

Analýza vstřikovací formy pro trubku sacího systému

Bc. Martin Dočekal

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Martin Dočekal
Osobní číslo:	T24707
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Analýza vstřikovací formy pro trubku sacího systému

Zásady pro vypracování

- 1) Vypracovat literární studii na dané téma
- 2) Nakreslit model daného dílu ve 3D
- 3) Navrhnout vstřikovací formu pro daný dílu a výkres sestavy
- 4) Provést analýzu navržené formy pomocí tokových simulací

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

Seznam doporučené literatury:

KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. Injection molding advanced troubleshooting guide. Munich: Hanser Publishers, 2018

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

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 9788027106141

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vojtěch Šenkeřík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

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

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

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

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na konstrukční návrh plastového dílu pro sací systém automobilu, návrh vstřikovací formy pro jeho výrobu a následnou simulační analýzu formy pomocí softwaru Autodesk Moldflow Adviser 2026. V teoretické části je zpracována rešerše zaměřená na problematiku sacích systémů, principy konstrukce vstřikovaných dílů a přístupy k jejich simulačnímu hodnocení. Praktická část je rozdělena do tří hlavních celků: návrh výrobku a jeho technologického procesu, konstrukce vstřikovací formy včetně výkresové dokumentace a simulační vyhodnocení plnění formy. Veškeré 3D modelování bylo provedeno v prostředí CATIA V5. Závěr práce shrnuje výsledky simulací a hodnotí optimalitu výrobního cyklu s ohledem na kvalitu výstřiku a efektivitu procesu.

Klíčová slova: sací systém, vstřikovací forma, vstřikování plastů, Moldflow, CATIA, simulační analýza, optimalizace výroby

ABSTRACT

This thesis focuses on the design of a plastic component for an automotive intake system, the development of an injection mold for its production, and the subsequent simulation analysis using Autodesk Moldflow Adviser 2026. The theoretical part presents a review of intake system design, injection-molded part engineering principles, and simulation approaches for mold performance assessment. The practical section is structured into three main areas: product and manufacturing process design, mold construction including technical drawings, and simulation-based mold filling analysis. All 3D modeling tasks were carried out in CATIA V5. The thesis concludes with an evaluation of the simulation results and an assessment of the production cycle, focusing on part quality and process efficiency.

Keywords: intake system, injection mold, plastic injection molding, Moldflow, CATIA, simulation analysis, production optimization

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji především svému vedoucímu práce Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, připomínky, a především za trpělivost, kterou mi během celé práce věnoval.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 TEORIE SACÍCH SYSTÉMŮ.....	15
1.1 ČÁSTI SACÍHO SYSTÉMU	16
1.1.1 Čistá strana sacího potrubí	17
1.2 AKUSTIKA SACÍCH SYSTÉMŮ	19
2 POUŽÍVANÉ TECHNOLOGIE A MATERIÁLY	23
2.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	23
2.1.1 Termoplasty.....	24
2.1.2 Dělení a příklady termoplastů pro vstřikování.....	24
2.1.3 Reaktoplasty	25
2.1.4 Elastomery.....	25
2.1.5 Termoplastické elastomery	26
2.2 ADITIVA	27
3 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ	29
3.1 TLOUŠŤKA STĚN	29
3.2 ŽEBROVÁNÍ	29
3.3 ÚKOSY	30
3.4 SMRŠTĚNÍ.....	31
3.5 PŘESNOST VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ	32
4 FORMA PRO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ	34
4.1 KONSTRUKČNÍ NÁVRH FORMY	36
4.2 POSTUP PŘI KONSTRUKCI VSTŘIKOVACÍ FORMY	36
4.3 MATERIÁLY PRO VÝROBU VSTŘIKOVACÍCH FOREM	37
4.4 TEMPERACE FOREM.....	37
4.5 VTOKOVÉ SOUSTAVY	37
4.6 VYHAZOVACÍ SYSTÉM FORMY	38
4.7 ODVZDUŠNĚNÍ FORMY.....	39
5 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	40
5.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	40
5.2 VADY VSTŘIKOVÁNÍ.....	41
5.2.1 Vady tvaru.....	41
5.2.2 Příčiny vad tvaru	41
5.2.3 Rozměrové vady.....	42
5.2.4 Faktory ovlivňující rozměrové vady	42
5.2.5 Typy smrštění.....	43

5.2.6	Řešení rozměrových vad a optimalizace procesu.....	43
5.2.7	Měření a kontrola rozměrových odchylek.....	44
6	ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU	45
6.1	DŮVOD PROVÁDĚNÍ ANALÝZY A JEJÍ VÝHODY	45
6.2	VADY ODHALENÉ POMOCÍ TOKOVÉ ANALÝZY	45
6.3	V PRAXI UŽÍVANÝ SOFTWARE.....	46
II	PRAKTICKÁ ČÁST	47
7	STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE.....	48
8	POUŽITÝ SOFTWARE	49
8.1	CATIA V5	49
8.2	AUTODES MOLDFLOW ADVISER 2026	49
9	NÁVRH VSTŘIKOVANÉHO DÍLU.....	51
9.1	FORMOVÁNÍ NAVRŽENÉHO DÍLU A NÁSOBNOST FORMY	52
10	NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY	54
10.1	VÝROBNÍ POSTUP DÍLU	55
10.2	KONCEPCE FORMY	56
10.3	VTOKOVÝ SYSTÉM A UMÍSTĚNÍ VTOKU.....	57
10.4	TEMPERAČNÍ SYSTÉM	58
10.5	PŘÍVOD TLAKOVÉHO VZDUCHU	59
10.6	VYHAZOVACÍ SYSTÉM	59
10.7	IZOLACE FORMY	60
10.8	ODVZDUŠNĚNÍ VSTŘIKOVACÍ FORMY	60
10.9	VYROBITELNOST JEDNOTLIVÝCH DÍLŮ FORMY	61
10.10	MANIPULACE S FORMOU	62
10.11	ELEKTRONICKÁ KONTROLA FORMY	63
11	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	65
12	ANALÝZA VSTŘIKOVACÍ FORMY	66
12.1	SANTOPRENE 101-55	66
12.2	VYHODNOCOVANÉ PARAMETRY	66
12.3	ZADANÉ PARAMETRY	67
12.4	JISTOTA PLNĚNÍ	68
12.5	PLNÍČÍ ČAS	68
12.6	POKLES TLAKU	69
12.7	STUDENÉ SPOJE	70
12.8	TEPLOTA NA ČELE TOKU	70

12.9	PREDIKCE KVALITY	71
12.10	REYNOLDSOVO ČÍSLO V TEMPERAČNÍM OKRUHU	72
12.11	TEPLOTA TEMPERAČNÍHO MÉDIA.....	72
12.12	DOBA NA DOSAŽENÍ VYHAZOVACÍ TEPLoty	73
12.13	TEPLOTA DÍLU PŘI VYHOZENÍ	74
12.14	KVALITA CHLAZENÍ.....	74
12.15	VYPOČTENÉ VÝROBNÍ PARAMETRY	75
12.16	VYHODNOCENÍ ANALÝZY	76
ZÁVĚR		77
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		78
SEZNAM OBRÁZKŮ		80
SEZNAM TABULEK.....		82
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		83
SEZNAM PŘÍLOH.....		84

ÚVOD

Tato práce byla vypracována za účelem návrhu dílu sacího potrubí, návrhu formy pro daný díl a její následné analýze tokovou simulací.

Polymerní materiály, a to zejména termoplasty jsou jedny z nejhojněji užívaných materiálů v automobilovém průmyslu se stále rostoucím podílem v rámci celého automobilu. Toto je zapříčiněno unikátní kombinací vlastností, jako je chemická odolnost, hustota, dobré mechanické vlastnosti a jednotková cena dílu při velkosériové výrobě.

Teoretická část se zabývá problematikou sacích systémů, polymerními materiály, technologií vstřikování a zásadami při návrhu vstřikovaných dílů, konstrukcí forem a analýzami metodou konečných prvků. V průběhu zpracování teoretické části byla využita umělá inteligence (ChatGPT) ke stylistickým úpravám a opravám gramatiky a slovosledu. V celém rozsahu práce nebyla ani jednou využita k vyhledání informací, či generování plného textu. Veškerý text opravený umělou inteligencí byl následně přečten a byla přebrána odpovědnost za její pravost a autenticitu.

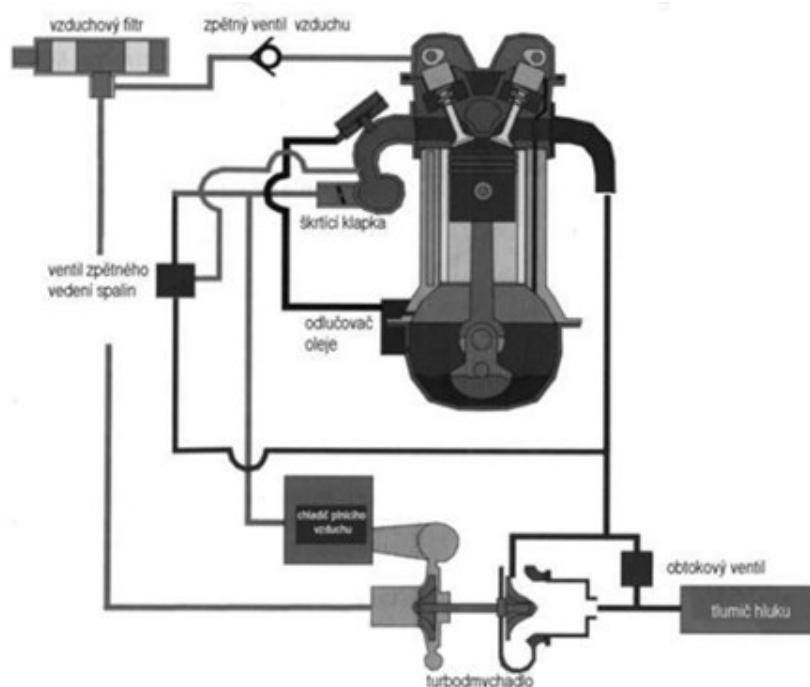
Praktická část se zabývá návrhem pružné části sání pro motor Tigershark 2.4, který na trh uvedla v roce 2013 společnost Fiat. Pro původní sací systém byla zvolena metoda vyfukování, kdy v rámci své bakalářské práce byl navrhnut alternativní sací systém, který využíval především technologii vstřikování. Tento alternativní návrh byl v rámci této práce vylepšen užitím termoplastického elastomeru za účelem snížení nákladů. Zbytek teoretické části se zabývá návrhem formy pro tento díl a provedené tokové simulace.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORIE SACÍCH SYSTÉMŮ

Hlavní funkcí sacího systému spalovacího motoru je zajištění dopravy spalovací směsi do vnitřního prostoru spalovacích válců. Množství a složení této směsi představují klíčové parametry ovlivňující celkový výkon motoru. Spalovací směs se skládá ze vzduchu a paliva, přičemž jejich poměr musí být neustále udržován v optimální hodnotě. Jakékoli odchylky od tohoto poměru mohou vést k neefektivnímu provozu motoru.

V případě nedostatečného množství paliva ve směsi by došlo ke vzniku tzv. chudé směsi, která neumožňuje plné využití dodávané energie, což by se projevilo sníženým výkonem motoru. Naopak při nadbytku paliva ve směsi hovoříme o tzv. bohaté směsi, která vede k neúplnému spalování. Tento jev by způsobil nejen snížení účinnosti motoru, ale také by zvýšil množství nespáleného paliva pronikajícího do výfukového systému, což by mohlo vést k jeho poškození. Z těchto důvodů je nezbytné zajistit správný poměr paliva a vzduchu v každém okamžiku provozu motoru. [1]



Obr. 1 Schéma sacího systému přeplňovaného zážehového motoru [2]

Vzhledem k tomu, že množství nasávaného vzduchu se v průběhu provozu mění, je nutné adekvátně regulovat i množství dodávaného paliva. Proces mísení těchto dvou složek může probíhat buď přímo ve spalovací komoře, nebo mimo ni. Přímé vstřikování paliva do spalovací komory představuje technologii umožňující přesné dávkování směsi, zatímco při mísení paliva se vzduchem mimo válce se využívá karburátor nebo nepřímé vstřikování.

V případě motorů s vnější přípravou směsi je nezbytné volit vhodné materiály jednotlivých součástí systému s ohledem na jejich odolnost vůči působení paliv. Nevhodná volba materiálů by mohla vést k degradaci jejich vlastností a tím i k negativnímu ovlivnění funkčnosti motoru.

Z hlediska sacího systému lze výkon motoru ovlivnit výhradně množstvím dopravovaného vzduchu. Zvýšení tohoto množství je možné pouze prostřednictvím regulace tlaku a teploty nasávané směsi. Ke zvýšení tlaku se využívají různé typy dmychadel, která umožňují efektivnější plnění spalovacích válců.

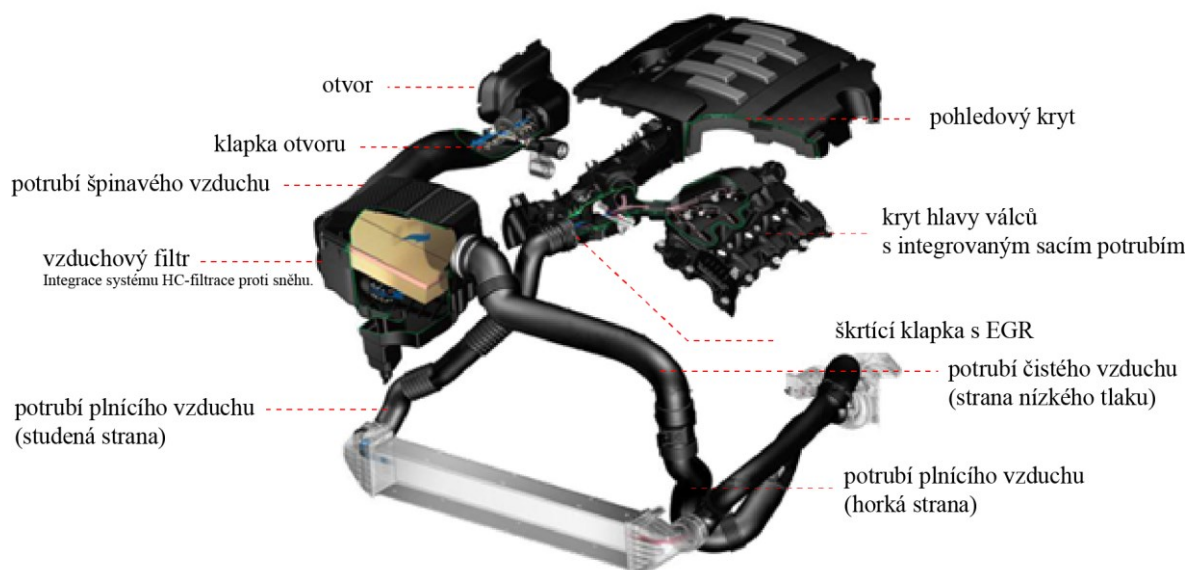
Další významnou funkcí sacího systému je redukce hluku, který se šíří ze spalovací komory do okolí motoru. K minimalizaci tohoto hluku přispívá řada konstrukčních faktorů, včetně zvětšeného objemu filtrační komory, prodloužení celkové délky sacího systému, zmenšení vnitřního průřezu potrubí a použití rezonátorů připevněných na sací vedení. Tyto prvky umožňují snížení intenzity akustického záření a přispívají ke zlepšení celkových akustických vlastností motoru. [1]

Konstrukční návrh sacího systému je zaměřen na optimalizaci přívodu dostatečného množství čistého vzduchu do spalovacích válců při současném dosažení efektivního utlumení hluku. Tento požadavek je nezbytný pro splnění platných emisních a hlukových regulací stanovených Evropskou unií či jinými lokálními regulačními orgány. Návrh sacího systému tak vyžaduje nalezení optimálního kompromisu mezi tlakovou ztrátou a akustickými vlastnostmi systému, což představuje jednu z klíčových výzev v oblasti motorového inženýrství. [3]

1.1 Části sacího systému

Sací systém většiny spalovacích motorů je tvořen několika hlavními komponenty, mezi které patří tzv. „špinavá strana“, vzduchový filtr, čistá část nízkotlaké větve, škrtková klapka a plnicí kanály. V případě přeplňovaných motorů jsou součástí systému také kompresor, chladič stlačeného vzduchu (tzv. mezichladič) a tlakové potrubí.

Při návrhu jednotlivých komponent sacího systému je nezbytné zohlednit nejen jejich funkční vlastnosti, ale také požadavky na jednoduchou montáž a možnost snadné výměny v případě poškození během provozu vozidla. Tento přístup přispívá k optimalizaci údržby a prodlužuje celkovou životnost motorového systému. [3]



Obr. 2 Vizualizace sacího systému pro přepíňaný motor [4]

1.1.1 Čistá strana sacího potrubí

Hlavní funkcí sacího potrubí na čisté straně je transport vzduchu od vzduchového filtru k motoru. Na základě umístění bývá toto potrubí rozděleno do dvou kategorií. První kategorií je nízkotlaké potrubí, které je situováno mezi vzduchovým filtrem a škrťací klapkou, případně mezi filtrem a dmýchadlem v případě přepíňaných motorů. Druhou kategorií je vysokotlaké potrubí, které se nachází mezi dmýchadlem a škrťací klapkou a vyskytuje se výhradně u přepíňaných motorů.

Vzhledem k tomu, že čisté sací potrubí slouží k vedení již přefiltrovaného vzduchu, musí být nezbytně zajištěna jeho maximální těsnost. Jakékoliv netěsnosti by mohly vést k vniknutí nečistot do systému, čímž by byl negativně ovlivněn výkon motoru a jeho životnost. Z tohoto důvodu musí být kladen důraz na precizní montáž a kontrolu těsnosti všech spojů. Rovněž musí být nezbytně zajištěna čistota jednotlivých komponent, aby nedocházelo ke kontaminaci nasávaného vzduchu nečistotami vzniklými během výrobního procesu. Těmito požadavky bývá navyšována technologická, časová a tím pádem i ekonomická náročnost výroby sacích systémů.

Ke spojování jednotlivých částí potrubí bývá běžně využíváno ocelových objímek či svařování, čímž bývá zajištěna dostatečná mechanická pevnost a těsnost spoje.

V případě nízkotlaké větve sacího potrubí, která propojuje vzduchový filtr upevněný na karoserii s motorem, musí být eliminován přenos vibrací a pohybů motoru. K zajištění této

funkce bývá do návrhu integrován pružný prvek, a to zpravidla elastomerový komponent s vlnovci.

Nedostatečné dimenzování vlnovců by mohlo vést k jejich protržení v průběhu životnosti vozidla, což by představovalo závažnou závadu. Jakékoliv poškození na čisté straně sání by zapříčinilo nasávání vzduchu z vnějšího prostředí, což by vedlo v průběhu času k degradaci motoru a snížilo by to jeho výkon. Tento problém by rovněž negativně ovlivnil funkčnost měření hmotnostního průtoku vzduchu, neboť by docházelo ke zkreslení signálu snímače průtoku vzduchu, což by mohlo vést k nesprávné regulaci spalovací směsi.

Pro zajištění těsného a spolehlivého spojení mezi vzduchovým filtrem a vstupem škrtkové klapky či dmychadla bývají běžně využívány objímkové spony a VDA konektory. Těmito spojovacími prvky by bylo umožněno bezpečné upevnění komponentů a bylo by minimalizováno riziko netěsností, které by mohly negativně ovlivnit výkon motoru a jeho provozní spolehlivost.

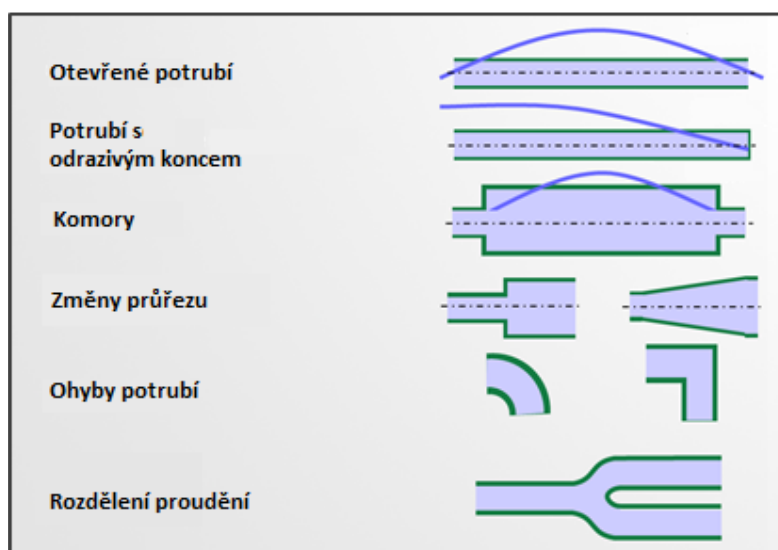
Ve většině případů bývá k sacímu potrubí připojeno odvětrání tlakové skříně, což by mohlo klást zvýšené nároky na odolnost použitých materiálů vůči působení motorového oleje a jeho par. Dále bývá sací potrubí umístěno v blízkosti motoru, čímž je způsobováno vysoké tepelné namáhání komponent.

