

Optimalizace designu částí ventilátoru pro automotive

Bc. Rišian Dominik

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Dominik Rišian
Osobní číslo: T22350
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Výrobní inženýrství
Forma studia: Kombinovaná
Téma práce: Optimalizace designu částí ventilátoru pro automotive

Zásady pro vypracování

V diplomové práci bude řešena problematika vlivu designu částí ventilátoru na jeho hmotnost a pevnostní charakteristiky. V rámci rešerše budou shrnuty zásady konstrukce vstříkovaných dílů, vč. jejich možných vad. Následovat bude samotná optimalizace (použití upraveného designu lopatek, změna jejich počtu aj.). V rámci optimalizace, která bude realizována na základě analýz metodou konečných prvků, budou provedeny 2 skupiny návrhů: 1. skupina návrhů bude zaměřena na snížení hmotnosti při zachování pevnosti a 2. skupina návrhů bude zaměřena na zvýšení pevnosti při zachování hmotnosti. Na závěr bude provedeno zhodnocení navržených řešení.

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

Seznam doporučené literatury:

BARBERO, Ever J. *Introduction to composite materials design*. Philadelphia: Taylor & Francis, 1998, xvii, 336 s. ISBN 1560327014.

JAROSCHEK, Christoph. *Design of injection molded plastic parts*. 1st ed. [online]. [s.l.]: Hanser Publications, 2018. eISBN 978-1-56990-894-5.

BONENBERGER, Paul R. *The first snap-fit handbook: creating and managing attachments for plastic parts*. 3rd ed. [online]. [s.l.]: Hanser Publications, 2016. eISBN 978-1-56990-596-8.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá optimalizací částí sériového krytu ventilátoru. První optimalizační návrh je zaměřen na snížení hmotnosti za zachování definované pevnosti. Druhý návrh je zaměřen na zlepšení pevnostních vlastností za zachování hmotnosti dílu. Práce v teoretické části pojednává o technologiích vstřikování, konstrukci vstřikovaných dílů a možných vadách při vstřikování.

V praktické části je nejprve objasněna problematika modulu automobilového chladiče se zaměřením na ventilátor a jeho kryt. Dále je popsán sériový návrh krytu ventilátoru spolu s použitým materiálem a následnou definicí okrajových podmínek potřebných pro provedení analýz za pomoci metody konečných prvků. V neposlední řadě jsou provedeny samotné návrhy jednotlivých změn designu společně s analýzami a závěrečným zhodnocením jednotlivých řešení.

Klíčová slova: návrh, konstrukce, optimalizace, automobilový ventilátor, kryt ventilátoru

ABSTRACT

The thesis focuses on optimizing parts of a serial fan shroud. The first optimization proposal aims at reducing the weight while maintaining defined strength. The second proposal focuses on improving the strength properties while maintaining the weight of the part. The theoretical part of the thesis discusses injection molding technology, the construction of injection-molded parts, and potential defects in injection molding.

In the practical part, the issue of the automotive radiator module is first clarified, focusing on the fan and shroud. The serial design of the fan shroud, along with the material used, is described, followed by the definition of boundary conditions necessary for conducting analyses using the finite element method. Finally, the actual design modifications are implemented, accompanied by analyses and a concluding evaluation of each solution.

Keywords: design, construction, optimization, automotive fan, fan shroud

Rád bych vyjádřil poděkování panu doc. Ing. Martinu Bednaříkovi, Ph.D., za jeho odborné vedení během psaní mé diplomové práce, stejně jako za jeho rady, čas a ochotu pomoci. Dále děkuji společnosti Hanon Systems Autopal s.r.o. za poskytnutí možnosti realizovat tento výzkum a mým kolegům za sdílení jejich cenných rad. Mé poděkování patří především mé manželce za její podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ	10
1.1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	10
1.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	12
1.2.1 Vstřikovací jednotka	12
1.2.2 Uzavírací jednotka	13
1.3 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	13
1.3.1 Typy a části forem.....	14
1.3.2 Typy vtoků	15
2 KONSTRUKCE VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ	19
2.1 PŘÍSTUPY KE KONSTRUOVÁNÍ	19
2.2 MEZNÍ STAVY.....	21
2.3 METODY A CÍLE PEVNOSTNÍCH VÝPOČTŮ	21
2.4 PRINCIPY PŘI NÁVRHU PLASTOVÉHO DÍLU	23
2.4.1 Úkosity	24
2.4.2 Žebrování	25
2.4.3 Tloušťka stěny.....	26
2.4.4 Ostré rohy.....	27
2.4.5 Podkosity	28
2.4.6 Upevňovací výstupky.....	28
2.4.7 Otvory	30
3 VADY VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ	31
3.1 POPIS VAD U VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ A JEJICH PŘÍČINY	31
3.1.1 Smrštění.....	31
3.1.2 Krátké plnění.....	32
3.1.3 Přetoky	33
3.1.4 Propadliny	34
3.1.5 Vzduchové kapsy	35
3.1.6 Studené spoje	36
3.1.7 Spálená místa	38
3.1.8 Změna barvy.....	39
3.1.9 Studené tokové linie.....	40
3.1.10 Delaminace.....	41
3.1.11 Jetting	42
3.1.12 Zkroucení	43
II PRAKTICKÁ ČÁST	45
4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	46
5 SESTAVA CHLADIČE A JEHO ČÁSTI V AUTOMOTIVE	47

5.1	UMÍSTĚNÍ VENTILÁTORU	47
5.2	RÁM VENTILÁTORU	49
6	SÉRIOVÝ DÍL.....	50
6.1	LOPATKY.....	51
6.1.1	Typy lopatek.....	51
7	MATERIÁL	53
7.1	CELSTRAN PP-GF30-0403P10.....	53
7.2	TAHOVÁ CHARAKTERISTIKA ZVOLENÉHO MATERIÁLU	53
8	SOFTWARE PRO NÁVRH A OPTIMALIZACI DÍLU	55
8.1	CATIA V5	55
8.2	CATIA V5 – MODULÁRNÍ SYSTÉM.....	55
8.2.1	Mechanical Design Solution	55
8.2.2	Shape Design & Styling Solution	55
8.2.3	Analysis Solution	56
9	DEFINICE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK A VAZEB DÍLU	57
9.1	OKRAJOVÉ PODMÍNKY	57
9.2	VAZBY DÍLU	58
9.2.1	Vazby konzol	58
9.3	TUHÁ VIRTUÁLNÍ ČÁST.....	60
9.3.1	Síly, momenty a zrychlení.....	60
9.4	NASTAVENÍ SÍTĚ.....	60
9.5	HODNOCENÍ NÁVRHŮ	62
10	OPTIMALIZOVANÉ NÁVRHY.....	63
10.1	OPTIMALIZACE 1 - SNÍŽENÍ HMOTNOSTI ZA ZACHOVÁNÍ PEVNOSTI.....	63
10.1.1	Postup optimalizace	63
10.1.2	Průběh optimalizace	65
10.1.3	Iterace interpretující vliv tloušťky lopatek na výsledné prohnutí	65
10.1.4	Finální návrh optimalizace	66
10.2	OPTIMALIZACE 2 – ZVÝŠENÍ PEVNOSTI ZA ZACHOVÁNÍ HMOTNOSTI.....	68
10.2.1	Postup optimalizace	68
10.2.2	Průběh optimalizace	70
10.2.3	Iterace interpretující vliv počtu lopatek na výsledné prohnutí.....	70
10.2.4	Finální optimalizace	71
11	ZHODNOCENÍ NÁVRHŮ.....	73
	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	79
	SEZNAM TABULEK.....	82

ÚVOD

Automobilový průmysl hraje klíčovou roli v ekonomice České republiky. Společnosti, které zásobují automobilové výrobce svými produkty, si na trhu práce udržují určité renomé. Avšak práce jako dodavatel pro automobilový průmysl přináší řadu výzev, včetně nutnosti splňovat vysoké požadavky na kvalitu komponentů, což má přímý dopad na požadovanou úroveň a standardy výrobních procesů těchto komponentů.

Firma Hanon Systems Autopal Ltd. se specializuje na výrobu chladících modulů pro automobilový průmysl a dalších komponentů. Tato firma provozuje výrobní zařízení a inženýrská centra ve 21 zemích světa. V rámci České republiky je společnost zastoupena ve městech Hluk a Nový Jičín.

Tato práce se zabývá optimalizací vybrané části sériového rámu ventilátoru chladiče automobilu za účelem snížení výrobních nákladů za použití dvou rozdílných postupů optimalizace. Tento díl se může nacházet jak před chladičem, tak za chladičem (v závislosti na specifikaci zákazníka) a slouží k uchycení motoru s vrtulí a navedení vzduchu do určitého prostoru, nebo zároveň poskytuje částečnou ochranu chladiče (v případě umístění před chladičem). Především automobilka Porsche je specifická tím, že daný díl se spolu s motorem a vrtulí nachází před chladičem. V opačném případě, kdy se daný díl nachází za chladičem, tak je jeho prací odvádět horký vzduch od chladiče směrem k motoru automobilu. Jako celek včetně motoru a vrtule je tato součást komponent známa pod pojmem „Sahara“.

Materiálem užívaným pro daný díl je aktuálně nejčastěji polypropylen s 30 % skelných vláken (PP-GF30) a jeho modifikace. V poslední době jsou výrobci tlačeni do použití materiálů s podílem recyklátu, který má negativní vliv na jeho cenu a mechanické vlastnosti. V případě užití materiálu s vyšším podílem recyklátu musí být použit sofistikovanější návrh dílu s vyšším podílem prvků, které zlepšují jeho pevnost, jako jsou například žebra a různé výztuhy.

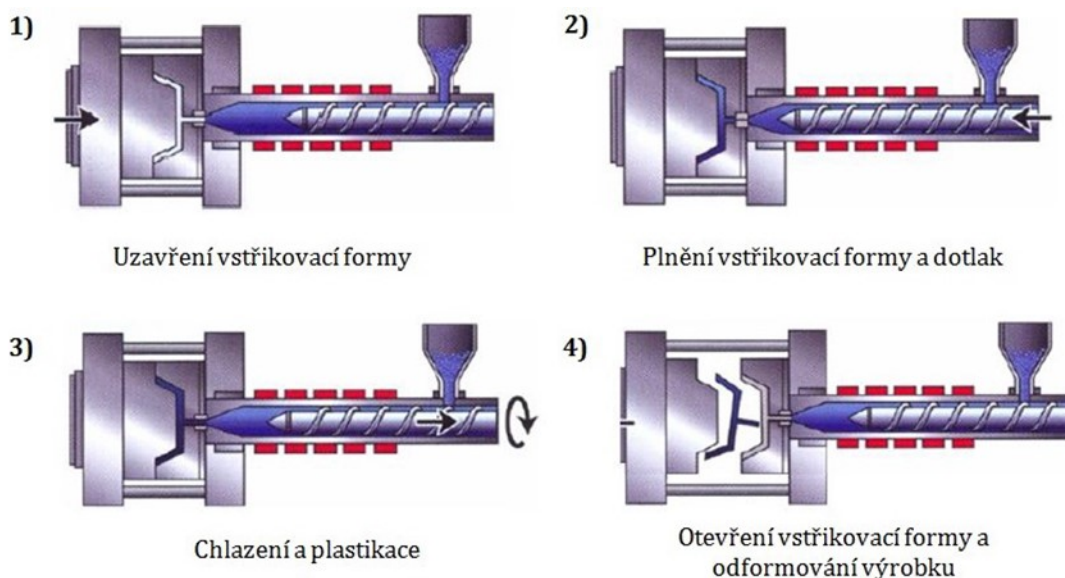
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ

Metoda vstřikování patří k předním technikám pro zpracování plastů, kde se rozeřtý materiál z plastifikačního segmentu přenáší do formovací dutiny, přičemž zde postupně tuhne a nabývá požadovaného tvaru výsledného produktu. Proces vstřikování se provádí s vysokou rychlostí a pod vysokým tlakem, což zajišťuje, že se materiál rovnoměrně rozprostře do všech částí formy, čímž se předchází tvorbě defektů na povrchu i uvnitř produktu. Pomocí vstřikovacího procesu je možné vytvářet polotovary pro další zpracování, součástky pro montáž do finálních sestav a také hotové výrobky připravené pro konečné použití [1-3].

1.1 Technologie vstřikování

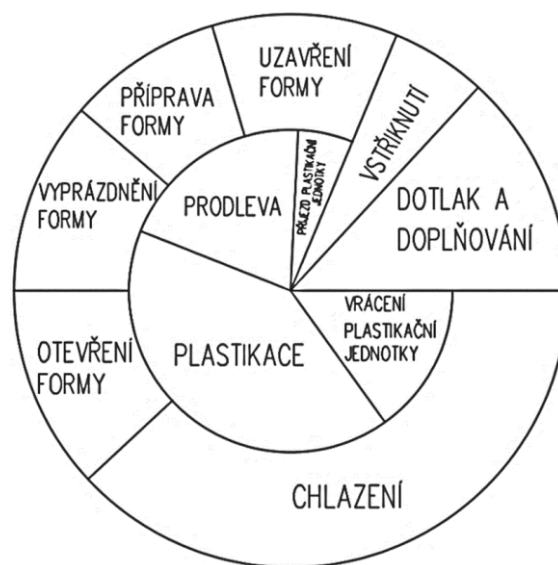
Technologie vstřikování nachází široké uplatnění zejména v automobilovém a elektrotechnickém sektoru, díky čemuž se řadí mezi obory s velkým potenciálem pro budoucí vývoj. Tento proces je charakterizován jako diskontinuální, tj. probíhá v cyklech (Obr. 1), přičemž klíčem k dosažení vysoké kvality výrobků je udržení konzistentnosti procesu při optimálních podmínkách. Je tedy důležité, aby každý vstřikovací cyklus probíhal uniformně [1].



Obrázek 1. Vstřikovací cyklus [2].

Vytvoření konečného produktu probíhá prostřednictvím několika po sobě jdoucích kroků. Začíná se s polymerním granulátem, který je vložen do zásobníku stroje, odkud je přepraven

do aktivní části stroje. Granulát je pak přesunut šnekem nebo pístem do tavicí komory, kde se za pomoci tepla a tření granulát taví a vytváří se z něj tavenina. Následuje proces vstřikování, kdy je tekutý materiál vstříknut do chladnější formy, která určuje tvar produktu. Pro úplné vyplnění formy a dosažení přesného tvaru je klíčové nastavení správného množství materiálu a dotlaku, což pomáhá minimalizovat smršťení a rozměrové odchylky. Po vstříknutí následuje fáze chlazení, kdy se materiál ochladí a ztuhne, čímž se vytvoří finální tvar výrobku. Po ztuhnutí se forma otevře a výrobek je vyjmut, poté se celý proces opakuje [2]. Postup a časová náročnost jednotlivých fází jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 2).



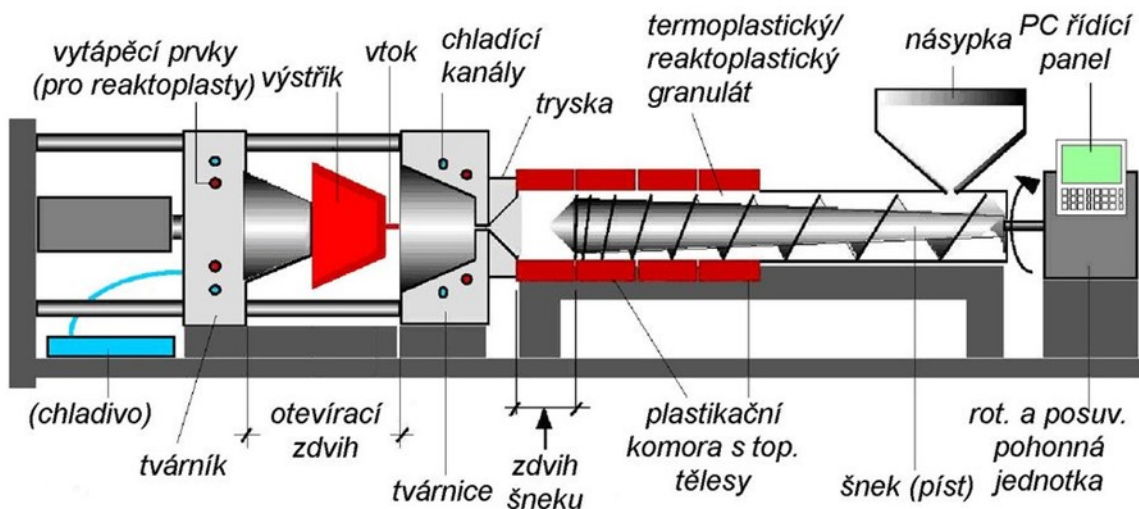
Obrázek 2. Grafické znázornění jednotlivých operací vstřikovacího cyklu [3].

V chladicím procesu má teplota formy zásadní význam pro kvalitu produktů. Rychlost, s jakou dochází k ochlazení, hraje klíčovou roli pro relaxační procesy, které mají vliv na konečnou míru a distribuci orientace, stejně jako na orientační a tepelné napětí, a u polymerních materiálů s částečnou krystalinitou rovněž ovlivňuje krystalickou strukturu. Se zvyšující se teplotou formy dochází ke snižování rychlosti, s jakou se produkt ochlazuje, což vyžaduje delší časový úsek pro úplné vychladnutí výrobku. Je obvyklé, že při pomalejším ochlazení dochází k nárůstu krystalické složky u polymerů, které jsou částečně krystalické. Na výrobcích je pak pozorováno větší smršťení a při klesajícím dosmršťení, navlhavosti a tažnosti také specifická hmotnost, pevnost, tvrdost a tuhost. Navíc, vyšší teplota formy má pozitivní vliv na lesk povrchu a zlepšuje celkovou povrchovou kvalitu produktu [1].

1.2 Vstřikovací stroj

Optimalizace vstřikovacího cyklu vyžaduje plně funkční vstřikovací stroj s pravidelně prováděnou údržbou. Pro dosažení vysoké pracovní efektivity, nezbytné pro výrobu v masových měřítcích, je klíčové využití plně automatizovaného a moderního zařízení. Při výběru stroje je důležité brát v úvahu potřeby spojené s kapacitou plastifikačního segmentu a požadovanou velikostí uzavírací síly. Nicméně, jedním z hlavních nedostatků vstřikovací technologie jsou vysoké pořizovací náklady na stroje a přidružené vybavení, jako jsou různé dopravní systémy, sušičky, manipulační zařízení nebo roboti [1,2].

Vstřikovací stroj se skládá ze tří základních komponent: jednotky pro vstřikování, uzavírací jednotky a jednotky pro řízení (Obr. 3) [2].



Obrázek 3. Schéma vstřikovacího stroje [2].

1.2.1 Vstřikovací jednotka

Hlavními úkoly vstřikovací jednotky jsou přeměna polymerního granulátu na taveninu a následné vstříknutí taveniny do dutiny formy. Šnekové vstřikovací jednotky, které v 50. letech 20. století převzaly roli od dříve běžných pístových jednotek, jsou v dnešní době standardem. K šnekové vstřikovací jednotce patří také zásobník pro granulát, tavicí komora s ohřívacími prvky a tryska pro vstřikování [2].

Během fáze plastifikace v cyklu dochází k transportu granulátu ze zásobníku do tavicí komory otáčením šneku, kde se polymer roztaví a shromáždí před čelem šneku, zatímco šnek se posouvá zpět. Jakmile je připraven dostatečný objem plastifikovaného polymeru,

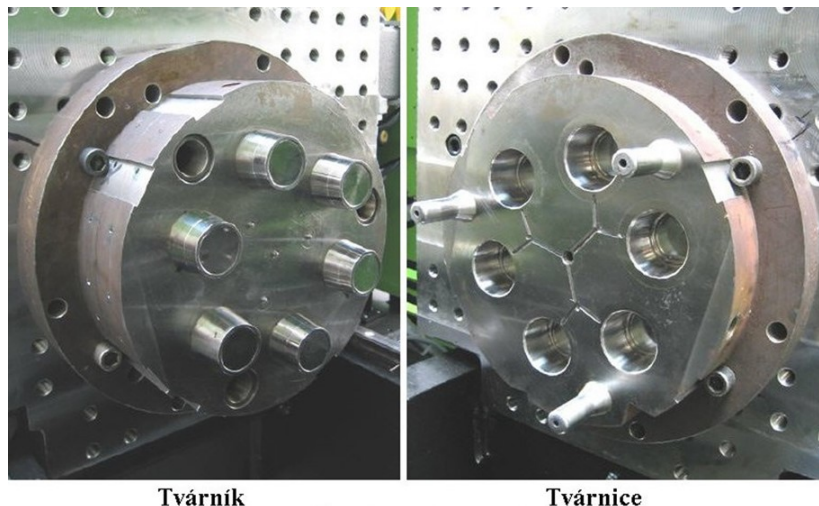
šnek se zastaví a po krátké pauze, dané rozdílem v délce cyklů mezi vstřikovací a uzavírací jednotkou, se vstřikovací jednotka posune k zavřené formě a šnek se pohybuje vpřed (funguje jako píst), což vede k vstříknutí roztaveného materiálu do formy přes vstřikovací trysku. Poté se vstřikovací jednotka vrátí zpět a začíná další cyklus plastifikace materiálu [2,3].

1.2.2 Uzavírací jednotka

Primárním úkolem uzavírací jednotky je zajistit otevření a zavření formy v pečlivě určených momentech vstřikovacího procesu. Vzhledem k tomu, že roztavený materiál je do formy vpravován pod vysokým tlakem, je nezbytné, aby uzavírací jednotka disponovala dostatečnou silou k udržení formy uzavřené během celého procesu vstřikování. Tuto nezbytnou sílu označujeme jako uzavírací a u současných strojů je možné ji nastavovat. Existuje několik způsobů, jakými lze uzavírací systém konstruovat, od hydraulických a mechanických řešení, přes jejich kombinace, až po elektrické systémy. Převážná část vstřikovacích strojů využívá horizontální uspořádání mezi vstřikovací a uzavírací jednotkou, nicméně pro speciální aplikace může být zvoleno jiné uspořádání. Uzavírací jednotka také zahrnuje samotnou formu a mechanismus pro její uchycení [2].

