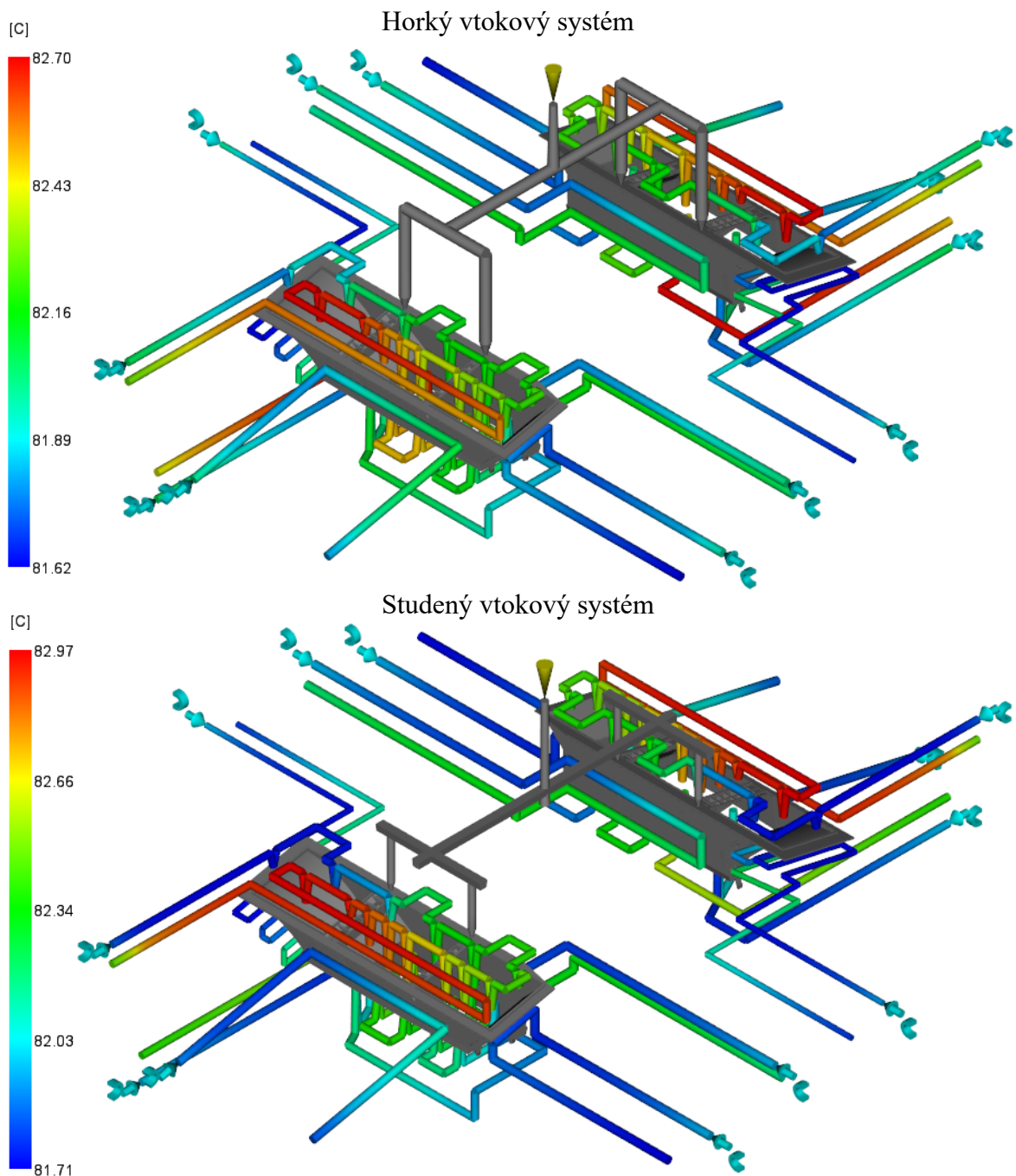
Studený vtokový systém



Obrázek 74 Místa vzniku vzduchových bublin

7.3.6 Teplota temperačního média (Circuit coolant temperature)

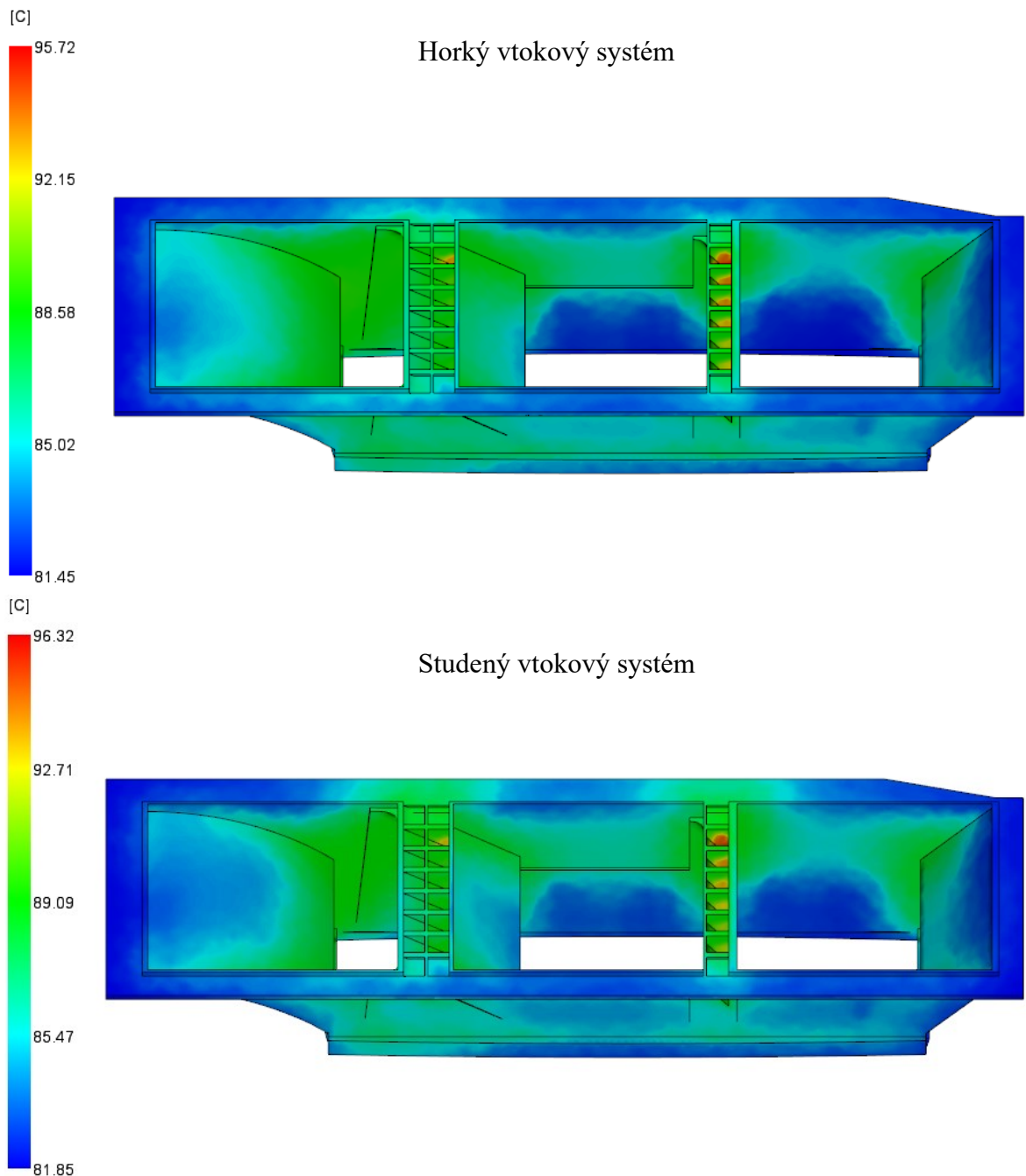
Teplota temperačního média u obou výsledků nepřekračuje maximální dovolený teplotní rozdíl, ten je stanovený na 3 °C. Teplotní pole u horkého vtokového systému se pohybuje v rozsahu od 81,62 °C do 82,7 °C a v případě studeného vtoku je velikost teplot stanovena na hodnoty 81,71 °C až 82,97 °C. Teplotní rozdíl, kterého se dosáhne v temperačních okruzích je menší u navrženého horkého vtoku a jeho hodnota je rovna 1,08 °C. U studeného vtokového dosahuje rozdíl teplot 1,18 °C.