Na základě těchto požadavků se při výrobě sacího potrubí bývají běžně využívány následující materiály:

- polyamidy plněné sklem (PA-GF) – bývají vyznačovány vysokou pevností, tepelnou a chemickou odolností, čímž jsou činěny vhodnými pro konstrukční části vystavené mechanickému a teplotnímu zatížení,
- elastomery typu AEM (ethylen-akrylový kaučuk) a ACM (akrylátový kaučuk) – tyto materiály bývají využívány pro díly, které jsou vystaveny nižšímu teplotnímu namáhání, přičemž je poskytována dostatečná odolnost vůči olejům a palivům,
- fluorokaučuky (FKM) – bývají preferovány pro komponenty, které pracují při vysokých provozních teplotách, a vyznačují se vynikající odolností vůči tepelnému a chemickému stárnutí, čímž je zajišťována jejich dlouhá životnost i v náročných podmínkách provozu motoru,
- polypropylen modifikovaný EPDM (PP-EPDM) – nachejí uplatnění především u flexibilních částí potrubí, které vyžadují zvýšenou odolnost vůči mechanickému

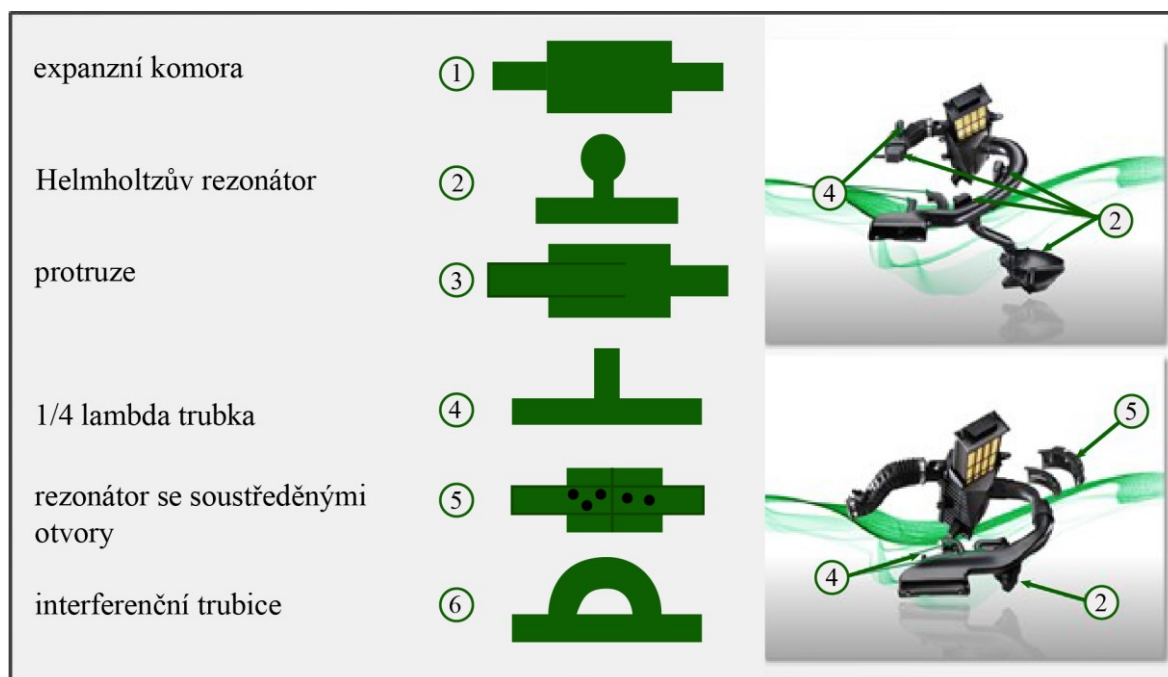
Pro minimalizaci vyzařovaného hluku bývá klíčové dosažení maximální dynamické tuhosti jednotlivých komponent sacího systému. Ke zvýšení akustického tlumení, a tím ke snížení hluku unikajícího ústím sacího systému, přispívá zvětšení objemu čističe vzduchu, prodloužení délky potrubí a zmenšení jeho průřezu. Tato opatření však přímo kolidují s požadavkem na minimalizaci tlakových ztrát v celém systému, což vyžaduje nalezení optimálního kompromisu mezi akustickou účinností a provozní efektivitou.

V případech, kdy nelze dosáhnout dostatečného tlumicího efektu pouze optimalizací délky a průřezu sacího systému, je nezbytné implementovat dodatečné tlumicí geometrie nebo použít další akustické prvky pro redukci hluku. [3]



Obr. 4 Akusticky účinné geometrie [3]

Na obrázku č.4 jsou znázorněny příklady různých tlumicích geometrií, které jsou využívány ke snižování hluku v sacím systému. První tři zobrazené varianty fungují na principu odrazu zvukových vln podél stěn, čímž dochází ke vzniku rezonancí, jež snižují energii přenášeného zvuku. Náhlé změny průřezu a ohyby v konstrukci dále vytvářejí odrazové plochy, které rovněž přispívají k rezonancím a tím i k útlumu akustické energie.



Obr. 5 Příklady druhů rezonátorů a jejich umístění [3]

Dalším účinným mechanismem je rozdělení proudění vzduchu, které vede k rozptylu a částečné destrukci zvukových vln, což dále přispívá k celkovému snížení hluku. Jelikož frekvence a intenzita odražených vln jsou ovlivňovány konkrétní geometrií a rozměry jednotlivých prvků, bývá často nezbytné kombinovat více typů tlumicích struktur tak, aby bylo dosaženo účinného potlačení širokého spektra frekvencí. [3]

Prvním rezonátorem znázorněným na obrázku č.5 je expanzní komora, která představuje lokální rozšíření objemu a bývá využívána především pro tlumení nízkých až středních frekvencí. Dalším typem je Helmholtzův rezonátor, tvořený dutou komorou propojenou s hlavním potrubím úzkým krčkem, jenž rovněž slouží ke snížení hluku v nízkém až středním frekvenčním rozsahu.

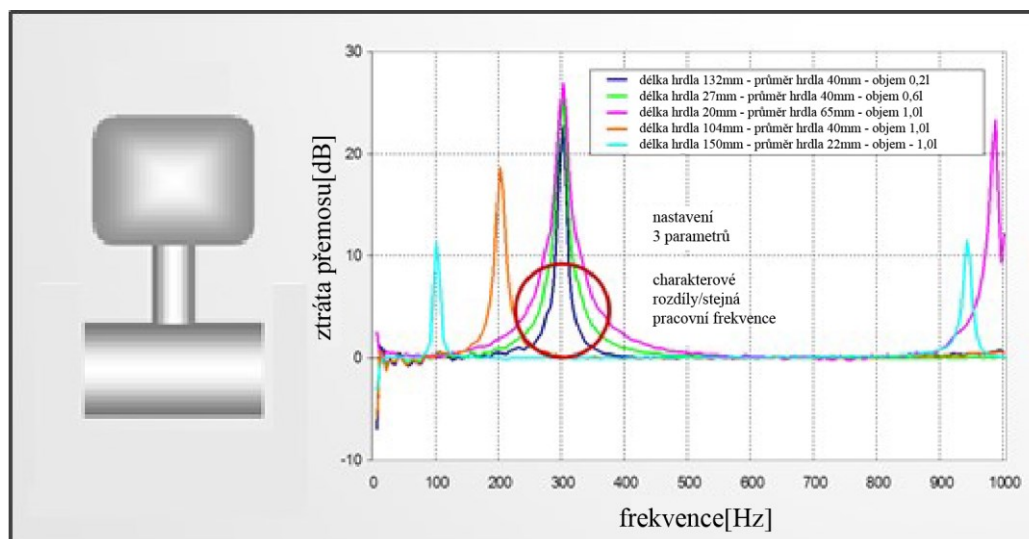
Třetím vyobrazeným rezonátorem je protruze, která se vyznačuje vysokým tlumicím účinkem a bývá primárně určena pro redukci hluku ve středním frekvenčním pásmu. Čtvrtý typ, tzv. $\lambda/4$ trubka, bývá efektivní pro tlumení středních a vysokých frekvencí. Pátým rezonátorem je komora obalující děrované potrubí, která slouží k redukci hluku ve vysokém frekvenčním rozsahu. Posledním vyobrazeným prvkem je obtoková trubka, jež bývá využívána ke snížení intenzity zvuku zejména ve vysokofrekvenčním spektru.

Při návrhu jednotlivých rezonátorů je nezbytné jejich dimenzování na specifické frekvence, které je třeba utlmit. Například tlumicí frekvence Helmholtzova rezonátoru bývá stanovována na základě matematického vztahu (1), který vyjadřuje závislost mezi geometrickými parametry rezonátoru a frekvenční odezvou systému.:

$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l \cdot V}} \quad (1)$$

Rezonanční frekvence Helmholtzova rezonátoru, označovaná jako f_{res} [Hz], je dána vztahem, který zohledňuje několik klíčových parametrů. Rychlost zvuku je označována jako c [m/s], průřez spojovacího krčku jako S [m²], délka krčku jako l [m] a objem rezonanční komory jako V [m³].

Při návrhu umístění jednotlivých rezonátorů v sacím systému je nezbytné respektovat několik zásadních pravidel. Expanzní komora, obtoková trubka a děrované potrubí s komorou by měly být situovány co nejbližší ke zdroji hluku, aby zajistily maximální tlumicí účinek. Ostatní typy rezonátorů, jako například Helmholtzův rezonátor či $\lambda/4$ trubka, dosahují optimální účinnosti, pokud jsou umístěny přibližně v jedné třetině nebo ve dvou třetinách celkové délky sacího systému. Toto uspořádání umožňuje efektivní potlačení širokého spektra akustických frekvencí. [3]



Obr. 6 Rozdílné návrhy Helmholtzova rezonátoru a graf jejich tlumících frekvencí [3]

2 POUŽÍVANÉ TECHNOLOGIE A MATERIÁLY

Díly sacích systémů jsou převážně vyráběny z polymerů, avšak některé komponenty, jako spony, pouzdra pro šrouby či tepelné štíty, jsou zhotoveny z kovů. V minulosti byly plnicí kanály často vyráběny litím hliníku, avšak z ekonomických a technických důvodů byl tento postup opuštěn. Dnes jsou tyto komponenty vyráběny převážně z termoplastů, které umožňují snížení hmotnosti a snadnější výrobu. [5]

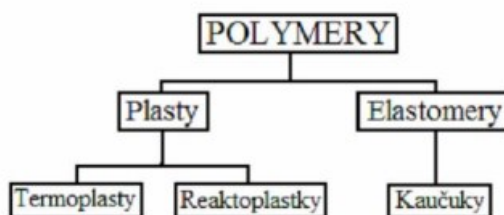


Obr. 7 Hliníkové plnicí kanály [5]

Jednotlivé díly sacích systémů jsou vystavovány odlišným provozním podmínkám a namáhání. Při volbě materiálu je proto nezbytné zohlednit nejen mechanické vlastnosti, jako je pevnost a tuhost, ale také chemickou odolnost vůči palivovým výparům, olejům a teplotním změnám. Výběr vhodného materiálu tak zásadně ovlivňuje životnost a spolehlivost celého systému. [5]

2.1 Základní rozdělení polymerů

Polymery jsou látky složené z makromolekul, které jsou rozdělovány do dvou hlavních skupin: elastomery a plasty. Plasty jsou dále děleny na termoplasty, které mohou být opakovaně tvarovány zahřátím, a reaktoplasty, které po vytvrzení již nelze znovu přetavit. Tento klasifikační systém umožňuje správnou volbu materiálu dle požadavků na mechanické a tepelné vlastnosti. [5]



Obr. 8 Základní dělení polymerů [6]

2.1.1 Termoplasty

Termoplasty jsou polymery, které při zahřátí přecházejí z pevného do kapalného skupenství a při ochlazení opět tuhnou. Tento proces je čistě fyzikální, bez chemické reakce, což umožňuje jeho opakování teoreticky neomezeně. Na základě vnitřního uspořádání jsou termoplasty rozdělovány na amorfní, které nemají uspořádanou strukturu a jsou obvykle transparentní, a semikrystalické, které obsahují krystalické oblasti zajišťující vyšší pevnost a odolnost vůči teplotě. [7]

2.1.2 Dělení a příklady termoplastů pro vstřikování

1. Amorfní – amorfní polymery jsou charakteristické tím, že při jejich zpracování nedochází k vytvoření krystalické struktury, přičemž jejich makromolekuly mají neuspořádaný, klubkový tvar. Pokud nejsou doplněny plnivem, vykazují velmi nízkou tepelnou roztažnost. Při vyhazování z formy je teplota polymeru pod bodem skelného přechodu T_g . Nejvýznamější amorfní polymery jsou polykarbonát (PC), polymethylmethakrylát (PMMA), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), a polyvinylchlorid (PVC) a polystyren (PS).
2. Semikrystalické – při zpracování semikrystalických termoplastů může být dosaženo částečné uspořádání krystalické struktury, která je charakterizována stupněm krystalinity. V těchto polymerech se vyskytují jak amorfní, tak krystalická fáze. Amorfní fáze se nachází mezi krystalickými oblastmi a zajišťuje pružnost a houževnatost materiálu, zatímco vyšší podíl krystalické fáze přispívá k jeho tuhosti a pevnosti. Makromolekuly v semikrystalických polymerech se uspořádávají do lamel, které následně vytvářejí sférolity. Obsah krystalické fáze je ovlivňován především konstrukcí dílu, přítomností a typem plniv, stejně jako teplotními podmínkami při ochlazování. Míra smrštění materiálu závisí na poměru mezi krystalickou a amorfní fází – vyšší podíl krystalické fáze vede k větší smrštivosti. Nejvýznamnější semikrystalické termoplasty jsou polyethyltereftalát (PET), polytetrafluorethylen (PTFE), Polyoxymethylen (POM).

3. Kompozity s termoplastickou maticí – termoplasty vyztužované částicovými plnivý jsou kompozitní materiály, u nichž je cílem zvýšení specifických mechanických vlastností, jako je pevnost, houževnatost nebo tepelná a rozměrová stabilita. Přídavek plniv umožňuje optimalizaci materiálu pro konkrétní aplikace, avšak kompozity s termoplastickou maticí vykazují anizotropní chování. To znamená, že mechanické vlastnosti jsou vykazovány odlišně ve směru toku taveniny a kolmo k němu, což může ovlivnit jak jejich zpracování, tak výsledné vlastnosti součásti. [8]

2.1.3 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou zesíťované polymery s trojrozměrnou prostorovou strukturou, která vzniká během zpracování působením tepla, tlaku a případně katalyzátorů. Tento proces zesíťování je nevratný a nelze jej zpětně ovlivnit tepelným ani mechanickým působením, zářením či použitým katalyzátorem.

Reaktoplasty patří mezi amorfní polymery a vynikají vysokou tepelnou i chemickou odolností, což je činí vhodnými pro aplikace s vysokými provozními nároky. Mezi nejběžnější zástupce této skupiny patří epoxidové a fenolytické pryskyřice. [7]

2.1.4 Elastomery

Elastomery jsou vysoce pružné materiály s nízkou tuhostí, které mohou být za běžných podmínek deformovány relativně malou silou, aniž by došlo k trvalému poškození. Během výroby jsou podrobovány procesu zesíťování, podobně jako reaktoplasty. Tento proces, nazývaný vulkanizace, zajišťuje vznik trojrozměrné struktury, díky níž je elastomerům dodávána mechanická stabilita. [7]



Obr. 9 Chování polymerů při zatížení: plast (vlevo), elastomer (vpravo) [7]

Na rozdíl od reaktoplastů zůstávají polymerní řetězce elastomerů schopné volného pohybu kolem svých zesíťovaných spojů, což jim umožňuje vysokou pružnost. Elastomery jsou amorfní polymery, které jsou díky své deformovatelnosti a schopnosti návratu do původního tvaru využívány například v těsněních, pryžových výrobcích a dalších pružných komponentech. [7]

2.1.5 Termoplastické elastomery

Termoplastické elastomery jsou materiály, u nichž jsou kombinovány vlastnosti elastomerů a termoplastů. Jejich struktura je tvořena tvrdými segmenty pocházejících z termoplastů a měkkými segmenty typickými pro elastomery. Na rozdíl od elastomerů při zvýšení teploty jsou přeskupeny do tekutého stavu, což umožňuje, aby byly zpracovávány stejnými metodami jako běžné termoplasty, například vstřikováním nebo extruzí.

Stejně jako elastomery jsou i termoplastické elastomery vybaveny zesíťovanou strukturou, avšak síťovací uzly jsou fyzikálního charakteru namísto chemických vazeb. Díky této struktuře sice není nedosahováno stejné elasticity jako u klasický elastomerů, avšak jejich výhodou je, že mohou být snadno zpracovatelné na standardních vstřikovacích strojích. Přítomnost termoplastických složek navíc umožňuje, aby byly svařovány s některými druhy termoplastů, což rozšiřuje jejich aplikační možnosti. [7]

Dělí se na šest klasifikovaných kategorií a jednu neklasifikovanou:

1. styrenové kopolymery (TPS)
2. termoplastické polyolefinelastomery (TPO)
3. termoplastické vulkanáty (TPV)
4. termoplastické polyurethany (TPU)
5. termoplastické kopolyestery (TPC)
6. termoplastické polyamidy (TPA)
7. neklasifikované termoplastické elastomery (TPZ), [9]

2.2 Aditiva

Polymery vhodné pro vstřikování mohou být složeny z několika složek, přičemž jednou z klíčových částí je samotný polymer, který je výsledkem jednoho z následujících procesů:

1. Polymerace – tento proces je využíván při výrobě polyolefinů, polyakrylátů a styrenových polymerů. Probíhá jako řetězová reakce, při níž jsou monomery postupně spojovány do dlouhých polymerních řetězců.
2. Polyadice – jedná se o proces, při němž jsou syntetizovány lineární polyuretany či silikony. Na rozdíl od polymerace je reakce prováděna mezi dvěma různými funkčními skupinami bez vedlejších produktů.
3. Polykondenzace – během tohoto procesu jsou vytvářeny polymery, jako jsou polykarbonáty, polyamidy a nenasycené polyestery. Průběh reakce je veden mezi dvěma různými monomery a často je doprovázen uvolněním vedlejších produktů, například vody nebo methanolu.

Polymery získané těmito metodami by mohly být vykazovány nevhodnými vlastnostmi pro proces vstřikování. Z tohoto důvodu jsou jejich charakteristiky upravovány pomocí vhodných aditiv, jimiž je ovlivňována zpracovatelnost, mechanické vlastnosti a další funkční parametry materiálu. Mezi nejčastěji používané přísady patří:

1. Písady zlepšující zpracovatelnost – jsou přidávány za účelem zvýšení teplotní stability polymeru a prodloužení doby, po kterou může být materiál udržován na pracovní teplotě v plastikační jednotce nebo v horkém vtokovém systému bez nežádoucí degradace.
2. Maziva – jsou používána ke zlepšení tokových vlastností polymerní taveniny, čímž usnadňují její zatékání do formy a následné odstranění z tvarové dutiny vstřikovací formy.
3. Činidla – u semikrystalických materiálů je zajišťována dokonalejší krystalická struktura a regulují rychlost přeměny. Díky těmto přísadám může být zkrácena doba krystalické přeměny, a tím i celkovou délku vstřikovacího cyklu.
4. Stabilizátory – jsou využívány ke zvýšení odolnosti polymeru vůči termooxidačnímu stárnutí a působení ultrafialového záření, čímž je prodlužována životnost výrobku.

5. Změkčovadla – jsou používána k modifikaci mechanických vlastností polymeru, zejména tuhosti, tvrdosti, tažnosti a elasticitě. Nejčastěji jsou používána v případě polyvinylchloridu (PVC) za účelem dosažení požadovaných mechanických vlastností.
6. Polymerní modifikátory – jsou přidávány k výchozímu polymeru s cílem zlepšení jeho vlastností, jako je houževnatost, odolnost vůči nárazům nebo chemickou stabilitu.
7. Lubrikanty – jsou využívány ke snížení viskozity taveniny, čímž je zvyšován lesk, zlepšena odformovatelnost a tekutost polymeru.
8. Antistatické přísady – jsou používány za účelem zabránění vzniku statické elektřiny na povrchu polymerního materiálu, čímž je snižována přilnavost prachu a zlepšována jeho estetické i funkční vlastnosti.
9. Zpomalovače hoření – ve vyšších koncentracích jsou používány k přispění samozhášivosti polymeru. Nadměrné množství těchto přísad však může nepříznivě ovlivnit zpracovatelské a užitné vlastnosti materiálu. Pro určení stupně hořlavosti je využívána stupnice 0-4, kde hodnota 0 označuje nehořlavý materiál a hodnota 4 označuje materiál s vysokou rychlostí hoření.
10. Nadouvadla – působení chemických nadouadel je dosahováno při zahřátí polymeru, kdy jsou tato činidla rozkládána a dochází k uvolňování plynů, čímž jsou ve struktuře materiálu vytvářeny dutinky. Použitím nadouadel může být dosaženo významného snížení měrné hmotnosti výrobku, přičemž úspora materiálu může dosahovat 20 až 60 procent. Nejčastěji jsou používána nadouvadla jako jsou plyny dobře rozpustné v polymerních materiálech, například oxid uhličitý a dusík. V praxi bývá běžně využíván azodikarbonamid, při jehož rozkladu je uvolňován dusík, a kyselina citronová, která uvolňuje oxid uhličitý.

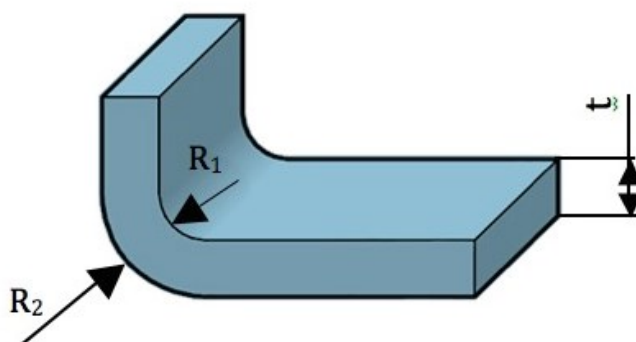
Tyto aditivní látky hrají klíčovou roli v optimalizaci vlastností polymerních materiálů, čímž je umožněno jejich širší uplatnění v průmyslové praxi.