1.3 Vstřikovací forma

Vstřikovací forma se skládá z několika propojených dílů, jejímž úkolem je převést roztavený polymer do vnitřního prostoru formy a zajistit jeho rovnoměrné rozložení. Kritéria pro návrh vstřikovací formy zahrnují její odolnost proti vysokému tlaku, možnost jednoduché extrakce hotového výrobku, vhodný výběr materiálu formy, a další faktory. Klíčovým kritériem je schopnost produkce dílů s přesnými rozměry, což je úzce spjato se smrštěním materiálu, které musí být zohledněno při návrhu formy, konkrétně při tvorbě tvárníku a tvárnice. Proces návrhu a výroby formy je složitou disciplínou, která vyžaduje hluboké odborné znalosti a zkušenosti, aby bylo možné splnit specifické požadavky zákazníků [2-4]. Návrh netradiční konstrukce formy pro vícenásobné vstřikování je vyobrazen na následujícím obrázku (Obr. 4).



Obrázek 4. Ukázka vícenásobné vstřikovací formy [2].

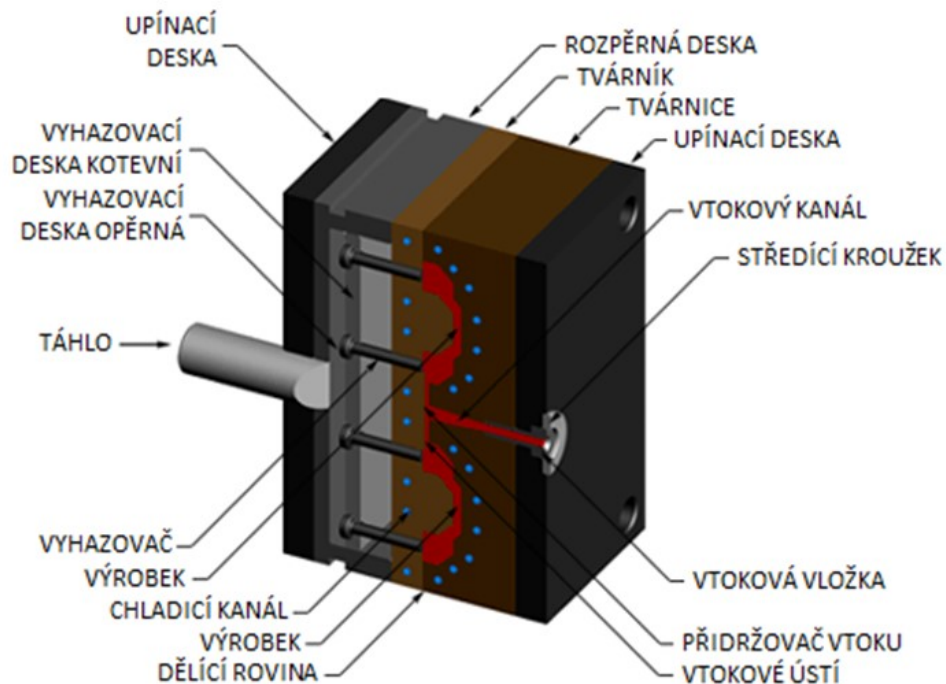
1.3.1 Typy a části forem

Konstrukční provedení vstřikovacích forem se může značně lišit. Rozdíly ve vývoji forem jsou primárně určeny požadavky na typ, tvar a počet výrobků, které mají být vyrobeny. Klasifikace forem je možná na základě několika kritérií:

- podle počtu dutin na jednodutinové a vícedutinové,
- dle způsobu zaformování a konstrukčního řešení na dvoudeskové, třidedkové, vytáčecí, čelistové, etážové apod.,
- podle orientace vstříku ve vztahu k vstřikovacímu stroji na formy s kolmým vstříkem k dělicí ploše a formy se vstříkem paralelním k dělicí ploše [2].

Základním typem, se kterým se setkáváme, je dvoudesková vstřikovací forma. Tento typ obsahuje několik desek, jejichž poloha vůči sobě je udržována pomocí vodících kolíků, pouzder a centrovacích trubíc. Desky jsou spojeny převážně cylindrickými šrouby. Forma je rozčleněna na stacionární a mobilní sekci, přičemž každá má svou upínací desku pro uchycení k vstřikovacímu stroji. V mobilní sekci se nachází také rozpěrná deska, hlavní a pomocná vyhazovací deska, vyhazovače a tvárník s tvárnicí. Ve stacionární sekci se umísťuje tvárnice, hlavní montážní šrouby a vstřikovací vložka. Rozhraní mezi těmito dvěma sekcemi tvoří dělicí rovina. Formovací dutina je utvořena tvárníkem a tvárnicí, které musí být vyrobeny z materiálů odolných vůči vysokým teplotám a mechanickému opotřebení, a proto bývají dražší než ostatní části formy. Tyto části jsou ukotveny v kotvicích deskách, které nemusí být tak odolné a mohou být vyrobeny z méně nákladných materiálů. Přesné umístění formy na vstřikovacím stroji zajišťují centrovací kroužky, přičemž je

klíčové, aby se osa trysky stroje a osa vstříkovací vložky formy shodovaly. Desky mají vrtané kanálky pro temperování a odvětrávání podle potřeby, kde temperační kanálky umožňují regulaci teploty formy pomocí média a odvětrávací kanálky odstraňují přebytečný vzduch z dutiny, což zabraňuje vzniku vad na výrobcích způsobených spálením. Na místě těchto vad dochází k degradaci materiálu, což snižuje jeho pevnostní vlastnosti. (Dieslův efekt) [4].



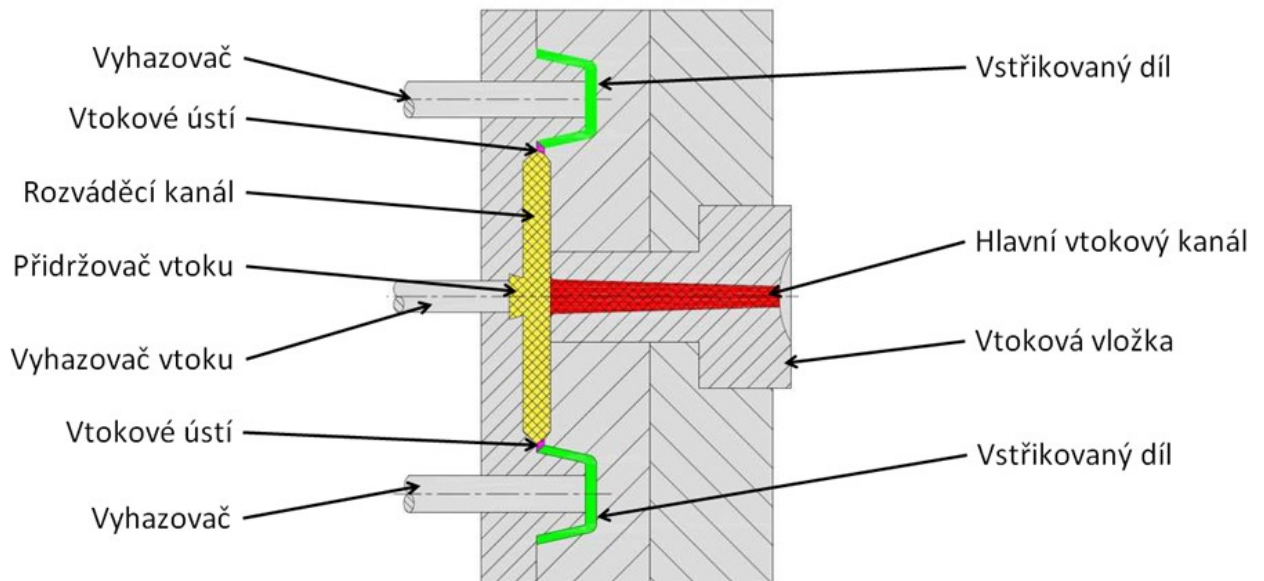
Obrázek 5. Části vstříkovací formy [7].

1.3.2 Typy vtoků

Polymer ve stavu taveniny proniká do tvarové dutiny vstříkovací formy skrze vtokové ústí, které představuje zúžené místo na konci distribučních kanálů. Existují dva základní typy vtokových systémů – studený a horký, přičemž horký systém se někdy nazývá "aktivní" [5, 6].

Studený vtokový systém

Předností studeného vtokového systému (Obr. 6) je schopnost umístění vstříkovacího otvoru na místa, kde by použití horkého vtokového systému nebylo možné. Existují různé typy vtoků, včetně plně kuželového, bodového, deštníkového, talířového, prstencového, filmového (štěrbínového), tunelového a banánového [4-6].



Obrázek 6. Schéma studeného vtoku [6].

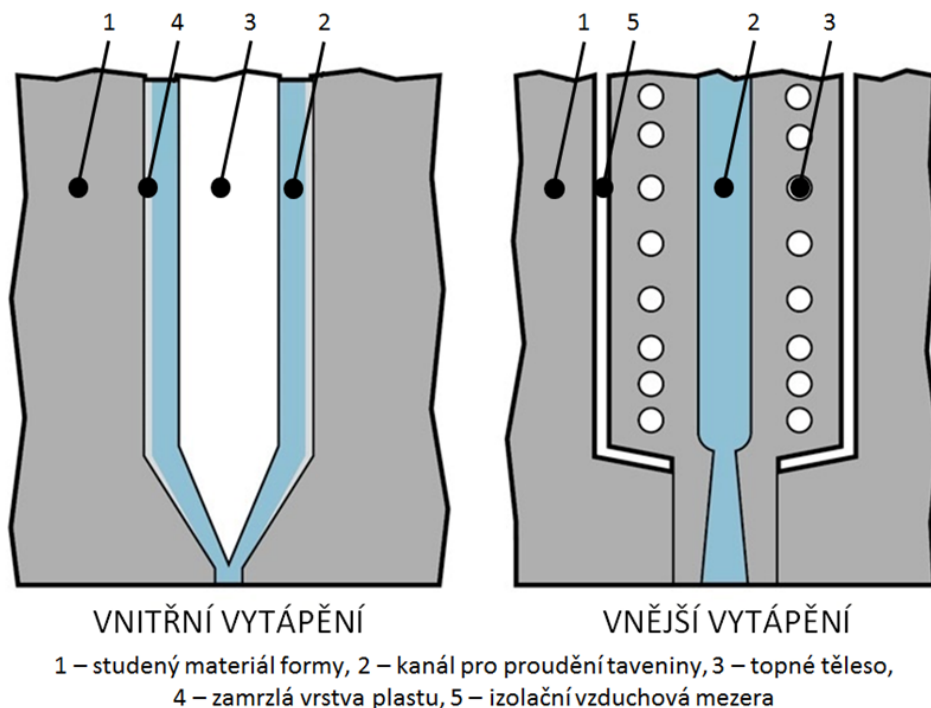
Varianta studeného vtokového systému je z konstrukčního hlediska nejjednodušší a nejekonomičtější, ale přináší s sebou řadu nevýhod. Tavenina se v tomto systému na stěnách výrazně ochlazuje, což vyžaduje použití vyšších tlaků při plnění, aby se zajistilo adekvátní rozložení materiálu v dutině formy. S každým vstříkovacím cyklem je nezbytné odstranit zbytky materiálu, které ztuhnou a zůstanou ve vtokovém kanále, což vede k vyšší spotřebě surovin a ekonomickým ztrátám. Tyto ztráty se ještě zvýší, pokud se používá materiál, který není možné recyklovat. Pro oddělení vtokového zbytku se využívá různých konstrukčních řešení, které při otevření formy zajišťují, že zbytek materiálu zůstane na mobilní části formy. Tímto způsobem se vtokový zbytek oddělí od hotového výrobku a je následně vyjmut z formy pomocí vyhazovače. Na výrobku však může zůstat viditelná stopa po vtoku, což u některých výrobků vyžaduje dodatečné mechanické úpravy. Z tohoto důvodu by mělo být místo vtoku co nejmenší, aby byl zanechaný otisk co nejméně viditelný. Aby se minimalizovala ztráta materiálu, měla by být cesta materiálu do formy co nejkratší. Často se však stává, že hmotnost materiálu, který nevyužijeme v produktu, převyšuje hmotnost samotného výrobku. Z těchto důvodů se studený vtokový systém obvykle používá u jednoduchých výrobků nebo u forem s více dutinami pro výrobu jednoduchých dílů [4-6].

Horký vtokový systém

Funkcí horkého vtokového systému je kompenzace tepelných ztrát taveniny, což vede k redukci množství nepoužitého materiálu a k výrazné úspoře ve srovnání se studenými systémy, jelikož polymer zůstává tekutý v celém průběhu toku od trysky stroje až k vtokovému ústí. Tento proces vyžaduje ohřev, který spotřebuje jisté množství energie. Počáteční vysoké investice zahrnující zakoupení systému horkých trysek, použití alespoň třídeskového typu formy a její úpravu, se vrátí skrz náklady na provoz vstřikovacího stroje po celou dobu výroby. Jejich přizpůsobení se časem vyplatí díky úsporám na provozních nákladech během výrobního procesu. Díky horkému vtokovému systému je možné zkrátit dobu vstřikovacího cyklu, protože je potřeba zpracovat menší objem materiálu, což při masové produkci může vést k významnému snížení celkového provozního času stroje o desítky až stovky hodin [4,5].

Během vstřikování zůstává tavenina v horkém vtokovém systému po celou dobu trvání cyklu. Když je dutina formy plně naplněna, tak v místě vtokového otvoru ztuhne a vytvoří tenkou bariéru. Tato bariéra zajišťuje, že tavenina zůstane v horkém rozvodu i po otevření formy. V následujícím cyklu je do formy vstříknuta nová tavenina, která před sebou tlačí starou taveninu z předchozího cyklu. Tlak nové taveniny v dutině pak způsobí proražení této bariéry a znovu naplní dutinu. Existuje také možnost mechanického uzavření vtokového otvoru, což se obvykle děje pomocí hydraulického nebo pneumatického systému. Horký vtokový systém umožňuje zamezení vniknutí ztuhlých částic do tvarové dutiny a zároveň úniku roztaveného materiálu z tohoto systému ven. Kromě toho, tento systém na výrobku zanechává minimální nebo žádné stopy, případně jen slabý otisk, který připomíná značku z vyhazovače. Předností je také schopnost provádět sekvenční nebo kaskádové plnění dutiny, což umožňuje specifikovat oblasti, kam bude roztavený materiál přiveden s předstihem a kam s následným zpožděním. Na druhou stranu je tato technologie dražší, vyžaduje intenzivnější údržbu a zvyšuje nároky na ovládání vstřikovacího stroje [4-6].

V běžné konfiguraci horkého vtokového systému se nachází vtoková vložka s vyhříváním, vtokové ústí a topné těleso, které zajišťuje teplo pro celý systém. Aby se minimalizovaly tepelné ztráty, je klíčové systém izolovat od zbytku formy, což se obvykle řeší pomocí vzduchových mezer a omezením bodů dotyku mezi vtokovým systémem a ostatními částmi formy. Ohřev systému lze zajistit pomocí topných těles umístěných buď uvnitř, nebo vně systému. V horkých vtokových systémech s externím ohřevem jsou pro zajištění tepla používána ohřívací zařízení umístěná mimo proudící kanál s taveninou. V případě systémů s interním ohřevem je použito tzv. torpédové ohřívací zařízení umístěné přímo v průtoku taveniny. Hlavním nedostatkem interního ohřevu je, že může dojít k vytvoření zamrzlé vrstvy materiálu na chladných stěnách formy, což může vést k degradaci materiálu. Pokud se tento degradovaný materiál uvolní a dostane do formy, může to ovlivnit mechanické vlastnosti výrobku nebo způsobit vzhledové vady. U všech typů horkých vtokových systémů může dojít k zachycení materiálu ve slepých bodech nebo ostrých zákrutech kanálů, což vede k jeho degradaci. Proto nejsou vnitřně ohřívávané systémy vhodné pro aplikace, které vyžadují vysokou kvalitu povrchu materiálů [5].



Obrázek 7. Základní konfigurace ohřevu v horkých vtokových systémech [5].

2 KONSTRUKCE VSTŘIKOVANÝCH DÍLU

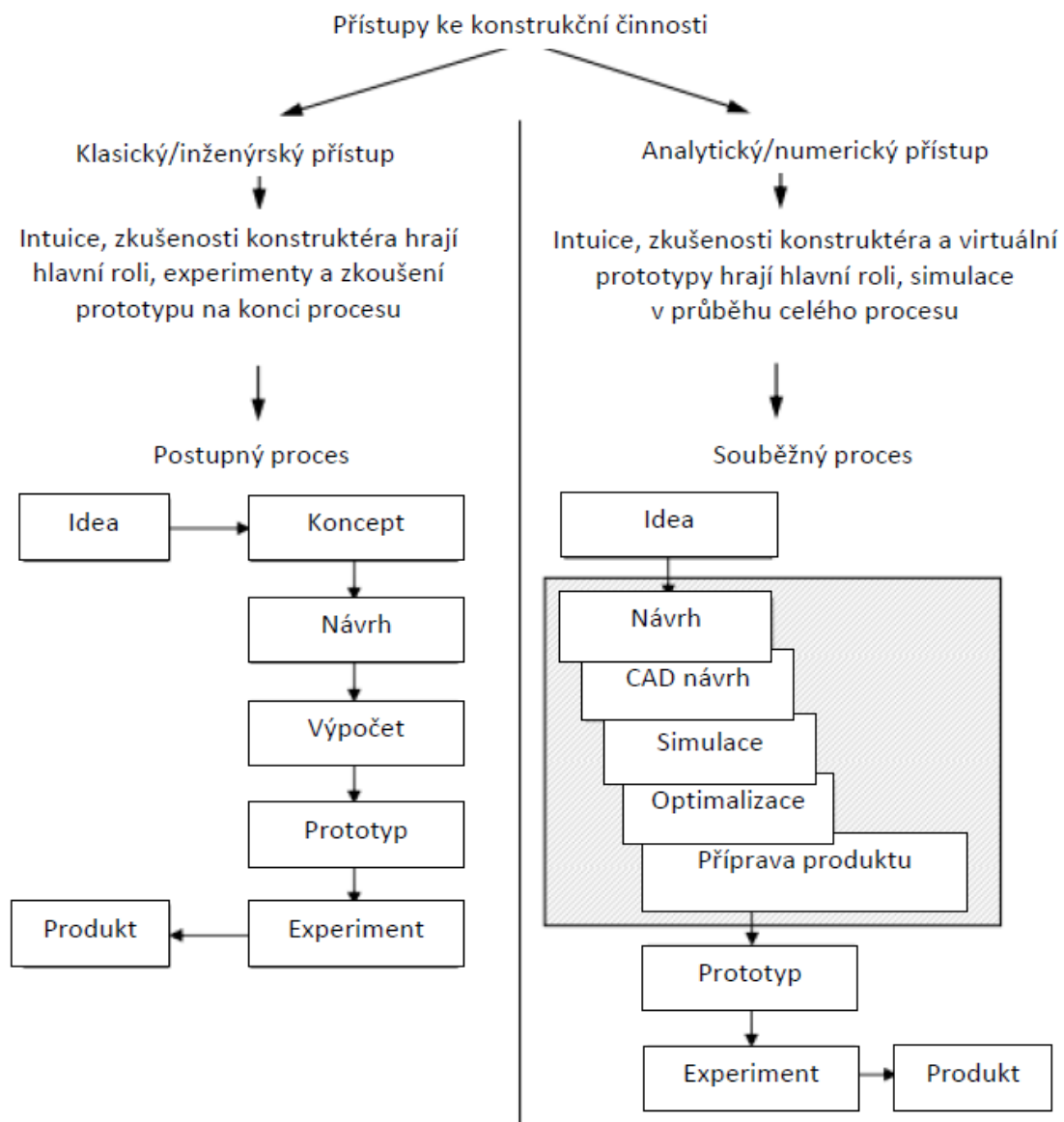
Navrhování konstrukcí je klíčovou činností inženýra, jehož úkolem je transformovat výkresovou dokumentaci do fyzické podoby. Tento proces, známý jako konstruování, zahrnuje promyšlenou tvorbu výkresů, které jsou následně realizovány. Dále je důležité, aby konstrukční návrhy vyhovovaly společenským požadavkům, byly ekonomicky výhodné a dosahovaly optimálních technických a provozních vlastností [11,19].

Práce konstruktéra by měla splňovat následující kritéria [12]:

- každá součást a podskupina konstrukce by měla být schopna nést dané zatížení a umožňovat potřebný pohyb efektivně a s ohledem na náklady,
- nesmí dojít k porušení součásti po stanovenou dobu životnosti,
- součást nesmí porušovat činnost jiné a musí splňovat zadanou funkci,
- přístupnost součásti musí být možná i po montáži do celku, aby jí bylo možné v případě potřeby zkontrolovat, případně vyměnit,
- konstrukční celek, nebo konstrukce musí plnit nejen danou funkci, ale také být konkurenceschopná a zabezpečit výrobcí přínos.

2.1 Přístupy ke konstruování

Konstruktér se ve své práci zaměřuje na studium minulých i současných výstupů, provádí výběr, odhaluje, přeskupuje a spojuje různé prvky. Tento proces se nazývá syntéza a představuje intelektuální přístup k navrhování, kde se využívají existující fakta, rovnice a další informace k dosažení cíle návrhu. Následně je výsledný návrh analyzován z hlediska jeho schopnosti splnit požadavky [20-23].



Obrázek 8. Možné přístupy ke konstrukční činnosti [11].

Postupný proces v sobě skrývá spoustu nevýhod v podobě možných pouze malých změn ovlivňující chování dílu. Větší zásahy již mohou vyžadovat analýzu všech předchozích kroků. Následné experimenty jsou časově i cenově náročné.

Souběžný proces poskytuje více možností při návrhu. V průběhu návrhu lze efektivně provádět výpočty vlastnostních parametrů a optimalizovat místa dílu, která se zdají být problematická. Tímto způsobem návrhu lze docílit velmi blízkých výsledků fyzických experimentů a docílení optimálního řešení [1].

2.2 Mezní stavy

Mimo jiné je potřebné dbát na zřetel také mezní stavy materiálů. Pod tímto pojmem rozumíme takový stav součásti či konstrukce, při kterém přicházejí o svou schopnost plnit funkci, ke které byly navrženy [1].

Nejčastější mezní stavy v technické praxi:

- mezní stavy únosnosti: ztráta stability, pevnostní vyčerpání, křehký lom, únavový lom,
- mezní stav použitelnosti: nadměrná velikost dynamické odezvy, nepříjemné průhyby.

Pro požadovanou trvanlivost konstrukce je zapotřebí brát v úvahu [20]:

- použití dílu,
- požadavky na funkčnost,
- vlastnosti materiálu,
- vliv prostředí,
- tvary konstrukčních prvků,
- očekávanou životnost dílu.

Dále je nutné brát v úvahu možné podmínky, za kterých může dojít k dosažení mezního stavu. Jedná se o vnější faktory, jako je např. zatížení, teplota, prostředí, energetické pole aj.) a faktory vnitřní (tepelné zpracování, chemické složení, struktura, velikost dílu aj.).