Obrázek 75 Teplota temperačního média

7.3.7 Teplota stěny formy (Temperature, mold)

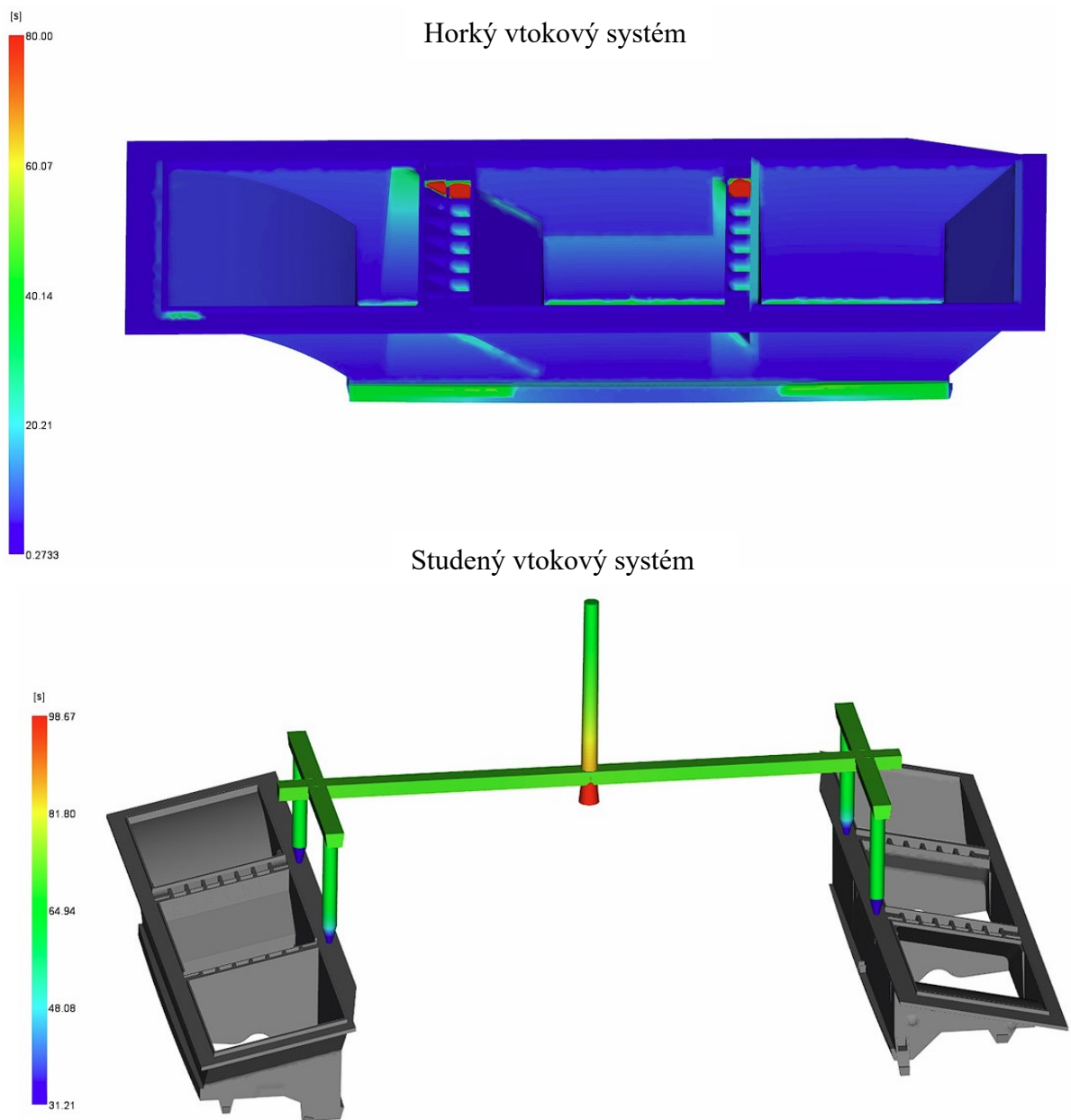
Výsledek je ovlivněn rozložením temperačního systému v tvarových dílech. Teplotní pole by mělo být v rozmezí teplot uvedených v materiálovém listě. Až na žebrované části dílu nedošlo k překročení spodní hranice 80 °C a horní 90 °C. Maximální dosažená teplota u horkého vtokového systému činí 95,75 °C a zároveň je menší o 0,6 °C než u studeného vtokového systému.