3 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ

Při návrhu vstřikovaného dílu musí být zohledněn směr odformování, poloha dělicí roviny, umístění vtoku, vyhazovačů a temperačních kanálů. Díl by měl být navržen tak, aby bylo odformování co nejjednodušší a nebylo nutné používat složitější pohyblivé dílce formy, jako jsou šikmé tvarové vyhazovače nebo hydraulicky ovládaná jádra, která vedou ke zvýšení nákladů na výrobu formy i finálního výrobku. Zároveň však musí být nezbytně zajištěno, aby konstrukční řešení neomezovalo funkčnost dílu, která musí být vždy upřednostněna. [3]

3.1 Tloušťka stěn

Tloušťka stěn vstřikovaných dílů by měla být co nejmenší s ohledem na funkčnost, mechanickou tuhost a pevnost vstřikovaného dílu. Nemělo by být dosaženo menší tloušťky než 0,8 milimetru, aby bylo zajištěno správné zatékání materiálu a rovnoměrná distribuce taveniny. Optimální volba tloušťky stěn přispívá ke zkrácení vstřikovacího cyklu, snížení spotřeby materiálu a omezení vzniku staženin a propadlin. Při návrhu je důležité vyvarování se nekonzistentní tloušťce stěn, která by mohla vést k nerovnoměrnému chladnutí, a tím ke vzniku pnutí a deformací. Pro minimalizaci těchto nežádoucích jevů je doporučováno v místech změny směru stěny použití zaoblení hran. Tím je snížen hydraulický odpor toku taveniny a zvýšena mechanická tuhost dílu. Ideálním řešením je navržení zaoblení tak, aby vnější rádius odpovídal součtu tloušťky stěny a vnitřního rádiusu, což zajišťuje rovnoměrné rozložení materiálu. Na obrázku č.10 je znázorněno správné provedení zaoblení. [11]



Obr. 10 Zaoblení hrany [10]

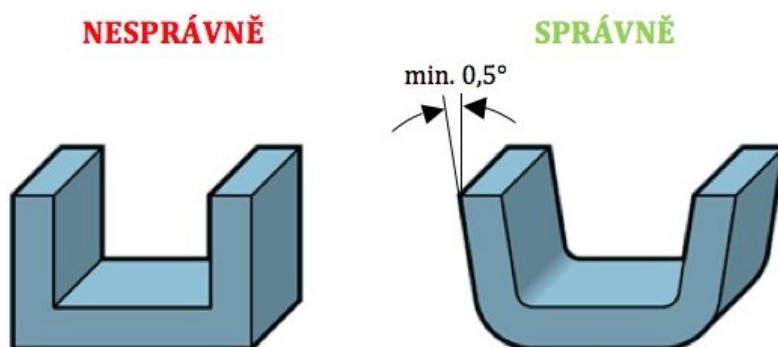
3.2 Žebrování

Žebra jsou klíčovým konstrukčním prvkem vstřikovaných plastových dílů a mohou být rozdělena na technologická a technická. Technologická žebra jsou začleněna do návrhu

s cílem optimalizovat tok taveniny ve formě, zabránit vzniku povrchových vad a omezit riziko borcení stěn. Technická žebra slouží ke zvýšení pevnosti, odolnosti a mechanické či dynamické tuhosti dílu při minimálním nárůstu jeho hmotnosti. Tloušťka žeber by měla být o 30 až 50 procent menší než tloušťka stěny, na kterou navazují, přičemž jejich výška by neměla přesahovat trojnásobek šířky stěny. Pro zajištění optimální pevnosti a snížení rizika vzniku materiálových akumulací je vhodné v místě napojení žeber na stěnu využít zaoblení s poloměrem odpovídajícím alespoň polovině šířky stěny. Důsledné navržení žebrování tak přispívá k rovnoměrnějšímu chladnutí dílu a omezení vnitřního pnutí. [11]

3.3 Úkosy

Pro zajištění hladkého vyhození výstřiku z formy a prodloužení její životnosti je nutné, aby úkosy na všech stěnách rovnoběžných s hlavním směrem odformování byly správně navrženy. Doporučené zkosení pro vnitřní stěny je $1-2^\circ$, přičemž minimální hodnota by neměla klesnout pod $30'$. U vnějších stěn se obvykle volí úkos v rozmezí $0,5-1^\circ$. Příliš malý úhel úkosu zvyšuje riziko poškození vstříkovaného dílu při vyhazování a může vést k rychlejšímu opotřebení formy. Pro ekonomickou výrobu je žádoucí minimalizovat podkoso a prvky, které by mohly způsobit zaseknutí dílu ve formě. Ačkoli je možné vyrobit díly i s negativním sklonem, je vhodné zvážit použití bočních čelistí nebo jiných mechanismů, které usnadní jejich vyhození. U menších dílů s nízkými podkoso lze díl odstranit bez poškození, pokud je vyroben z dostatečně elastického materiálu. Na obrázku č.11 je vyobrazeno správné navržení úkosů. [11]



Obr. 11 Návrh úkosů [10]

3.4 Smrštění

Smrštění je představováno jako rozměrová odchylka, která musí být zohledněna při návrhu dutiny a jádra formy tak, aby byly požadované rozměry a tvar hotového vstřikovaného dílu po ochlazení dosaženy. Obvyklým postupem pro stanovení velikosti smrštění je využívána konzultace materiálových listů poskytovaných dodavatelem materiálu. Hodnoty uvedené v těchto dokumentech jsou získány na základě zkušebních dílů vyrobených v souladu s normami ASTM (American Society for Testing and Materials) nebo ISO 294-4. Testování je prováděno za definovaných vstřikovacích podmínek, jako jsou teplota taveniny, teplota formy či vstřikovací tlak. Přestože jsou takto získané údaje poskytovány jako základní přehled o smrštění daného materiálu, mohou být skutečné rozměrové změny ovlivněny specifiky konkrétní aplikace. Proto nemohou být tyto hodnoty obvykle přímo aplikovány. U dílů s vysokými požadavky na rozměrovou přesnost musí být zohledněny všechny faktory ovlivňující smrštění, aby mohla být výsledná rozměrová přesnost výsledného vstřikovaného dílu co nejpřesněji predikována. [8]

Smrštění vstřikovaného dílu je primárně ovlivněno tlakem ve formovací dutině, přičemž klíčová role z konstrukčního hlediska je tloušťka stěny dílu. V oblastech s vyšší tloušťkou stěny (3,1 mm a více) je smrštění pohybováno na horní hranici stanoveného rozsahu, zatímco u tenčích stěn (1,3 mm nebo méně) je naopak nižší. Dále je nutné zohlednit anizotropii, tedy směrovou rozdílnost rozměrových změn, která je způsobena orientací makromolekul a přítomností plniv. U neplněných materiálů je obvykle posuzován rozdíl smrštění v podélném a příčném směru toku taveniny. Kromě konstrukčních faktorů je smrštění také ovlivněno teplotou taveniny, teplotou formy a dobou setrvání dílu ve formě, které společně určují výsledné rozměrové vlastnosti vstřikovaného dílu. [8]

Pokud jsou i přes zohlednění všech faktorů ponechány pochybnosti o konečných rozměrech dílu, mohou být přesnější údaje získány prostřednictvím výroby prototypů. V takovém případě je nejprve vytvořena prototypová forma, na jejímž základě může být stanovena reálná hodnota smrštění. Pro dosažení relevantních výsledků by měl být testovaný díl vyráběn minimálně po dobu třiceti minut za stejných podmínek, které budou použity při sériové produkci. K měření a vyhodnocení by mělo být použito pouze posledních šest vyrobených dílů, které nejlépe reflektují stabilizované podmínky výroby. [12]

3.5 Přesnost vstřikovaných dílů

Rozměry uvedené na výrobním výkrese jsou teoretické a v průběhu výroby jsou ovlivňovány odchylkami způsobenými technologií, výrobním procesem a lidským faktorem. Proto jsou na výkrese uváděny tolerance rozměrů, které určují přípustné odchylky, známé jako toleranční pole. Užší toleranční pole je spojováno s vyšší přesností výrobku, avšak současně je zvyšována výrobní náročnost a náklady. Optimální rozsah tolerance musí být stanoven konstruktérem s ohledem na funkčnost, technologické možnosti a cenu dílu. Přesnost dílu je ovlivňována technologickými parametry procesu, přesností vstřikovací formy, použitým materiálem, geometrií dílu a okolními podmínky. Často bývá předepisováno neúčelné užívání úzkých tolerancí, čímž jsou zvyšovány náklady bez výrazného přínosu pro funkčnost.

TYP PLASTU	TŘÍDA PŘESNOSTI		
	obecná	přesná	velmi přesná
ABS	130	120	110
PA	130	120	110
PA6	140	130	120
PA6.6	140	130	120
PBT	140	130	120
PC	130	120	110
PE	150	140	130
PMMA	130	120	110
POM (délka do 150 mm)	140	130	120
POM (délka nad 150 mm)	150	140	130
PP	150	140	130
PS	130	120	110
SAN	130	120	110

Tab. 1 Tolerance rozměrů plastových vstřikovaných dílů dle DIN 16901 [10]

Tolerancemi rozměrů vstřikovaných dílů je obsažena norma DIN 16901, v níž je detailně popsán proces tolerování. Přesnost je určována výběrem třídy přesnosti podle typu plastu (Tab. 1) a následně volbou tolerance podle rozměru dílu (Tab. 2). [10]

TRÍDA PŘESNOSTI	TYP ROZMĚRU	NOMINÁLNÍ ROZMĚR										
		0 - 1	1-3	3-6	6-10	10-15	15-22	22-30	30-40	40-53	53-70	70-90
extra přesné	A	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,31	0,35
	B	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,21	0,25
110	A	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,36	0,40	0,44
	B	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,26	0,30	0,34
120	A	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,46	0,50	0,56	0,60	0,68
	B	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,26	0,30	0,36	0,40	0,48
130	A	0,36	0,38	0,40	0,42	0,46	0,50	0,54	0,60	0,68	0,76	0,88
	B	0,16	0,18	0,20	0,22	0,26	0,30	0,34	0,40	0,48	0,56	0,68
140	A	0,40	0,42	0,44	0,48	0,54	0,60	0,68	0,76	0,86	1,00	1,20
	B	0,20	0,22	0,24	0,28	0,34	0,40	0,48	0,56	0,66	0,80	1,00
150	A	0,46	0,50	0,54	0,60	0,68	0,76	0,86	0,98	1,14	1,36	1,62
	B	0,26	0,30	0,34	0,40	0,48	0,56	0,66	0,78	0,94	1,16	1,42
160	A	0,56	0,60	0,66	0,74	0,84	0,98	1,14	1,32	1,56	1,88	2,30
	B	0,36	0,40	0,46	0,54	0,64	0,78	0,94	1,12	1,32	1,68	2,10

Tab. 2 Hospodárně dosažitelné třídy přesnosti dle DIN 16901[10]

4 FORMA PRO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

Vstřikovací forma je představována jako komplexní nástroj, jehož hlavním účelem je výroba plastových dílů vstřikováním taveniny do uzavřené dutiny. Tento proces musí splňovat širokou škálu technologických požadavků, které se týkají nejen kvality výsledného vstřikovaného dílu, ale také optimalizace výrobního procesu z hlediska času, nákladů a efektivity výroby. Mezi základní funkce vstřikovací formy je zařazována především doprava taveniny do dutiny formy a její rovnoměrné rozložení tak, aby mohl být zajištěn tvar konečného výrobku odpovídající navrženému designu.

Kromě primární funkce plnění formy musí forma zajišťovat i optimální odvádění tepla získaného z taveniny. Správně navržený systém temperace umožňuje rovnoměrné tuhnutí plastu, čímž se předchází vzniku vnitřního pnutí a deformací. Další zásadní funkcí formy je mechanismus odformování vstřikovaného dílu, který musí umožňovat jeho rychlé a bezproblémové vyjmutí, a to při zachování požadovaných rozměrových tolerancí a povrchové kvality výrobku.

Při návrhu formy je třeba zvážit nejen základní konstrukční požadavky, ale také jejich vzájemnou provázanost a možné konflikty, například mezi optimálním temperačním kanálů a rozmístěním vyhazovačů. Správná volba konstrukčních parametrů formy má klíčový dopad na kvalitu výsledného produktu, životnost formy a efektivitu celého výrobního procesu. [10]

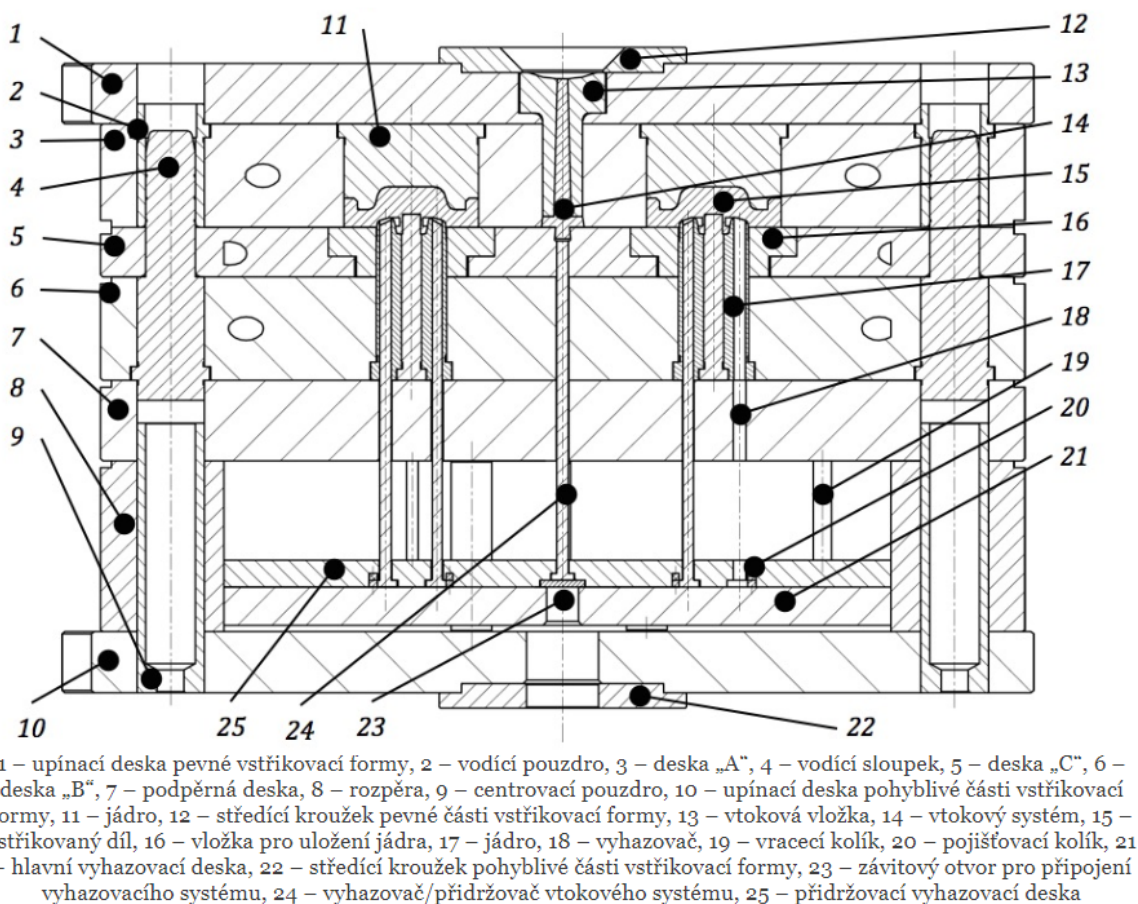
VSTŘIKOVACÍ FORMA					
DOPRAVA TAVENINY		PŘENOS TEPLA		ODFORMOVÁNÍ DÍLU	
ODOLNOST PROTI DEFORMACÍM	VEDENÍ TAVENINY	ODVOD TEPLA Z DÍLU	ODVOD TEPLA Z FORMY	OTEVŘENÍ FORMY	ODFORMOVÁNÍ DÍLU
PODPĚRNÉ VÁLCE	VÝTOKOVÝ SYSTÉM	POČET TEMPERAČNÍCH KANÁLŮ	RYCHLOST TOKU TEMPERAČNÍ TEKUTINY	DĚLÍČÍ ROVINA	VYHAZOVAČE
TLOUŠŤKA DESEK	ÚSTÍ VTOKU	ROZMĚRY CHLADÍČÍCH KANÁLŮ	PRŮŘEZ VEDENÍ TEMPERAČNÍ KAPALINY	VYTAŽENÍ JADER	ROBOTICKÉ VYJÍMÁNÍ
VÝCENÁSOBNÉ PROPOJENÍ		TEPELNĚ VODIVÉ VLOŽKY			TAHAČE JADER

Tab. 3 Návaznost požadavků a funkcí vstřikovací formy. [10]

Rozvržení vstřikovací formy může mít různé varianty, přičemž mezi nejčastěji používané konfigurace patří:

1. konstrukce s jednou dělicí rovinou, obsahující opěrnou desku a vyhazovací mechanismus
2. konstrukce se dvěma dělicími rovinami, vybavená stírací deskou a vyhazovacím mechanismem
3. konstrukce s jednou dělicí rovinou, neobsahující opěrnou ani upínací desku
4. konstrukce s jednou dělicí rovinou bez opěrné desky
5. konstrukce s jednou dělicí rovinou, umožňující vyhřívání a vybavená vyhazovacím mechanismem
6. konstrukce s jednou dělicí rovinou, bez opěrné desky, s vyhazovacím mechanismem a možností vyhřívání rozvodu

Každý z těchto typů je odlišován svou konstrukční složitostí a je volen s ohledem na specifické požadavky výrobního procesu a charakteristiky vyráběného dílu. [10]



Obr. 12 Řez vstřikovací formou [10]

4.1 Konstrukční návrh formy

Konstrukční návrh vstřikovací formy je nezbytný nejen jako podklad pro samotnou konstrukci, ale také pro posouzení technologické náročnosti a odhad nákladů na její výrobu. Při návrhu musí být zohledněna řada klíčových faktorů, mezi které patří rozměry a tvar vyráběného dílu, vlastnosti vstřikovaného materiálu, jeho zpracovatelnost, způsob zaformování a násobnost formy. Dále musí být určena poloha dělicí roviny, typ a umístění vtoku s ústím a optimální rozložení vyhazovacích prvků. Na základě analýzy těchto parametrů je přirozeně vyvozován celkový koncept formy, ke kterému se následně navrhuje vyhazovací a temperační systém, případně další specifické konstrukční prvky. [11]

4.2 Postup při konstrukci vstřikovací formy

Konstrukce vstřikovací formy je systematický proces, který zahrnuje několik na sebe navazujících kroků:

1. Analýza vstřikovaného dílu – je posuzován tvar a rozměry výrobku, jsou analyzovány tvářecí podmínky a případná technologická omezení.
2. Určení dělicí roviny – je volena optimální poloha dělicí roviny a určován způsob zaformování.
3. Návrh rozložení dutin ve formě – jsou rozmístěny dutiny v závislosti na požadavcích na produktivitu výroby a technologické limity vstřikovacího stroje.
4. Konstrukce temperačního a vyhazovacího systému – Je navržen systém chlazení a odformování vstřikovaného dílu, který ovlivňuje délku vstřikovacího cyklu a kvalitu dílu.
5. Volba konstrukčního řešení formy – je určen vhodný typ rámu formy, zohledňující počet dutin, způsob chlazení a vyhazování.
6. Kontrola funkčnosti návrhu – jsou ověřovány funkční parametry formy s ohledem na kompatibilitu se vstřikovacím strojem a požadavky na výslednou kvalitu vstřikovaného dílu.

Použití normalizovaných dílů formy, tzv. je normálií, výrazně usnadňováno při její konstrukci a výrobě. Normalizované součásti jsou zahrnovány například do rámců forem, vtokových soustav, vyhazovacích systémů nebo mechanismů pohyblivých částí formy.

Využitím těchto komponent vede je dosahováno optimalizace výrobních nákladů, zvýšení životnosti formy a zkrácení celkového vývojového cyklu. [11]

4.3 Materiály pro výrobu vstřikovacích forem

Výběr materiálu pro výrobu vstřikovací formy je zásadně ovlivňován její požadovanou životností, odolností proti opotřebení a kvalitou výsledného vstřikovaného dílu. Nejčastěji jsou používány materiály legované oceli, které jsou vybírány pro svou optimální kombinaci mechanických vlastností, korozní odolnosti a tepelné vodivosti.

Správná volba materiálu formy je podmíněna několika faktory, mezi které patří:

- Obrobitelnost a tepelná stabilita – materiál formy by měl umožňovat to, aby mohl být přesně obráběn a měla by být zachována rozměrová stabilita při změnách teploty.
- Povrchová úprava – měla by být umožněna možnost leštění, nitridace či povlakování materiálu pro zvýšení jeho odolnosti vůči opotřebení.
- Tepelná vodivost – měla by být zajištěna schopnost efektivního odvádění tepla, která ovlivňuje kvalitu chladicího procesu a rozměrovou stabilitu dílu. [13]

4.4 Temperace forem

Temperační systém vstřikovací formy je považován zásadní prvek v řízení teplotního režimu během vstřikovacího procesu. Efektivní temperace je umožňována optimalizací délky výrobního cyklu a minimalizací délky deformací dílu způsobených nerovnoměrným chlazením.

Při návrhu temperačního systému musí být dbáno na rovnoměrné rozmístění temperačních kanálů a jejich optimální vzdálenost od povrchu dutiny formy. Temperační médium, nejčastěji voda, je vedeno skrz kanály v tělese formy, přiváděno teplo do formy před zahájením výroby ve formě a následně je z ní odváděno teplo z roztaveného plastu, čímž zajišťuje konzistentní kvalitu vstřikovaného dílu. [13]

4.5 Vtokové soustavy

Vtoková soustava je považována za klíčovou součástí vstřikovací formy, prostřednictvím které je zajišťován plynulý přívod taveniny do dutiny formy. Správně navržený systém musí být navržen tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné plnění dutin, minimalizaci tlakových ztrát a optimální distribuci materiálu. Konstrukční řešení vtokových soustav je ovlivňováno nejen

požadavky na kvalitu vstřikovaného dílu, ale také efektivitu výrobního procesu. Vtokové soustavy jsou rozdělovány na studené a horké, přičemž jejich výběr je určován požadovanou kvalitou vstřikovaného, objemem výroby a ekonomickými faktory.

Studené vtokové soustavy jsou považovány za jednodušší a levnější řešení, kde je po zatuhnutí ponechán vtokový systém jako součást vyrobeného dílu a je nutné, aby byl následně odstraněn. Tím je vedeno k vyšší spotřebě materiálu a odpadu, který musí být recyklován nebo likvidovat. Tento systém je vhodný pro menší výrobní série a méně náročné aplikace.

Horké vtokové soustavy umožňují, aby byla tavenina udržována v tekutém stavu po celou dobu vstřikovacího cyklu, čímž je eliminován vznik vtokové odpadů a umožněna vyšší efektivita výroby. Jsou preferovány při sériové výrobě, zejména u dílů, na které jsou kladeny vysoké nároky na rozměrovou přesnost a povrchovou kvalitu. Je však vyžadována vyšší počáteční investice a pravidelná údržba.

Zásadní vliv na výslednou kvalitu je volba optimálního vtokového systému, který zásadně ovlivňuje výrobní náklady a celkovou efektivitu vstřikovacího procesu. [10]

4.6 Vyhazovací systém formy

Vyhazování vstřikovaných z formy je proces, při němž je hotový výrobek odstraňován z dutiny formy pomocí vyhazovacího mechanismu, který může pracovat automaticky nebo poloautomaticky. Klíčovým faktorem správného vyhození je, aby byl zajištěn hladký povrch vstřikovaného dílu, správně zvolené úkosy a zajištěna dostatečná vyhazovací síla. Ta nebývá v praxi běžně počítána, ale u hydraulických či pneumatických systémů je správnost funkce ověřována testováním.

Existují tři základní typy vyhazování:

- Mechanické vyhazování je nejrozšířenější a preferované řešení pro většinu aplikací. Jsou využívány metody, jako jsou vyhazovací kolíky, stírací desky či šikmé vyhazování.
- Pneumatické vyhazování je vhodné pro tenkostěnné vstřikované díly větších rozměrů, přičemž je stlačený vzduch vháněn mezi vstřikovaný díl a formu a díl je tímto je způsobem rovnoměrně oddělován.

- Hydraulické vyhazování bývá součástí vstřikovacího stroje a umožňuje, aby bylo ovládání mechanických vyhazovačů zajištěno formou uzavřené hydraulické jednotky zabudované do formy.