2.3 Metody a cíle pevnostních výpočtů

Problematika pevnostního výpočtu je náročná disciplína, kdy analytické řešení je možné použít pouze v dostatečně zjednodušených případech. Cílem pevnostních výpočtů je zjistit, zda konstrukce nebo její části vydrží předpokládaná zatížení během své životnosti bez poškození nebo selhání. Pomáhají předvídat chování materiálů pod zatížením, optimalizovat design, zvýšit bezpečnost a efektivitu konstrukcí a minimalizovat materiálové a výrobní náklady [3].

Analytický pevnostní výpočet obvykle zahrnuje několik etap:

1. Definice podmínek, které mají zásadní vliv na životnost a spolehlivost konstrukce.
2. Výběr vhodného materiálu.

3. Popis a určení mezních stavů.
4. Aplikace matematických a fyzikálních principů pro modelování a chování konstrukce pod zatížením.

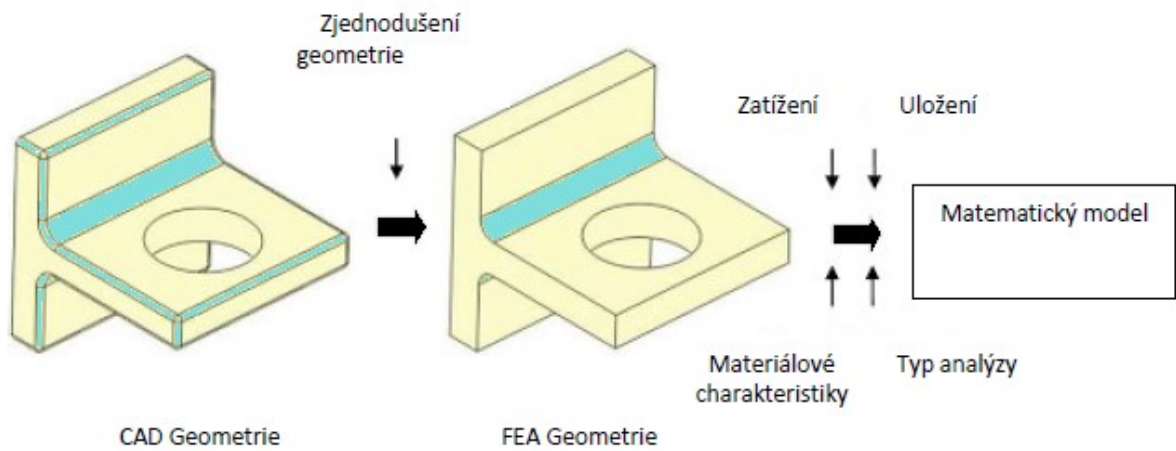
FEA (Finite Element Analysis) – Analýza konečných prvků užívá výpočtů k předpovězení a pochopení toho, jak se objekt bude chovat za různých fyzikálních podmínek. Jedná se o numerickou metodu užívající výpočtu množiny parciálních diferenciálních rovnic popisující zkoumaný fyzikální problém. Tato metoda je využívána v širokém spektru odvětví k predikcím zranitelnosti navrhovaných dílů [28].

Jednotlivé fáze výpočtu:

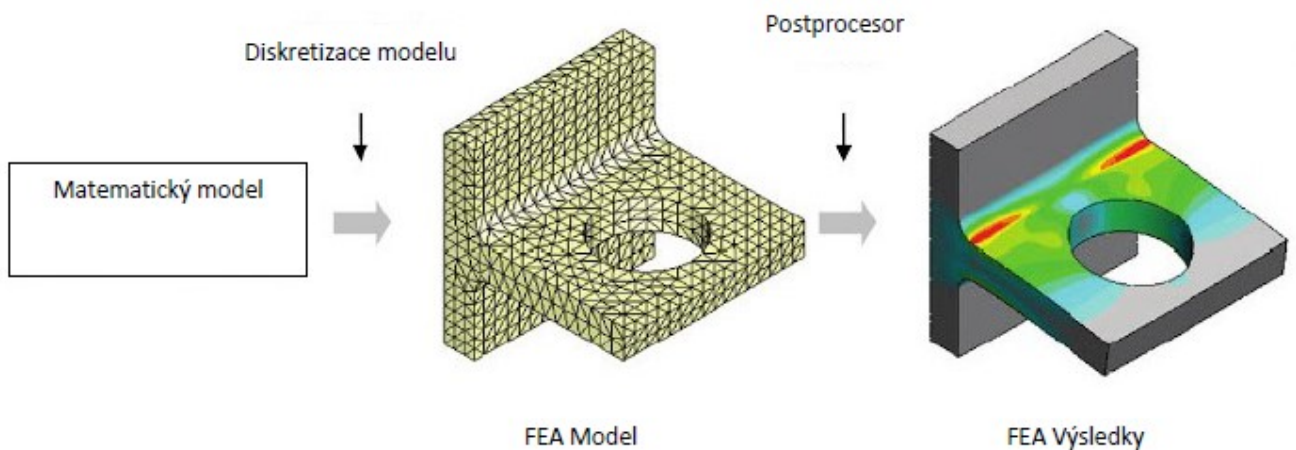
1. Příprava geometrického modelu – 3D model v CAD programu.
2. Diskretizace 3D modelu na konečné prvky.
3. Aplikace zatížení a okrajových podmínek.
4. Řešení získaného systému rovnic.
5. Vyhodnocení a interpretace výsledků.

Tyto kroky umožňují detailní analýzu chování konstrukce v simulovaných podmínkách.

Interpretace fází CAE výpočtů za pomoci ilustrace:



Obrázek 9. První fáze CAE výpočtu [29].



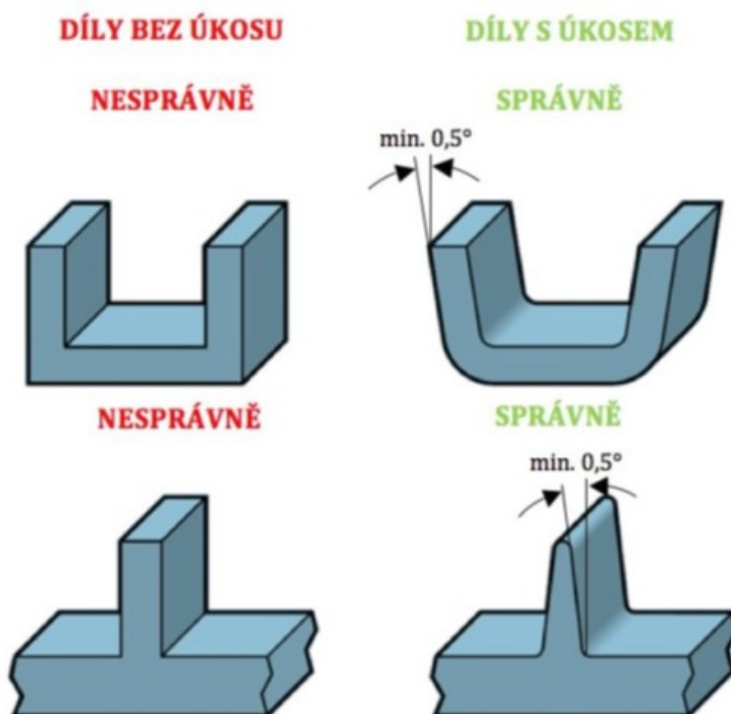
Obrázek 10. Druhá fáze CAE výpočtu [29].

2.4 Principy při návrhu plastového dílu

Při tvorbě polymerních výstřiků se uplatňují specifické principy odlišné od těch, které se používají u kovových komponent. Je důležité, aby konstruktér měl znalosti o polymerních materiálech, procesu vstřikování, návrhu samotného vylisku i o vstřikovací formě. Správný výběr materiálu a pečlivý návrh jak vylisku, tak formy může zabránit vzniku defektů na vstřikovaných dílech a potřebě dodatečných úprav formy [9,10].

2.4.1 Úkosy

Úkosy jsou běžnou součástí plastových dílů, přičemž jejich hlavní funkcí je usnadnit odformování a vyhození vylisku z formy. Rozměry a počet úkosů jsou určeny podle tvaru dílu, typu povrchové úpravy na formě, konstrukce samotné formy a systému vyhazování. Příliš malý úhel úkosu může zvýšit riziko poškození vylisku během jeho odstraňování z formy. V případě, že návrh dílu neumožňuje aplikaci větších úkosů, je nutné provést speciální úpravu povrchu formy, což může vést k zvýšení výrobních nákladů na vstříkované díly. Obvykle platí, že u forem s leštěnými dutinami postačují menší úkosy, zatímco u dutin vytvořených standardním obráběním je potřeba volit úkosy větší [9,10].



Obrázek 11. Úkosy [21].

Tabulka 1. Doporučené hodnoty úkosů [10].

Typ úkosu	Doporučená hodnota úkosu
Vnější plochy	30' - 2° (1°)
Vnitřní plochy	30' - 3° (2°)
Hluboké otvory	1° - 10°
Otvory do hloubky 2D	30' - 1° (45')
Výstupky	2° - 10°
Žebra a nálitky	1° - 10° (3°)

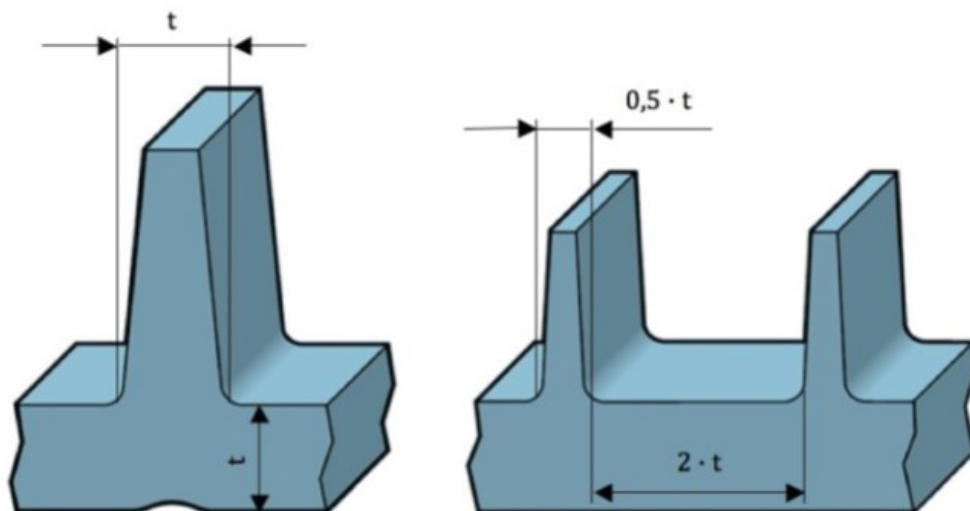
2.4.2 Žebrování

Plastové výrobky často využívají žebra pro zvýšení jejich tuhosti a pevnosti, aniž by bylo potřeba zvyšovat tloušťku stěn, což přináší úsporu materiálu a snižuje náklady. Žebrování také plní funkci při zarovnávání komponent, slouží jako opěry, vodítka pro pomocné mechanismy nebo usnadňuje správné sestavení dílů během montáže [9,10].

Charakteristika žebrování je definována pomocí různých parametrů:

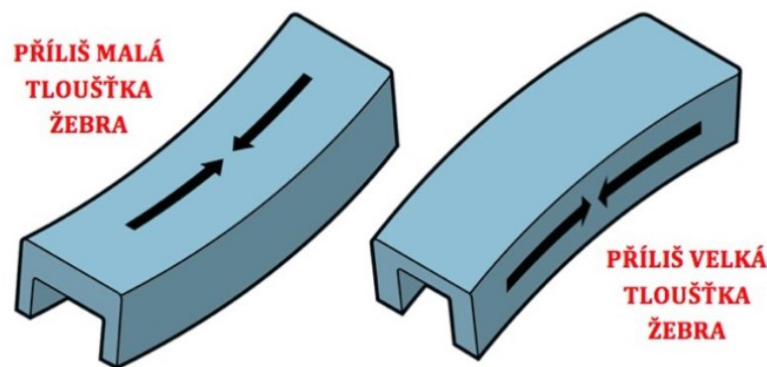
- výškou,
- tloušťkou,
- umístěním,
- počtem.

Zvyšování výšky žebra obvykle vede k větší tuhosti komponentu. Avšak, aby se předešlo problémům s plněním formy, odformováním nebo odvětráváním, žebro by nemělo být více než třikrát vyšší, než je jeho tloušťka. Úkoso na žebrech mohou způsobit nechtěné ztenčení žebra, což může vést k jeho snadnějšímu poškození. Proto je často vhodnější volit více menších žebor, která jsou snadněji odformovatelná a poskytují podobný vyztužující efekt. Ideálně by vzdálenost mezi žebry měla být dvojnásobkem tloušťky stěny žebra a tloušťka žebra by neměla být větší než 0,7 tloušťky stěny, ke které je žebro připojeno, aby se předešlo propadlinám. Rovněž se nedoporučuje kombinovat žebra s různou tloušťkou stěny v místech, kde se žebra kříží, aby nedocházelo k hromadění materiálu [9,10].



Obrázek 12. Změna jednoho vysokého žebra za dvě menší [21].

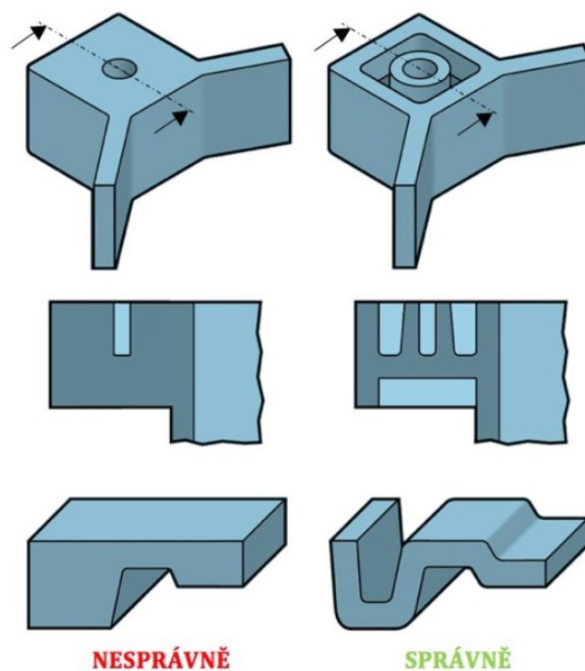
Zvýšení tuhosti proti ohybu v jedné rovině je možné dosáhnout použitím jednoduchého žebrování. Pro zvýšení odolnosti vůči torzním silám a ohybu v několika směrech je efektivní použít křížové nebo diagonální žebrování. U materiálů, které se smršťují stejně jak ve směru toku, tak i kolmo na něj, mohou tenčí žebra ztuhnout dříve než hlavní stěny, k nimž jsou připojena, což může vést k nejednotnému smrštění žebrování a stěn, a následně k deformaci dílu (Obr. 13). Tuto deformaci lze minimalizovat, pokud bude tloušťka stěn žebra blíže tloušťce hlavní stěny, avšak toto sblížování zvyšuje riziko vzniku propadlin na povrchu. Tyto problémy lze obvykle vyřešit intenzivnější temperací v oblasti žebrování [20,23].



Obrázek 13. Význam tloušťky stěny žebra na deformaci dílu [21].

2.4.3 Tloušťka stěny

Tloušťka stěny má významný dopad na klíčové charakteristiky vstřikovaného komponentu, včetně jeho pevnosti, tuhosti, odolnosti, možností zpracování, estetického vzhledu a celkových nákladů. Volba optimální tloušťky stěny vyžaduje nalezení rovnováhy mezi opačnými faktory, jako je pevnost ve vztahu k hmotnosti a odolnost vůči nákladům. Správným výběrem tloušťky stěny lze efektivně předcházet mnohým potenciálním problémům s komponentem, čímž se omezí potřeba dodatečných úprav formy. Pro ploché díly může desetiprocentní nárůst tloušťky stěny vést k třetinovému zvýšení tuhosti. Nicméně, zvětšení tloušťky stěny znamená také vyšší hmotnost, delší cykly vstřikování a vyšší náklady na materiál. Pro zlepšení tuhosti se proto často upřednostňuje použití konstrukčních prvků, jako jsou žebra, zakřivené nebo vlnité struktury, nad zvyšováním tloušťky stěny. Obvyklá tloušťka stěny se pohybuje v rozmezí 0,5 – 6 mm, dle druhu plastu [20,23].



Obrázek 14. Správně a nesprávně řešené tloušťky stěn [21].

2.4.4 Ostré rohy

Plastové díly by se měly vyhýbat ostrým hranám, protože tato místa jsou náchylná k akumulaci mechanických napětí, což snižuje mechanickou odolnost dílu a ztěžuje rovněž proudění materiálu během vstřikování. Zaoblení hran pomáhá rozptylovat tato napětí a zlepšuje tok materiálu, což vede k lepšímu plnění dutiny formy. Kromě toho zaoblení zajistí konzistentní tloušťku stěn v oblastech přechodů a zabraňuje akumulaci materiálu. Díly se zaoblenými hranami mají až o 50 % lepší odolnost proti nárazu a jsou méně předurčené k trhlinám. Dalším benefitem zaoblení ostrých hran je snížení potřebných vstřikovacích tlaků, což přispívá k delší životnosti vstřikovací formy [8-10].

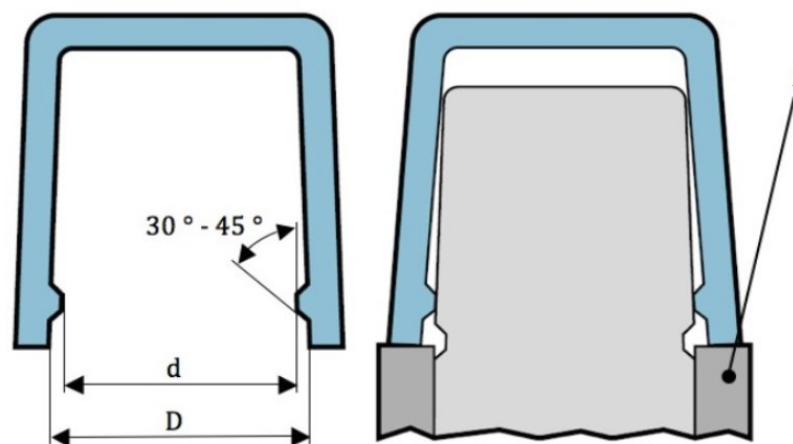
Minimální poloměr			Doporučený poloměr	
Plast	r [mm]	R [mm]	r	l
Plněné PA, PC	1,5	r + s	1,6	>50
PS, PC, CAB, PMMA, PVC	0,6-1	r + s	2,5	50-100
PE, PP, CA, PPO, POM, PETP, PA, ABS, SAN	0,5	r + s	4	100-150
			5	150-200
			6	200-250
			8	250-300
			12	300-400
			20	400-500

Obrázek 15. Minimální preferované rozměry zaoblení [20].

2.4.5 Podkosy

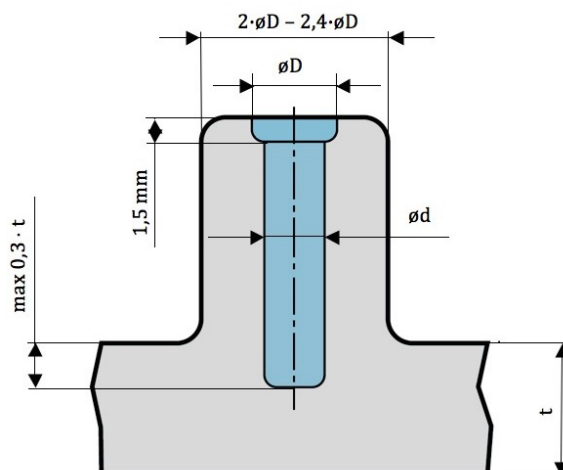
Během standardního procesu odstraňování vstříkovaných dílů z formy mohou určité designové prvky způsobit komplikace. V některých situacích je možné tyto designové prvky přizpůsobit pomocí metody, která umožňuje jejich deformaci během odformování, což se nazývá deformační odformování. Tento přístup eliminuje potřebu dodatečných odformovacích prvků, jako jsou boční výsuvky, což vede ke zjednodušení návrhu formy a snížení nákladů. Aby bylo možné toto řešení použít, musí mít díl vhodný tvar, který dovoluje přetahování daného prvku bez destrukce. Použití této techniky je vhodné pouze v případě, že jsou pružné prvky umístěny mimo pevné oblasti dílu, jako jsou žebra nebo rohy, a také ve formě musí být dostatek prostoru pro pružnou deformaci dílu. Klíčovým faktorem pro efektivní návrh odformovacího prvku je udržení správného poměru mezi vnitřním rozměrem dílu a vnitřním rozměrem pružného prvku. Obecně se doporučuje vyhnout se použití této techniky u křehkých nebo velmi tuhých materiálů, jako jsou vlákny vyztužené plasty [9,10].

2.4.6 Upevňovací výstupky

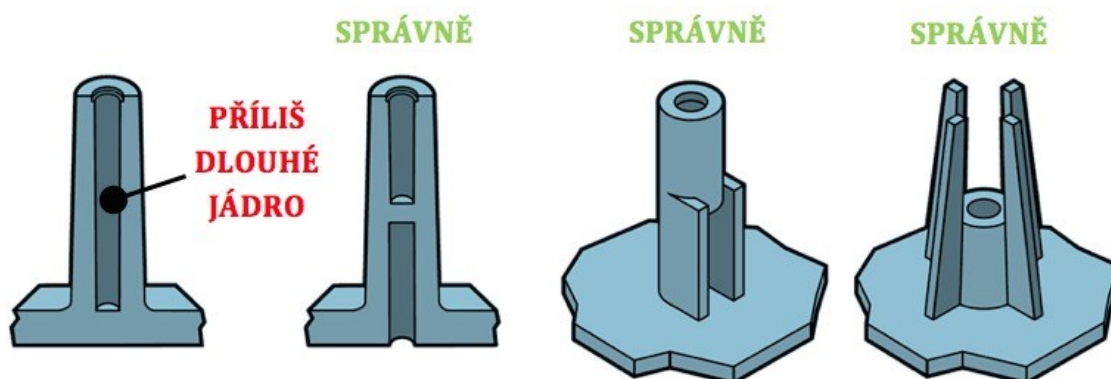


Obrázek 16. Doporučená konstrukce podkosů [20].