Obrázek 76 Teplota stěny formy

7.3.8 Dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)

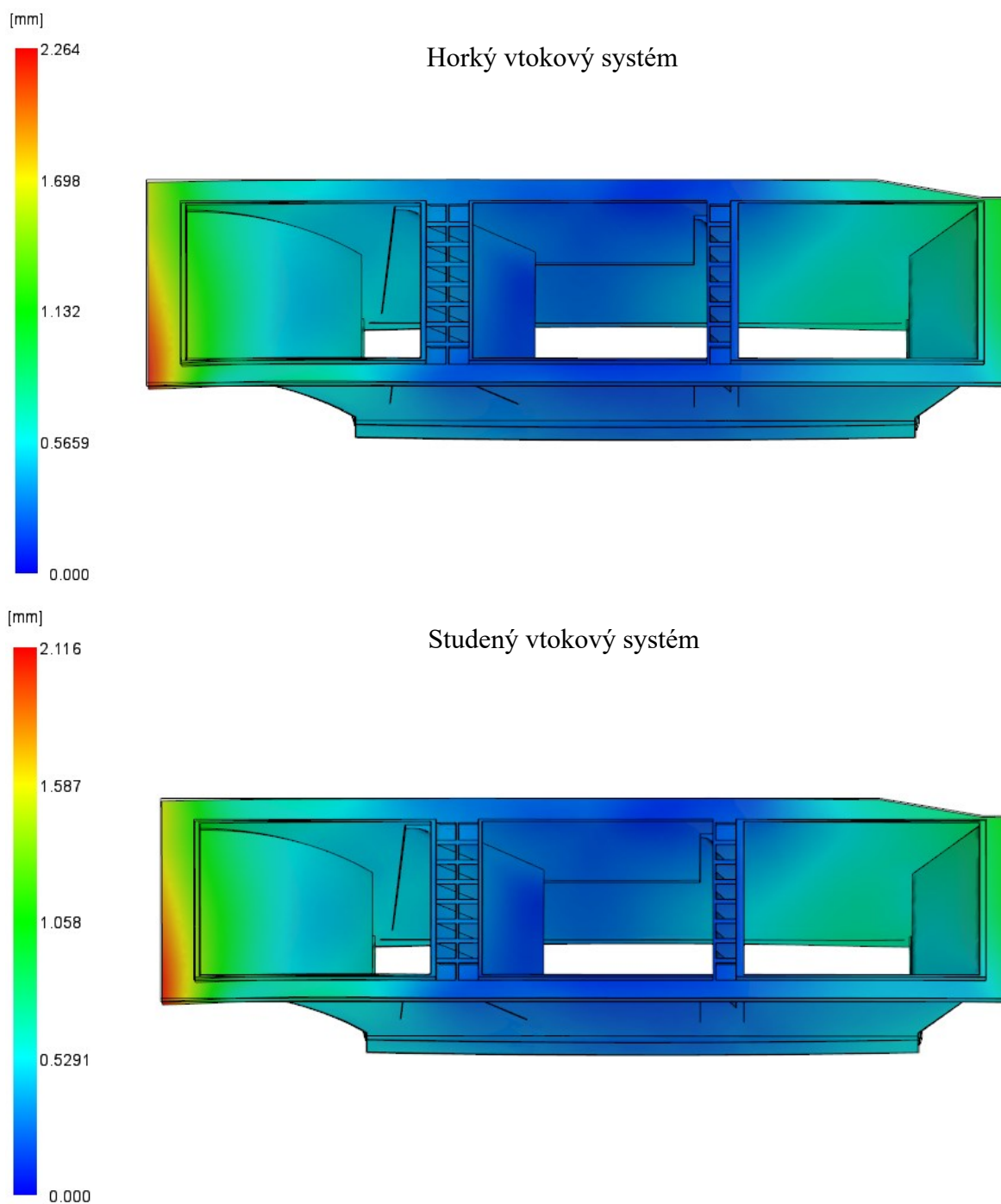
Maximální doba dosažení teploty odformování u studeného vtoku je 283 s a u horkého vtoku 281,1 s. Řešením je posunutí intervalu na čas, kdy je polymer dostatečně zatuhlý v místech působení vyhazovačů na stěnu dílu. U studeného vtokového systému to je ovlivněno ještě dobou tuhnutí v přidržovačích toku. Navrženou optimalizací je snížení doby v případě studeného vtokového systému na 98,68 s, kdy je možné odformovat vtokový systém z přidržovače toku. Vstříkovaný díl je ale možné odformovat dřív. Tohoto poznatku bylo využito pro horký vtokový systém, zde je navrženo snížení doby na 80 s. Navržené úpravy cílily na snížení finančních nákladů na díl.



Obrázek 77 Navržená doba dosažení vyhazovací teploty

7.3.9 Celková deformace (Deflection, all effects)

Výsledek deformační analýzy předpovídá možnou tvarovou změnu dílu. Nejvíce kritickou částí na dílu je červeně označená oblast. Zde dochází k odchýlení od původního tvaru o více jak 2 mm. Oproti tomu největší tvarovou stálost vykazuje oblast v okolí prostřední usměrňovací komory. Nižší deformace dílu se dosáhlo u studeného vtokové systému.



Obrázek 78 Celková deformace

8 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Pro zadaný díl byl navržen polymer. Tím je polyamid (PA66) plnění skelnými vlákny. Zvolený materiál vykazuje dobrou tvarovou stálost a také i chemickou odolnost. Výrobce je společnost BASF a jedná se o polymer s produktovým označením Ultramid A3EG6. Pro zaformování vytvořeného modelu rozdělovače vzduchu byly zvoleny čtyři vedlejší roviny. Jejich počet se stanovil na základě tvarové komplikovanosti dílu, konkrétně kombinací podkosů, lemů a montážních prvků pružných spojů. Vtokový systém je zajištěn pomocí horkého vtoku. Zvolený typ rozvaděče je ITM4. Navržená vzdálenost trysek od vtokové vložky je 140 mm, tento rozměr je zvolen pro vytvoření prostoru pro posuvnou jednotku čelisti. Vzdálenost mezi tryskami činí 105 mm.

Tvarové části jsou navrženy jako vložky umožňující snížení nákladů za materiál vstřikovací formy a v případě poškození tvarových ploch odpadají výdaje spojeny s deskami forem. Tvárník s tvárnici jsou uloženy v kotevních deskách. Do kotevní desky pohyblivé části formy jsou umístěny i tvarové čelisti. Každá z těchto čelistí vyžadovala rozdílnou délku potřebnou k zajištění odformování dílu. Ve dvou dělicích rovinách je odformování řešeno mechanicky pomocí posuvných jednotek a šikmých kolíků. Navržené jednotky umožňují dráhu posuvu 22 a 43 mm. Pro čelist s posuvem 22 mm jsou použity dva šikmé kolíky o délce 120 mm a průměru 12 mm. U druhé čelisti má zvolený kolík délku 180 mm a průměr 18 mm. Uložení kolíků je pod úhlem 18°. U zbylých čelistí je odformování zajištěno hydraulickými válci. Důvodem byla velká délka potřebná k odformování a u druhé čelisti odformování podkosu dříve, než bude otevřena vstřikovací forma. Velký hydraulický válec posouvá čelist po dráze 90 mm. K odformování podkosu je použit menší válec se zdvihem 60 mm.

Kromě čelisti lemu jsou ostatní tvarové díly samostatně temperovány. Ve vstřikovací formě se nachází celkem 12 temperačních okruhů. Pro tvárník a tvárnici jsou navrženy kanálky s průměrem 8 mm. Temperační okruhy tvárníku i tvárnice obsahují ploché přepážky o různých délkách, které zajišťují průtok média okolo vnitřních stěn dílu. Záslepení kanálků zajišťují záslepky s O-kroužky. Čelist napojena na velký hydraulický válec má temperační okruh tvořený kanálky o průměru 6 mm. Záslepení kanálku je zajištěno válcovými záslepkami a záslepkami s O-kroužky. Zbylé čelisti jsou temperovány okruhy s průměrem kanálků 9 mm. Ty jsou záslepeny kuličkovými záslepkami. Vyhození výrobku z formu je řešeno vyhazovacím paketem. Každý díl je vyhozen čtyřmi vyhazovači zajištěnými proti pootočení jednostraným jištěním. Zvolené průměry vyhazovačů jsou 10 a 14 mm. Dále jsou zde

uloženy šikmé vyhazovací jednotky se šikmými vyhazovač. Tyto vyhazovače jsou spojeny s tvarovou čelistí lemu.