Po odstranění vstřikovaného dílu musí být vrácen vyhazovací systém do výchozí polohy, což může být provedeno pružinami, vratnými kolíky, vačkami nebo využitím tlakového média v pneumatických a hydraulických systémech. [13]

4.7 Odvzdušnění formy

Při zahájení vstřikovacího procesu je dutina formy naplněna uzavřených vzduchem, který je před taveninou vytlačován. Pokud není vzduch správně odváděn, může dojít k nadměrnému ohřevu polymeru a vzniku tzv. dieselového efektu, který způsobuje místní degradaci materiálu. Ta se projevuje jako lesklé nebo černé spálené skvrny. Špatné odvzdušnění může také vést k nedotečení materiálu do všech částí vstřikovaného dílu.

Vzduch je obvykle odváděn mezerami mezi pohyblivými čelistmi nebo dělicí rovinou formy. Problémy s odvzdušněním lze předcházet již ve fázi návrhu formy, kdy lze využít simulační výpočty k identifikaci kritických míst. Na základě zkušeností mohou být konstruktérem navrženy odvzdušňovací kanály. Další možností je optimalizace odvzdušnění v průběhu zkušební fáze formy na základě naměřených výsledků.[8]

5 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je jednou z nejrozšířenějších technologií zpracování polymerů, umožňující výrobu termoplastů, vybraných reaktoplastů a kaučuků. Tento proces je klíčový pro plastikářský průmysl díky své efektivitě při sériové výrobě a schopnosti zpracovávat tvarově složité díly. Výrobky mohou být finálními produkty nebo polotovary pro další úpravy.

Jedná se o cyklický proces, kdy je materiál z plastikační komory vstřikuje do kovové formy, kde zatuhne či zasíťuje. Výhodou je krátký výrobní cyklus, vysoká přesnost a kvalitní povrchová úprava. Nevýhodami jsou vysoké pořizovací náklady, dlouhá výroba formy a rozměrnost zařízení vůči vyráběnému dílu. [14]

5.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus lze nejlépe vizualizovat pomocí koláčového grafu, který znázorňuje jednotlivé fáze procesu z pohledu vstřikovací jednotky i formy. Vnitřní část grafu reprezentuje děje plastikační jednotky, zatímco vnější část znázorňuje činnost formy.

Cyklus začíná uzavřením formy, přičemž současně dochází k přesunutí plastikační jednotky. Po úplném uzavření formy započne vstřikování, tedy doprava taveniny do dutiny formy. Po jejím naplnění plastikační jednotka ještě krátce působí dotlakem, aby se zabránilo vzniku vad. Následně se plastikační jednotka vzdálí a probíhá chlazení vstřikovaného dílu. Po jeho dokončení se forma otevře, vstřikovaný díl je vyhozen a forma se připraví na další cyklus. Tento proces se opakuje, přičemž jednotlivé fáze musí být přesně časově sladěny pro optimální efektivitu výroby. [10]



Obr. 13 Koláčový graf vstřikovacího cyklu [10]

5.2 Vady vstřikování

Vstřikování plastů je jednou z nejpoužívanějších metod výroby plastových dílů, přičemž kvalita vstřikovaných dílů je považována za klíčovou pro jejich funkčnost, zejména v technických aplikacích, jako je automobilový průmysl. Mezi nejčastější výrobní problémy jsou řazeny vady tvaru a rozměrové vady, které mohou být způsobeny důsledkem nesprávného návrhu vstřikovacího procesu, nevhodných parametrů, vlastností polymeru nebo chybných konstrukčních řešení formy. [15]

5.2.1 Vady tvaru

Vady tvaru jsou zahrnovány mezi situace, kdy rozměry a geometrie vstřikovaného dílu nejsou v souladu s předem definovanými specifikacemi, a mohou být negativně ovlivněny jak estetické, tak funkční vlastnosti dílu. Nejčastějšími tvarovými vadami jsou:

- Přestřiky, přetoky, otřepy – nadbytečný materiál na vstřikovaném díle vznikající nedokonalým uzavřením formy nebo příliš vysokým vstřikovacím tlakem.
- Neúplné výstřiky – výrobek není zcela vyplněn materiálem, obvykle z důvodu nedostatečného vstřikovacího tlaku nebo špatného odvětrání formy.
- Propadliny, staženiny, zvlněný povrch – jsou způsobovány důsledkem nerovnoměrného chladnutí nebo nedostatečného dotlaku během procesu tuhnutí materiálu.
- stopy po vyhazovačích – jsou vytvářeny deformacemi způsobené nevhodným návrhem vyhazovacího systému nebo nedostatečnou tuhostí vstřikovaného dílu při vyhození.
- Deformace výstřiku při vyhození – jsou způsobovány nesprávně nastavenými vyhazovacími silami nebo špatně navrženými úkosy, což by mohlo vést k nežádoucím průhybům a mechanickému poškození dílu.
- Delaminace povrchu a stopy po studené tavenině – jsou spojovány s nesprávnou teplotou taveniny, nevhodnou homogenizací materiálu nebo špatným odvětráním formy. [15]

5.2.2 Příčiny vad tvaru

Vznik tvarových vad může být způsoben několika faktory:

- Materiálové vlastnosti – například viskozita taveniny, obsah vlhkosti, příměsi a přítomnost plniv mohou ovlivnit průběh vstřikovacího procesu.
- Technologické parametry – nesprávně nastavená teplota taveniny, tlak vstřikování, dotlak nebo délka cyklu mohou způsobit tvarové deformace.
- Vstřikovací stroj – nevyhovující uzavírací síla nebo nevhodně dimenzovaná tryska mohou negativně ovlivnit výsledný produkt.
- Konstrukce formy – chyby v návrhu odvzdušnění, temperačního systému nebo vyhazovací soustavy mohou vést k vadám vstřikovaného dílu.
- Geometrie vstřikovaného – nadměrné rozdíly v tloušťce stěn, ostré hrany nebo nevhodně rozmístěná žebra mohou způsobit problémy s plněním formy. [15]

5.2.3 Rozměrové vady

Rozměrové vady jsou spojovány se smrštěním materiálu během chladnutí a jeho anizotropií, tedy rozdílným smrštěním v různých směrech. Při návrhu formy musí být bráno v úvahu nejen okamžité smrštění po vyhození vstřikovaného dílu z formy, ale také dodatečné smrštění, ke kterému dochází během skladování nebo při vystavení vyšším teplotám. [15]

5.2.4 Faktory ovlivňující rozměrové vady

- Smrštění materiálu – u každého polymeru je vykazována odlišná míra smrštění, která je závislá na jeho molekulární struktuře a přítomnosti plniv.
- Dotlaková fáze – správným nastavením úrovně a doby dotlaku jsou kompenzovány objemové změny materiálu a minimalizovat rozměrové odchylky.
- Teplota formy – u amorfních polymerů musí být vstřikovaný díl před vyhozením ochlazen pod teplotu skelného přechodu (T_g), zatímco u semikrystalických materiálů je klíčová rychlost krystalizace.
- Vtoková soustava – umístění vtoků a jejich dimenzování jsou ovlivňovány tokem materiálu a tím i rozměrovou stabilitou dílu.
- Tloušťka stěny vstřikovaného dílu – nerovnoměrná tloušťka může způsobit různé rychlosti chladnutí a vést k nežádoucím deformacím. [15]

5.2.5 Typy smrštění

- Objemové smrštění – je zaznamenáváno po naplnění formy a je pokračováno i po vyhození vstřikovaných dílů, dokud není materiál plně neochlazen. Jeho hodnoty lze odhadnout z pV_T diagramů konkrétního polymeru.
- Lineární smrštění – je vyjádřeno jako rozdíl mezi rozměrem dutiny formy a finálním rozměrem vstřikovaného dílu vyjádřený v procentech. Tato hodnota je klíčová pro návrh rozměrů formy.
- Dodatečné smrštění – je zaznamenáváno po delší době, například během skladování nebo po vystavení vyšším teplotám, což může vést k dalším rozměrovým změnám.
- Anizotropie smrštění – je charakterizována rozdílným smrštěním ve směru toku taveniny a v kolmém směru. Tento jev je zvláště výrazný u polymerů vyztužených skleněnými vlákny, kde může být smrštění ve směru toku několikanásobně nižší než ve směru kolmém. [15]

5.2.6 Řešení rozměrových vad a optimalizace procesu

Přesná predikce smrštění je považována za obtížnou, a proto se v praxi využívají metody, které umožňují jeho optimalizaci:

- Simulace vstřikovacího procesu – softwary jako Moldflow, Cadmould nebo Moldex3D jsou používány k předvídání chování taveniny a rozměrových změn vstřikovaných dílů.
- Úprava dotlakové fáze – zvýšení dotlaku a prodloužení jeho doby jsou považovány za způsob, jak snížit smrštění a zlepšit rozměrovou stabilitu.
- Optimalizace teploty formy – vyšší teplota formy může být ke snížení anizotropie smrštění u semikrystalických polymerů.
- Použití plniv a aditiv – skleněná vlákna nebo nukleační činidla mohou být využívány k redukci a celkového smrštění a zvýšení rozměrové stability.
- Experimentální ověření na prototypové formě – u kritických dílů je vhodné nejprve vyrobit prototyp a na základě měření upravit finální konstrukci formy. [15]

5.2.7 Měření a kontrola rozměrových odchylek

Přesné měření rozměrů a tvarových deformací vstřikovaných dílů je považováno za klíčové pro zajištění jejich kvality. Používány jsou metody jako:

- 3D měřicí stroje (CMM) – umožňuje se vysoce přesné měření dílů podle referenčního 3D modelu.
- Optické skenery – poskytují se rychlé a bezkontaktní měření rozměrů a tvarových odchylek.
- Speciální měřicí přípravky – jsou používány v automobilovém průmyslu pro kontrolu složitých plastových dílů.
- Efektivní řízení vstřikovacího procesu a optimalizace technologických parametrů jsou považovány za klíčové pro minimalizaci vad a zajištění stabilní výroby rozměrově přesných plastových vstřikovaných dílů. [15]

6 ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU

V průběhu návrhu vstřikovací formy je chování polymeru ve formě analyzováno pomocí počítačové simulace toku ve zkratce nazývané MFA (z anglického Mold Flow Analysis). Jedná se o klíčový nástroj pro optimalizaci vstřikovacího procesu plastů. Pomáhá předvídat chování roztaveného plastu při vstřikování do formy, identifikovat možné výrobní vady a navrhnout řešení ke zlepšení kvality vstřikovaných dílů. Tato metoda umožňuje snížit výrobní náklady, minimalizovat materiálový odpad a zkrátit dobu vývoje produktu. [16]

6.1 Důvod provádění analýzy a její výhody

Hlavním účelem analýzy toku formy je zajistit, aby proces vstřikování důsledně produkoval díly bez vad. Mezi její výhody patří:

- Zlepšení kvality konstrukce – provedením analýzy je možno identifikovat a opravit konstrukční vady ještě před fyzickou výrobou.
- Zkrácení doby realizace – simulace umožňuje virtuální testování a úpravy, což výrazně zkracuje dobu potřebnou pro vývoj formy.
- Úspora nákladů – minimalizuje nutnost úprav forem a omezuje množství vadných vstřikovaných dílů [16]

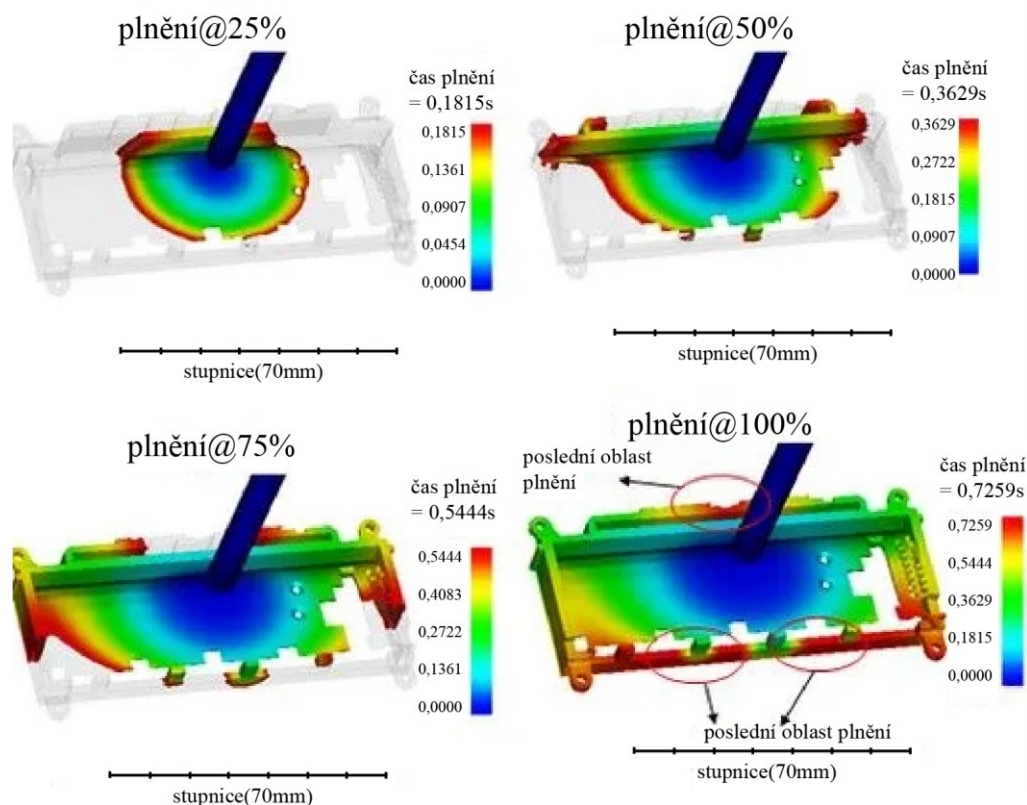
6.2 Vady odhalené pomocí tokové analýzy

Mezi běžné problémy, které toková analýza pomáhá odhalit a předejít jejich výskytu ve výrobním procesu patří:

- Vzduchové kapsy – umožňuje optimální návrh odvzdušňovacích kanálů.
- Studené spoje – vede k navržení optimálního umístění vtoků a parametry vstřikování.
- Propadliny – možnost vhodného návrhu rozložení temperačních kanálů a upravit parametry dotlaku.
- Deformace a kroucení vstřikovaného dílu – v případě přílišného kroucení je optimalizována teplota formy, zvýšena je tvarová tuhost dílu dodáním žebrování a případně je navržena dutina formy již uvažující deformaci. [16]

6.3 V praxi užívaný software

Simulace toku taveniny je dnes užívána ve velkém množství odvětví, a to zejména v automotive a lékařském průmyslu. V budoucnu se dá předpokládat široké užití umělé inteligence a strojového učení v simulačním procesu. V současné době jsou nejužívanějšími programy Moldex3D, Autodesk Moldflow a Sigma. [17]



Obr. 14 Vyobrazení plnění dutiny formy v čase [17]

II PRAKTICKÁ ČÁST

7 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

V diplomové práci jsou stanoveny následující cíle:

- 1) Vypracovat literární studii na dané téma
- 2) Nakreslit model daného dílu ve 3D
- 3) Navrhnout vstřikovací formu pro daný dílu a výkres sestavy
- 4) Provést analýzu navržené formy pomocí tokových simulací

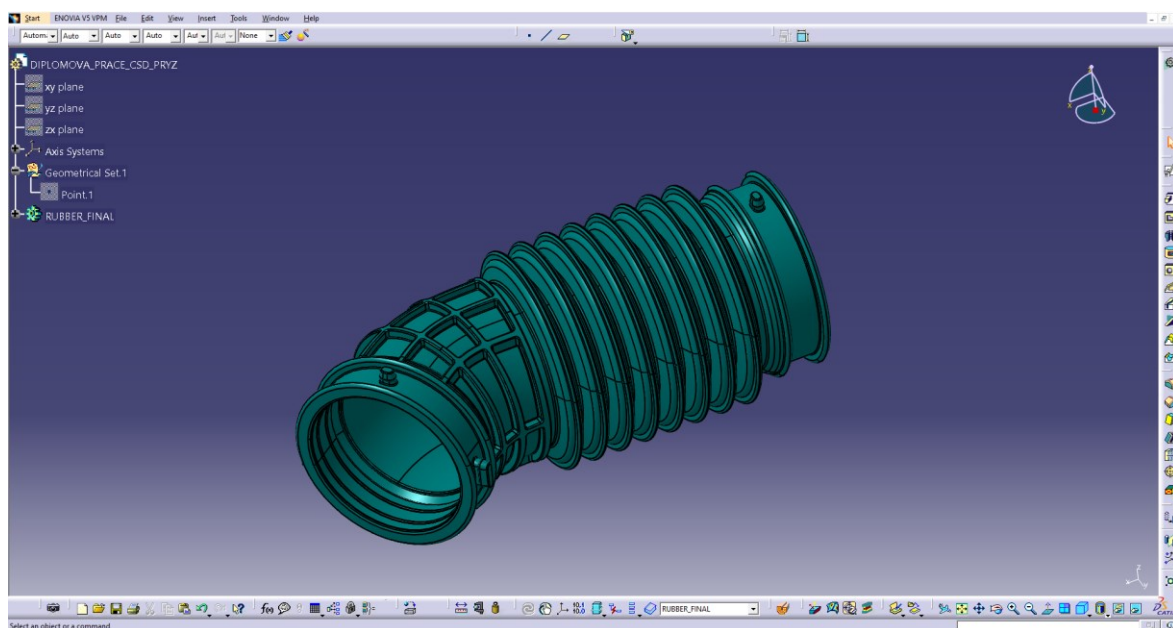
Teoretická část byla vypracována tak, aby popsala problematiku návrhu komponent sacích systémů automobilů, navrhování vstřikovaných dílů, forem a jejich následné analýzy. První kapitola pojednává o teorii sacích systémů a jaké kompromisy je třeba volit při jejich návrhu. Druhá kapitola rozebírá používané materiály, a to především polymery. Třetí kapitola řeší problematiku návrhu vstřikovaného dílu a jakými zásadami je třeba se řídit při jejich navrhování. Čtvrtá kapitola se zabývá formami pro vstřikované díly, jaké zásady dodržovat při jejím navrhování, jednotlivými funkčními částmi a jejich materiály. Pátá kapitola rozebírá samotnou technologii vstřikování, a to vstřikovací cyklus, vady, které mohou nastat při výrobě vstřikovaného dílu. Šestá a poslední kapitola teoretické části pojednává o simulacích, které se využívají k analýze procesu vstřikování.

Praktickou část můžeme rozdělit na tři hlavní části, a to návrh části sacího systému pro osobní automobil, návrh formy a výrobního procesu pro tohoto dílu v softwaru CATIA V5 a následná analýza vstřikovacího cyklu v softwaru Autodesk Moldflow Adviser 2026. Na proběhlo zhodnocení dosažených výsledků.

8 POUŽITÝ SOFTWARE

8.1 CATIA V5

Software CATIA slouží k tvorbě interaktivních trojrozměrných modelů a představuje významný nástroj v oblasti počítačem podporovaného navrhování (CAx). Jeho vývoj započal v roce 1977 ve francouzské společnosti Avions Marcel Dassault, původně pro interní potřeby firmy. Ke komerčnímu uplatnění došlo v roce 1981 a v roce 1988 se software začala využívat i společnost Boeing. Významným milníkem se stal rok 1998, kdy byla uvedena pátá verze systému, která se dodnes řadí mezi nejrozšířenější CAx aplikace zejména v automobilovém průmyslu. Kromě toho nachází uplatnění také v leteckém a lodním průmyslu. Mezi zásadní přednosti systému CATIA patří vysoká míra modifikovatelnosti návrhů, schopnost modelovat složité tvarové plochy, integrace katalogů normalizovaných součástí a možnost provádění různých typů analýz. Jako alternativní řešení lze uvést například software NX vyvíjený společností Siemens.

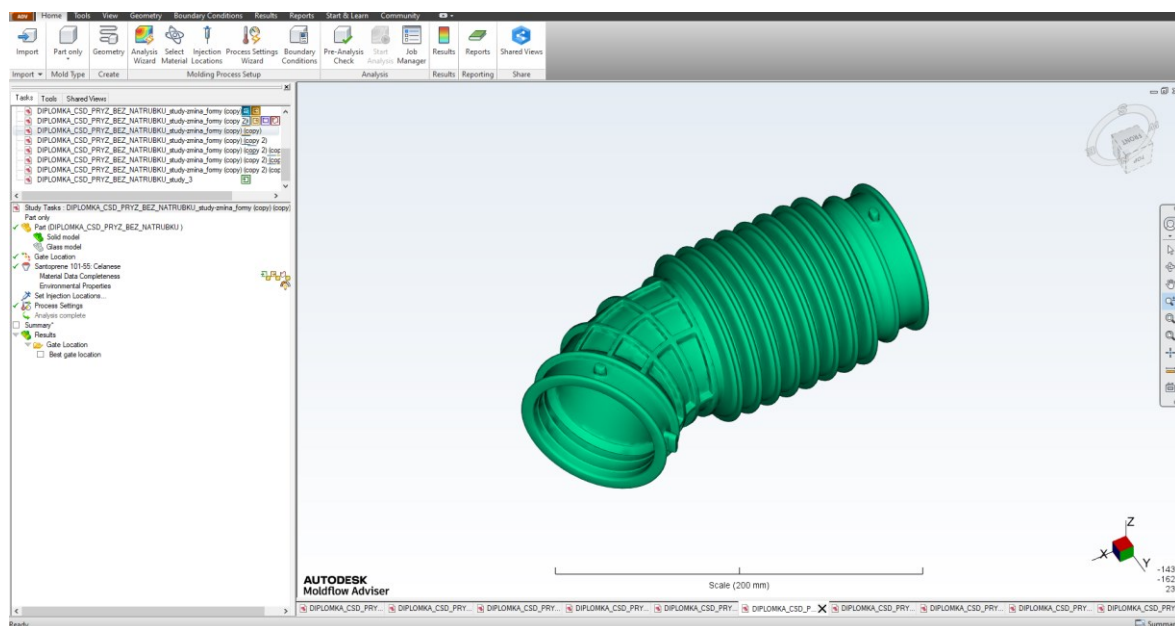


Obr. 15 Rozhraní softwaru CATIA V5

8.2 Autodesk Moldflow Adviser 2026

Autodesk Moldflow Adviser 2026 je specializovaný software sloužící k simulaci vstřikování plastů a optimalizaci návrhu plastových dílů i forem. Vývoj tohoto systému probíhá pod společností Autodesk, která se dlouhodobě zaměřuje na nástroje pro počítačem podporované inženýrství a návrh. Moldflow Adviser je určen především pro konstruktéry a technologické

specialisty, kterým poskytuje uživatelsky přívětivé rozhraní pro rychlé vyhodnocení návrhu z hlediska vstřikovací technologie. Verze z roku 2026 přináší rozšířenou podporu nových typů polymerních materiálů, přesnější výpočtové algoritmy a vylepšené nástroje pro analýzu chladicích kanálů a deformací. Své využití nachází zejména v automobilovém, elektrotechnickém a spotřebním průmyslu. Mezi hlavní výhody softwaru patří možnost rychlé identifikace konstrukčních chyb, minimalizace výrobních nákladů a snížení počtu prototypů. Alternativními řešeními mohou být například Simcenter Moldex3D nebo software SIGMASOFT.