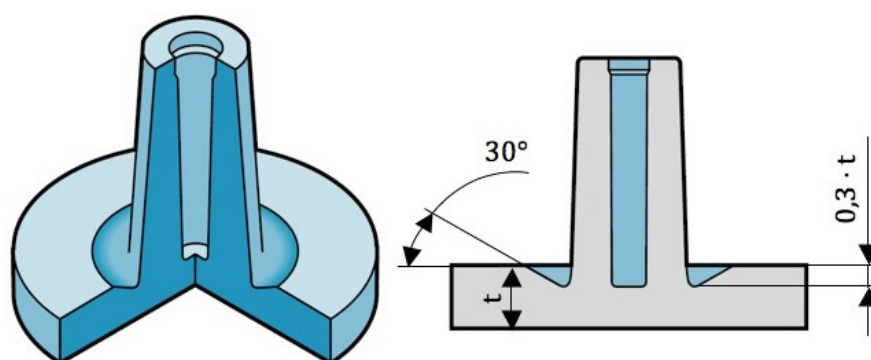
Konstrukce upevňovacích výčnělků pro šrouby, kolíky, nýty a čepy by měly být řešeny tak, aby nedocházelo k hromadění materiálu a následnému vzniku lunek, potažmo ulomení upevňovacího výstupku. K vyztužení by měla být použita žebra. Tloušťka těchto žeber by měla být 80 % tloušťky stěny. Veškeré stěny by měly být zaobleny. Upevňovací stěny a jejich napojení na samotný výrobek musí být řešeno tak, aby při utažení na předepsaný moment nedošlo k prasknutí nebo ulomení [10].



Obrázek 17. Doporučené rozměry upevňovacího výstupku [22].



Obrázek 18. Možná řešení upevňovacích výstupků [10].

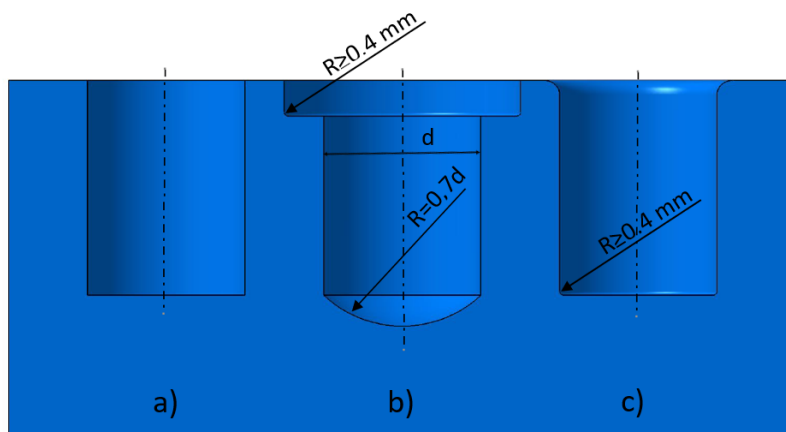


Obrázek 19. Odlehčení výstupku [10].

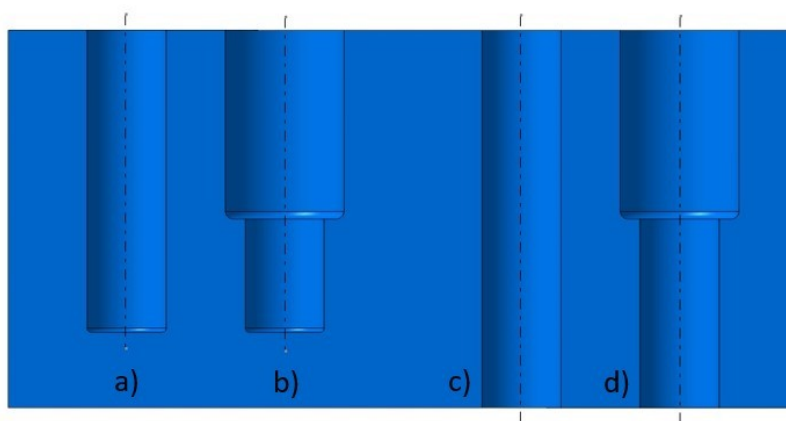
2.4.7 Otvory

Otvory vytváří část formy zvaná jádro a mohou být buď průchozí, nebo slepé. Materiál se během tuhnutí stahuje kolem jádra, což vyžaduje, aby jádro bylo navrženo s mírným sklonem, typicky o 1° , i když v některých případech může být tento sklon menší. V určitých situacích, v závislosti na konstrukci dílu, může být potřeba některé části otvorů navrhnout i bez úkosu.

Obecně se doporučuje, aby otvory byly co nejvíce rozšířené a co nejméně hluboké, aby se předešlo poškození tvarové části formy. U neprůchozích otvorů je důležité nezapomenout, že tenčí dno může být náchylné k deformaci během smršťování materiálu [10].



Obrázek 20. Neprůchozí otvory: a) chybná řešení – ostrá vnější i vnitřní hrana, nebezpečí vzniku trhlin, b) správná řešení, c) správná řešení [20].



Obrázek 21. Otvory – příklad aplikace: a) neprůchozí otvor, b) neprůchozí otvor s rozšířeným průměrem v nefunkční části, c) průchozí otvor, d) průchozí otvor s rozšířeným průměrem v nefunkční části [20].

3 VADY VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ

Vada ve výrobě plastového výstřiku je nedostatek, který způsobuje, že finální produkt se liší ve vzhledu, tvaru, rozměrech nebo vlastnostech od původně zamýšleného návrhu, obvykle definovaného výkresem nebo 3D modelem. Tyto nedostatky mohou být způsobeny nevhodným výběrem polymerního materiálu, chybami v návrhu produktu, použitím nevhodného vstřikovacího stroje, konstrukcí formy nebo neadekvátními parametry zpracování, jako jsou teplota taveniny, teplota formy, rychlost vstřikování a další. Defekty ve vstřikovaných dílech se rozdělují na ty, které jsou ihned zjevné, a na skryté vady, které se mohou projevit až časem [15].

3.1 Popis vad u vstřikovaných dílů a jejich příčiny

Vady u vstřikovaných plastových dílů popisují běžné problémy, které mohou vzniknout během procesu vstřikování plastů do forem. Tyto vady mohou ovlivnit jak estetický vzhled, tak i funkčnost finálního produktu. Mnoho vad u vstřikovaných plastových dílů lze ovlivnit již v rané fázi návrhu výrobku. Při návrhu výrobku je důležité vzít v úvahu různé aspekty, které mohou přispět k minimalizaci vzniku vad.

3.1.1 Smrštění

Smrštění plastového dílu při vstřikování je nevyhnutelný vedlejší efekt při ochlazování v dutině formy. Smrštění může zmenšit žádanou velikost a rozměry hotového dílu, což může způsobit problémy s tvarem, zapadáním a celkovou funkcí [32].

Možné příčiny smrštění jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 2).

Tabulka 2. Možné příčiny smrštění [34].

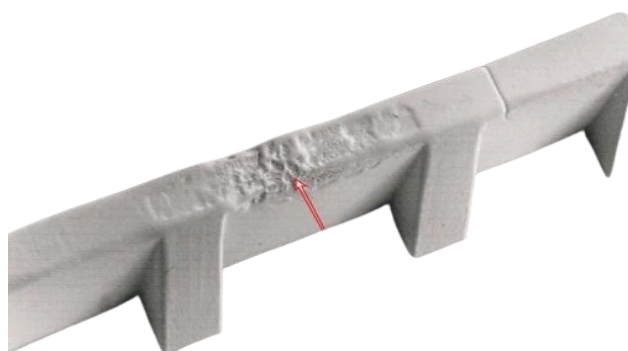
Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Příliš vysoká teplota šneku Nedostatečný vstřikovací tlak nebo čas Nedostatečná doba chlazení Krátká doba dotlaku
Proces	Příliš vysoká teplota formy Příliš malé vtoky Nevhodné umístění vtoků

	Nadměrná délka vtoků
Materiál	Nesprávně nastavený průtok
Design	Nestejněměrná tloušťka stěny Tlusté stěny

Úplné odstranění smrštění je téměř nemožné. Aby se při vstřikování alespoň minimalizovalo, je nezbytné pečlivě zvážit výběr materiálu, konstrukci součásti, konstrukci formy a parametry zpracování. Může být také nutné upravit proces vstřikování na základě specifických požadavků součásti [34].

3.1.2 Krátké plnění

Krátké plnění znamená, když roztavený polymer ztuhne uvnitř formy před vyplněním celé dutiny (Obr. 22), což má za následek neúplné nebo chybějící prvky na díle [32]. Možné příčiny krátkého plnění jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 3)



Obrázek 22. Krátké plnění formy [15].

Tabulka 3. Možné příčiny krátkého plnění [34].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Nedostatečný přísun materiálu Příliš nízká teplota šneku Příliš malá tryska Příliš nízký vstřikovací tlak nebo rychlost Nedostatečná doba vstřikování
Proces	Příliš nízká teplota formy Nevhodné umístění vtoku

	Nedostatečné odvětrání Vtokové pouzdro je příliš dlouhé Příliš malý průměr vtoku
Materiál	Nesprávně nastavený průtok Nadměrný obsah vlhkosti Nestejněměrná velikost granulí
Design	Část stěny je příliš tenká Složité prvky s proměnlivou tloušťkou stěn

Eliminaci krátkého plnění lze provést prostřednictvím optimalizace parametrů, jako je vstřikovací tlak, teplota, přídržný tlak aj. Důležitý je také správný návrh vtokového systému a odvětrání, aby podporovaly rovnoměrné plnění dutiny formy [15].

3.1.3 Přetoky

Vznikají, když se roztavený materiál protlačí mezerou mezi dvěma polovinami formy (Obr. 23). Obvykle se vyskytuje v blízkosti vyhazovačů. Nejčastěji tento problém nastává z důvodu nadměrného tlaku ve formě nebo malou silou uzavření formy. Přetoky jsou běžnou vadou při vstřikovacím procesu, kdy mohou ovlivnit vzhled a funkčnost hotového výrobku. Dalším problematickým faktorem je zvýšení výrobních nákladů a plýtvání materiálem [15]. Možné příčiny vzniku přetoků jsou shrnuty v následující tabulce (Tab. 4).



Obrázek 23. Přetoky na vstřikovaném díle [15].

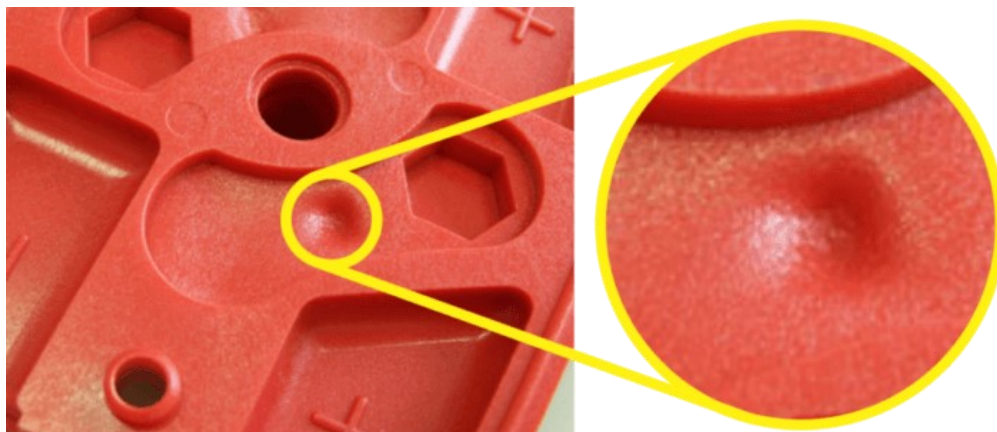
Tabulka 4. Možné příčiny vzniku přetoků [34].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Nedostatečný přítlak Nadměrný vstříkovací tlak Příliš dlouhá doba cyklu
Proces	Nedostatečná podpora forem Nedostatečné odvětrání formy Příliš dlouho vtokové ústí Kontaminovaný povrch formy na rozhraní dělicích ploch
Materiál	Příliš vysoký index toku taveniny
Design	Dělicí roviny umístěné ve složitých spojích

Z hlediska eliminace přetoků je důležité zajistit to, aby forma byla správně upnuta a přiměřeně uzavřena dostatečnou silou. Dalšími důležitými faktory, které je potřebné sledovat jsou vstříkovací tlak a objem vstříkovaného materiálu. Nezbytné je sledovat i správné nastavení parametrů procesu, jako rychlost a tlak vstříkování [35].

3.1.4 Propadliny

Jsou mělké prohlubně na vstříkovaném díle, které se objevují, když povrch součásti chladne a tuhne různou rychlostí, což způsobuje změny v objemu materiálu. Nejčastěji jsou způsobeny několika faktory, jako je nesprávné umístění nebo velikost vtoku a nesprávná konstrukce formy [15]. Možné příčiny vzniku propadlin jsou uvedeny v tabulce 5.



Obrázek 24. Propadlina na výrobku [15].

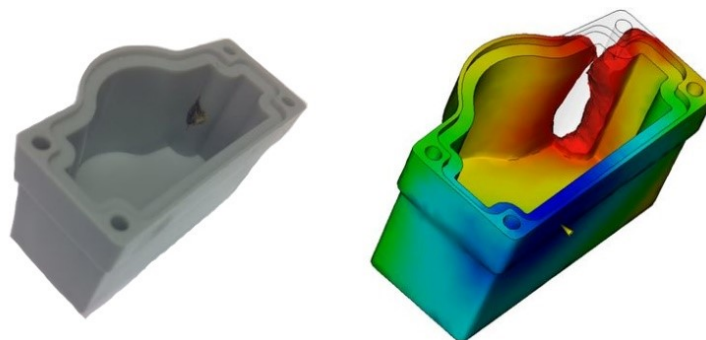
Tabulka 5. Možné příčiny vzniku propadlin [34].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Vadný zpětný uzávěr šneku Zatékající tavenina na trysce Předčasně zamrzlá tavenina na trysce
Proces	Příliš vysoká teplota formy na žebrech Nevhodné umístění vtoku Nadměrná délka vtoku Nevyvážené proudění taveniny Vzduchové kapsy Nedostatečně odvzdušněná forma
Materiál	Vysoká viskozita materiálu
Design	Nadměrná tloušťka žeber Nadměrná tloušťka stěn Nadměrná tloušťka pinů

Aby se zabránilo vzniku propadlin, je zásadní optimalizovat parametry procesu, jako rychlost vstřikování, tlak a teplotu tak, aby byl zajištěn rovnoměrný tok roztavené taveniny. Další zásadní aspekt, který pomáhá eliminovat propadliny, je dostatečně dlouhá doba chlazení, aby materiál ve formě rovnoměrně vychládl [35].

3.1.5 Vzduchové kapsy

Vzduchové kapsy vznikají během vstřikovacího procesu, kdy je vzduch uvězněn uvnitř formy. Tato vada se projevuje tvorbou malých dutin nebo kapes v materiálu. Tyto kapsy na výrobku mohou nepříznivě ovlivnit strukturální integritu a vzhled finálního produktu [35]. Možné příčiny vzniku bublin jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 6).



Obrázek 25. Vzduchová bublina [15].

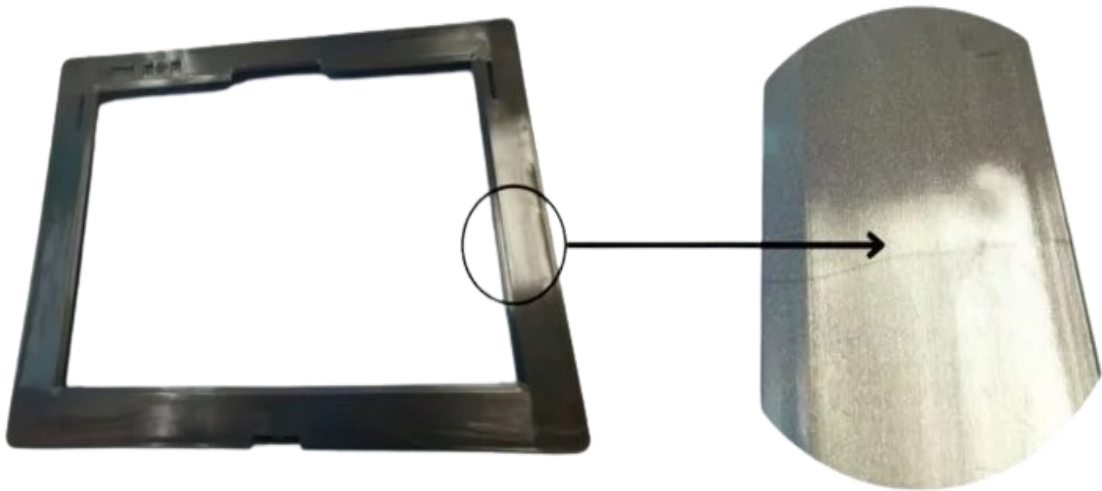
Tabulka 6. Možné příčiny vzniku bublin [34].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Příliš vysoká vstřikovací teplota Nízký vstřikovací tlak Krátký vstřikovací čas Malý přísun materiálu Nesprávný teplotní profil Nadměrná rychlost vstřikování Nedostatečný protitlak
Proces	Nesprávné odvzdušnění Nevhodné vtokové kanály Příliš nízká teplota formy
Materiál	Nadměrná vlhkost
Design	Příliš velká tloušťka stěny a náhlé přechody tlouštěk stěn

Eliminace vzduchových kapes při vstřikování plastů zahrnuje optimalizaci parametrů vstřikování, jako je tlak, teplota a rychlost vstřiku, stejně jako návrh formy s adekvátními ventilačními kanálky pro odvod vzduchu. Užívání vhodných technik chlazení a udržování konstantní teploty formy také pomáhá předcházet vzniku vzduchových kapes [35].

3.1.6 Studené spoje

Jsou místa, kde se na vstřikovaném díle setkávají dva proudy taveniny a tím se na povrchu obvykle objeví viditelná čára nebo šev. Tyto místa jsou obvykle vizuálně rozpoznatelná a také mohou zásadně snižovat mechanické vlastnosti dílu. Mezi běžné příčiny vzniku tohoto jevu patří nedostatečný vstřikovací tlak, nízká teplota formy a nedostatečné odvzdušnění [15]. Možné příčiny vzniku studených spojů jsou uvedeny v tabulce 7.



Obrázek 26. Studený spoj [15].

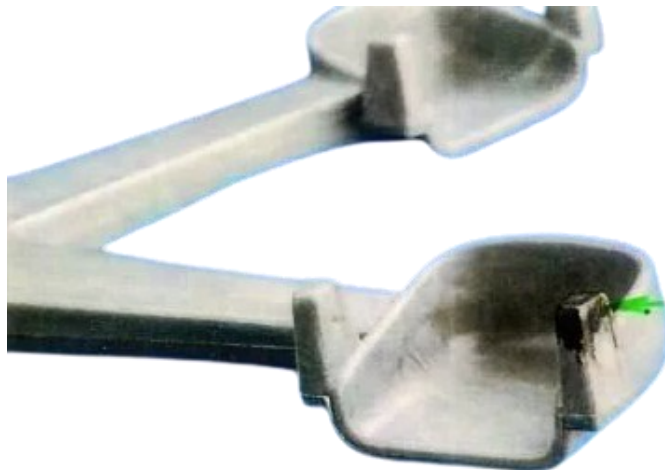
Tabulka 7. Možné příčiny vzniku studených spojů [34].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Příliš nízká teplota šneku Nedostatečný protitlak Nízký vstřikovací tlak a rychlost
Proces	Příliš nízká teplota formy Příliš malé vstřikovací ústí Nevhodné umístění vtoku Nadměrná délka vtoku
Materiál	Nevhodný průtok
Design	Prvky jako otvory a výřezy blokující tok taveniny z ústí

Důležitým faktorem pro eliminaci studených spojů je optimalizace konstrukce formy spolu s podmínkami zpracování. To může zahrnovat úpravu rychlosti vstřikování a tlaku, zvýšení teploty formy a zajištění správného umístění vtoku a odvzdušnění. V případě, že se již na výrobku studené spoje nacházejí, k jejich redukci je možné využít tepelné zpracování, nebo povrchovou úpravu [35].

3.1.7 Spálená místa

Spálená místa na díle po vstřikování plastů jsou vady, které vznikají v důsledku nadměrného ohřevu taveniny plastu během vstřikovacího procesu. Tyto vady se obvykle projevují jako tmavé nebo černé skvrny, plochy nebo pruhy na povrchu vstřikovaného dílu a mohou být doprovázeny nežádoucím pachem spáleného plastu. Možné příčiny vzniku spálených míst jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 8).



Obrázek 27. Spálená místa na vstřikovaném díle [20].

Tabulka 8. Možné příčiny vzniku spálených míst na výrobku [34].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Nadměrný vstřikovací tlak nebo rychlosti Vadný regulátor teploty Příliš horká tryska Nadměrná teplota šneku Malý průměr trysky Neaděkvátní délka cyklu
Proces	Nesprávná velikost a umístění odvzdušnění Nesprávná velikost a umístění vtoků
Materiál	Příliš nízký průtok Nadměrné použití maziva
Design	N/A

Eliminace spálených míst na dílech po vstřikování plastů vyžaduje identifikaci a řešení příčin, které k těmto vadám vedou. Především správným nastavením teploty taveniny, regulací

rychlosti vstřikování a zajištění správné ventilace formy můžeme dosáhnout eliminace spálených míst [33].

3.1.8 Změna barvy

K lokálním změnám barvy na vstřikovaném díle dochází při kontaminaci vstřikovaného materiálu, jeho nadměrnou vlhkostí, nebo nesprávně nastavenými procesními podmínkami [32]. Možné příčiny vzniku barevných vad na vstřikovaném díle jsou uvedeny v tabulce 9.



Obrázek 28. Barevné vady na vstřikovaném díle [15].

Tabulka 9. Možné příčiny vzniku barevných vad na vstřikovaném díle [34].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Příliš vysoká teplota trysky Příliš vysoká teplota šneku Příliš dlouhá doba cyklu Nadměrná doba cyklu
Proces	Nesprávná teplota formy Neefektivní chlazení Nedostatečné odvzdušnění
Materiál	Kontaminovaný materiál
Design	N/A

Je důležité používat vysoce kvalitní materiál a barviva, aby nedocházelo ke změně barvy. Materiál je potřebné správně skladovat a manipulovat s ním, aby nedošlo ke kontaminaci. Optimalizace parametrů procesu, jako tlak a teplota jsou rovněž nezbytné pro zajištění správného zpracování materiálu. V případě, že již došlo ke změně barvy, je možné tuto vadu eliminovat broušením, nebo leštěním [15].