Konstrukční návrh vstřikovací formy byl ověřen pomocí devíti různých výsledků z analýz vyhotovených softwarem Moldflow 2023. Ty jsou složeny z analýzy plnění, chlazení a deformace. Na základě vyhodnocených výsledků se porovnávala efektivita použitého horkého vtokového systému v navržené formě s plněním formy pomocí studeného vtokového systému. Porovnávaný studený vtok je navržen se dvěma bodovými vtokovými ústími. Všechna zpracovaná data jsou uvedena v tabulce 8. Z výsledků obou vtokových systémů se vypočítal rozdíl naměřených hodnot a ten je v tabulce uvedený ve čtvrtém sloupci. Zeleně jsou označeny výsledky, kde dosahuje horký vtokový systém lepších hodnot. Z devíti porovnávaných výsledků dosahuje navržený vtokový systém lepších hodnot u šesti z nich. Výsledek orientovaný na vznik studených spojů je u obou testovaných vtoků stejný, a proto nebyl v tabulce uveden. Hlavním a zásadním rozdílem na ekonomičnost výroby zadaného dílu je doba dosažení vyhazovací teploty. Použití horkého vtoku umožňuje zkrácení této doby na 80 s, zároveň je podpořena i estetičnost vstřikovaného dílu.

Tabulka 8 Souhrn porovnávaných výsledků z analýz

Porovnávaný výsledek	Horký vtokový systém	Studený vtokový systém	Klady a zápory horkého vtokového systému
Doba plnění [s]	1,398	1,403	-0,005
Uzavírací síla [t]	100,4	168,6	-68,2
Tlak v místě ústí vtoku [MPa]	27,69	42,36	-14,67
Vzduchové bubliny [-]	Více míst	Méně míst	Horší řešení
Rozdíl teplot temperačního média [°C]	1,08	1,18	-0,1
Teplota stěny formy [°C]	95,72	96,32	-0,6
Dosažení vyhazovací teploty [s]	80	98,68	-18,68
Deformace [mm]	2,264	2,116	+0,148

ZÁVĚR

V diplomové práci bylo cílem navržení vstříkovací formy pro zadaný díl automobilu s následnou verifikací návrhu. K této tématice byla zhotovena v teoretické části práce literární studie popisující technologii vstříkování a možnosti využití a principy práce s CAD a CAE systémy. S podporou získaných poznatků byl vymodelován zadaný automobilový díl, kterým je rozdělovač vzduchu. Délka této součásti je 350 mm, šířka činí 90 mm a výška dosahuje 70 mm. Tyto rozměry se následně promítly při volbě rozměrů desek vstříkovací formy. Ty byly navrženy tak, aby se za jeden vstříkovací cyklus vyrobily dva díly. Rozměry navržené vstříkovací formy činí 796 x 746 x 603 mm (délka x šířka x výška).

K vyhotovení modelu automobilového dílu a konstrukčního návrhu vstříkovací formy byl použit software CATIA V5-6R20. Pro tyto účely se pracovalo souběžně s několika softwarem nabízenými moduly. Konkrétně se jednalo o nabídku modulů ze sekce mechanical a shape designu.

Při návrhu vstříkovací formy byl kladen důraz na co největší využití normalizovaných dílů. Ty byly použity z databáze společnosti Meusburger zabývající se výrobou dílů pro vstříkovací formy.

Zvolený typ vstříkovacího stroje je Allrounder 920 A – 5000 – 1300 (55). Hlavním kritériem jeho výběru byla vzdálenost mezi vodícími sloupky, potřebného materiálu a velikost uzavírací síly.

K ověření funkčnosti navržené formy byl použit simulační software Moldflow 2023. Forma byla porovnávána na efektivitu typu vtokového systému. Na základě devíti porovnávaných výsledků vycházel navržený horký vtokový systém výhodněji než studený vtokový systém. Hlavní výhodou byla možnost odformovat díl za kratší časový úsek. Také se snížilo množství potřebné materiálu.

Vytvořená výkresová dokumentace sestavy vstříkovací formy obsahuje pohled s několika řezy a kusovníky použitých součástí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BI, Zhuming a Xiaoqin WANG. *Computer aided design and manufacturing*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, [2020]. Wiley-ASME Press series. ISBN 9781119534242.
- [2] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů 2: simulace, analýzy, odstraňování vad, 3D tisk – teorie a praxe*. Grada, [2021], (448 stran). ISBN 978-80-271-4247-7.
- [3] GEROMIN, Anthony, Lionel ROUCOULES, François MALBURET a Cédric LOPEZ. *CAD modelling based on knowledge synthesis for design rational*. *Procedia CIRP* [online]. 2018, 70, 156-161 [cit. 2023-01-14]. ISSN 22128271.
- [4] Towards an Open-Source Industry CAD: A Review of System Development Methods. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette* [online]. 2022, 29(6) [cit. 2023-01-14]. ISSN 13303651. Dostupné z: doi:10.17559/TV-20220909091201
- [5] VAN BIESBROECK, Antoine, Feifei SHANG a David BASSIR. CAD Model Segmentation Via Deep Learning. *International Journal of Computational Methods* [online]. 2021, 18(03) [cit. 2023-01-14]. ISSN 0219-8762. Dostupné z: doi:10.1142/S0219876220410054
- [6] RAO, Singiresu S. *The finite element method in engineering*. Sixth edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, [2018]. ISBN 978-0-12-811768-2.
- [7] DEBNEY, Peter. *Computational Engineering*. London: Institution of Structural Engineers (ISTRUCTE), [2020]. ISBN 978-1-906335-44-1.
- [8] KUROWSKI, Paul M. *Finite element analysis for design engineers (2nd edition)*. Warrendale, PA: SAE International, [2017]. ISBN 978-0-7680-8231-9.
- [9] CHANG, Kuang-Hua. *Product design modeling using CAD/CAE: the computer aided engineering design series*. Kidlington, Oxford, UK: Academic Press, [2014], (xvii, 418 stran). The computer aided engineering design series. ISBN 9780123985170.
- [10] KOÇ, Muammer a Tuğrul ÖZEL. *Modern manufacturing processes*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, [2020]. ISBN 978-1-11807-192-2.
- [11] DANGEL, Rainer a Mark SMITH. *Injection molds for beginners (2nd edition)*. Cincinnati: Hanser Publications, [2020]. ISBN 978-1-56990-818-1.