Obr. 16 Rozhraní softwaru Autodesk Moldflow Adviser 2026

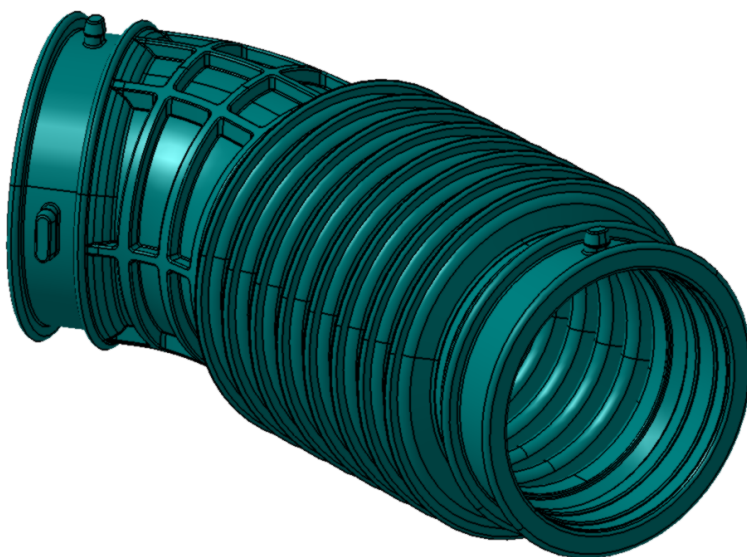
9 NÁVRH VSTŘIKOVANÉHO DÍLU

Konstrukční návrh zpracovaný v této práci je pružná část čisté strany sacího systému motoru automobilu. Jeho hlavní funkcí je tlumení vzájemného pohybu motoru a skříně filtru při zaručení minimální tlakové ztráty a těsnosti. Z tohoto důvodu bývá tento díl obvykle vyrobený z pryže. Jelikož jsou ale stroje a znalosti pro zpracování termoplastů mezi výrobci dílů v automobilovém průmyslu rozšířenější rozhodl jsem se pro návrh dílu z termoplastického elastomeru Santoprene 101-55. Tento materiál je schopný zajistit veškeré materiální požadavky pro tento díl.

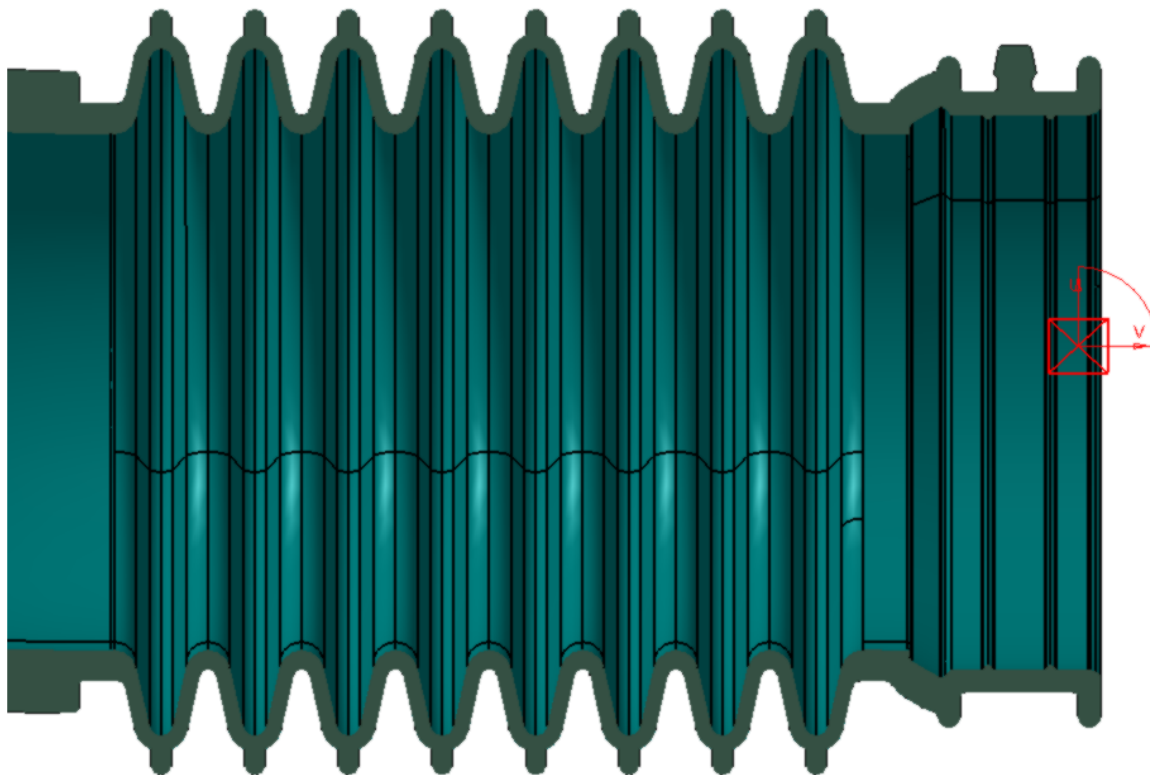
Jelikož se jedná o velmi pružný díl je možné do návrhu dílu zakomponovat mírné podkoso, čehož bylo při návrhu využito na těsnících geometriích.

V případě poškození tohoto dílu vlivem cyklické únavy a degradací materiálu by došlo k porušení celkové funkce sacího systému a možnému následnému poškození celého motoru je proto vhodné volit geometrie, které jsou již užit v obdobných aplikacích. Nejčastějšími poruchami těchto dílů v reálných aplikacích je ztráta těsnosti na připojovacích geometriích a prasknutí korugované části. Z těchto důvodů jsem převzal tyto dvě geometrie ze sacích systémů které jsou momentálně v produkci.

Vstřikovaný výrobek má přibližné rozměry 230x115x98mm a hmotnost 237g.



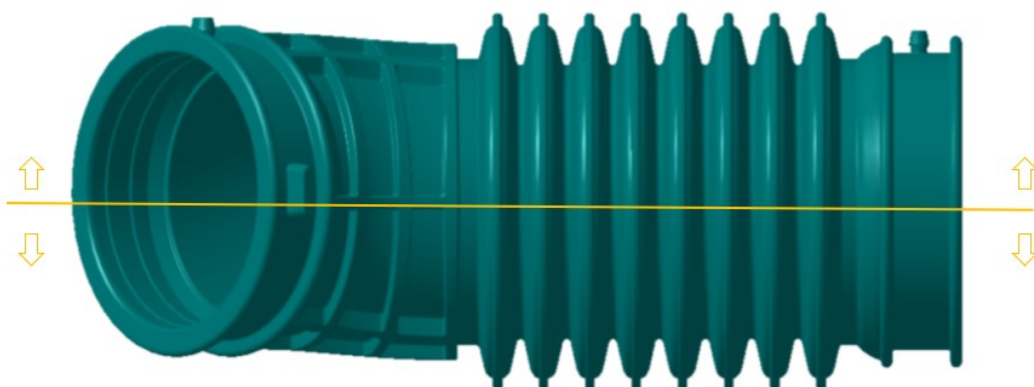
Obr. 17 Navržený díl



Obr. 18 Převzatá těsnící a korugovaná geometrie

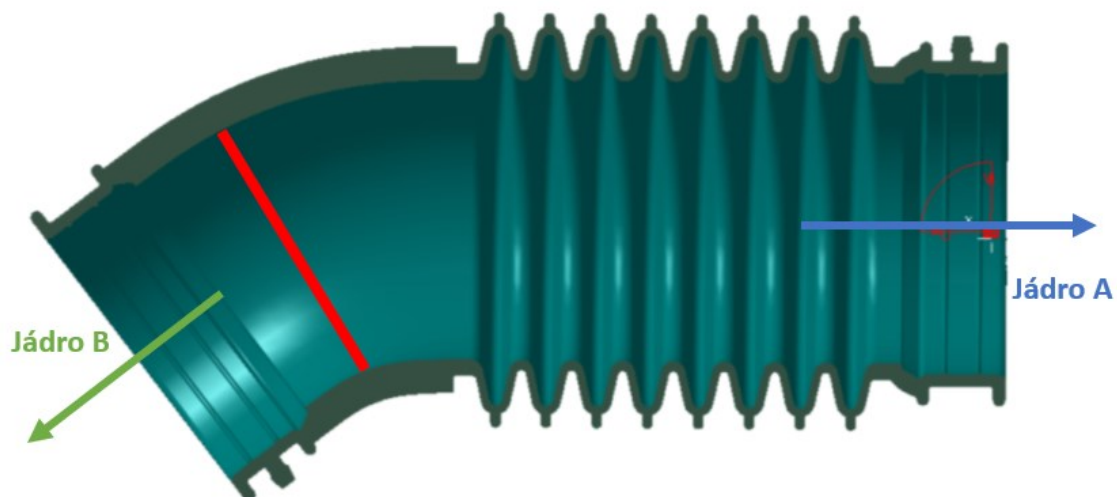
9.1 Formování navrženého dílu a násobnost formy

Vnější geometrie dílu je celá formovatelná v hlavním směru. Formování vnitřní geometrie bylo s ohledem na náročnost rozděleno do dvou pohyblivých jader.



Obr. 19 Dělicí rovina dílu a hlavní formovací směr

Obrázek 19 znázorňuje pozici dělicí roviny a hlavní formovací směr. Na Obrázku 20 je znázorněn přechod mezi jednotlivými jádry a jejich směr odsunu.

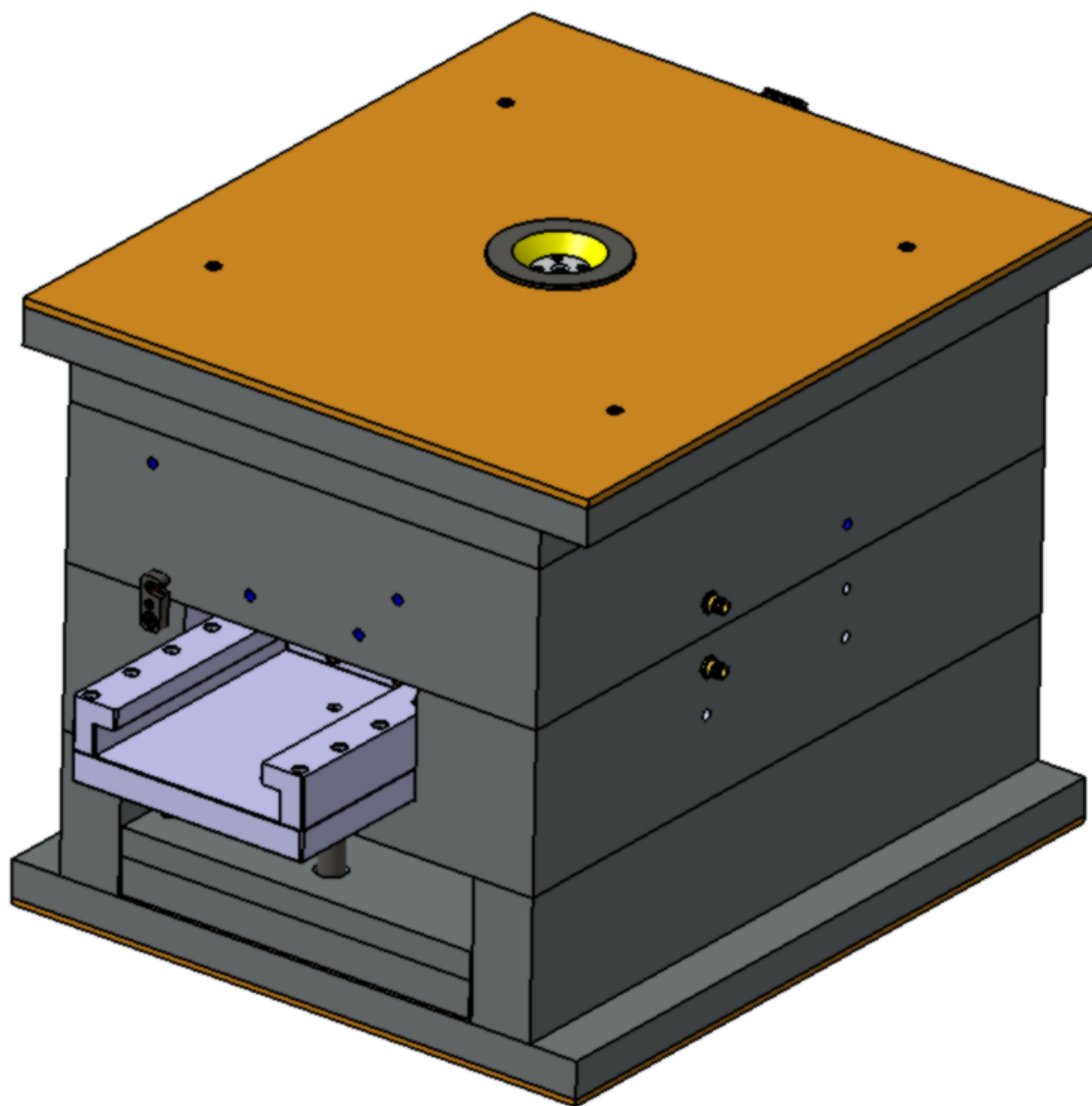


Obr. 20 Dělicí rovina jader a jejich směr pohybu

Jádro B má mírné podkoso, které je možné díky pružnosti zvoleného materiálu odformovat pohybem uvnitř formy. Jádro B má ale velmi výrazné podkoso a to především v korugované části dílu. Jelikož se jedná o primární funkční prvek s definovanou geometrií není možné tyto podkoso redukovat a musí se tomu přizpůsobit výrobní proces.

10 NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY

Při návrhu formy bylo prioritizováno užití normálií. Z toho důvodu byly využívány internetové knihovny dílů dodavatelů Hasco a Meusburger, které byly exportovány do formátu STP a následně importovány do CATIA V5. V případě potřeby neexistujícího dílu byl vybrán vyhovující díl, pro které následně byl navržený obrobený tvar toho dílu. Mezi tyto díly patří především přepážky pro chlazení jader, či vyhazovací sloupky pro jádro A. Hlavní sestava formy byla rozdělena do dvou podsestav, a to horní poloviny a dolní poloviny. Hlavní sestava a obě podsestavy jsou detailně popsány v příložené 2D dokumentaci ve formě výkresů sestav na kterých jsou uvedené katalogová čísla dodavatelů anebo čísla normy daného dílu.

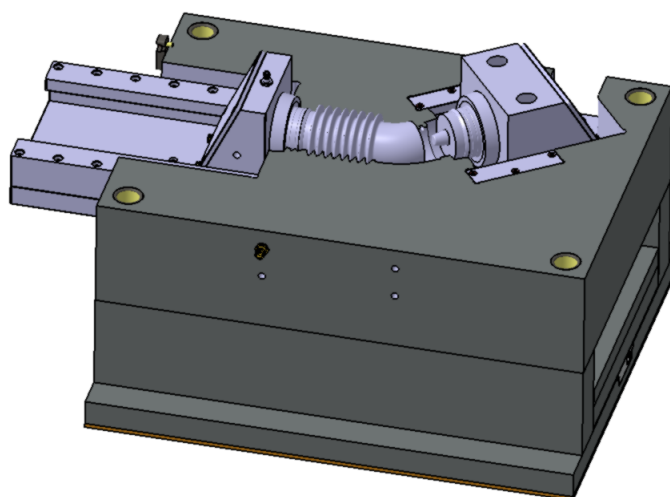


Obr. 21 Sestava formy

10.1 Výrobní postup dílu

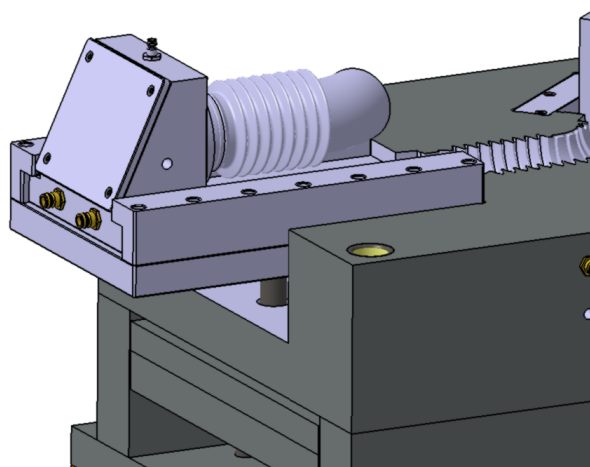
Návrh výrobního postupu byl vypracován s uvážením náročnosti výroby korugované části dílu. U pryžových dílů s obdobnou geometrií se v praxi používá natlakovaný vzduch, který se vhání mezi jádro a díl, čímž dojde k nafouknutí dílu a odlepení od jádra. Současně s vháněním vzduchu dochází k manuálnímu sejmutí dílu.

Při hlavním pohybu formy dojde k odsunutí jádra B pomocí šikmých kolíků. Toto uvolní jeden konec dílu.



Obr. 22 Otevřená forma

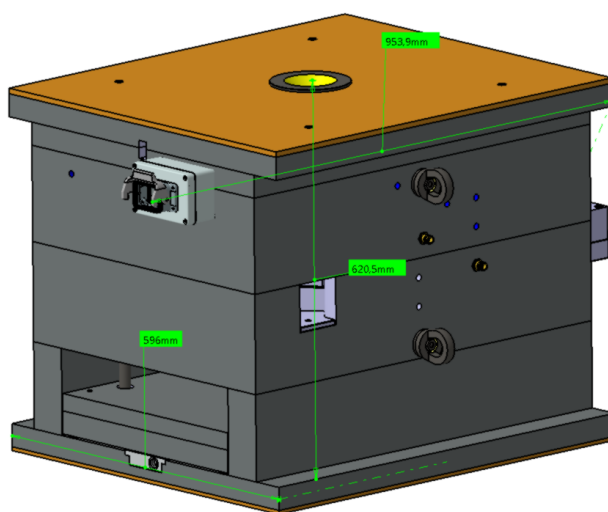
Posunutím vyhazovací desky dojde k uvolnění dílu z kavity formy, kdy díl zůstává umístěný na jádře A, které je následně manuálně odsunuto do zadní polohy svého vedení. Operátor výroby připojí na volný konec dílu dříve uvolněný jádrem B záslepku a zavede dovnitř dílu tlakový vzduch. Pro zavádění vzduchu je na vrcholu jádra umístěná rychlospojka pro připojení hadice. Po sejmutí dílu, je jádro A připraveno do originální pozice a je znovu spuštěn vstřikovací cyklus.



Obr. 23 Jádro A v odsunuté pozici

10.2 Koncepce formy

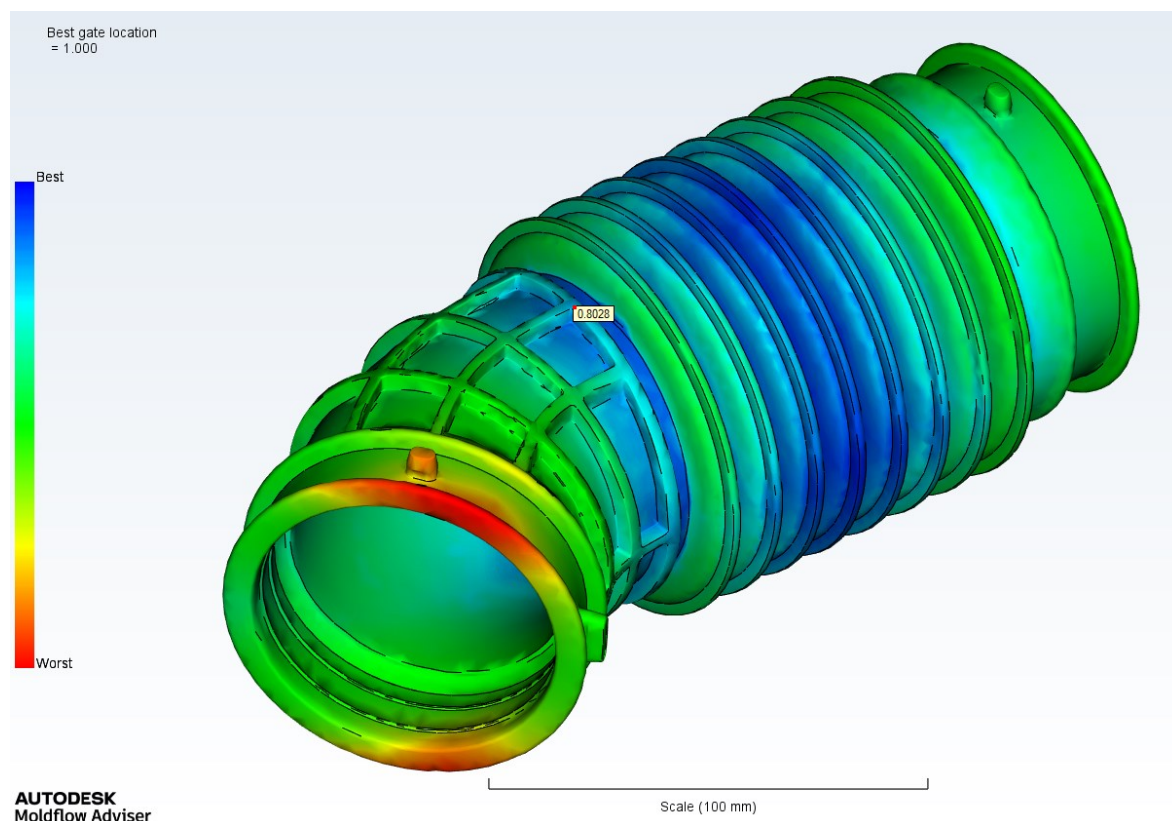
Rám formy by volen se zástavbovými požadavky horkého vtoku, násobnosti formy, rozměry vstřikovaného dílu a nutného místa pro chod pohyblivých prvků formy. Těmto požadavkům odpovídal rám o rozměrech 596x696x564,5 mm. Po přidání externího vedení jádra A a dalších externích prvků pro řízení elektroniky a manipulaci má forma celkové vnější rozměry 609x953,9x620,5 mm. Rám pohyblivé části formy sestává z kotevní desky, desky A a B a tvárnice A. Rám nepohyblivé části formy sestává z kotevní desky, distančních sloupků, tvárnice B a desek pro vyhazování. Celková váha formy dosahuje 1364,7 kg.