3.1.9 Studené tokové linie

Zobrazují se jako zvlněný vzor nebo zvlnění na povrchu vstřikovaného dílu. I když nepoškozují strukturální integritu součásti, indikují nerovnoměrný tok materiálu a snižují estetickou kvalitu. Stopy se vyskytují primárně v blízkosti vtoku. Obecně se objevují jako kruhy, čáry anebo opakované vzory [32]. Možné příčiny vzniku studených tokových linií na vstřikovaném díle jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 10).



Obrázek 29. Studené tokové linie materiálu [15].

Tabulka 10. Možné příčiny vzniku studených tokových linií [34].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Nedostatečný vstřikovací tlak Nízká teplota šneku Nízká teplota trysky Nekonzistentní doba cyklu
Proces	Nevhodná volba vtokového ústí
Materiál	Příliš nízký ITT pro danou tloušťku a délku toku
Design	N/A

Je důležité optimalizovat parametry procesu vstřikování, jako je tlak, rychlost a teplotu tak, aby bylo zajištěno, že roztavený plast protéká formou rovnoměrně. Dalším podpůrným faktorem může být úprava designu formy, nebo přidání vtoku, který může podpořit tok taveniny a snížit tvorbu stop [33].

3.1.10 Delaminace

K delaminaci na polymerních dílech dochází v případě, kdy během vstřikování je materiál špatně spojen. K dané závadě může také dojít, pokud je teplota formy příliš nízká, nebo vstřikovací tlak není příliš vysoký, aby formu správně naplnil. Kromě toho, pokud doba chlazení není dostatečná, povrchové vrstvy součásti mohou ztuhnout dříve, než má jádro možnost plně ztvrdnout, což způsobí oddělení vrstev [32]. Možné příčiny vzniku delaminace vrstev jsou uvedeny v tabulce 11.



Obrázek 30. Delaminace materiálu [15].

Tabulka 11. Možné příčiny vzniku studených spojů [34].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Příliš nízká rychlost vstřikování Příliš krátký kanál vtokové vložky
Proces	Nízká teplota formy Ostré vtoky
Materiál	Nadměrná vlhkost Nečistoty v materiálu
Design	Značné přechody tloušťek Ostré hrany

Předejít delaminaci lze správným nastavením vstřikovacího procesu, jako je tlak, teplota a doba chlazení, která je nezbytná pro zabránění delaminace. Kromě toho je potřebné navrhnout formu tak, aby podporovala rovnoměrné chlazení materiálu uvnitř formy [15].

3.1.11 Jetting

Jetting při vstřikování polymeru je vada, která se objevuje, když proud taveniny, který vstupuje do dutiny formy, vytvoří zvlněný nebo vláknitý vzhled na povrchu vstřikovaného dílu. Tato vada je způsobena tím, že tavenina je při vstřikování příliš rychle vpravena do formy, což vede k tomu, že se tavenina takzvaně "střílí" přímo do chladnější části formy, aniž by se dostatečně rozšířila a vyplnila dutinu formy rovnoměrně.

Jetting obvykle vzniká, když je vtokový bod umístěn tak, že tavenina nenaráží přímo na stěnu formy, která by ji rozptýlila, ale místo toho proudí přímo do volného prostoru formy. Tento proud taveniny pak zchladne a ztuhne dříve, než se stihne spojit s ostatní taveninou, která naplňuje formu, což vede k výskytu zvlněného nebo vláknitého vzoru na povrchu finálního produktu [33]. Možné příčiny vzniku jettingu jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 12).



Obrázek 31. Kresba po volném proudu taveniny [15].

Tabulka 12. Možné příčiny vzniku Jettingu [32].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Nadměrná rychlost vstřikování Příliš malý otvor trysky Nedostatečná teplota trysky
Proces	Příliš nízká teplota formy Nevhodné umístění vtoku Nadměrná délka vtoku
Materiál	Nevhodný průtok
Design	N/A

Předejít této vadě lze optimalizací konstrukce formy spolu se správným umístěním vtoků, aby se zajistil hladký tok taveniny. V procesu je možné snížit rychlost vstřikování spolu se zvýšením tlaku pro vyplnění dutiny formy. Správná volba materiálu s vyšší viskozitou spolu se správně navrženým odvzdušněním formy dokáže daný problém z větší části eliminovat [33].

3.1.12 Zkroucení

Je běžná vada při vstřikování plastů, kdy vstřikovaný plastový díl podléhá nežádoucím změnám tvaru nebo deformacím poté, co zchladl a ztuhl. Deformace je charakterizována tím, že díl je zkroucený nebo ohnutý, což může vést k tomu, že díl nebude správně pasovat nebo fungovat [15]. Možné příčiny vzniku zkroucení na vstřikovaném díle jsou shrnuty v tabulce 13.



Obrázek 32. Zkroucený díl po vychladnutí [15].

Tabulka 13. Možné příčiny vzniku zkroucení [32].

Kategorie vad	Možné příčiny
Stroj	Nedostatečný vstřikovací tlak nebo čas Příliš nízká teplota šneku Nízká teplota trysky Nedostatečná délka cyklu
Proces	Nízká teplota formy Příliš malý otvor trysky Nevhodné umístění vtoku
Materiál	Nevhodně zvolený průtok
Design	Nadměrná tloušťka žeber Nadměrná tloušťka stěn Nadměrná tloušťka nálitků

Předejít této vadě lze několika opatřeními. Patří mezi ně optimalizace konstrukce formy a chladicího systému pro zajištění rovnoměrného chlazení v celém dílu. Při procesu je možné snížit vstřikovací tlak a teplotu formy. Pro snížení zbytkového napětí je možné změnit umístění a orientaci vtoku [33].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo vypracování dvou optimalizovaných konstrukčních návrhů rámu automobilového ventilátoru s primárním požadavkem na snížení výrobních nákladů. První návrh se zabýval redukcí hmotnosti ve funkční části rámu za zachování pevnosti dílu v kritickém směru. Druhý návrh se zabýval zvýšením pevnosti v kritickém směru za zachování sériové hmotnosti, kde snížení nákladů poskytuje možnost rozšíření výrobních tolerancí a tím spjaté snížení zmetkovitostí pro daný díl. Tato varianta také poskytuje zvýšení životnosti daného dílu.

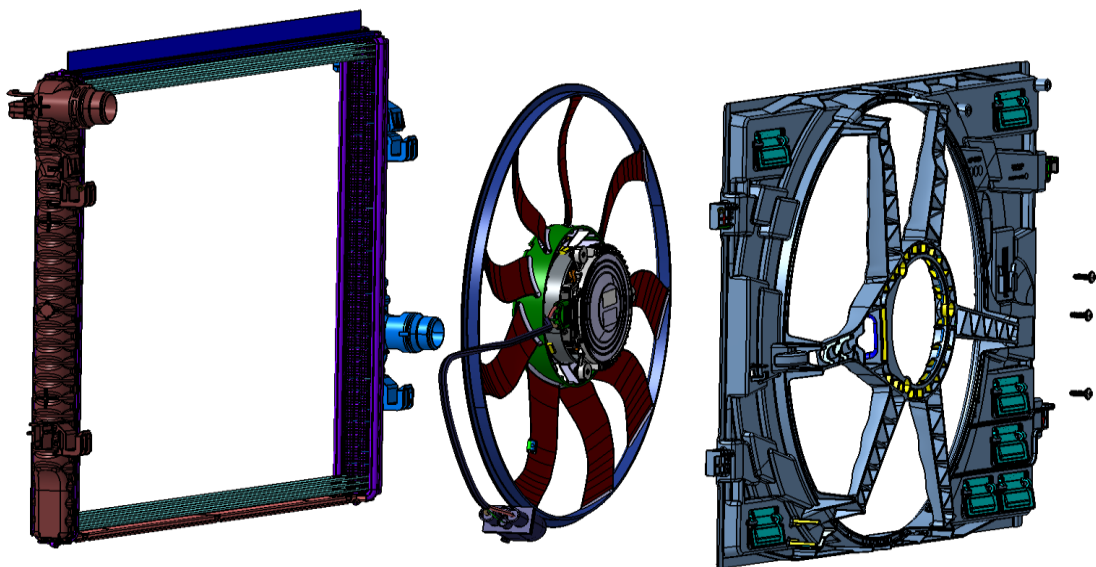
Pevnost dílu byla sledována za pomoci velikosti prohnutí v ose X (proti směru jízdy vozidla) oproti sériovému dílu, kdy tato hodnota je kritická z důvodu možného kontaktu vrtule s rámem s možnou destrukcí obou dílů.

Pro optimalizaci návrhů byly použity totožné okrajové podmínky pro MKP analýzu včetně vlastností materiálu použitého na sériovém dílu. Tvary lopatek byly navrženy ve spolupráci se simulačními týmy zabývajícími se aerodynamikou. Zároveň byl vypracován nový prsteneček pro uchycení elektromotoru a lopatky vedoucí kabel z funkční části do místa uchycení na okraji rámu.

Oba tyto návrhy byly průběžně ověřovány za pomoci MKP v programu Catia V5 s použitím okrajových podmínek požadovaných firmou Hanon Systems a optimalizované až do doby splnění zadání. U každého návrhu probíhala průběžně kontrola hmotnosti a zároveň eliminace napětí, která byla nad povolenou hodnotou 60 MPa pro daný materiál za teploty 100 °C. Cílem prvního optimalizačního návrhu bylo dosáhnout velikosti prohnutí v ose X (proti směru vozidla) 6,25 mm (stejně, jako v případě sériového dílu) a současně s tím v maximální možné míře snížit hmotnost tohoto dílu v jeho funkční části. Druhý návrh se soustředil na co největší zvýšení pevnosti dílu s podmínkou nepřekročení původní hmotnosti sériového dílu a tím docílení možného rozšíření výrobních tolerancí a snížení ceny na základě redukce zmetkovitosti.

5 SESTAVA CHLADIČE A JEHO ČÁSTI V AUTOMOTIVE

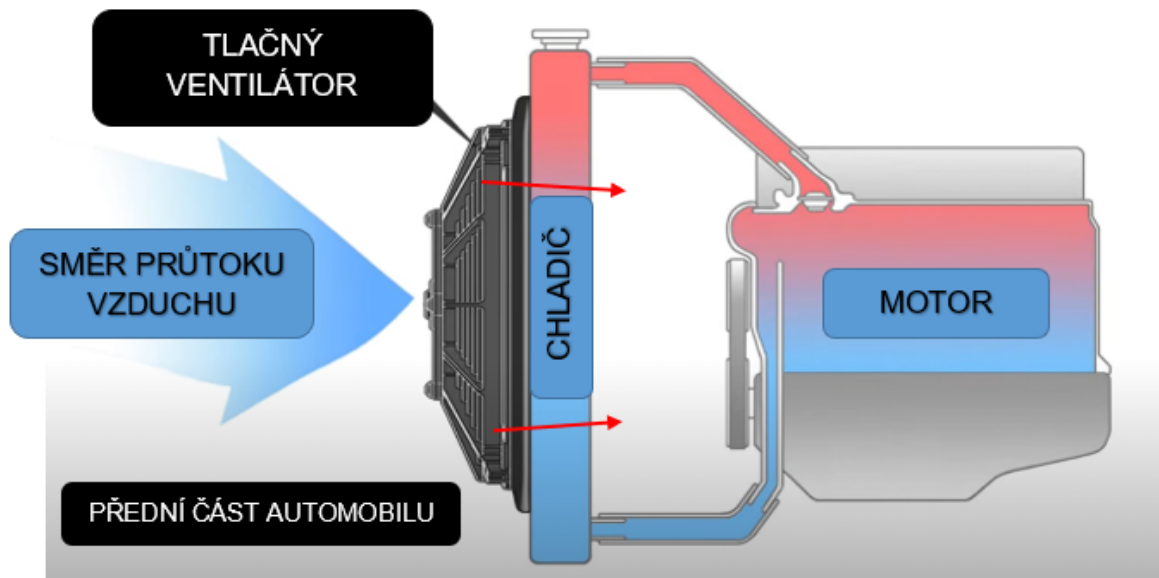
Ventilátor pro chladič automobilu (Obr. 33) je klíčovou součástí termodynamického managementu motorového vozidla. Jeho primární funkcí je zajištění dostatečného průtoku vzduchu skrze chladič, zejména v situacích, kdy vozidlo stojí nebo se pohybuje nízkou rychlostí, a přirozený průtok vzduchu je nedostatečný. Ventilátor využívá elektrickou energii k pohánění rotoru, který generuje proudění vzduchu. Toto proudění vzduchu prochází chladičem, kde absorbuje teplo z chladicí kapaliny motoru a přispívá tak k odvádění tepla. Efektivita tohoto procesu je klíčová pro udržení optimální provozní teploty motoru a prevenci jeho přehřátí [18].



Obrázek 33. Sestava modulu chladiče – chladič, vrtule, elektromotor, rám.

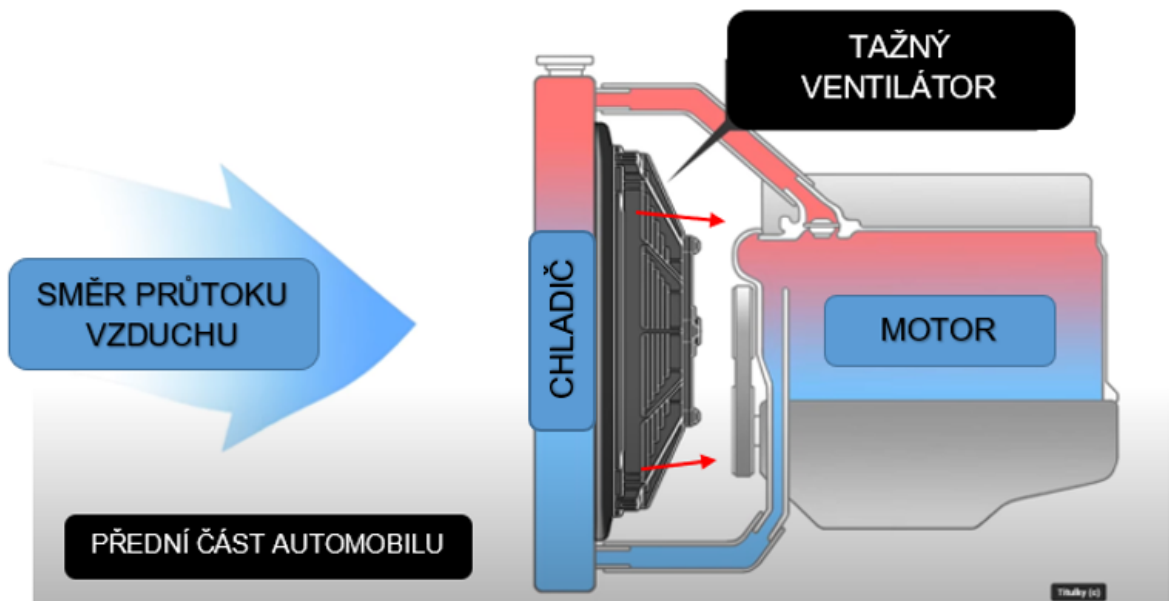
5.1 Umístění ventilátoru

Tlačný ventilátor na chladič automobilu je umístěn před chladičem a tlačí vzduch skrz něj (Obr. 34), což může být výhodné v omezeném prostoru, ale může být méně efektivní kvůli teplejšímu vzduchu přicházejícímu z motoru. Tažný ventilátor je umístěn za chladičem a táhne vzduch skrz (Obr. 35), což je obvykle efektivnější, protože využívá chladnější vzduch, ale vyžaduje více prostoru za chladičem. Správný výběr závisí na specifických podmínkách a požadavcích vozidla [18].



Obrázek 34. Tlačné umístění ventilátoru na chladiči [18].

Výhody tlačného ventilátoru na chladiči automobilu zahrnují jeho schopnost poskytovat efektivní chlazení i v nízkých rychlostech nebo při stání vozidla, což je klíčové v hustém městském provozu nebo při jízdě v kolonách. Tlačný ventilátor může také pomoci předcházet přehřátí motoru, zvláště v extrémních teplotních podmínkách nebo při náročném použití vozidla. Navíc, jeho umístění před chladičem může usnadnit montáž a údržbu ve srovnání s tažnými ventilátory [18].

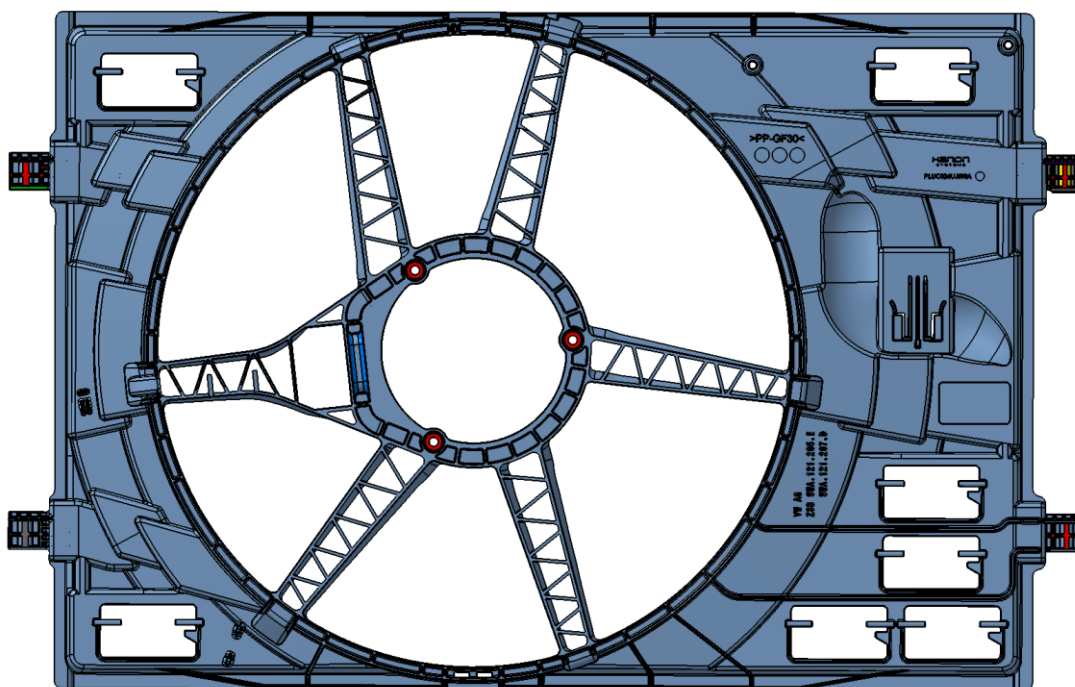


Obrázek 35. Tažné umístění ventilátoru na chladiči [18].

Tažný ventilátor na chladiči automobilu, stejně jako v případě použití na sériovém díle, je obvykle efektivnější v chlazení, protože táhne chladnější vzduch přes chladič bez ovlivnění teplem z motoru. Tato konfigurace může pomoci zajistit lepší výkon chlazení a přispět k optimálnímu fungování motoru, zvláště při vysokých teplotních zátěžích [18].

5.2 Rám ventilátoru

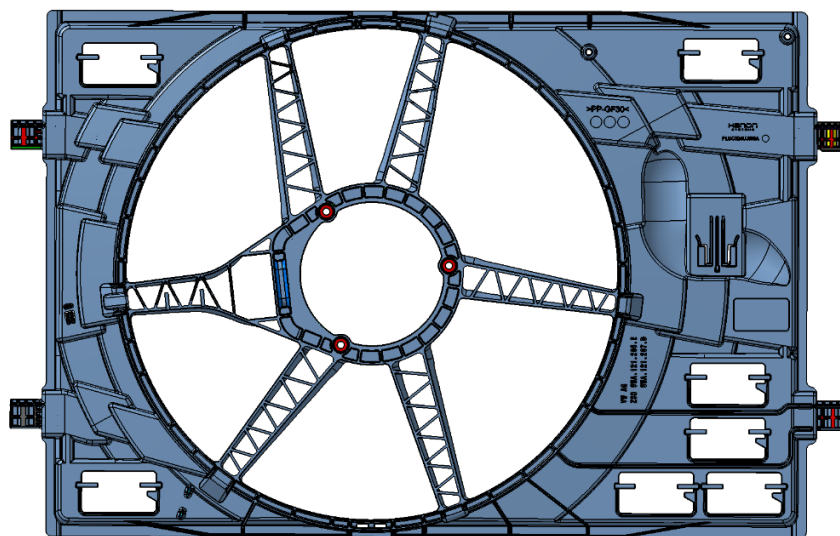
Rám ventilátoru chladiče v automobilu je díl, který obklopuje ventilátor z vnitřní nebo vnější strany chladiče a slouží k zefektivnění proudění vzduchu do chladiče nebo z něj. Jeho hlavním účelem je směřovat vzduch tak, aby maximálně procházel chladičem, a tím zlepšoval chladičí výkon systému v případě použití tlačného ventilátoru, nebo k maximalizaci průtoku vzduchu z chladiče na ventilátor v případě použití tažného ventilátoru. Výhody tažného umístění zahrnují lepší chlazení motoru, zvýšení účinnosti ventilátoru a potenciální snížení spotřeby paliva díky efektivnějšímu chlazení. V případě tlačné konfigurace může rám ventilátoru chránit chladič před poškozením cizími tělesy [17].



Obrázek 36. Rám ventilátoru pro tažnou konfiguraci.

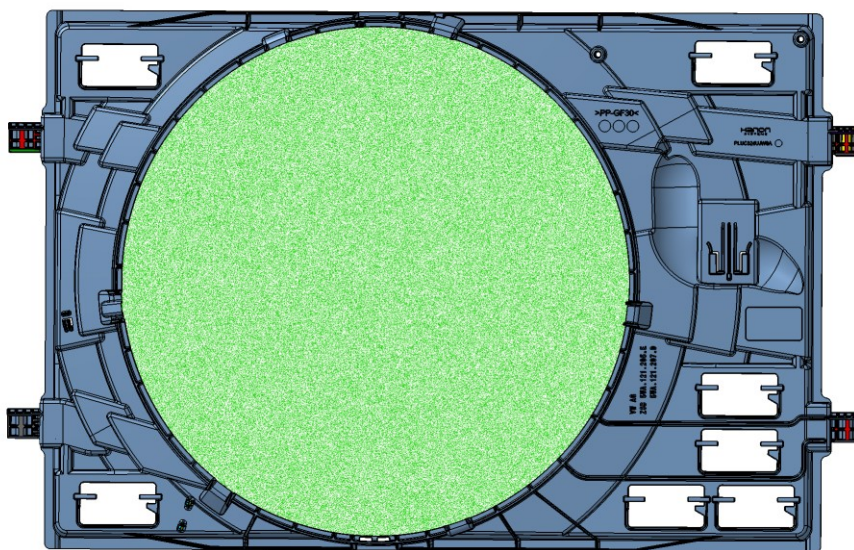
6 SÉRIOVÝ DÍL

Sériový rám ventilátoru (Obr. 37) byl navržen za specifických požadavků zákazníka s použitím materiálu PP-GF30 od firmy Celanese pod názvem Celstran PPGF30-0403P10. Teoretická vypočtená hmotnost dílu činila 770 gramů a deformace v ose X (ve směru jízdy automobilu) činila za specifického zatížení 6,25 mm vycházející z MKP analýzy. Deformace dílu v ose X je důležitý parametr z důvodu možné kolize vrtule s rámem a následného poškození obou dílů.