- [12] QIN, Yi. *Micro-manufacturing engineering and technology*. Amsterdam: Elsevier, [2010]. ISBN 9780815515456.
- [13] TOSELLO, Guido. *Micro injection molding*. Munich: Carl Hanser Verlag, [2018], xx, 388 s. ISBN 9781569906538.
- [14] FU, Hongbo, Hong XU, Ying LIU, Zhaogang YANG, S. KORMAKOV, Daming WU a Jingyao SUN. Overview of Injection Molding Technology for Processing Polymers and Their Composites. *ES Materials & Manufacturing* [online]. 2020 [cit. 2023-01-26]. ISSN 25780611. Dostupné z: doi:10.30919/esmm5f713
- [15] STOKES, Vijay Kumar. *Introduction to plastics engineering (edition 2020)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, [2020]. ISBN 9781119536574.
- [16] CALHOUN, Allison R., Jerry GOLMANAVICH a Jon RATZLAFF. *Plastics technician's toolbox*. Brookfield: Society of Plastics Engineers, 2002, 6 sv. ISBN 0971643520.
- [17] SCHILLER, Gary F. *A practical approach to scientific molding*. Munich: Hanser Publishers, [2018], xiv, 176 s. ISBN 9781569906866.
- [18] KENT, Robin. *Energy management in plastics processing: strategies, targets, and tools (3rd edition)*. [2018]. ISBN 978001025079.
- [19] SELVARAJ, Senthil Kumaran, et al. A review on machine learning models in injection molding machines. *Advances in Materials Science and Engineering*, [online]. 2022 [cit, 2023-1-28]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2022/1949061>
- [20] GRIMM, Todd. *User's guide to rapid prototyping*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2004, (xvi, 404 p.). ISBN 9781613449653.
- [21] KULKARNI, Suhas. *Robust process development and scientific molding: theory and practice (2nd edition)*. Munich: Hanser Publications, c2017, xv, 256 s. ISBN 978-1-56990-586-9.
- [22] OSSWALD, Tim A. a Juan P. HERNÁNDEZ-ORTIZ. *Polymer processing: modeling and simulation*. Munich: Hanser Publishers, c2006, xxvii, 606 s. ISBN 1569903980.

- [23] HYVÄRINEN, Marko, Rowsni JABEEN a Timo KÄRKI. The Modelling of Extrusion Processes for Polymers—A Review. *Polymers* [online]. 2020, 12(6) [cit. 2023-01-29]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12061306
- [24] TUCKER, Charles L. *Fundamentals of fiber orientation: description, measurement and prediction*. Munich: Hanser publishers, 2022, xviii, 334 s. ISBN 978-1-56990-875-4.
- [25] GOODSHIP, Vannessa, Bethany, MIDDLETON a Ruth CHERRINGTON. *Design and manufacture of plastic components for multifunctionality: structural composites, injection molding, and 3D printing*. Amsterdam: Elsevier. [2016]. ISBN 978-0-323-34061-8.
- [26] BHARGAVA, Vikram. *Robust plastic product design: a holistic approach*. Munich: Hanser Publishers, [2018], xxix, 312 s. ISBN 9781569905807.
- [27] CAO, Huan, Lijun YE, Yucong JIN, Jiayao WANG, Jiahui HONG a Yongjin LI. Structural heterogeneity and evolution in ultrahigh-filled polypropylene/flake graphite composites during injection molding. *Composites Science and Technology* [online]. 2022, 227 [cit. 2023-02-01]. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2022.109590
- [28] KREVELEN, D. W. van a K. te NIJENHUIS. *Properties of polymers: their correlation with chemical structure : their numerical estimation and prediction from additive group contributions*. 4th, completely rev. ed. Amsterdam: Elsevier, c2009, xxvi, 1004 s. ISBN 978-0-08-054819-7.
- [29] MALKIN, Aleksandr Jakovlevič a Avraam I. ISAYEV. *Rheology: concepts, methods, and applications*. 4th edition. Toronto: ChemTec Publishing, 2022, xvi, 520 s. ISBN 978-1-927885-93-2.
- [30] NAKAYAMA, Yasuki. *Introduction to fluid mechanics*. 2nd edition. Amsterdam: Elsevier, c2018. ISBN 978-0-08-102437-9.
- [31] Ústav fyziky a materiálového inženýrství UTB. *Viskoelastické modely*. Online [cit. 23-01-30]. Dostupné také z: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_09.pdf
- [32] DEALY, John M., Daniel J. READ a Ronald G. LARSON. *Structure and rheology of molten polymers: from structure to flow behavior and back again*. 2nd edition. Munich: Hanser, [2018], xvii, 592 s. ISBN 9781569906118.

- [33] LERMA VALERO, José R. *Plastics injection molding: scientific molding, recommendations, and best practices*. Munich: Hanser publications, [2020], xxiii, 400 s. ISBN 978-1-56990-689-7.
- [34] ZHOU, Huamin, ed. *Computer modeling for injection molding: simulation, optimization, and control*. Hoboken: Wiley, [2013]. ISBN 9781118444887.
- [35] EHRENSTEIN, Gottfried W., Gabriela RIEDEL a Pia TRAWIEL. *Thermal analysis of plastics: theory and practice*. Munich: Hanser Publishers, c2004, xxix, 368 s. ISBN 156990362X.
- [36] FISCHER, Jerry M. *Handbook of molded part shrinkage and warpage*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. ISBN 978-1-4557-2597-7.
- [37] YAM, Kit L., ed. *The Wiley encyclopedia of packaging technology*. Third edition. Hoboken: Wiley, [2009], ix, 1353 s. ISBN 9780470087046.
- [38] MORGAN, Wani J. a Hsiao-Yeh CHU. Development of a Reliable Vibration Based Health Indicator for Monitoring the Lubricating Condition of the Toggle Clamping System of a Plastic Injection Molding Machine. *Applied Sciences* [online]. 2022, 12(1) [cit. 2023-02-03]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app12010196
- [39] OSSWALD, Tim A. a Georg MENGES. *Material science of polymers for engineers*. 3rd ed. Cincinnati: Hanser Publications, 2012, xix, 595 s. ISBN 9781569905142.
- [40] IBEH, Christopher C. *Thermoplastic materials: properties, manufacturing methods, and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press. [2011], (xxiii, 616 stran). ISBN 9780429150968.
- [41] KOHLGRÜBER, Klemens, Michael BIERDEL a Harald RUST. *Plastics compounding and polymer processing: fundamentals, machines, equipment, application technology*. Munich: Hanser Publishers, 2022, xxxi, 846 s. ISBN 978-1-56990-837-2.
- [42] FONSECA, João Henrique, Luca QUAGLIATO, Seungjong YUN, Dosuck HAN, Naksoo KIM a Hyungyil LEE. Preliminary design of an injection-molded recycled-carbon fiber-reinforced plastic/metal hybrid automotive structure via combined optimization techniques. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2021, 64(4), 2773-2788 [cit. 2023-02-05]. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-021-02988-y