Obr. 24 Rozměry formy

10.3 Vtokový systém a umístění vtoku

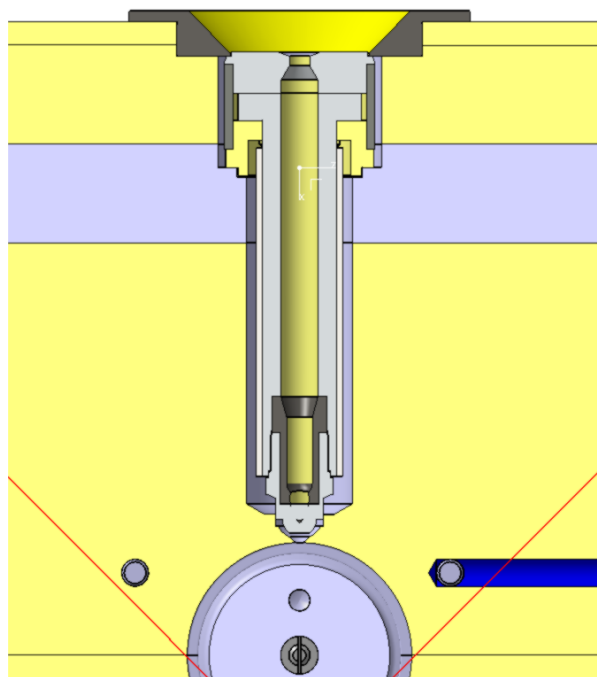
V Autodesk Moldflow Adviser 2026 byla provedena analýza polohy pro vtok. Jelikož ale tato analýza nebere v potaz funkční plochy a geometrie, je nutné vybírat kompromis mezi hodnocením polohy a funkčností.



Obr. 25 Analýza vstřikovacího bodu

Simulace vyhodnotila jako optimální místo vrchol ve středu korugací. Jelikož se ale jedná o zásadní funkční geometrii byla zvolena poloha zvýrazněná na Obrázku 25. Toto místo má hodnocení 0,8028, které je velmi příznivé a jelikož se nachází na vrcholku žebrování poskytne plochu pro vtok o průměru 4 mm a neovlivní funkčnost dílu.

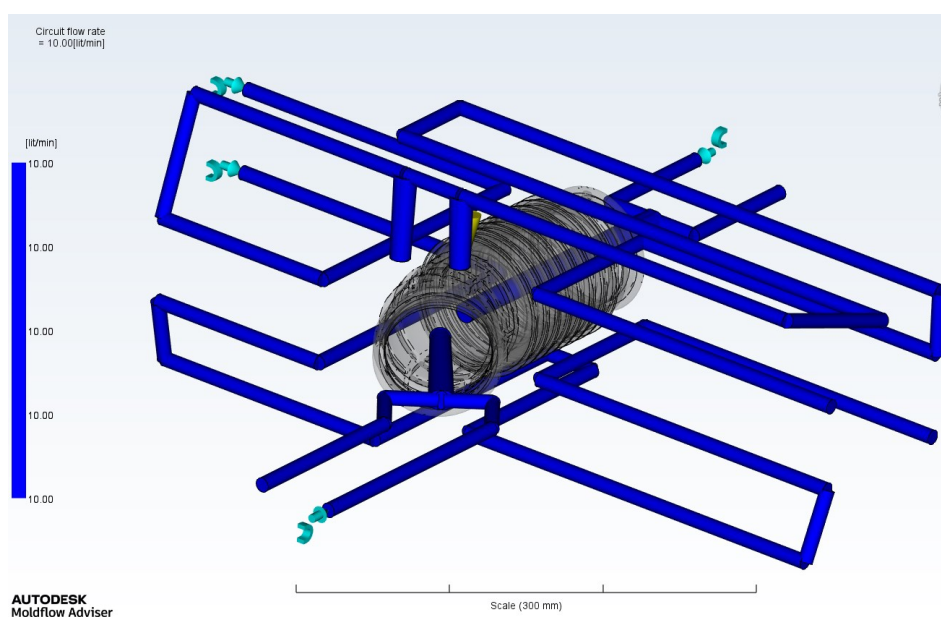
Na základě polohy a průměru byl zvolena horká tryska Vario Shot, Mono H6211 50x175 od společnosti Hasco. Na základě produktového listu výrobce byla do formy implementována požadovaná geometrie ve středu formy, se kterým je zarovnán i vstřikovací bod na díle.



Obr. 26 Usazení trysky ve formě

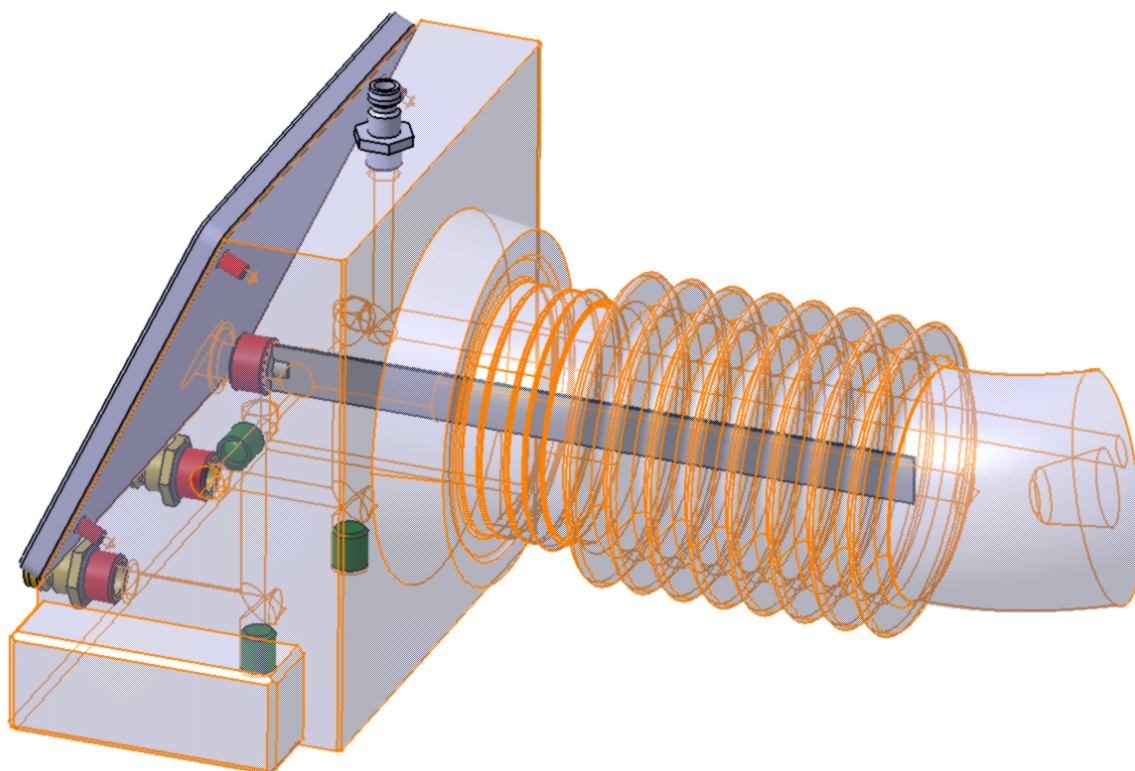
10.4 Temperační systém

Temperační systém zajišťuje udržení formy v požadované provozní teplotě a zároveň odvádí nadbytečné teplo, které je do formy přeneseno taveninou. Návrh vedení temperačních kanálů probíhal především v softwaru Autodesk Moldflow Adviser 2026, při uvážení prostoru pro vtokový systém a rozměrů jader. Bylo provedeno čtyři iterace různých rozložení temperačních kanálů, kdy první tři nedosahovaly dostatečné kvality chlazení.



Obr. 27 Čtvrtý návrh temperačních okruhů

Analýzám vyhovující návrh temperačních kanálů sestává ze čtyř okruhů s nominálním průměrem 10 mm a u temperačních kanálů vedoucími jádru je průměr 14 mm rozdělený rovnou přepážkou která je znázorněna tmavě šedě na Obrázku 28. Vtok a výtok z okruhů je řešen rychlospojkami situovanými na povrchu tvárníků a jader. Zaslepení vrtání kanálů je řešeno kuličkovou záslepkou od výrobce Hasco znázorněno zeleně na Obrázku 28.



Obr. 28 Konstrukční řešení jádra A

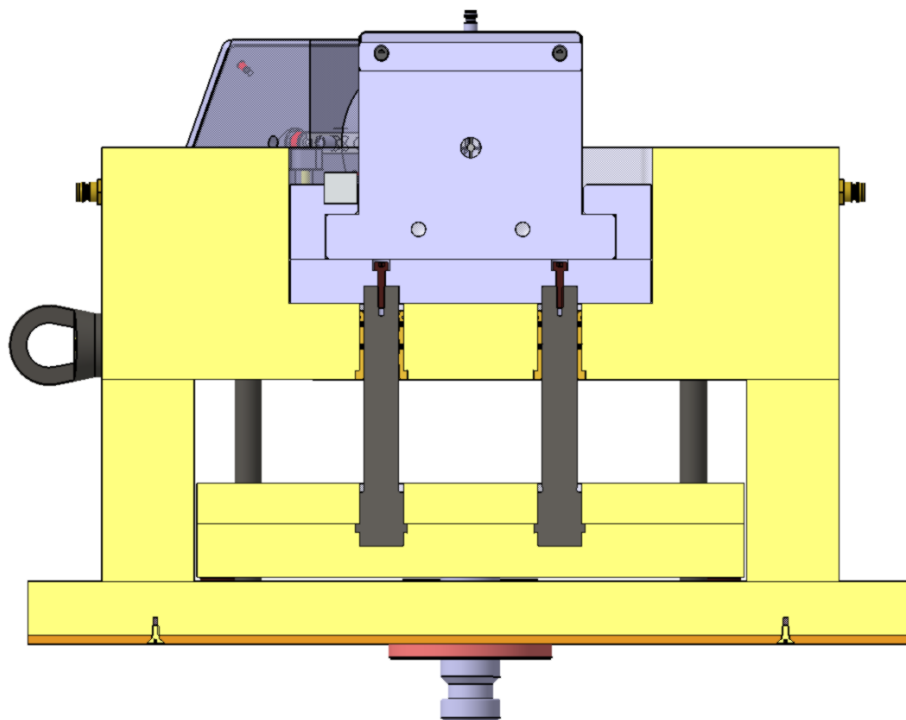
10.5 Přívod tlakového vzduchu

Jak bylo rozebráno v kapitole 10.1 pro sejmutí výrobku z jádra A je nutné přivést do dílu stlačený vzduch. Na Obrázku 28 je znázorněno umístění rychlospojky, která je napojená na vrtání procházející celým jádrem. V momentě zaslepení otevřeného konce výrobku tedy dojde k odlepení, nafouknutí a snadnému sejmutí z jádra. Jelikož by bylo konstrukčně náročné zakomponovat permanentně připojenou hadici je nutné, aby byla před vrácením jádra do polohy odpojena.

10.6 Vyhazovací systém

Vyjmutí dílu z kavity spodního tvárníku probíhá posunem jádra A, které sahá takřka přes celou délku dílu. Tento pohyb je řízen vyhazovacími deskami, ve kterých jsou uložené

vyhazovací tyče připevněné k vedení jádra A, což je vyobrazeno na Obrázku 29. Celý vyhazovací systém je uložený na spodní kotevní desce a připojený k táhlu vyhazovače. Systém se tak skládá z vyhazovací desky A a B, vedení vyhazovače, vyhazovacích tyčí a vedení jádra A.



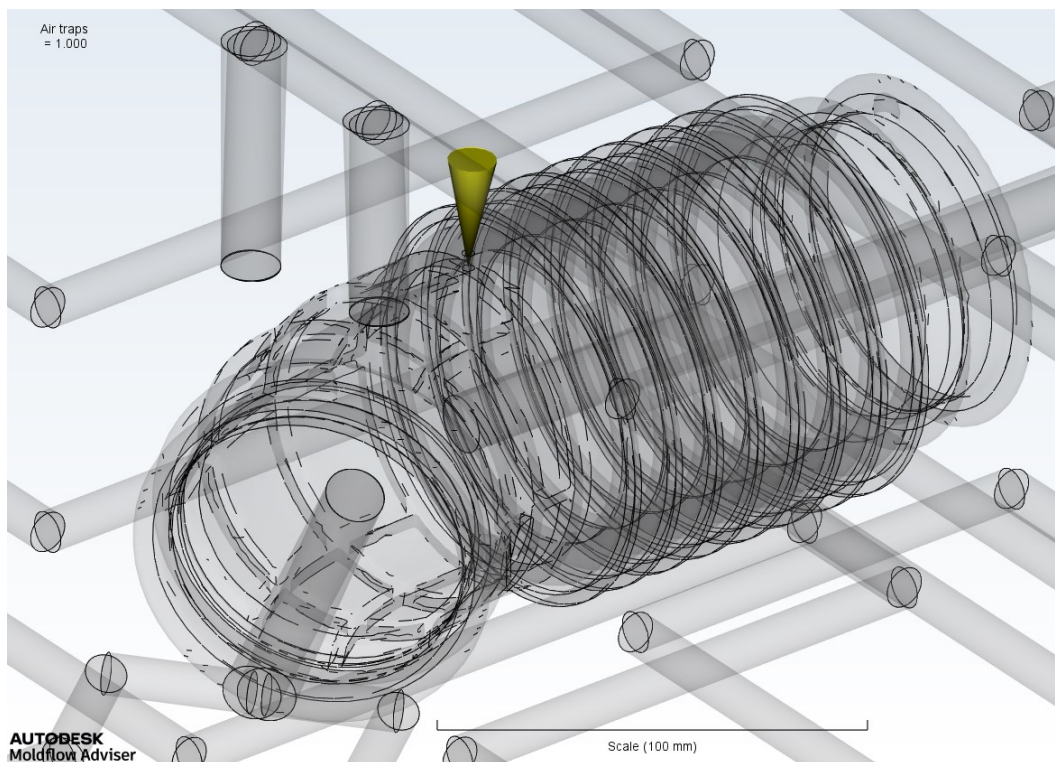
Obr. 29 Propojení vyhazovacích desek a uložení jádra A

10.7 Izolace formy

Vstřikovací forma je sevřena za obě strany ve vstřikovacím stroji. Aby nedocházelo k nežádoucím přestupům tepla jsou obě strany formy vybavené izolačními deskami, které jsou zabezpečené zapuštěnými šrouby M6, což zabráňuje kontakt šroubů se strojem. Zabezpečení izolační desky pro spodní stranu formy je znázorněné na Obrázku 29 a identické řešení je použité i na horní polovině formy.

10.8 Odvzdušnění vstřikovací formy

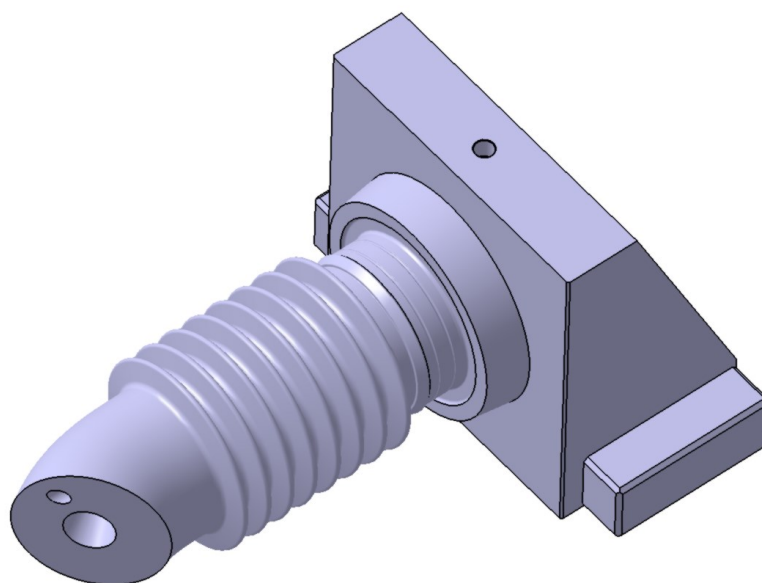
V průběhu plnění dutiny formy může při špatném návrhu formy dojít k uvěznění vzduchu. Pokud by k tomu došlo způsobilo by to na výrobku řadu defektů. Z toho důvodu byla na dílu provedena analýza vzduchových kapes. Jak je vyobrazeno na Obrázku 30 simulace neodhalila žádné oblasti, kde by vznikalo riziko uvěznění vzduchu. V návrhu formy proto bylo předpokládáno dostatečné odvzdušnění skrz dělicí roviny.



Obr. 30 Analýza vzduchových kapes

10.9 Vytvořitelnost jednotlivých dílů formy

Veškeré díly, které nelze sehnat jako normálie byly navrženy s myšlenkou jednoduché vytvořitelnosti za užití konvenčních technologií. Za výrobně nejnáročnější díl lze považovat jádro A, které bude vyžadovat obrábění na víceosé CNC frézce z důvodu komplexního tvaru.

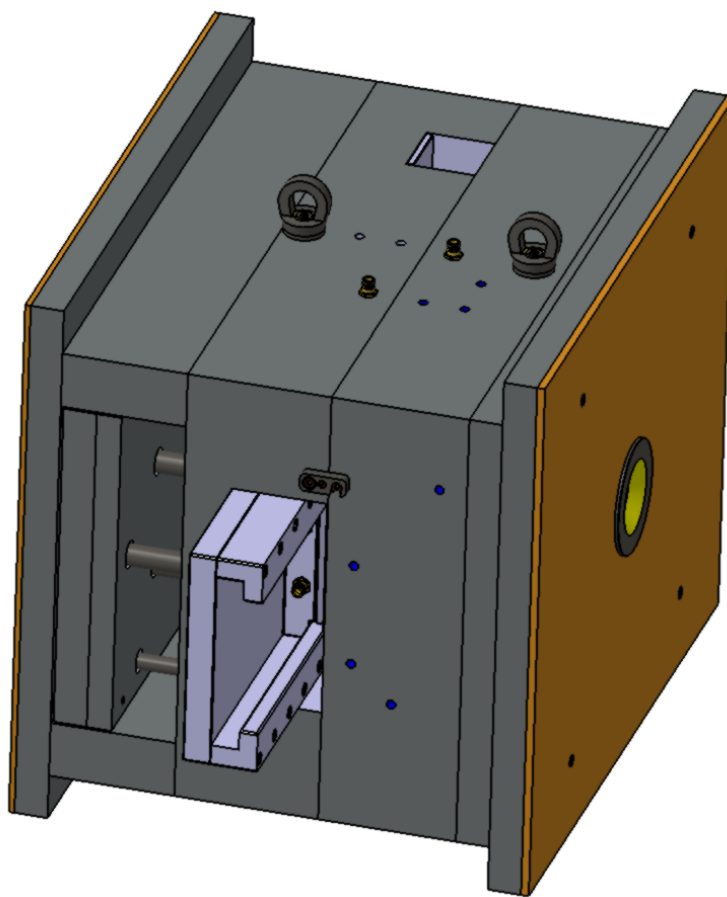


Obr. 31 Detail jádra A

10.10 Manipulace s formou

Pro manipulaci formou po hale pomocí jeřábu byla forma opatřena závěsnými oky M12, které mají dostatečnou nosnost pro manipulaci s jednotlivými polovinami i celou formou. Poloha závěsných ok je v zákrytu s těžišti každé poloviny formy a celkové těžiště se tedy bude nacházet mezi nimi. Díky tomu se předejde převrácení formy při manipulaci. V případě usazení formy do vertikálního lisu není možné užít jeřáb, ale musí se použít například zvedací vozík. Aby se předešlo rozevření formy v průběhu manipulace byla opatřena transportní pojistkou zabráňující jejímu rozevření. Jelikož forma v zavřené poloze uzamyká pohyb všech ostatních dílů, není třeba přidávat další pojistky.

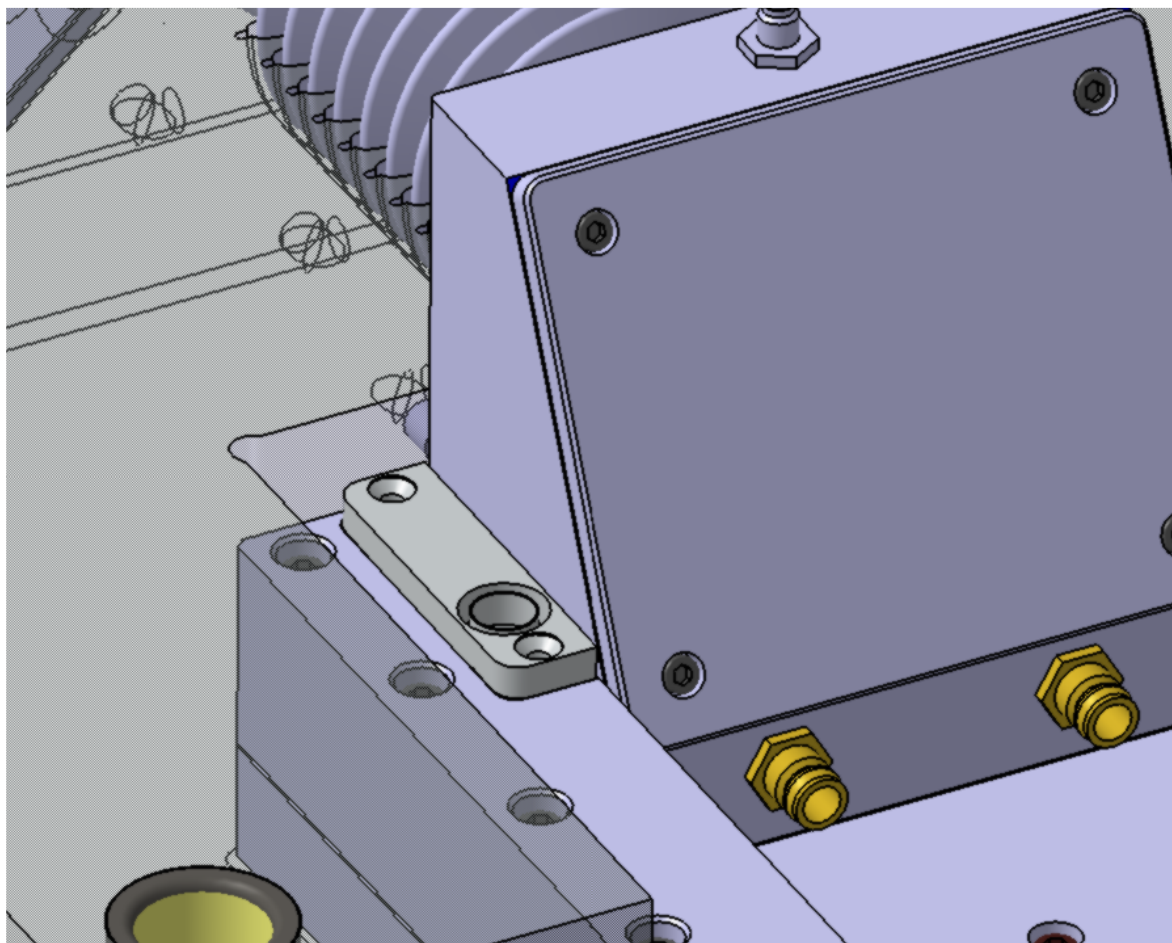
Správné usazení a vystředění vstřikovací formy je podmíněno přesným umístěním středících kroužků na její dolní a horní části. Tyto kroužky, vyznačující se specifickou geometrií, zajišťují centrování formy vůči plastikační jednotce. Po přesném zapolohování formy dochází k dosednutí trysky plastikační jednotky na vstup studené vtokové soustavy, čímž je zajištěn plynulý přenos taveniny do formy.