Obrázek 37. Sériový návrh rámu ventilátoru MQB37.

V rámci optimalizace bylo firmou povoleno optimalizovat pouze průtokovou část dílu (Obr. 38) z důvodu následné možnosti otestovat návrhy také na hlučnost při specifických otáčkách.



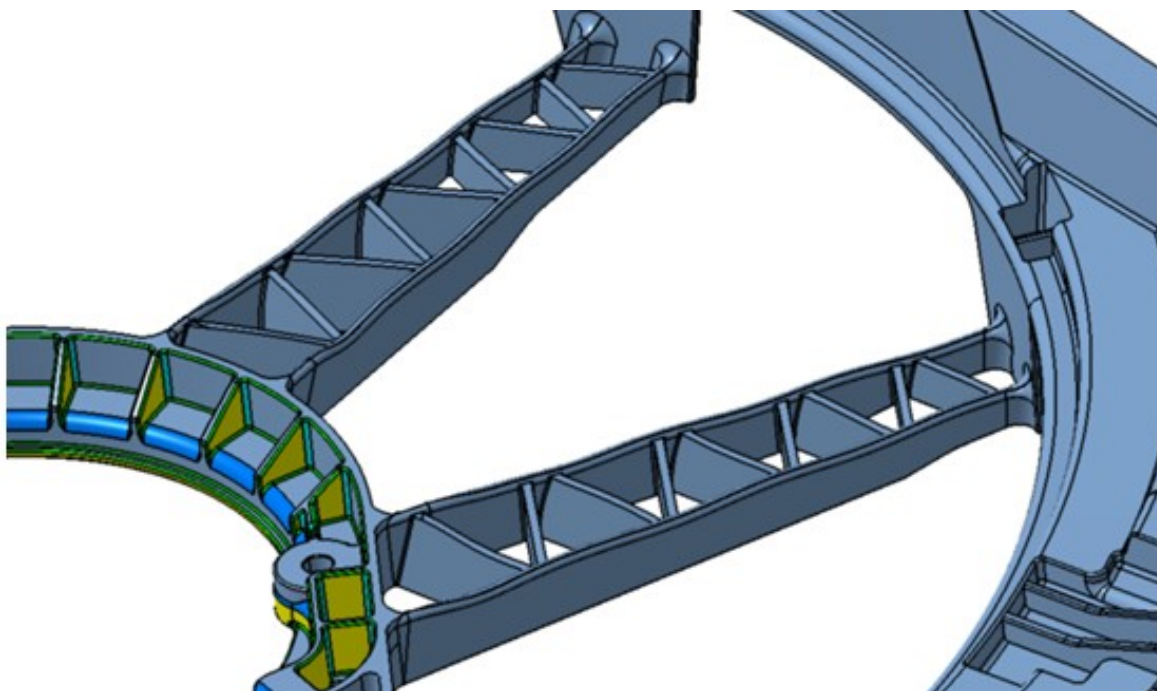
Obrázek 38. Vybraná část dílu pro optimalizaci.

6.1 Lopatky

Lopatky na rámu ventilátoru slouží k usměrnění a optimalizaci průtoku vzduchu od vrtule v případě tažné konfigurace. Jejich tvar má zásadní vliv na průtok vzduchu od specifické vrtule směrem do motorového prostoru. Tvar lopatek má také velký vliv na hlučnost dílu za maximálních otáček. Jejich hlavním úkolem je efektivní odvádění horkého vzduchu do motorového prostoru spolu s pevným uchycením prstence pro motor ventilátoru. Množství použitých lopatek má nejzásadnější vliv na míru prohnutí. Sekundární vliv má jejich rozložení, tloušťka, popřípadě použité výztuhy.

6.1.1 Typy lopatek

Sériový návrh lopatek (Obr. 39) byl primárně zaměřen na pevnost za použití co nejmenšího počtu dvojité lopatek s velkým množstvím výztužných žebek. Tento návrh, jak se později ukázalo, trpí na turbulence vzduchu mezi žebry a již nespĺňuje nové požadavky zákazníků na hlučnost při daných otáčkách vrtule.

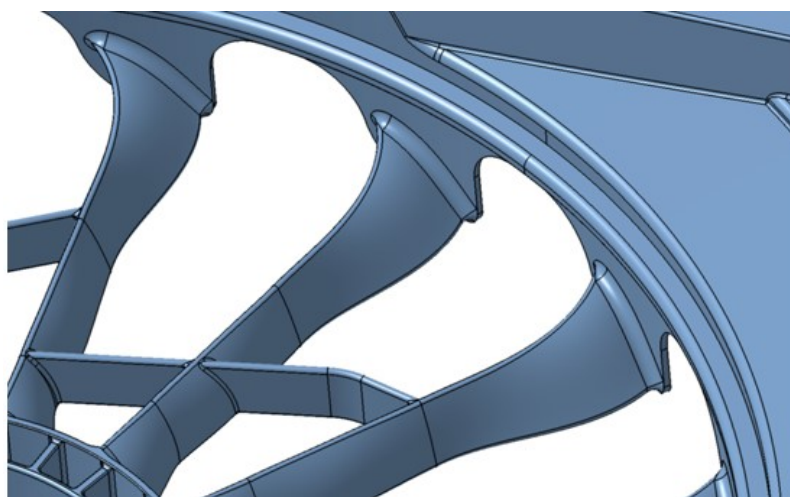


Obrázek 39. Sériový návrh lopatek rámu.

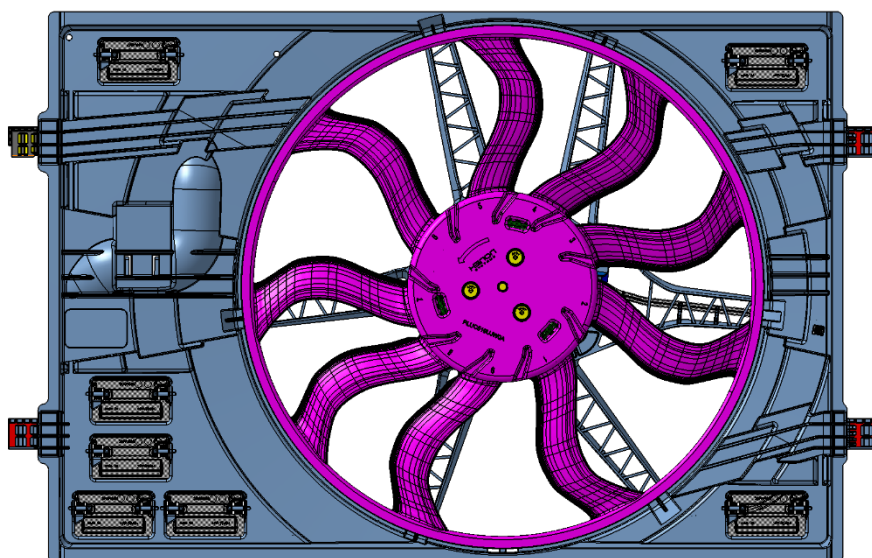
Z požadavku firmy na snížení nákladů na díl a zároveň požadavku zákazníka na snížení hlučnosti ventilátoru byly navrženy dva nové typy lopatek (Obr. 40, 41) pro daný projekt se specifickou vrtulí ze sériového dílu.



Obrázek 40. První návrh lopatek pro optimalizaci 1.



Obrázek 41. Druhý návrh lopatek pro optimalizaci 2.



Obrázek 42. Sériový návrh vrtule vsazené do sériového rámu.

7 MATERIÁL

Pro sériovou výrobu rámu ventilátoru jsou nejčastěji užívané kompozitní materiály na bázi polypropylenu (PP) spolu se skelnými vlákny z důvodu jejich vylepšených vlastností a požadavků na pevnost, rozměrovou stabilitu a odolnost za zvýšených teplot [16].

7.1 Celstran PP-GF30-0403P10

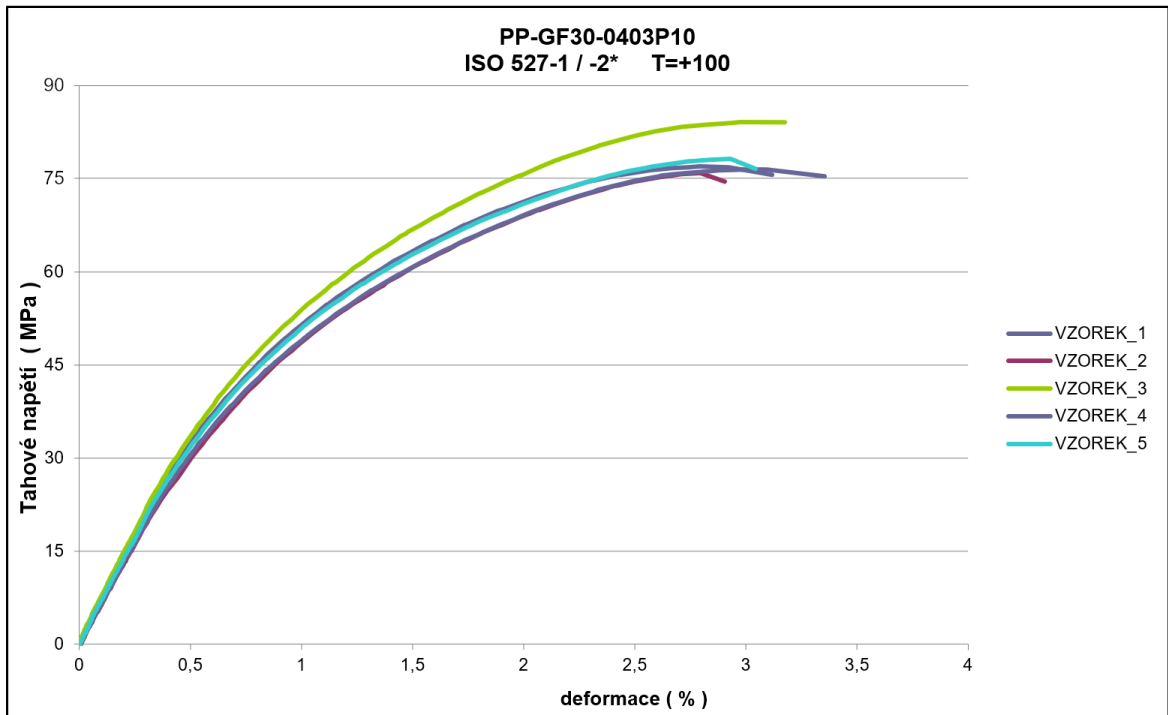
Pro danou aplikaci byl zvolen materiál ze sériového dílu Celstran PP-GF30-0403P10. Jedná se o označení kompozitního materiálu, který se skládá z PP vyztuženého 30 % skelných vláken. Tento materiál kombinuje výhody PP, jako je nízká hmotnost, chemická odolnost a dobrá zpracovatelnost, s vylepšenými mechanickými vlastnostmi způsobenými přítomností skelných vláken. Vyztužení vlákny významně zvyšuje pevnost, tuhost, tepelnou odolnost a rozměrovou stabilitu materiálu oproti čistému polypropylenu.

PP-GF30 se často používá v aplikacích, kde jsou požadovány vyšší mechanické vlastnosti než u nevyztuženého PP, například v automobilovém průmyslu pro výrobu komponentů v interiéru a exteriéru. Materiál také dobře odolává opotřebení a má vynikající únavové vlastnosti, což z něj činí ideální volbu pro díly vystavené opakovanému zatížení [24-26].

Mimo výše uvedené výhody vykazuje materiál i některá omezení na které musí být brán v rámci návrhu zřetel. Mezi hlavní omezení patří především zvýšení křehkosti v důsledku přítomnosti skelných vláken, což se projevuje snížením odolnosti vůči nárazu. Při zpracování materiálu je také třeba dbát na správné nastavení procesních podmínek tak, aby se minimalizovalo riziko degradace materiálu a zajistily se optimální vlastnosti finálního produktu [27].

7.2 Tahová charakteristika zvoleného materiálu

Na rám ventilátoru jsou kladené specifické požadavky v rámci teplot. Daný díl musí být schopen odolávat dlouhodobému vystavení provozní teploty až 100 °C a za těchto teplot plnit pevnostní a životnostní požadavky. Z tohoto důvodu byla provedena tahová zkouška za zvýšené teploty (Obr. 43). Měření bylo realizováno v souladu s normou ISO 527-1 a získaná data byla použita v rámci jednotlivých analýz.



Obrázek 43. Tahové diagramy zvoleného materiálu (zkušební teplota: 100 °C).

Mez pevnosti se u zkušebních vzorků pohybovala v rozmezí 75-83 MPa (při zkušební teplotě 100 °C). Pro následné MKP analýzy (po interních verifikacích již zhotovených dílů a korelacemi nelineárních výpočtů v programu ANSYS) je nutné pro vyhodnocení kritických míst na výrobku v průběhu MKP analýzy počítat s hodnotou 80 % nejnižší naměřené meze pevnosti. V daném případě nesmí návrh obsahovat žádná místa s napětím vyšším než 60 MPa. Dané hodnocení platí pouze za pracovních teplot v rozmezí 80-100 °C.

8 SOFTWARE PRO NÁVRH A OPTIMALIZACI DÍLU

V této kapitole bude popsán ve stručnosti program CATIA V5 použitý pro danou práci a konkrétní moduly použité pro návrh dílu a jeho optimalizaci v průběhu konstrukce.

8.1 Catia V5

CATIA V5 je pokročilý CAD (Computer-Aided Design) software vyvinutý společností Dassault Systèmes. Umožňuje uživatelům navrhovat složité 3D modely a simulovat různé inženýrské procesy v mnoha oborech, včetně automobilového průmyslu, leteckého průmyslu a strojírenství. Nabízí širokou škálu nástrojů pro modelování, simulaci, analýzu a management dat, čímž poskytuje komplexní platformu pro celý proces vývoje produktu od konceptu až po výrobu [30].

8.2 CATIA V5 – modulární systém

Software CATIA je k dispozici nejen jako jednotlivé moduly, ale také ve formě sestav, které jsou přizpůsobeny běžným potřebám uživatelů v průmyslovém a výrobním sektoru. Tyto sestavy, neboli konfigurace, představují předem definované balíčky softwaru určené pro specifické profesní obory, obvykle používané v procesu vývoje a výroby. Pro většinu uživatelů by měla existovat vhodná konfigurace, s možností doplnění dalších funkcí přidáním jednotlivých produktů pro specifické potřeby dané firmy [30].

8.2.1 Mechanical Design Solution

Mechanické konstruování zahrnuje intuitivní 3D modelování objemů, práci s plochami, plechy, sestavami a kreslení výkresů. Skládá se z několika modulů určených pro vývoj CAD modelů strojírenských konstrukcí, které umožňují vytvoření plně editovatelných parametrických modelů s rozsáhlými geometrickými a technologickými funkcemi a úplnou asociativitou. Technická výkresová dokumentace je vytvářena buď projektováním modelů, nebo přímým kreslením [30].

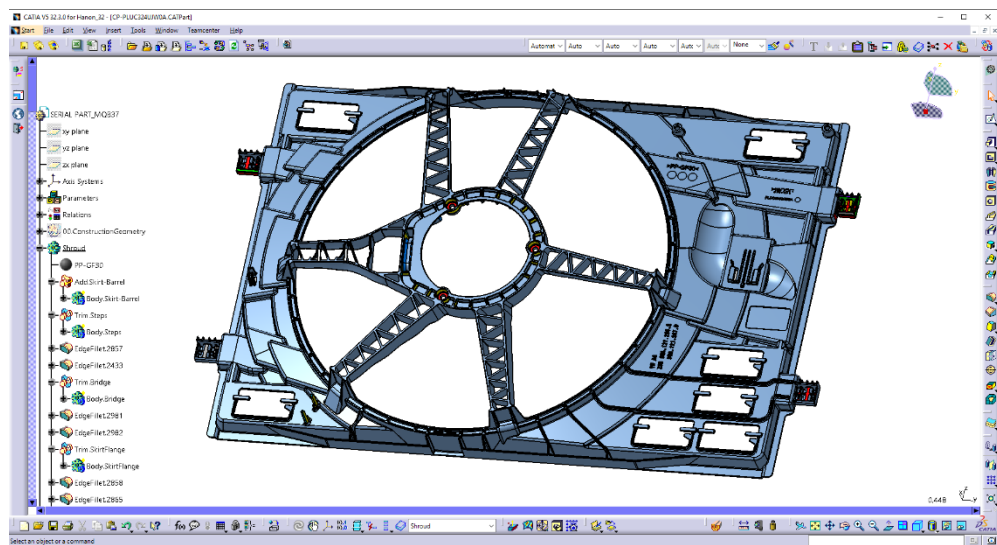
8.2.2 Shape Design & Styling Solution

Nástroje určené pro tvorbu, správu a úpravy jak jednoduchých, tak komplexních povrchů, speciálně vyvinuté pro pokročilé úlohy v oblasti volného i parametrického návrhářství s

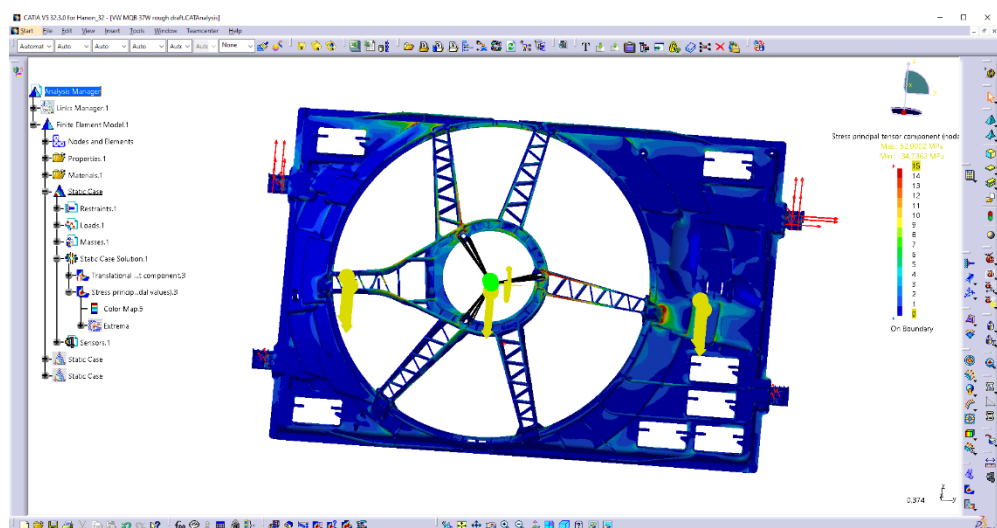
využitím technik povrchového modelování. Obsahují rovněž specifické nástroje pro vysoké nároky ve vývoji automobilových karoserií [30].

8.2.3 Analysis Solution

Nástroje pro základní analýzy metodou konečných prvků jsou určeny pro konstruktéry ke kvalifikované první analýze dílů či celých sestav. Tyto aplikace se zaměřují na počáteční posouzení adekvátnosti rozměrů konstrukcí, které konstruktér navrhl, a poskytují rychlý přehled o stabilitě konstrukce již v průběhu jejího vzniku. Umožňují rovněž hodnotit napětí a vibrace ve struktuře [31].



Obrázek 44. Prostředí pro modelaci návrhu.



Obrázek 45. Prostředí pro analýzu napětí a prohnutí dílu.

9 DEFINICE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK A VAZEB DÍLU

V této kapitole jsou definovány a popsány okrajové podmínky, vazby, síly, momenty a definice materiálu nutné pro vyhodnocení provedených návrhů.

9.1 Okrajové podmínky

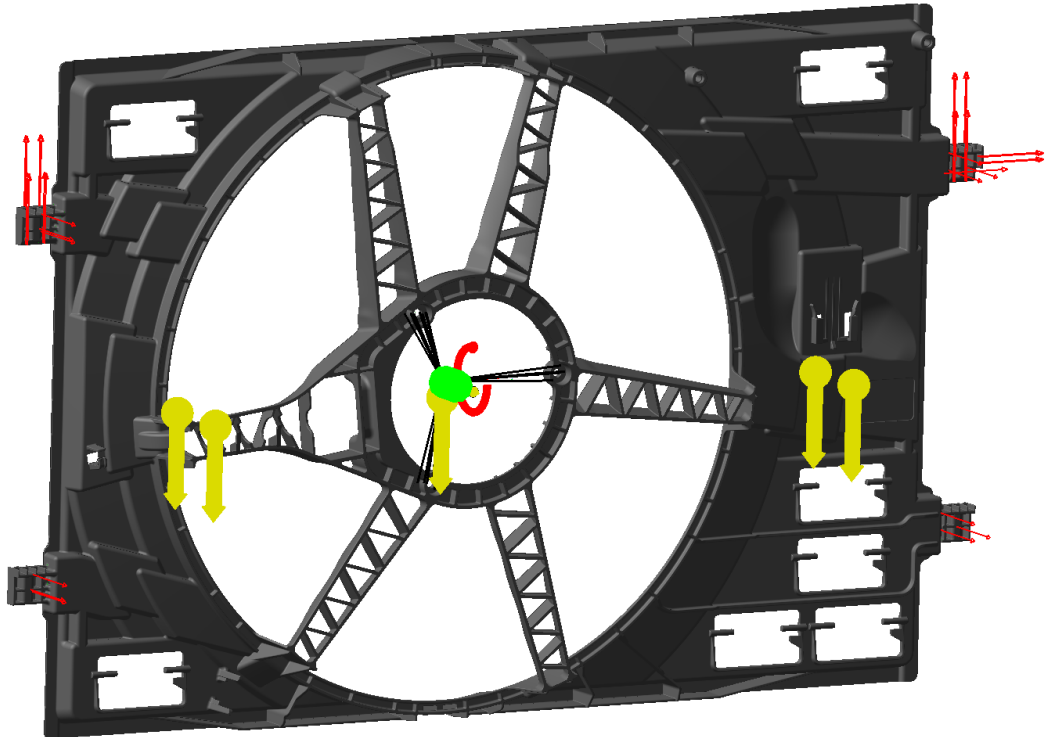
Definice okrajových podmínek pro nové optimalizační varianty proběhla na základě požadavků dodaných zákazníkem pro sériový díl (Tab. 14). Síť pro MKP byla zvolena tak, aby globální chyba nepřesahovala 10 % u rychlého výpočtu a 5 % u přesného výpočtu.