- [43] CAMPO, E. Alfredo. *The complete part design handbook: for injection molding of thermoplastics*. Munich: Hanser Publishers, c2006, xxi, 870 s. ISBN 1569903751.
- [44] MALLOY, Robert A. *Plastic part design for injection molding: an introduction*. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2011, xiv, 549 s. ISBN 9781569904367.
- [45] JAROSCHEK, Christoph. *Design of injection molded plastic parts*. Munich, Germany: Carl Hanser Verlag, [2022]. ISBN 9781569908945.
- [46] FISCHER, Jerry M. *Handbook of molded part shrinkage and warpage*. Second edition. Amsterdam: Elsevier/William Andrew, 2013, xiii, 261 s. Plastics design library. ISBN 9781455725977.
- [47] CATOEN, Bruce a Herbert REES. *Injection mold design handbook*. Munich: Hanser publishers, 2021, xxviii, 786 s. ISBN 978-1-56990-815-0.
- [48] BEAUMONT, John P. *Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding*. 3rd edition. Munich: Hanser Publishers, [2019], xx, 450 s. ISBN 978-1-56990-590-6.
- [49] MENNIG, Günter a Klaus STOECKHERT. *Mold-making handbook*. 3rd edition. Cincinnati: Hanser Publications, 2013, (xxx, 701 pages). ISBN 978-1-56990-446-6.
- [50] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. *Injection molding advanced troubleshooting guide*. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, [2021], xx, 491 s. ISBN 978-1-56990-834-1.
- [51] CRAWFORD, Roy J. a Peter J. MARTIN. *Plastic engineering*. 4th edition. Amsterdam: Elsevier. c2020. ISBN 9780081007099.
- [52] UNGER, Peter, ed. *Gastrow injection molds: 130 proven designs*. 4th ed. Munich: Hanser Publishers, 2006, x, 335 s. ISBN 978-3-446-40592-9.
- [53] ARBURG, 2023 [online]. Arburg. [cit 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.arburg.com>
- [54] MENGES, Georg, Walter MICHAELI a Paul MOHREN. *How to make injection molds*. 3rd ed. Munich: Hanser, c2001, xvii, 612 s. ISBN 3446212566
- [55] KAZMER, David. *Injection mold design engineering*. 2nd edition. Munich: Hanser, [2016], xxiv, 529 s. ISBN 9781569905708.

- [56] FENG, Shaochuan, Amar M. KAMAT a Yutao PEI. Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2021, 171 [cit. 2023-02-13]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082
- [57] PRUNER, Harry a Wolfgang NESCH. *Understanding injection molds*. 2nd edition. Munich: Hanser, c2020, xii, 145 s. ISBN 9781569908433
- [58] ALI, Salah H. R. *Automotive engine metrology*. Boca Raton, FL: CRC Press, [2017]. ISBN 978-981-4669-52-8.
- [59] BASF, 2023 [online]. Materiálový list. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.basf.com>
- [60] MEUSBURGER, 2023 [online]. Katalog normalizovaných dílů. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://ecom.meusburger.com/fpl_menu

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm	milimetr
L	délka
%	procento
°	stupeň
°C	stupeň celsia
GPPS	polystyren pro všeobecné použití
T_g	teplota skelného přechodu
T_m	teplota měknutí
mm^3	milimetr krychlový
cm^3	centimetr krychlový
CAD	počítačem podporovaný design
CAE	počítačem podporované konstruování
CAM	počítačem podporované modelování
FEM	metoda konečných prvků
apod.	a podobně
např.	například
1D	jednorozměrný
2D	dvourozměrný
3D	trojrozměrný
H	výška
R	poloměr
D	průměr
Re	Reynoldsovo číslo
τ_{ij}	tenzor napětí
η	viskozita

D_{ij}	tenzor rychlosti smykové deformace
λ	relaxační čas
$\dot{\tau}_{ij}$	kodeformační časová derivace tenzoru napětí
p	tlak
v	objem
T	teplota
MIT	Massachussettský technologický institut
v_r	relativní objem při pokojové teplotě
$v_{1\text{bar}}$	relativní objem při hodnotě atmosférického tlaku
T_r	pokojová teplota
T_e	vyhazovací teplota
P_1	atmosférický tlak
P_2	tlak 2
P_3	tlak 3
bar	jednotka tlaku
μm	mikrometr
PA66	polyamid
min	minuta
MVR	objemový průtok taveniny
MPa	megapascal
kN	kilonewton
g	gram
s	sekunda
t	tuna

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Mikroskopický výstřik [15].....	13
Obrázek 2 Časové rozložení operací vstřikovacího cyklu [19]	14
Obrázek 3 pVT diagram [34].....	15
Obrázek 4 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 520 H [53]	17
Obrázek 5 Tavení polymerní směsi ve šnekové plastikační jednotce [17].....	18
Obrázek 6 Energetická bilance vstřikovacího stroje [18].....	19
Obrázek 7 Rozložení spotřeby energie vstřikovacího cyklu [18].....	20
Obrázek 8 Hydraulická uzavírací jednotka [39]	21
Obrázek 9 Kloubová uzavírací jednotka [39]	22
Obrázek 10 Závislost viskozity na aplikované síle [30].....	25
Obrázek 11 Fontánový tok a detail na orientaci plniva [27].....	26
Obrázek 12 Vliv orientace vláken na deformaci výrobku [24]	27
Obrázek 13 Množství nákladů v závislosti na výrobních etapách [2]	28
Obrázek 14 Transformační parametry v obecném maticovém zápisu [1]	30
Obrázek 15 Aplikace transformační matice a) před transformací, b) po transformaci [1] ..	30
Obrázek 16 Rozdělení křivkových povrchů [1].....	31
Obrázek 17 Nevýhody drátěného modelu [9].....	32
Obrázek 18 Vymodelovaná plocha [1]	33
Obrázek 19 Vývojový diagram provádění simulací [7].....	34
Obrázek 20 1D element – přímka	36
Obrázek 21 2D elementy – a) trojúhelník; b) čtyřúhelník	36
Obrázek 22 3D elementy – a) trojstěn; b) šestistěn; c) klín.....	37
Obrázek 23 Síťovací metody [8].....	37
Obrázek 24 Závislost smrštění na tloušťce stěny [46].....	39
Obrázek 25 Úprava žeber [43].....	40
Obrázek 26 Vliv zaoblení [43].....	40
Obrázek 27 Aplikace úkosů a) obtížně odformovatelné, b) snadněji odformovatelné [45]	41
Obrázek 28 Dvoudesková vstřikovací forma [16]	42
Obrázek 29 Uspořádání vtokového systému [52].....	43
Obrázek 30 Tvary a rozměry vtokových kanálků [48]	44
Obrázek 31 Typy studených vtoků [39]	45
Obrázek 32 Řešení přívodu taveniny horký vtokovým systémem [39].....	47
Obrázek 33 Rozložení temperačních kanálků [17].....	49
Obrázek 34 Metody vedení kanálků [17]	50