Obr. 32 Forma v manipulační kondici

10.11 Elektronická kontrola formy

Jelikož je pro výrobní postup nutný manuální pohyb jádrem a při jeho špatné poloze v případě uzavření formy by mohlo dojít k jejímu poškození, byly na formu umístěny dva indukční senzory. Jeden horizontální kontrolující polohu jádra A a jeden vertikální kontrolující polohu vyhazovací desky. Těmito dvěma senzory by měla být zajištěna dostatečná kontrola pozice jádra ve formě a v případě špatné polohy se nespustí cyklus dokud nedojde k její korekci.

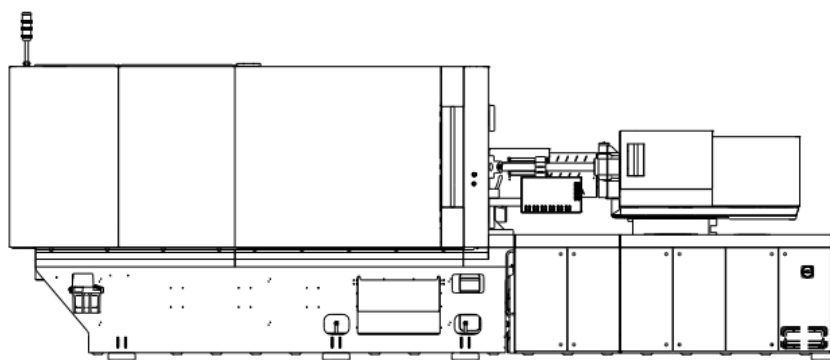


Obr. 33 Horizontální indukční senzor polohy

Jádro B je plně řízené pohybem horní poloviny formy. Není třeba proto hlídat jeho polohu.

11 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Volba vhodného vstřikovacího stroje je velmi důležitým parametrem při návrhu výroby. Stroj musí disponovat dostatečnou vstřikovací kapacitou, vstřikovacím tlakem, uzavírací silou a musí mít dostatečný prostor pro usazení formy. Pro výrobu tohoto dílu byl vytypován vhodný vstřikovací stroj, a to Arburg ALLROUNDER 630 A. Z důvodu ergonomie by byl vhodnější vertikální vstřikovací stroj s posuvným stolem, ale jejich nabídka je méně rozmanitá a u potenciálně vhodných strojů není volně dostupná informace o pracovním prostoru.



Obr. 34 Arburg ALLROUNDER 630 A

Parametry	Arburg ALLROUNDER 630 A
Uzavírací síla	2500 kN
Maximální výška formy	750 mm
Maximální vzdálenost mezi deskami	1300 mm
Prostor mezi sloupky	630x630 mm
Vstřikovací kapacita	474 cm ³
Vstřikovací tlak	165 MPa

Tab. 4 Parametry vstřikovacího stroje

Veškeré uvedené parametry odpovídají výsledkům simulací a jedná se proto o vhodný vstřikovací stroj.

12 ANALÝZA VSTŘIKOVACÍ FORMY

Jak již bylo zmíněno k analýze formy byl použit software Autodesk Moldflow Adviser 2026. Jako vstup byla využita možnost importu nativních dat z CATIA V5. Tvorba sítě probíhá při importu modelu do programu a byla zvolena možnost 3D prvků, jelikož se jedná o komplexní díl. Bohužel není možné získat detailní informace o vytvořené síti v tomto programu. Tuto možnost poskytuje pouze Autodesk Moldflow Insight, který společnost poskytuje pouze jako komerční licenci a není dostupná ve studentské verzi.

12.1 Santoprene 101-55

Tento materiál byl zvolen již při návrhu dílu, z důvodu vhodných vlastností. Jedná se o termoplastický vulkanizát, kombinující vlastnosti pryže a zpracovatelnost termoplastů. Jedná se o směs polypropylenu a EPDM jehož tvrdost odpovídá 55 Shore A a vyrábí ho společnost Celanese. Díky svým vlastnostem se jedná o materiál běžně užívaný v automotive.

Santoprene 101-55	Hodnoty
Teplota taveniny pro vstřikování	165–265 °C
Rozsah teploty formy	20–80 °C
Doporučená teplota vstřikování	215 °C
Maximální teplota taveniny	285 °C
Vyhazovací teplota	89 °C

Tab. 5 Procesní hodnoty Santoprene 101-55

12.2 Vyhodnocované parametry

Autodesk Moldflow Adviser dokáže vyhodnotit velké množství hodnot dosahovaných v průběhu výrobního cyklu. V této práci jsem se zaměřil na tyto:

- 1) Jistota plnění
- 2) Plnicí čas
- 3) Predikce kvality
- 4) Vstřikovací tlak
- 5) Teplota na hranici toku
- 6) Studené spoje
- 7) Kvalita chlazení
- 8) Doba na dosažení vyhazovací teploty

- 9) Teplota dílu při vyhození
- 10) Tlak v temperačních kanálech
- 11) Teplota temperačního média
- 12) Reynoldsovo číslo v temperačních kanálech

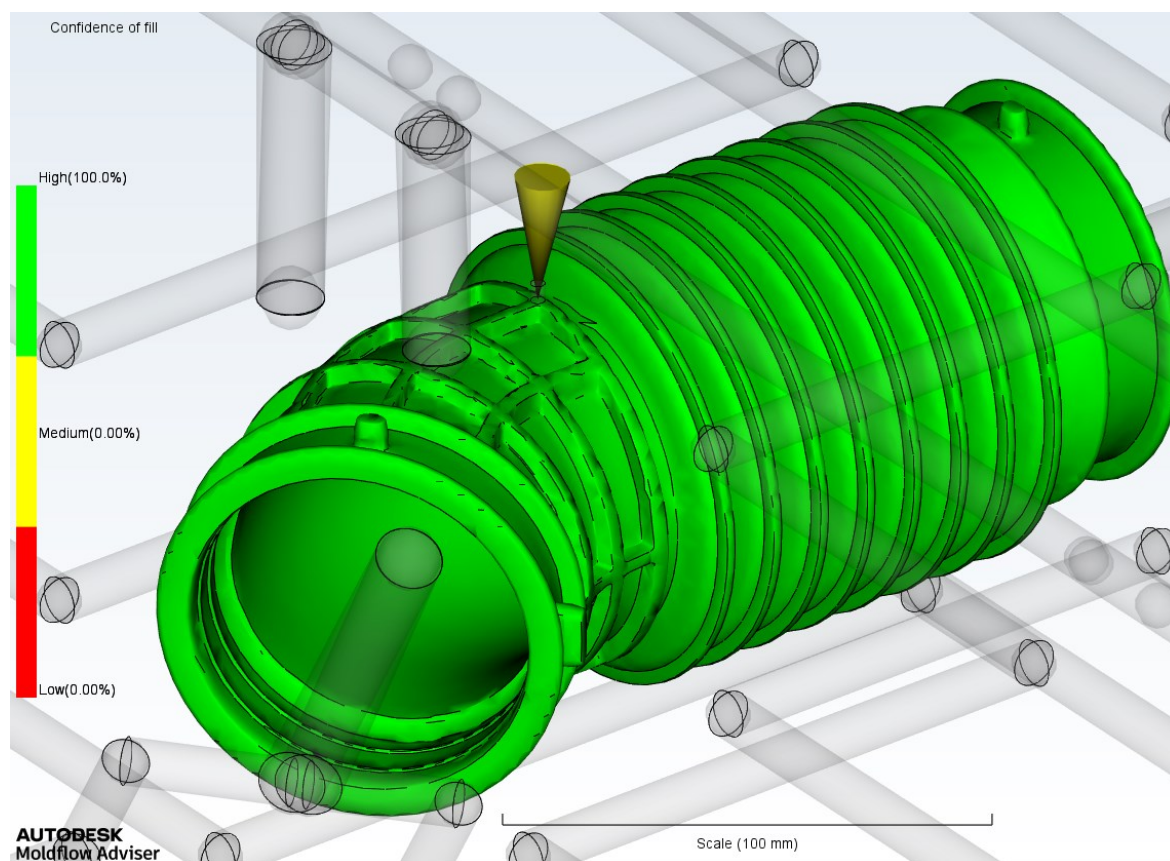
12.3 Zadané parametry

Při zahájení simulace v Autodesk Moldflow je nutné nastavit procesní parametry. Parametry pro tuto práci jsou následující:

- Materiál: Santoprene 101-55
- Tavicí teplota: 215 °C
- Maximální vstřikovací tlak: 140 MPa
- Procesní rozlišení analýzy: 3 (nejvyšší)
- Počet vtoků: 1
- Pozice vtoku: [0;0;41] mm
- Typ vtoku: Horký
- Průměr: 4 mm
- Čas plnění: Automatický
- Čas dotlaku a chlazení: Automatický
- Profil dotlaku: Automatický
- Teplota formy: 50 °C
- Temperační médium: Voda
- Rychlost toku: 10/min na každé větvi
- Vstupní teplota temperačního média: 40 °C
- Rozměry formy: 496x696 mm
- Materiál formy: 1.2311

12.4 Jistota plnění

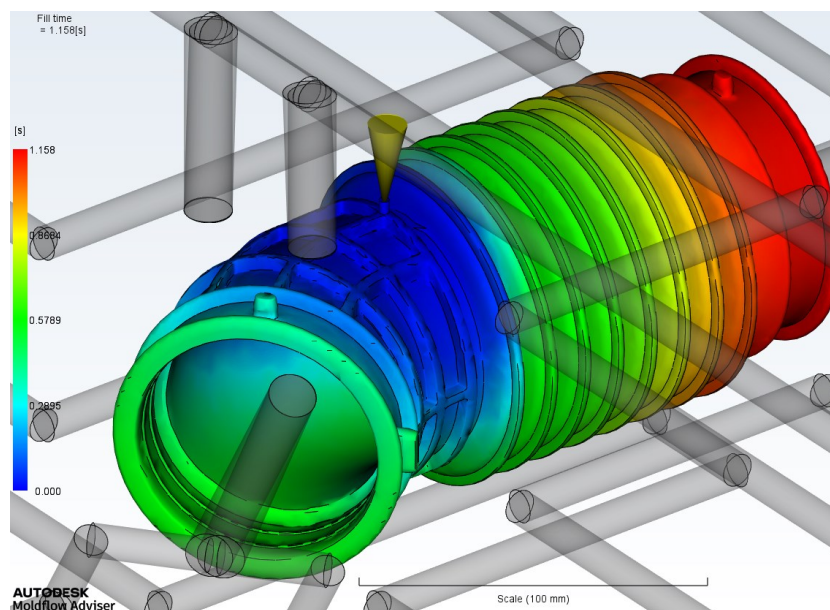
Jistota plnění vyhodnocuje pravděpodobnost vyplnění dutiny formy v procentech. Toto umožňuje uživateli rychle vyhodnotit problematická místa vstřikovaného dílu a případně upravit parametry či geometrii dílu, aby se zlepšilo plnění formy. Simulovaný díl při výše specifikovaných parametrech dosáhl 100% ve všech oblastech a lze proto považovat za vyhovující.



Obr. 35 Jistota vyplnění dutiny formy

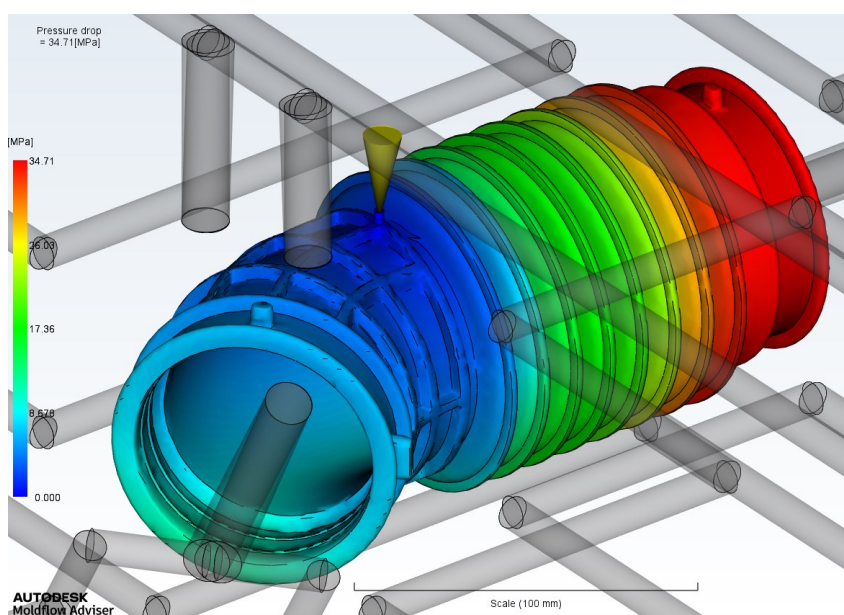
12.5 Plnicí čas

Plnicí čas vyhodnocuje čas potřebný k vyplnění jednotlivých částí dutiny formy. Znázorněná data barevně znázorňují postup čela taveniny v čase, což umožňuje optimalizaci umístění místa vtoku v případě rizika vzniku defektů jako je neúplné vyplnění formy anebo studené spoje. Výsledky simulace provedené v této práci ukazují rychlé spojení taveniny na obvodu dílu a následně rovnoměrný postup dutinou formy. Tento výsledek lze považovat za vyhovující.

*Obr. 36 Plnicí čas*

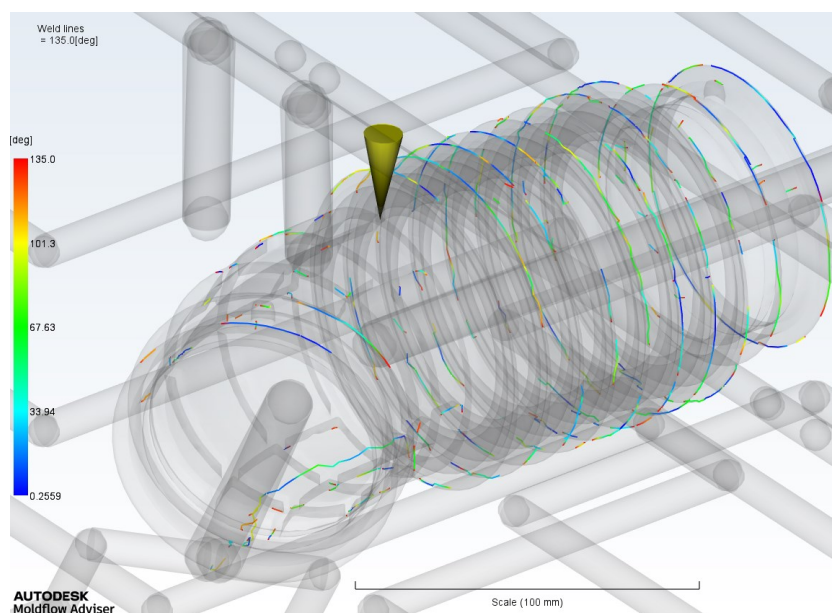
12.6 Pokles tlaku

Pokles tlaku vyjadřuje rozdíl mezi tlakem na vstupu plastikační jednotky a tlakem v části dutiny formy během plnění. Tento parametr ukazuje, jak velký odpor klade plastová tavenina při proudění skrze vtokový systém a dutinu výlisku. Vysoký pokles tlaku může signalizovat příliš úzké průřezy, dlouhé proudové dráhy nebo nevhodný návrh formy a materiálu, což může vést k neúplnému zaplnění nebo vysokým požadavkům na vstřikovací tlak. Díl analyzovaný v této práci dosáhl poklesu tlaku 34,71 MPa, což je vyhovující výsledek.

*Obr. 37 Pokles tlaku*

12.7 Studené spoje

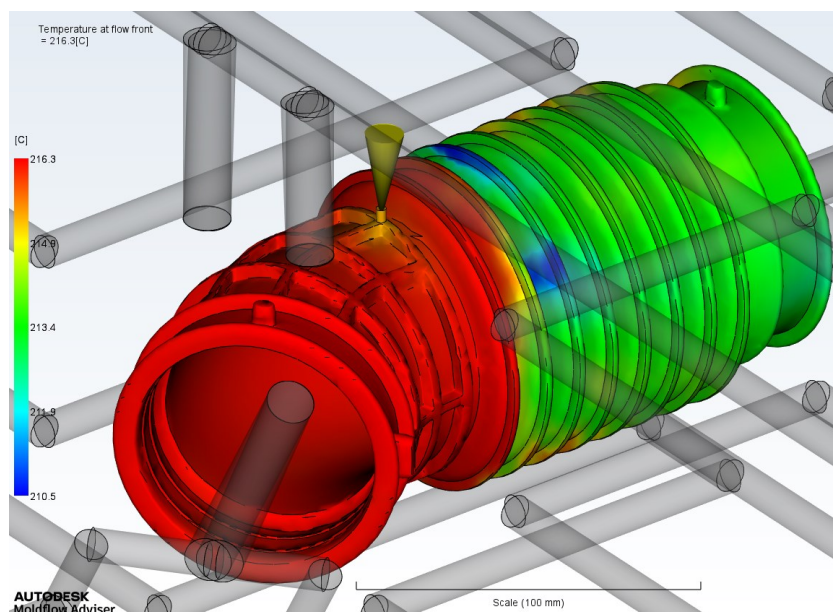
Studené spoje vznikají v místech, kde se během plnění formy setkávají dvě nebo více čel taveniny, které se opět nesloučí dostatečně homogenně. K jejich vzniku dochází typicky při proudění kolem otvorů, jader nebo výstupků, případně při vstřikování z více vtoků. Pokud je v těchto místech teplota taveniny nebo vstřikovací tlak příliš nízký, spojení tokových větví je slabé, což může vést k mechanickému oslabení vylisku, viditelným liniím na povrchu nebo k selhání dílu při zatížení. V Autodesk Moldflow jsou vyobrazeny jako čáry na modelu jejichž barva vyznačuje úhel, pod kterým se setkávají toková čela taveniny. V této práci se nachází pár míst s vysokým úhlem. Pokud se ale tyto výsledky skombinují s teplotou tokového čela, můžeme predikovat, že nedojde k negativnímu ovlivnění výrobku.



Obr. 38 Studené spoje

12.8 Teplota na čele toku

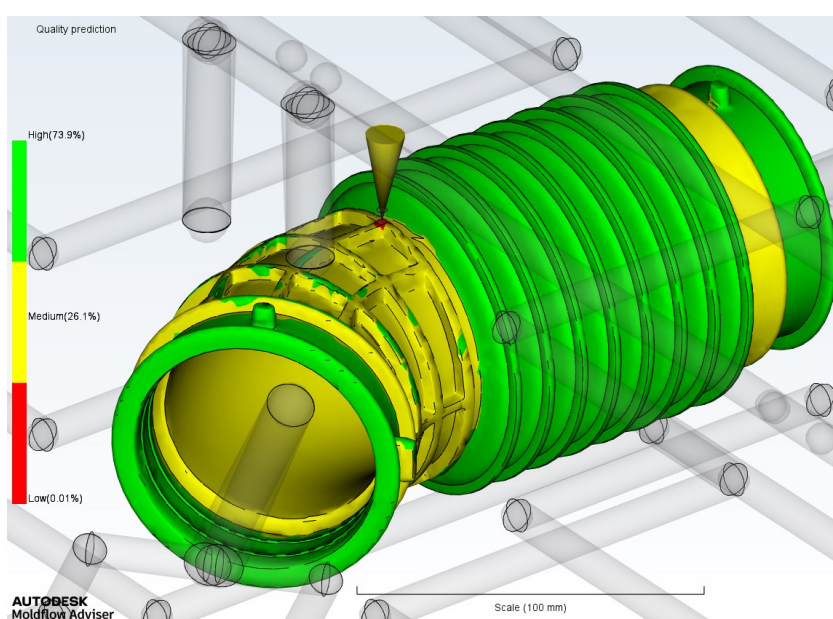
Teplota na čele toku označuje teplotu plastové taveniny právě v místě, kde čelo toku postupuje dutinou formy během plnění. Tento údaj je klíčový pro posouzení, zda tavenina zůstává dostatečně tekutá po celé proudové dráze a zda nehrozí vznik studených spojů. Příliš nízká teplota na čele toku může vést ke kosmetickým vadám, oslabení vylisku nebo rizikům studených spojů, zatímco příliš vysoká může způsobit degradaci materiálu. Výsledkem simulace pro tuto práci byl rozsah teplot od 210,5 °C do 216,3 °C což se pohybuje v dobrém rozmezí při uvážení Santoprene 101-55.



Obr. 39 Teplota na čele toku

12.9 Predikce kvality

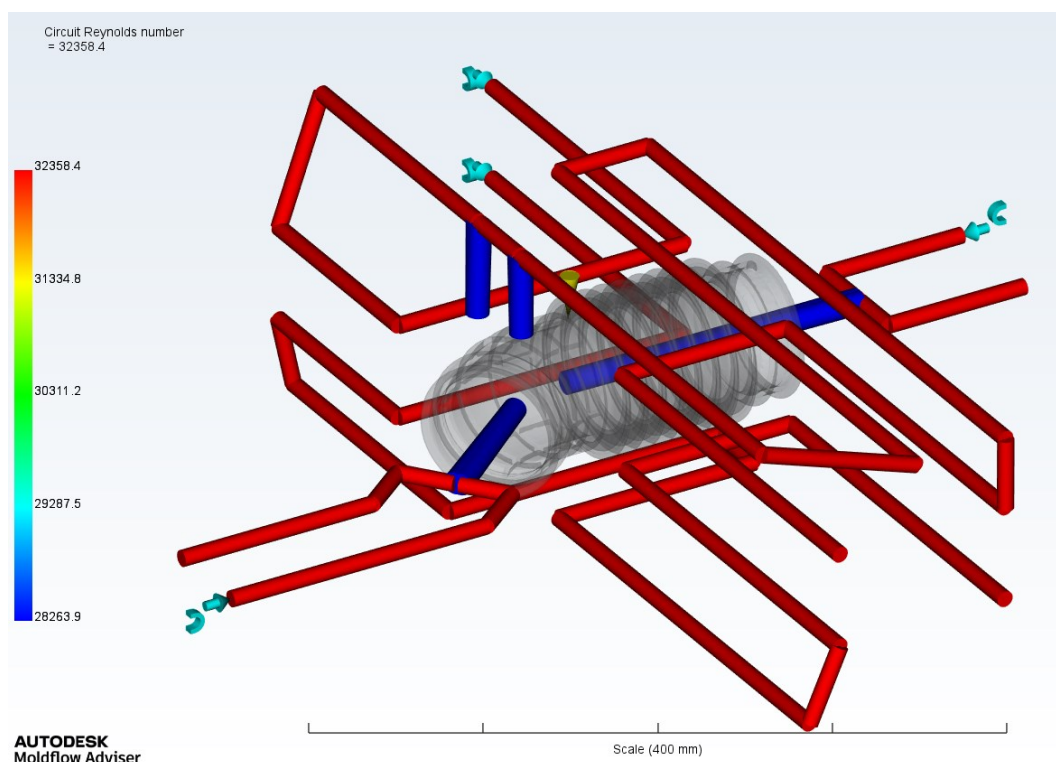
Jedná se o souhrnné vyhodnocení očekávané kvality výlisku na základě kombinací výsledků jistoty plnění, studených spojů, teploty tokového čela a dalších. Výsledkem je barevná vizualizace, která identifikuje potenciálně rizikové oblasti. Díl simulovaný v této práci s navrženými parametry dosáhl vysoké kvality na 73,9 % dílu, střední kvality na 26,1 % dílu a 0,01 % dílu je nízké kvality. Veškeré funkční plochy a geometrie dílu dosahují vysoké kvality a nízká kvalita je pouze v okolí vtoku. Tento výsledek je zcela vyhovující.