Tabulka 14. Definice okrajových podmínek pro analýzu a optimalizaci dílů.

Materiálové vlastnosti	
Materiál:	Celstran PP-GF30
Modul pružnosti v tahu:	4544 MPa
Mez pevnosti s bezpečnostním faktorem:	60 MPa za teploty 100 °C
Hustota	1120 kg·m ⁻³
Zátěžové stavy pro výpočet:	
1. Síla proti směru osy X + kladný coriolis moment	
2. Síla proti směru osy X + záporný coriolis moment	
3. Síla ve směru osy X + kladný coriolis moment	
4. Síla ve směru osy X + záporný coriolis moment	
Zatížení:	
Hmotnost sestavy motoru s vrtulí	2.5 kg
Centrum gravitace motoru	25 mm
Síla proti směru osy X:	-70 N
Síla ve směru osy X:	150 N
Moment coriolis v ose Y	+5/-5 N
Nastavení sítě pro rychlý výpočet:	
Globální velikost sítě:	2 mm
Globální SAG:	0.5 mm
Lokální velikost sítě:	0.5 mm
Lokální SAG:	0.5 mm
Nastavení sítě pro co nejpřesnější výsledky:	
Globální velikost sítě:	1 mm
Globální SAG:	0.2 mm
Lokální velikost sítě:	0.1 mm
Lokální SAG:	0.2 mm

9.2 Vazby dílu

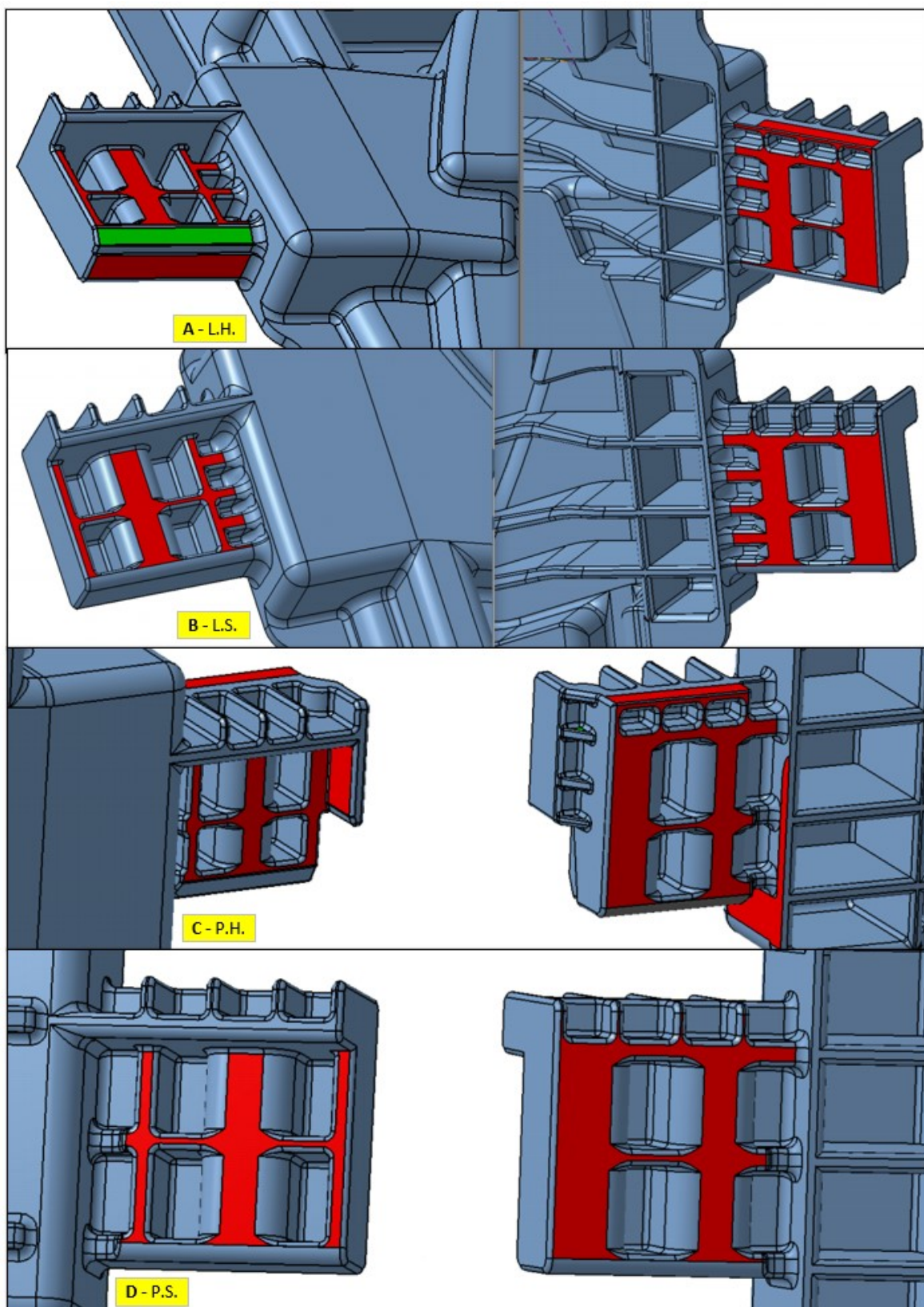
Všechny tři návrhy byly podrobeny MKP analýzám za totožných podmínek v programu Catia V5 pro co nejlepší vyhodnocení výsledků.



Obrázek 46. Plně zavazbený rám ventilátoru.

9.2.1 Vazby konzol

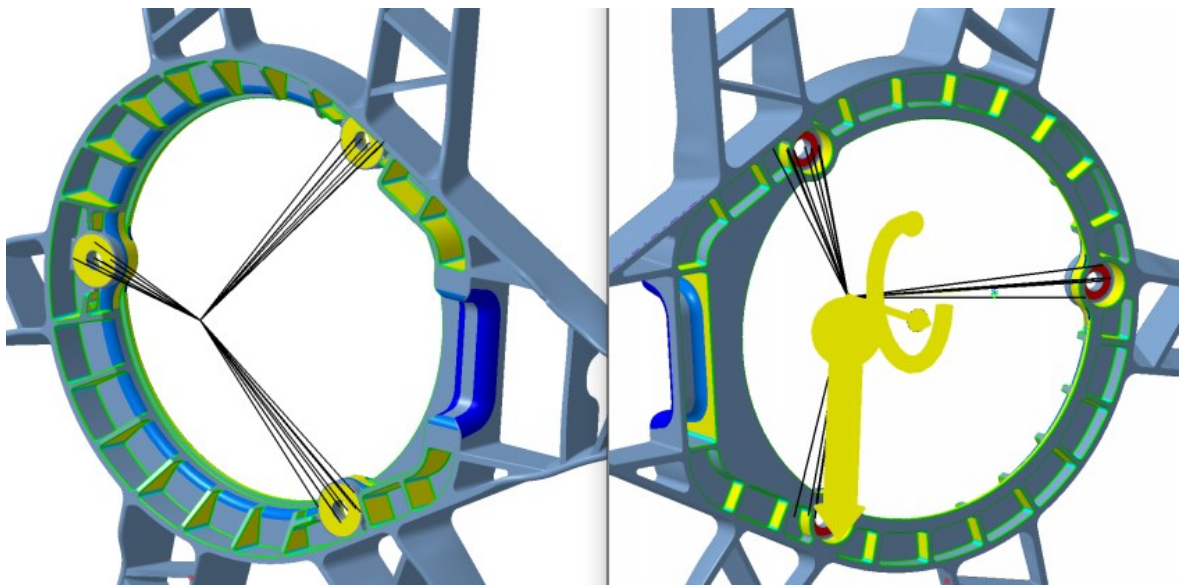
Zavazbení konzol pro simulaci probíhalo pro všechny návrhy stejným způsobem na základě uchycení konzol do protějšího dílu. Levá horní konzola byla zavazbená v ose X a Z. Pravá horní konzola byla vazbená ve všech třech osách X, Y, Z. Levá a pravá spodní konzola byla zavazbená pouze v ose X. Místa vazeb jsou znázorněna červeně na následujícím obrázku (Obr. 47) a jedná se o místa doteku s protějším dílem.



Obrázek 47. Vazby jednotlivých konzol v osách X, Y, Z znázorněny červeně: a) levá horní vazba b) levá spodní vazba c) pravá horní vazba d) pravá spodní vazba.

9.3 Tuhá virtuální část

Po plném uchycení rámu ventilátoru pomocí sil v určitých osách bylo nutné zvolit gravitační centrum motoru. Tento bod je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 48) žlutou barvou a nachází se v ose X motorového prstence ve vzdálenosti 25 mm od montážní plochy mezi motorem a prstencem.



Obrázek 48. Virtuální rigidní část spolu s definovaným momentem a silami.

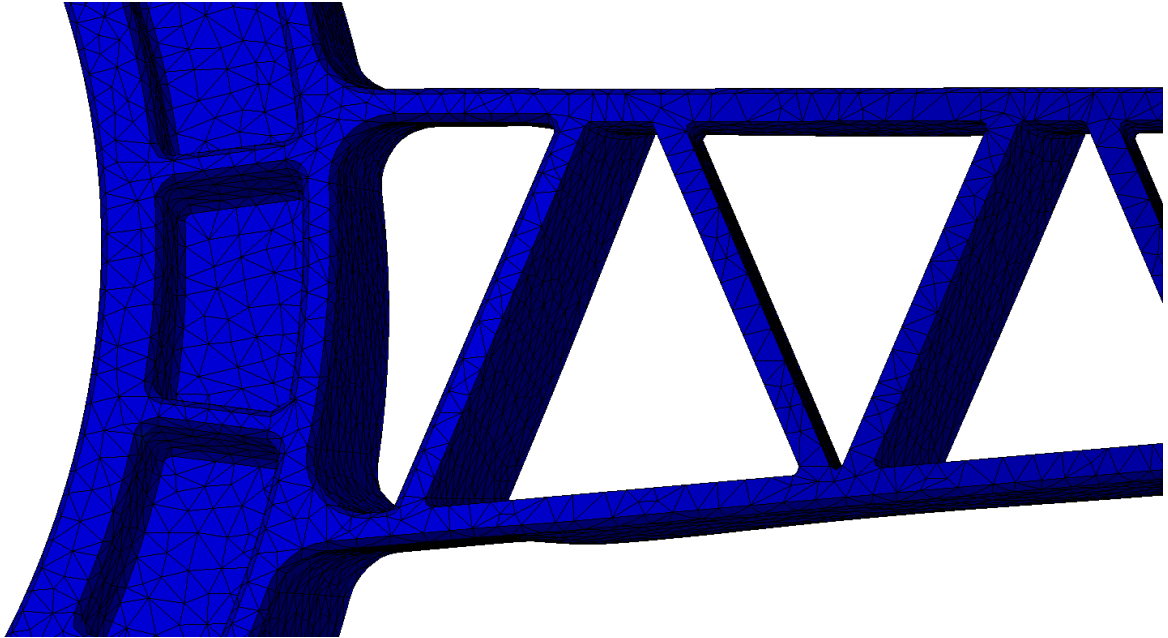
9.3.1 Síly, momenty a zrychlení

Na tuhý virtuální bod byla použita distribuovaná síla 150 N ve směru osy X (směr jízdy vozidla) definovaná pro maximální rychlost vozidla na daný průměr a tvar vrtule. Dále bylo do tohoto bodu zaneseno gravitační zrychlení ve směru osy Z o velikosti $9,81 \text{ m/s}^2$. Dané zrychlení bylo nutné stejným způsobem aplikovat i na celou síť modelu. Poslední nutná aplikace spočívala v umístění coriolisova momentu do virtuálního bodu o velikosti 5 Nm v ose Y.

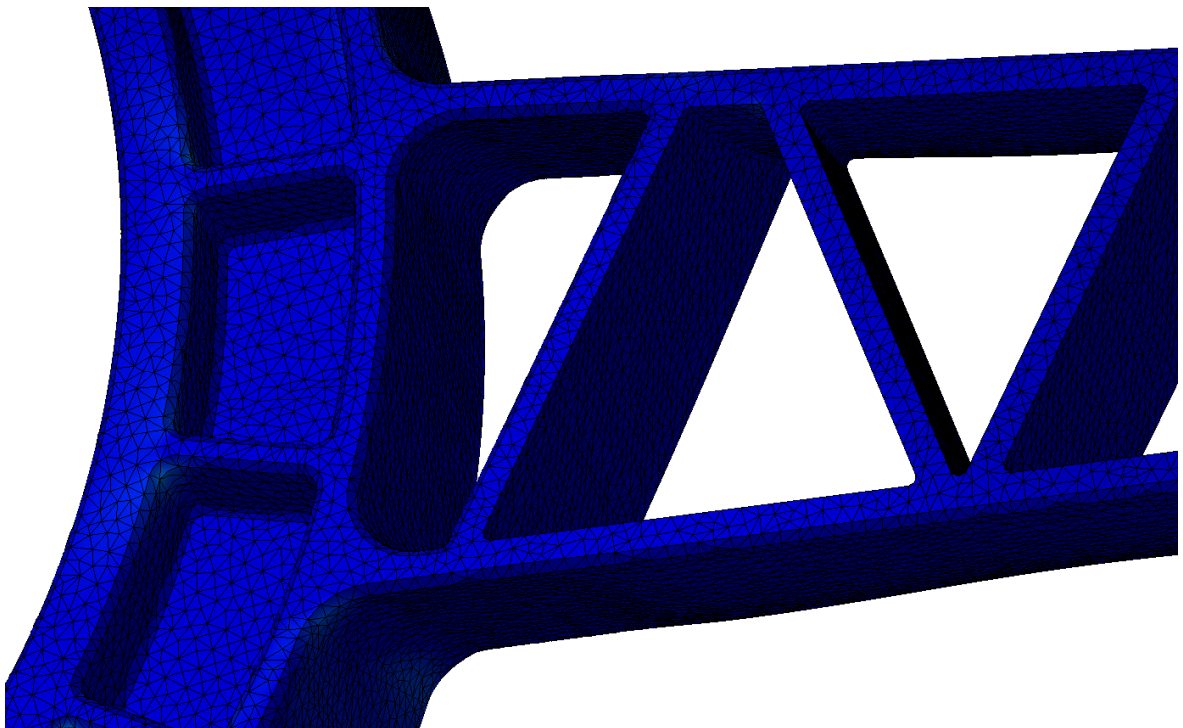
9.4 Nastavení sítě

Díl byl analyzován dvěma způsoby nastavení sítě. Prvotní analýzy dílu probíhaly za pomoci hrubé sítě s velikostí elementu 2 mm a SAGu 0,5 mm s parabolickým typem elementu spolu s vybranými lokálními místy, kde byla velikost elementu zvolena 0,5 mm (Obr. 49). V případě, že návrh vypadal pozitivně pro realizaci, bylo nastavení změněno na jemnou síť

o velikosti elementu 1 mm a SAGu 0,2 mm s parabolickým typem elementu tak, aby byla dosažena co nejuvhodnější síť s výsledky blížíci se skutečnosti (Obr. 50). Jemné nastavení sítě výrazně prodlužuje čas výpočtu, tudíž byl aplikován až pro koncové návrhy.



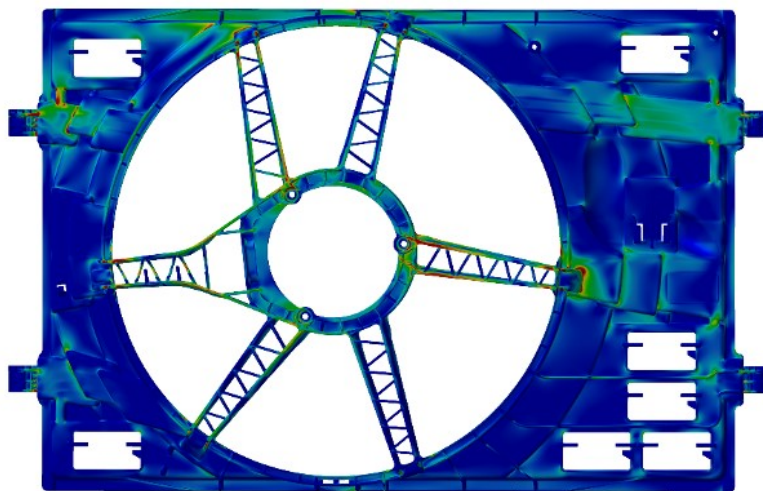
Obrázek 49. Hrubá síť o velikosti strany elementu 2 mm pro rychlé vyhodnocení návrhu.



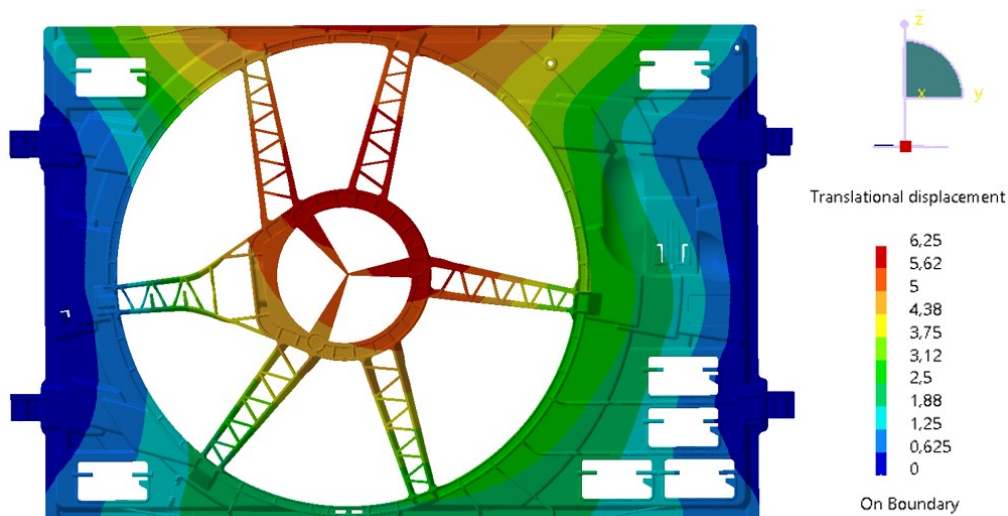
Obrázek 50. Jemná síť o velikosti strany elementu 1 mm pro precizní vyhodnocení návrhu.

9.5 Hodnocení návrhů

Jednotlivé návrhy byly hodnoceny podle velikosti prohnutí v ose X (směru jízdy vozidla), za daných podmínek, kdy tato hodnota je kritická pro kolizi s vrtulí. Návrh 1 zaměřující se na snížení hmotnosti měl dosahovat stejných hodnot prohnutí jako návrh sériový, ale jeho přidanou hodnotou měla být co největší redukce hmotnosti. Návrh 2 měl dosahovat co nejnižšího prohnutí, za zachování hmotnosti k sériovému dílu. Velikost posunutí motorového prstence byla primárně řízena počtem lopatek. Kritické body napětí byly vyšetřovány pomocí výsledků redukovaného napětí (von Mises) a eliminovány za pomoci žeber, zaoblení a výztuh. Na následujících obrázcích (Obr. 51, 52) jsou znázorněny výchozí analýzy pro sériový návrh.



Obrázek 51. Analýza distribuce redukovaného napětí v rozsahu 0-15 MPa sériového návrhu při teplotě 100 °C a zatížení v ose X 150 N.



Obrázek 52. Analýza prohnutí sériového dílu v rozsahu 0 - 6,25 mm.

10 OPTIMALIZOVANÉ NÁVRHY

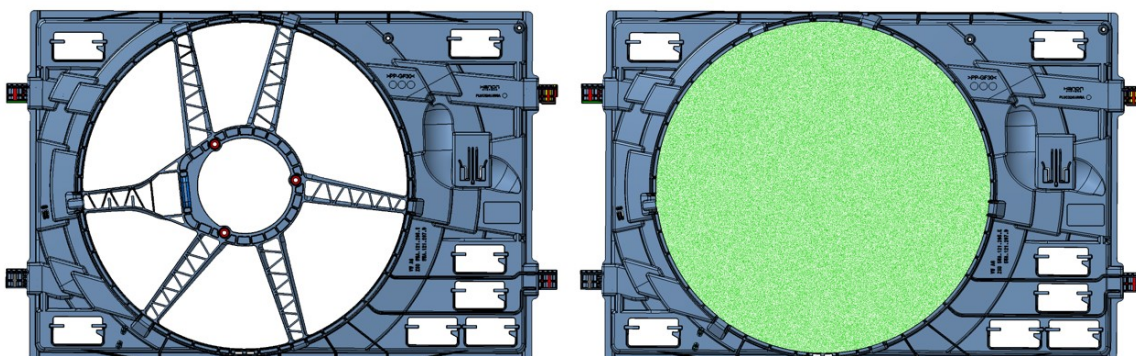
V této kapitole budou v první části popsány postupy dvou optimalizačních návrhů, následně jejich jednotlivé části s aplikovanými iteracemi a na závěr představeny finální návrhy.

10.1 Optimalizace 1 - snížení hmotnosti za zachování pevnosti

První návrh se zabýval problematikou snížení hmotnosti, ve funkční části rámu ventilátoru, za zachování pevnosti v ose X za teploty $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ oproti sériovému návrhu.

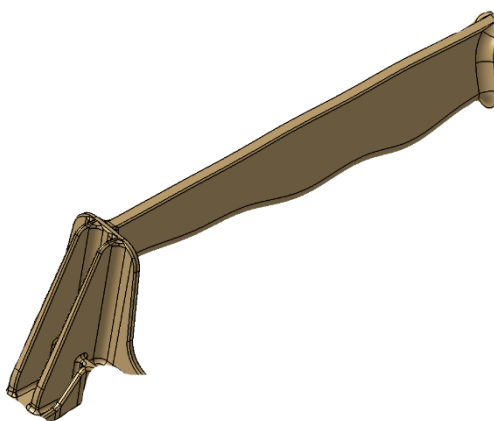
10.1.1 Postup optimalizace

Na počátku optimalizace byla odebrána celá funkční část rámu ventilátoru (Obr. 53), kde vznikl prostor pro nové návrhy vzpěrných lopatek, lopatek pro vedení kabelu a prstence pro uchycení motoru.