Obrázek 35 Typy temperace – a) konvenční temperace, b) konformní temperace [56].....	51
Obrázek 36 Ploché přepážky [17].....	51
Obrázek 37 Fontánová přepážka [56].....	52
Obrázek 38 Tepelná trubice [26].....	53
Obrázek 39 Umístění vyhazovacích prvků [47].....	54
Obrázek 40 Mechanické odformování bočního otvoru [15].....	55
Obrázek 41 Hydraulické odformování bočních otvorů [26].....	56
Obrázek 42 Úprava kolíků proti pootočení [47].....	57
Obrázek 43 Prizmatický vyhazovací kolík a válcový vyhazovací kolík [26].....	57
Obrázek 44 Trubkový vyhazovací kolík [26].....	58
Obrázek 45 Princip stírací desky [11].....	59
Obrázek 46 3D model usměrňovače vzduchu.....	62
Obrázek 47 Sestava vstřikovací formy.....	64
Obrázek 48 Statická polovina formy.....	65
Obrázek 49 Pohyblivá polovina formy.....	65
Obrázek 50 Odpor toku polymerní taveniny.....	66
Obrázek 51 Umístění vtokového ústí.....	67
Obrázek 52 Zvolené umístění vtokového ústí.....	67
Obrázek 53 Hlavní a vedlejší dělicí roviny.....	68
Obrázek 54 Tvárnice a tvárník.....	69
Obrázek 55 Tvarové čelisti.....	70
Obrázek 56 Horký blok a jeho zapojení.....	71
Obrázek 57 Rozložení temperačních okruhů.....	72
Obrázek 58 Odformování podkosu v uzavřené formě.....	73
Obrázek 59 Otevření formy a odformování ve zbylých rovinách.....	74
Obrázek 60 Odformování lemu a vyhození výrobku z formy.....	74
Obrázek 61 Šikmý kolík.....	75
Obrázek 62 Blokovací válec a spojka.....	75
Obrázek 63 Vyhazovací paket.....	76
Obrázek 64 Závěsné oko.....	76
Obrázek 65 Princip funkce transportního zámku [60].....	77
Obrázek 66 Vysíťovaný model dílu.....	79
Obrázek 67 Kvalita sítě temperačního systému.....	79
Obrázek 68 Kvalita sítě horkého vtokového systému.....	80
Obrázek 69 Kvalita sítě studeného vtokového systému.....	80

Obrázek 70 Doba plnění	83
Obrázek 71 Závislost uzavírací síly na čase	84
Obrázek 72 Závislost vstřikovacího tlaku na čase	85
Obrázek 73 Vznik studených spojů	86
Obrázek 74 Místa vzniku vzduchových bubliny	87
Obrázek 75 Teplota temperačního média	88
Obrázek 76 Teplota stěny formy	89
Obrázek 77 Navržená doba dosažení vyhazovací teploty.....	90
Obrázek 78 Celková deformace.....	91

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vlastnosti Ultramid A3EG6 [59].....	63
Tabulka 2 Parametry stroje Arburg Allrounder 920 A – 5000 – 1300 (55) [53].....	63
Tabulka 3 Kontrola kvality sítě modelu	78
Tabulka 4 Nastavení temperačního média.....	81
Tabulka 5 Volba okrajových podmínek chlazení	81
Tabulka 6 Volba okrajových podmínek plnění a dotlaku.....	82
Tabulka 7 Volba okrajových podmínek deformací	82
Tabulka 8 Souhrn porovnávaných výsledků z analýz.....	93

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technický list vstříkovacího stroje

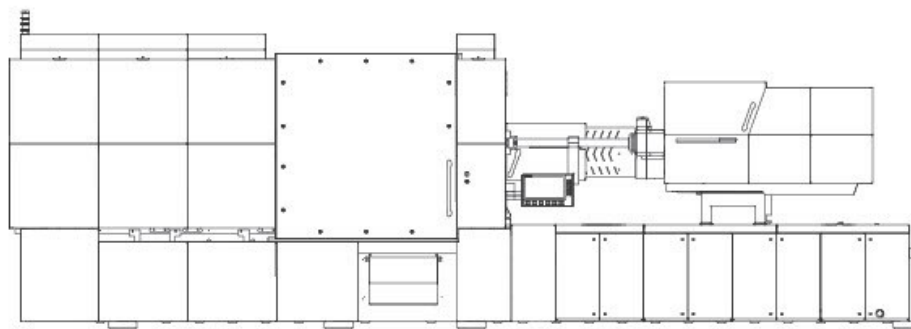
Příloha P II: Materiálový list

Příloha P III: Výkresová dokumentace:

- Výkres sestavy formy s řezy
- Kusovníky

Příloha P IV: CD disk

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST VSTŘIKOVACÍHO STROJE



ALLROUNDER 920 A

Clamp-Design

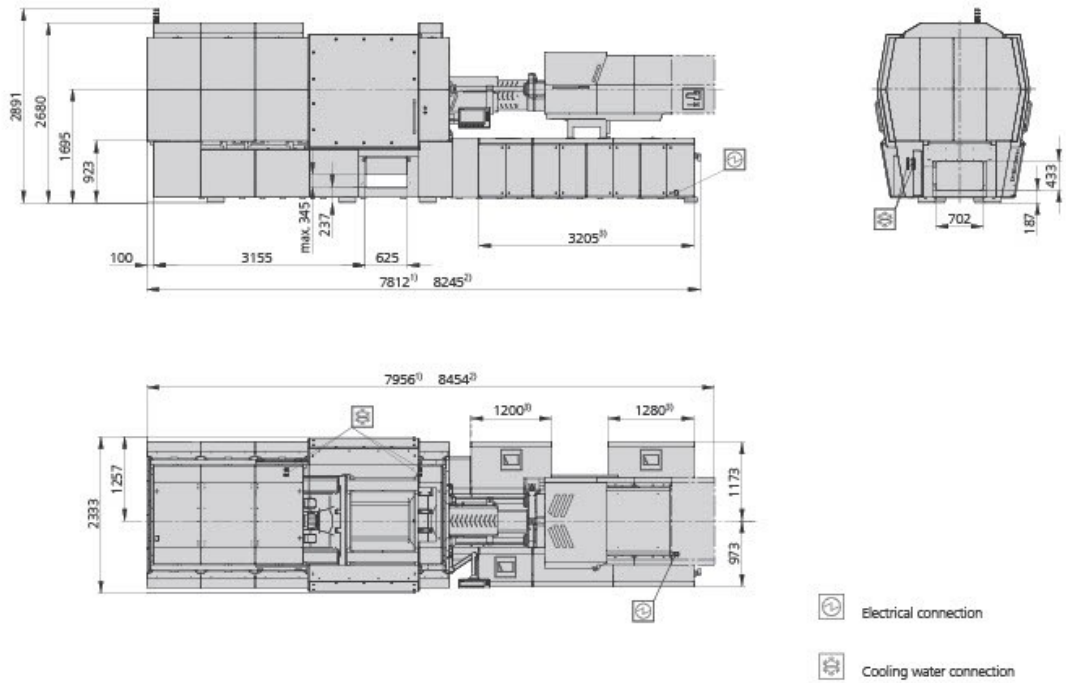
Distance between tie bars: 920 x 920 mm

Clamping force: 5000 kN

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

ARBURG

MACHINE DIMENSIONS | 920 A



- 1) Injection unit 1300
- 2) Injection unit 2100
- 3) Depending on the power and size of the injection unit