Obr. 40 Predikce kvality

12.10 Reynoldsovo číslo v temperačním okruhu

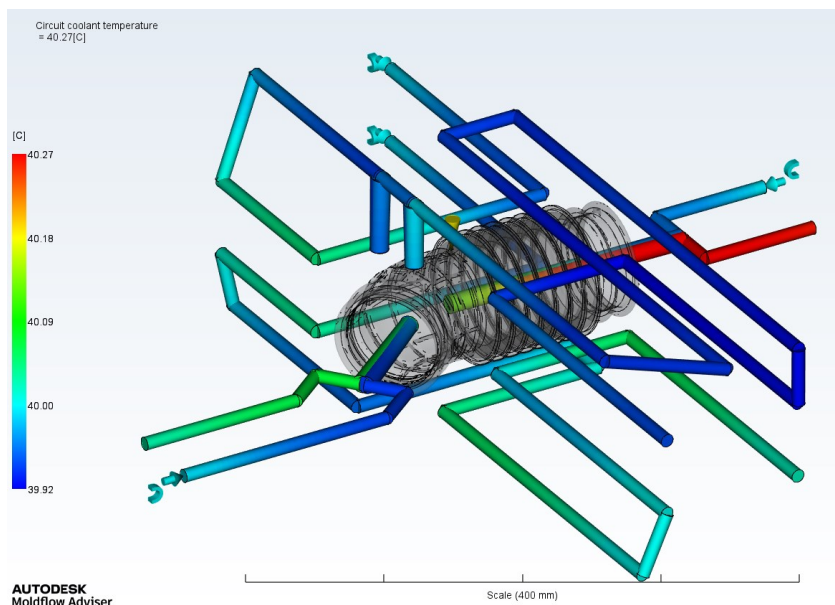
Reynoldsovo číslo nám říká, jestli proudící médium dosahuje laminárního, přechodového, nebo turbulentního proudění. Pro temperační kanály obvykle chceme dosáhnout turbulentního proudění pro maximalizaci přenosu tepla. To je charakterizováno tím, že Reynoldsovo číslo je vyšší, než 4000. V simulaci vyšla nejnižší hodnota na 20000 což je výrazně nad 4000. Lze tedy předpokládat že v celém okruhu bude turbulentní proudění.



Obr. 41 Reynoldsovo číslo v temperačních kanálech

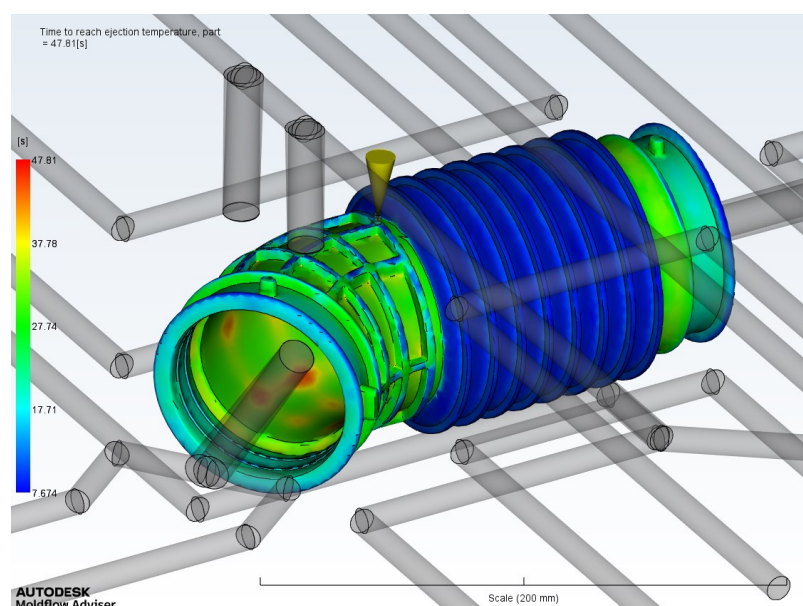
12.11 Teplota temperačního média

Teplota temperačního média nám ukazuje změnu teploty tím, jak médium proudí temperačními kanály. Pokud by se temperační médium při proudění příliš zahřívalo docházelo by ke snížení kvality chlazení. Příliš nízká změna teploty zase může signalizovat předimenzovaný, nebo neefektivní temperační okruh. V zpracované v této práci byl rozdíl teplot pouze 0,35 °C, což v kombinaci s velmi vysokým Reynoldsovým číslem značí předimenzovaný průtok. V rámci optimalizace by proto stálo za zvážení snížení průtoku.

*Obr. 42 Teplota temperačního média*

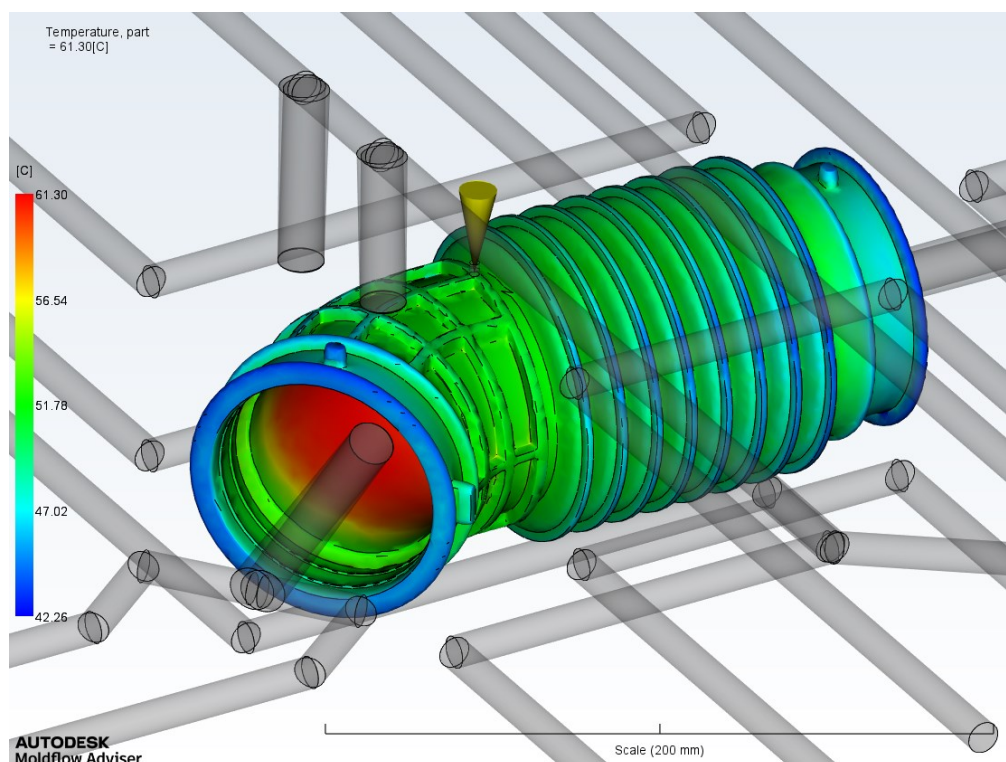
12.12 Doba na dosažení vyhazovací teploty

Doba na dosažení vyhazovací teploty je klíčovým vstupem pro optimalizaci doby cyklu. Výpočet vychází z termofyzikálních vlastností materiálu, geometrie dílu a účinnosti chlazení formy. Příliš krátká doba může vést ke kroucení, zatímco zbytečně dlouhá zvyšuje výrobní náklady. Tato analýza pomáhá stanovit rovnováhu mezi kvalitou výlisku a efektivitou výrobního procesu. V rámci simulace bylo dosaženo časů od 7,7s po 47,8s. Jedná se velký rozdíl, který bude náročné odstranit, protože je způsobené rozdílnou tloušťkou stěn dílu danou funkčními požadavky. Prostor pro optimalizaci ale nabízí snížení celkového času.

*Obr. 43 Doba na dosažení vyhazovací teploty*

12.13 Teplota dílu při vyhození

Udává teplotu dílu v jednotlivých částí dílu. Umožňuje identifikovat oblasti s nevyrovnaným chlazením, což může následně pomoci s optimalizací temperace formy. Z výsledků této simulace je vidět nízké rozdíly teplot na povrchu dílu, ale výrazné rozdíly uvnitř dílu na hranici jader. Momentálně se jako jediná možnost optimalizace chlazení vnitřku dílu jeví změna průměru temperačního kanálu uvnitř jádra.

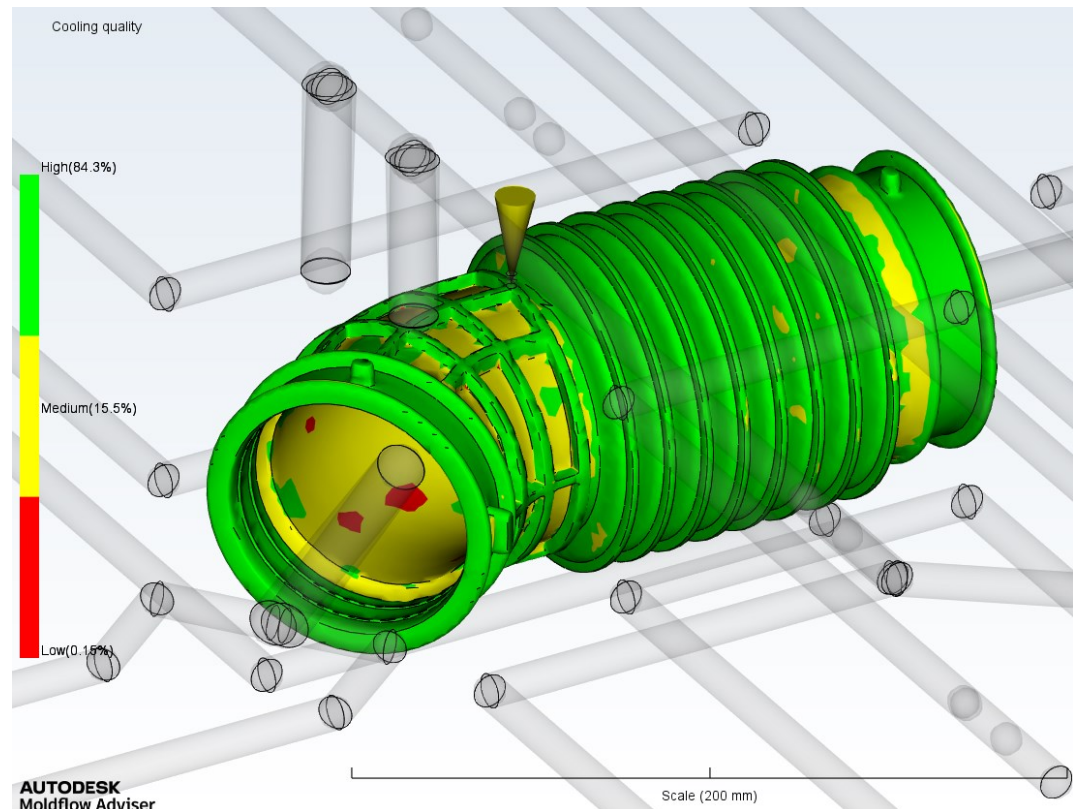


Obr. 44 Teplota dílu při vyhození

12.14 Kvalita chlazení

Kvalita chlazení vyjadřuje, jak efektivně dochází k odvádění tepla z vylisku během fáze chlazení. Tento parametr hodnotí rovnoměrnost a účinnost tepelné výměny mezi vyliskem a formou, přičemž bere v úvahu faktory jako je rozložení teploty formy, proudění chladicího média, tepelná vodivost materiálu a doba cyklu.

V simulaci je kvalita chlazení vizualizována barevnou mapou, která znázorňuje místa s příliš pomalým nebo nerovnoměrným odvodem tepla. Nedostatečná kvalita chlazení může vést k deformacím, nerovnoměrnému smrštění, nebo prodloužení doby chlazení, což má přímý dopad na kvalitu vylisku i efektivitu výroby. Cílem je dosažení co nejvyrovnanější teploty po celé ploše dutiny formy i vylisku, a tím stabilního a opakovatelného výsledku výroby.



Obr. 45 Kvalita chlazení

Vysoká kvalita chlazení je na 84,3 % dílu, střední na 15,5 % a nízká na 0,15 %. Nízké a střední kvality jsou koncentrované mimo funkční oblasti, ale přesto naznačují prostor pro optimalizaci.

12.15 Vypočtené výrobní parametry

V rámci simulace byly vypočítány tyto parametry:

- Plnicí čas: 1,16 s
- Vstřikovací tlak: 34,7 MPa
- Objem kavity: 256,5 cm³
- Uzavírací síla při dotlaku 125,7 tun
- Čas dotlaku: 27,5s
- Čas chlazení: 56,4s
- Celkový čas cyklu: 90,2s

12.16 Vyhodnocení analýzy

Dle výsledků analýzy lze předpokládat výrobu dílu bez defektů výrazně ovlivňující funkci, či vzhled. Veškeré funkční plochy mají vysokou kvalitu plnění i chlazení, což je u technických dílů prioritou. Celková délka cyklu 90,2s rozhodně ukazuje oblasti pro zlepšení, a to především v oblasti temperace.

Díl a forma dle vypočítaných parametrů dobře odpovídá navrženému vstřikovacímu stroji a není třeba volit alternativní stroj.

ZÁVĚR

Práce byla vypracována dle zadání. V 3D CAD softwaru CATIA V5 byl navržen díl sacího systému automobilu dle dostupných geometrií pro obdobné díly vyráběné z elastomerů. Na základě předběžných simulací v Autodesk Moldflow Adviser a navrženého výrobního postupu byla v CATIA V5 navržena jednonásobná forma za velkého využití normálií výrobců dílů pro formy. Pro navrženou formu byla ve stejném softwaru vytvořena výkresová dokumentace skládající se ze tří výkresů sestav, na kterých jsou znázorněny všechny použité díly včetně kusovníku. Navržená sestava formy dosahuje rozměrů 609x953,9x620,5 mm váhy 1364,7 kg. Na závěr byla provedena simulace v softwaru Autodesk Moldflow Adviser 2026, který potvrdil vyrobiteľnost, ale odhalil oblasti pro optimalizaci.

Návrh dílu by dle všech dostupných informací měl být možnou alternativou k dílu vyráběným z elastomeru. Kvalita veškerých funkčních prvků dle analýz dosahuje dobrých hodnot a není zde důvod pochybovat o funkčnosti. Po dokončení návrhu a simulací je ale možné identifikovat dvě problematické oblasti. A to požadavek a náročnost manuální obsluhy výroby a velmi dlouhý vstřikovací cyklus.

Náročnost výroby by se dala snížit návrhem automatizovaného pracoviště při přizpůsobení formy požadavkům automatizované výroby. Toto řešení by ale přesáhlo zadání a rozsah této práce. Druhou možností by bylo vytvořit návrh vícenásobné formy s plně odnímatelným jádrem ve dvou provedeních kdy by docházelo k sejmutí výrobků v průběhu vstřikovacího cyklu. Toto řešení se nejevilo jednoznačné při zahájení této práce, a proto nebylo prozkoumáno.

Druhá problematická oblast je samotná temperace formy a chlazení dílu. Ačkoliv díl dosahuje obecně dobré úrovně chlazení, cyklus je relativně dlouhý a samotný temperační cyklus jeví znaky pro optimalizaci.

Tyto dvě problematické oblasti se negativně promítanou do cenové náročnosti výroby navrženého dílu a výhodnost by zřejmě záležela především na ceně a dostupnosti elastomerové alternativy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HADRAVA, M. *Sací systémy spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [2] RAUSCHER, Jaroslav. *Vozidlové motory-studijní opory - 1. vydání*. Brno: [s.n.], 2003.
- [3] WEBER, Andreas. *Product Development Handbook: Air Intake Systems - 3. vydání*. MANN+HUMMEL, 2018.
- [4] FEJTA, Tomáš. *Passenger car air filtration*. MANN+HUMMEL, 2018.
- [5] DOČEKAL, Martin. *Konstrukční návrh nízkotlaké větve sání pro automobil*. Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2020.
- [6] ŠMEJKAL, J. *Rozdělení a charakteristika polymerů [online]*. Praha: EDUKO, 2012 [cit. 2025-05-09]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [7] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Verze knihy: 15. [Online]: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3. Dostupné také z: <https://etul.publi.cz/?book=180-polymery..>
- [8] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 9788027106141.
- [9] MEZINÁRODNÍ ORGANIZACE PRO STANDARDIZACI. *ISO 18064:2014 – Termoplastické elastomery – Nomenklatura a zkrácené názvy*. Ženeva: ISO, 2014.
- [10] BOBEK, J. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*, Code Creator, s.r.o 2016. ISBN: 978-80-88058-65-6
- [11] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů*. I. díl, Vstřikování termoplastů. 2. vydání. Brno: Uniplast Brno, 1999, 133 s.
- [12] DYM, Joseph B. *Injection molds and molding: a practical manual*. New York: Van Nostrand Reinhold, c1979, xiv, 400 s. ISBN 0442222238.
- [13] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů*. II. díl, Vstřikování termoplastů. Brno: Uniplast Brno, 1999, 214 s.
- [14] LENFELD, Petr. *Technologie II – Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti*. Technická univerzita Liberec – Fakulta strojní. Dostupný z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm

- [15] NEUHÄUSL, Emil. *Vady výstřiků – 2. díl: Vady tvaru a rozměrové vady*. MM Spektrum, 2024. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-2-dil-vady-tvaru-a-rozmerove-vady>. [cit. 2025-02-13].
- [16] DJMOLDING. *A Full Guide Of Mold Flow Analysis In Injection Molding*. Online. Dostupné z: <https://www.djmolding.com/a-full-guide-of-mold-flow-analysis-in-injection-molding/>. [cit. 2025-02-15].
- [17] LIAO, Gary. *The Complete Guide to Mold Flow Analysis*. Online. Dostupné z: <https://tdlmould.com/guide-to-mold-flow-analysis/>. [cit. 2025-02-15].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma sacího systému přepřínovaného zážehového motoru [2]	15
Obr. 2 Vizualizace sacího systému pro přepřínovaný motor [4]	17
Obr. 3 Zdroje a šíření hluku sacím systémem [3]	19
Obr. 4 Akusticky účinné geometrie [3]	20
Obr. 5 Příklady druhů rezonátorů a jejich umístění [3]	21
Obr. 6 Rozdílné návrhy Hemholtzova rezonátoru a graf jejich tlumících frekvencí [3]	22
Obr. 7 Hliníkové plnicí kanály [5]	23
Obr. 8 Základní dělení polymerů [6]	23
Obr. 9 Chování polymerů při zatížení: plast (vlevo), elastomer (vpravo) [7]	25
Obr. 10 Zaoblení hrany [10]	29
Obr. 11 Návrh úkosů [10]	30
Obr. 12 Řez vstřikovací formou [10]	35
Obr. 13 Koláčový graf vstřikovacího cyklu [10]	40
Obr. 14 Vyobrazení plnění dutiny formy v čase [17]	46
Obr. 15 Rozhraní softwaru CATIA V5	49
Obr. 16 Rozhraní softwaru Autodesk Moldflow Adviser 2026	50
Obr. 17 Navržený díl	51
Obr. 18 Převzatá těsnící a korugovaná geometrie	52
Obr. 19 Dělicí rovina dílu a hlavní formovací směr	52
Obr. 20 Dělicí rovina jader a jejich směr pohybu	53
Obr. 21 Sestava formy	54
Obr. 22 Otevřená forma	55
Obr. 23 Jádru A v odsunutě pozici	56
Obr. 24 Rozměry formy	56
Obr. 25 Analýza vstřikovacího bodu	57
Obr. 26 Usazení trysky ve formě	58
Obr. 27 Čtvrtý návrh temperačních okruhů	58
Obr. 28 Konstrukční řešení jádra A	59
Obr. 29 Propojení vyhazovacích desek a uložení jádra A	60
Obr. 30 Analýza vzduchových kapes	61
Obr. 31 Detail jádra A	61
Obr. 32 Forma v manipulační kondici	63
Obr. 33 Horizontální indukční senzor polohy	64
Obr. 34 Arburg ALLROUNDER 630 A	65

<i>Obr. 35 Jistota vyplnění dutiny formy</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 36 Plnicí čas</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 37 Pokles tlaku</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 38 Studené spoje</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 39 Teplota na čele toku</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 40 Predikce kvality</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 41 Reynoldsovo číslo v temperačních kanálech</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 42 Teplota temperačního média</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 43 Doba na dosažení vyhazovací teploty</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 44 Teplota dílu při vyhození</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 45 Kvalita chlazení</i>	<i>75</i>

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 <i>Tolerance rozměrů plastových vstřikovaných dílů dle DIN 16901 [10]</i>	32
Tab. 2 <i>Hospodárně dosažitelné třídy přesnosti dle DIN 16901[10]</i>	33
Tab. 3 <i>Návaznost požadavků a funkcí vstřikovací formy. [10]</i>	34
Tab. 4 <i>Parametry vstřikovacího stroje</i>	65
Tab. 5 <i>Procesní hodnoty Santoprene 101-55</i>	66

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PP	Polypropylen
EPDM	Ethylen-propylen-dienový monomer
CAD	Počítačem podporované projektování
CAE	Počítačem podporované inženýrství
t	tuna
mm	milimetr
cm ³	Centimetr krychlový
°C	Stupeň Celsia
cm ³ /s	Centimetr krychlový za sekundu
s	sekunda
g	gram
kg	kilogram
kN	kilonewton

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: SESTAVA FORMY

Příloha P II: HORNÍ POLOVINA FORMY

Příloha P III: DOLNÍ POLOVINA FORMY