TECHNICAL DATA | 920 A

Clamping unit			920 A
with clamping force	max. kN		5000
Opening force stroke	max. kN mm		--- 900
Mould height, fixed variable	min.-max. mm		--- 400-1050
Platen daylight fixed variable	max. mm		--- 1300-1950
Distance between tie bars (w x h)	mm		920 x 920
Mould mounting platens (w x h)	max. mm		1280 x 1280
Weight of movable mould half	max. kg		6000
Ejector force stroke	max. kN mm		86 250
Dry cycle time EUROMAP	Comfort	min. s - mm	2,5 - 644
	Ultimate	min. s - mm	1,8 - 644

Injection unit		1300			2100		
with screw diameter	mm	55	60	70	60	70	80
Effective screw length	L/D	22	20	17	23	20	17,5
Screw stroke	max. mm	240			280		
Calculated stroke volume	max. cm ³	570	678	923	792	1078	1407
Shot weight	max. g PS	521	620	844	723	984	1286
Material throughput	max. kg/h PS	86	96	115	125	145	175
	max. kg/h PA6.6	43	48	58	62	74	88
Injection pressure	max. bar	2380	2000	1470	2500	2000	1530
Holding pressure time	max. s - bar	300-1900	300-1600	300-1170	300-2180	300-1600	300-1220
Injection flow ²	Comfort [+]	261 [356]	311 [424]	423 [577]	339 [452]	462 [616]	603 [804]
	Ultimate [+]	476	566	772	707 [919]	962 [1251]	1257 [1634]
Injection speed ³	Comfort [+]	110 [150]			120 [160]		
	Ultimate [+]	200			250 [325]		
Screw circumferential speed	max. m/min	55	60	70	51	60	69
Screw torque	max. Nm	1510	1640	1920	2140	2500	2850
Nozzle contact force retraction stroke	max. kN mm	90 500			110 600		
Heating capacity zones	kW	22,9 8			31,2 8		
Feed hopper	l	---			---		

Drive and connection		Comfort		Ultimate		
with injection unit		1300	2100	1300	2100	
Net weight of machine	kg	26800	28500	26800	28500	
Sound press. level insecurity ⁴	dB(A)	< 68		< 68		
Electrical connection ⁵	kW	71	96	77	101	
	Total	A	150	---	143	---
	Machine	A	125	160	125	160
	Heating	A	40	50	40	50
Cooling water connection	max. °C	30		30		
	min. Δp bar	1,5 DN 25		1,5 DN 25		

Machine type
with EUROMAP size designation ¹
920 A 5000-1300 | 2100

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 versions, 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) Specification of maximum injection flow at maximum injection pressure.
 - 3) Specifications relate to 400 W/50 Hz.
 - 4) Emission sound pressure level at the workplace. Detailed information in the operating instructions.
 - 5) Forward speed of plasticising screw at 1000 bar injection pressure.
- [] Specifications apply to alternative equipment.

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST

Ultramid® A3EG6

Product Information



We create chemistry

Typical values for uncoloured product at 23 °C ¹⁾	Test method	Unit	Values ²⁾
Properties			
Polymer abbreviation	-	-	PA66-GF30
Density	ISO 1183	kg/m ³	1360
Viscosity number (0.5% in 98 % H ₂ SO ₄)	ISO 307, 1157, 1828	cm ³ /g	145
Moisture absorption, equilibrium 23°C/50% r.h.	similar to ISO 62	%	1.5 - 1.9
Water absorption, saturation in water at 23°C	similar to ISO 62	%	5.2 - 5.8
Halogen content (Cl, Br, I), Schoeniger IC		mg/kg	< 100
Processing			
Melting temperature, DSC	ISO 11357-1/-3	°C	260
MVR 275 °C/5 kg	ISO 1133	cm ³ /10min	30
Melt temperature, injection moulding/extrusion	-	°C	280 - 300
Mould temperature, injection moulding	-	°C	80 - 90
Moulding shrinkage, constrained ³⁾	-	%	0.55
Moulding shrinkage (parallel)	ISO 294-4	%	0.53
Moulding shrinkage (normal)	ISO 294-4	%	1.02
injection molding, Melt temperature, recommended	-	°C	290
injection molding, Mold temperature, recommended	-	°C	80
Flammability			
UL 94 rating at 1,6 mm thickness	IEC 60695-11-10	class	HB
Automotive materials (Thickness >= 1mm) ⁴⁾	ISO 3795, FMVSS 302	-	+
Oxygen index	ISO 4589-1/-2	%	24
UL 94 rating at 3.05 mm thickness	UL-94, IEC 60695	class	HB
UL 94 (2)	UL-94, IEC 60695	-	UL
Mechanical properties			
			dry / cond.
Tensile modulus	ISO 527-1/-2	MPa	10000 / 7200
Stress at break	ISO 527-1/-2	MPa	190 / 130
Strain at break	ISO 527-1/-2	%	3 / 5
Tensile creep modulus, 1000 h, strain <= 0.5%, 23°C	ISO 899-1	MPa	* / 5300
Flexural modulus	ISO 178	MPa	8600 / 6500
Flexural strength	ISO 178	MPa	280 / 210
Charpy unnotched impact strength (23°C)	ISO 179/1eU	kJ/m ²	85 / 100
Charpy unnotched impact strength (-30°C)	ISO 179/1eU	kJ/m ²	70 / 70
Charpy notched impact strength (23°C)	ISO 179/1eA	kJ/m ²	11 / 20
Charpy notched impact strength (-30°C)	ISO 179/1eA	kJ/m ²	10 / 9.5
Izod notched impact strength (23°C)	ISO 180/A	kJ/m ²	12 / 15
Izod notched impact strength (-30°C)	ISO 180/A	kJ/m ²	10.4 / 10
Thermal properties			
HDT A (1.80 MPa)	ISO 75-1/-2	°C	250
HDT B (0.45 MPa)	ISO 75-1/-2	°C	260
Max. service temperature (short cycle operation) ⁵⁾	-	°C	240
Temperature index at 50% loss of tensile strength after 5000 h	IEC 60216	°C	165
Temperature index at 50% loss of tensile strength after 20000 h	IEC 60216	°C	135
Coefficient of linear thermal expansion, longitudinal (23-55)°C	ISO 11359-1/-2	E-8/K	28
Coefficient of linear thermal expansion, transverse (23-55)°C	ISO 11359-1/-2	E-8/K	88
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W/(m K)	0.35
Specific heat capacity	-	J/(kg*K)	1260

Footnotes

1) If product name or properties don't state otherwise.

2) The asterisk symbol "*" signifies inapplicable properties.

3) Test box with central gating, dimensions of base (107*47*1,5) mm, processing conditions: TM = 290°C, TW = 80°C

4) - = passed

5) Empirical values determined on articles repeatedly subjected to the temperature concerned for several hours at a time over a period of several years. Proviso! Proper design and processing according to our recommendations.

BASF SE

67056 Ludwigshafen, Germany