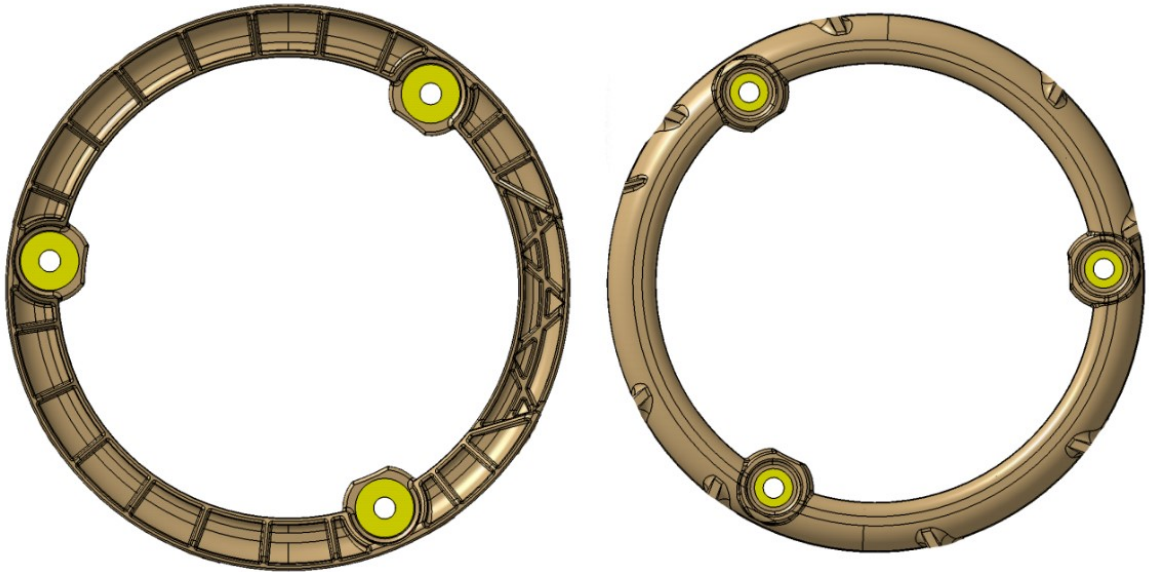
Obrázek 53. Odebrání funkční části sériového ventilátoru.

V dalším kroku byl navržen tvar lopatky kompatibilní se sériovou vrtulí za spolupráce s německým týmem zabývajícím se aerodynamikou (Obr. 54). Na dané geometrii lopatky byla dovolená mírná variabilita v tloušťce (pro dosažení cílových požadavků).



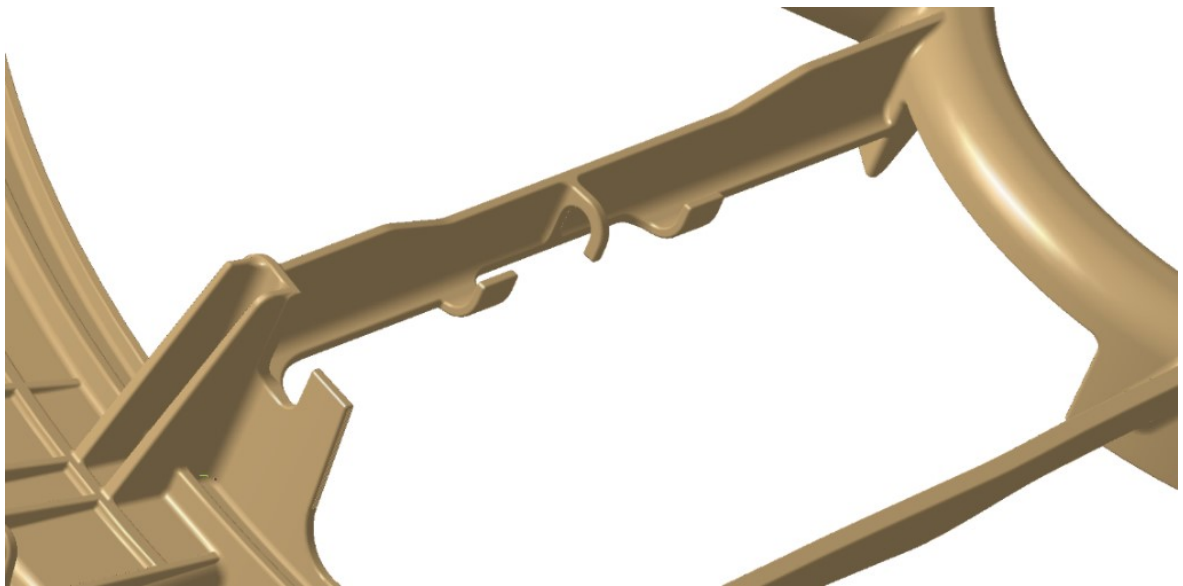
Obrázek 54. Navržený tvar lopatky pro optimalizaci zaměřující se na snížení hmotnosti.

Po vybudování geometrie vzpěrné lopatky bylo nutné vytvořit nový návrh prstence pro uchycení motoru z důvodu nekompatibility sériového návrhu s novým tvarem lopatek.



Obrázek 55. Navržený tvar motorového prstence pro optimalizaci zaměřující se na snížení hmotnosti.

Na nově navrženém motorovém prstenci (Obr. 55) probíhala průběžně ve vnitřní části modifikace žebér, kdy se měnil dle potřeby jejich počet, tvar, umístění, tloušťka a výška. Posledním dílem vstupujícím do výsledné geometrie funkční části byla vzpěrná lopatka pro vedení kabelu (Obr. 56), která musela být co nejlehčí a zároveň plnit svou funkci.



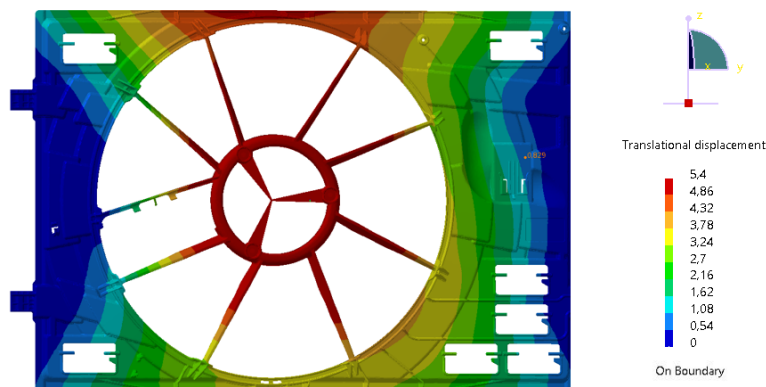
Obrázek 56. Navržený tvar vzpěrné kabelové lopatky pro optimalizaci zaměřující se na snížení hmotnosti.

10.1.2 Průběh optimalizace

V průběhu optimalizace za pomoci MKP bylo nutné sledovat velikost prohnutí dílu v ose X za definovaných podmínek. Vlivem odebrání materiálu (množství a tloušťka lopatek, žebrování motorového ringu aj.) se tato hodnota dostávala pod hodnoty sériového dílu a následně bylo nutné přidávat postupně materiál na kritických místech pro dosažení stejné deformace. Iterace obsahovaly taktéž výsledky redukovaného napětí zobrazujícího jak průběh napětí, tak lokální extrém, které byly nutné zredukovat například použitím většího množství žeber, výztuh, úpravou rozložení lopatek nebo za pomoci většího zaoblení.

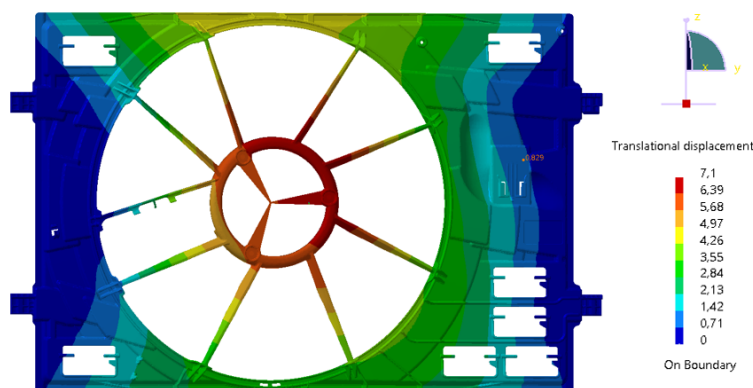
10.1.3 Iterace interpretující vliv tloušťky lopatek na výsledné prohnutí

Iterace s lopatkami o tloušťce 4 mm dosahovala nižšího prohnutí oproti sériovému dílu o velikosti 5,4 mm s větším přenesením průhybu do rámu (Obr. 57). Tato iterace ukázala, že i nadále je možné redukovat hmotnost dílu, která již byla pod hodnotou sériového dílu.



Obrázek 57. Průhyb rámu při použité tloušťce lopatek 4 mm.

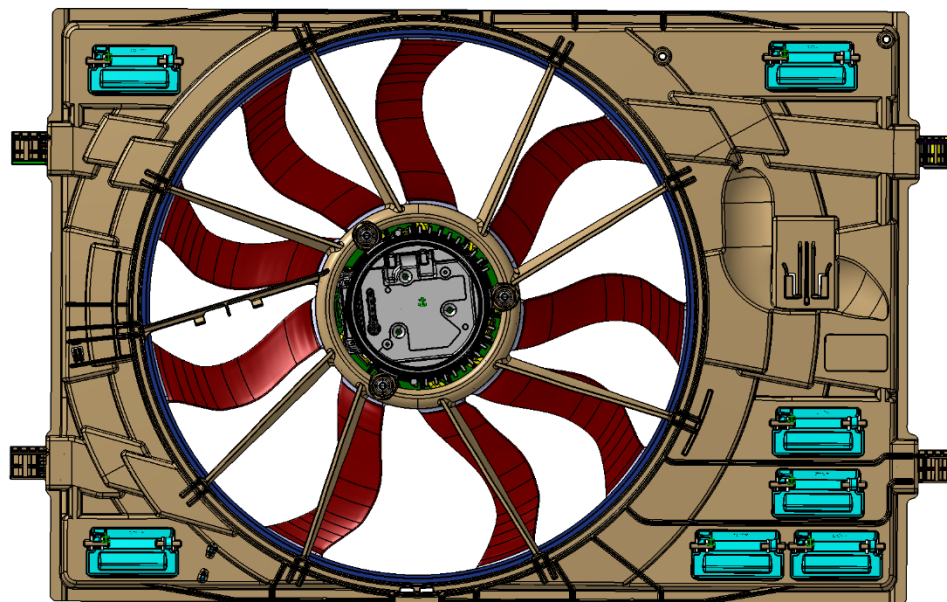
Po razantním snížení tloušťky lopatek na hodnotu 3 mm již nastal problém s prohnutím dílu, které dosahovalo maximálních hodnot 7,1 mm (Obr. 58), namísto požadovaných 6,25 mm. Z toho důvodu bylo nutné najít vhodnou tloušťku stěny v daných mezích.



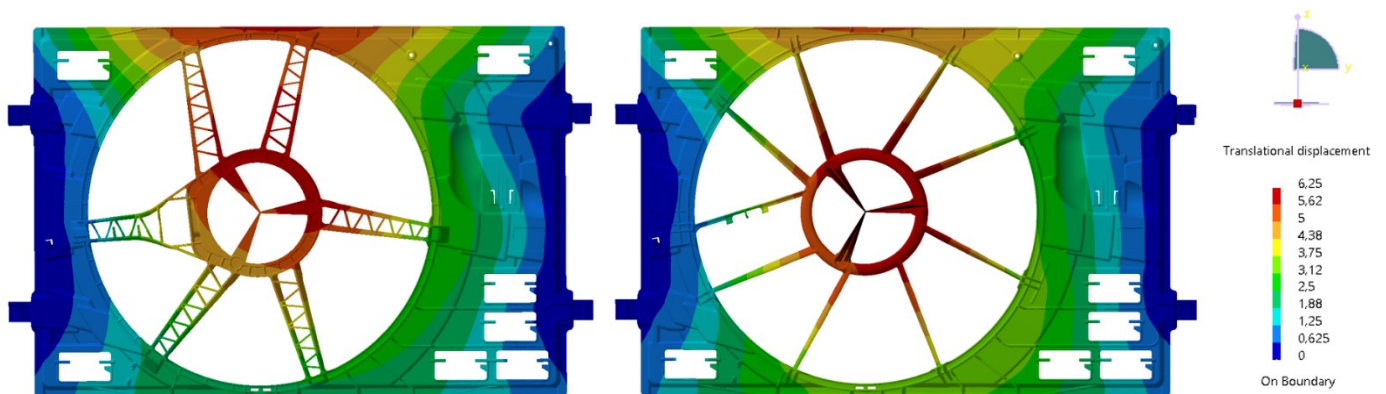
Obrázek 58. Průhyb rámu při použité tloušťce lopatek 3 mm.

10.1.4 Finální návrh optimalizace

U finálního návrhu kladoucího důraz na maximální redukci hmotnosti za zachování pevnosti v ose X bylo použito 8 aerodynamických lopatek o tloušťce 3,6 mm a jedné speciální lopatky navržené pro vedení kabelu z elektromotoru, kdy daný počet a tloušťka dovolila dosáhnout kýženého prohnutí dílu o velikosti 6,25 mm (Obr. 60). Hmotnost optimalizovaného dílu se dostala na hodnotu 693 g, což se rovná úspoře 10 %, oproti sériovému dílu. Oproti sériovému návrhu bylo potřeba použít vyšší množství lopatek z důvodu jejich tvaru a tloušťky spolu s novým tvarem prstence pro uchycení motoru. Sériový návrh obsahoval pět dvojných vzpěrných lopatek držících motorový prsteneček a jednu odlišnou vzpěrnou lopatku držící kabel motoru.

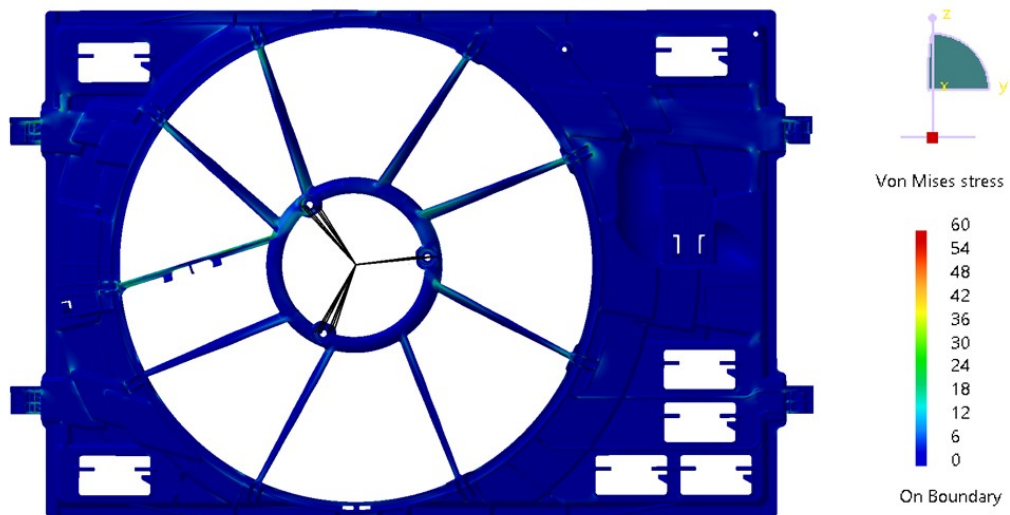


Obrázek 59. Sestava optimalizovaného návrhu na redukci hmotnosti.



Obrázek 60. Velikost prohnutí sériového dílu (vlevo) a nového dílu (vpravo) v ose X.

V průběhu snižování hmotnosti a kontroly prohnutí dílu probíhala zároveň kontrola redukovaného napětí a lokálních extrémů, kdy tyto extrémní nad dovolené napětí byly redukovány za pomoci výztuh, žeber, zaoblení, případně jinou úpravou geometrie. Kontrola redukovaného napětí na optimalizovaném návrhu splňuje podmínky definované v cílech diplomové práce (Kap. 4) (Obr. 61).



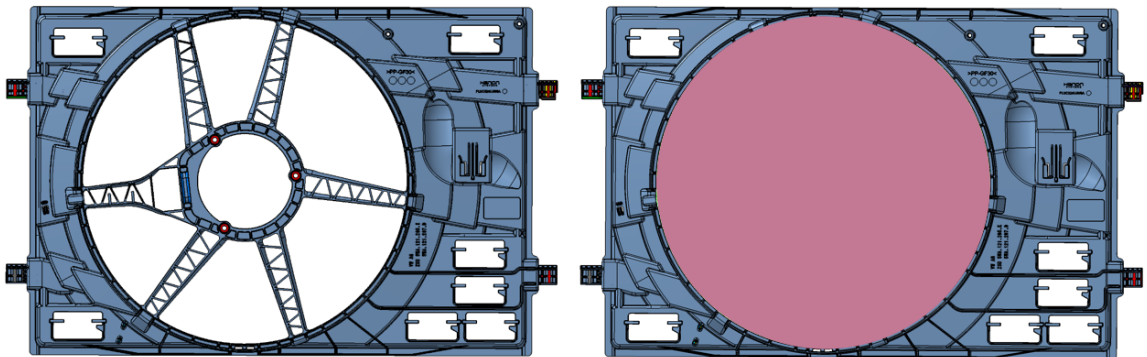
Obrázek 61. Kontrola redukovaného napětí na optimalizovaném návrhu.

10.2 Optimalizace 2 – zvýšení pevnosti za zachování hmotnosti

Druhý návrh se zabýval problematikou zvýšení pevnosti a tím snížení velikosti prohnutí rámu v ose X za teploty 100 °C. Podmínkou u daného návrhu bylo nepřesáhnout hmotnost sériového rámu.

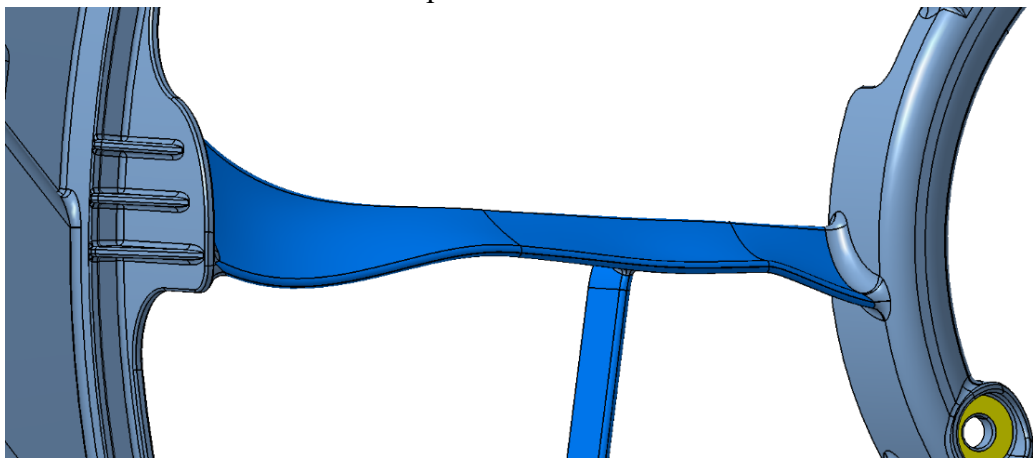
10.2.1 Postup optimalizace

Na počátku druhé optimalizace byla opět odebrána celá funkční část rámu ventilátoru, kde vznikl prostor pro nové návrhy vzpěrných lopatek, lopatek pro vedení kabelu a prstence pro uchycení motoru (Obr. 62).



Obrázek 62. Odebrání funkční části sériového ventilátoru.

V následujícím kroku byl vybudován další typ lopatek kompatibilní se sériovou vrtulí, který se více hodí pro optimalizaci pevnosti z důvodu možnosti použití výztužných prvků mezi nimi. Na navržených lopatkách bylo taktéž možné manipulovat s tloušťkou stěny, ale důraz byl kladen na množství a rozložení v prostoru.

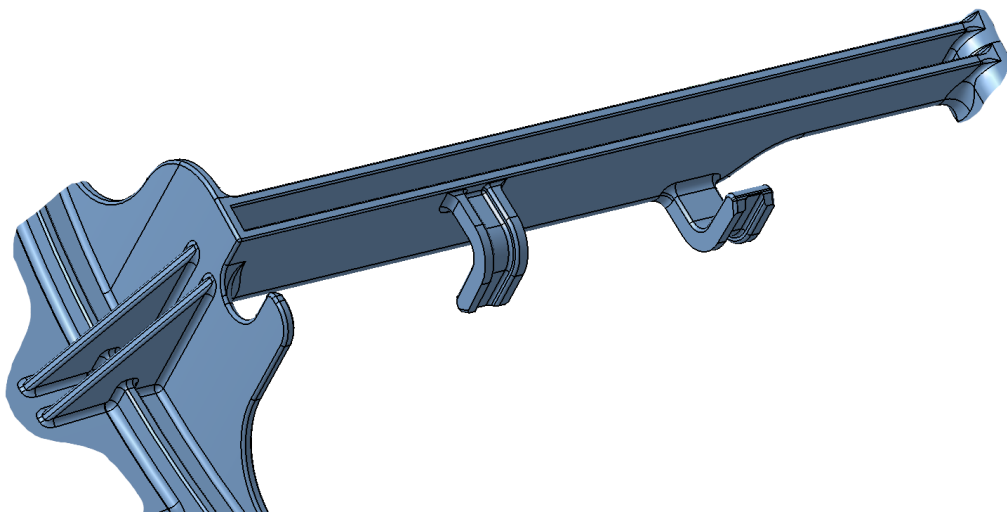


Obrázek 63. Navržený tvar vzpěrné lopatky pro optimalizaci zaměřující se na zvýšení pevnosti a snížení průhybu prstence.

Po návrhu geometrie vzpěrné lopatky bylo opět nutné vytvořit nový návrh prstence pro uchycení motoru z důvodu nekompatibility sériového návrhu a návrhu pro první optimalizaci s novým tvarem lopatek (Obr. 64). Na nově navrženém motorovém prstenci probíhala průběžně ve vnitřní části modifikace žebek, kdy se měnil dle potřeby jejich počet, tvar, umístění, tloušťka a výška. Posledním dílem vstupujícím do výsledné geometrie funkční části byla vzpěrná lopatka pro vedení kabelu, která dopomáhala celkovému zpevnění geometrie (Obr. 65).



Obrázek 64. Navržený tvar motorového prstence pro optimalizaci zaměřující se na zvýšení pevnosti a snížení průhybu motorového prstence.



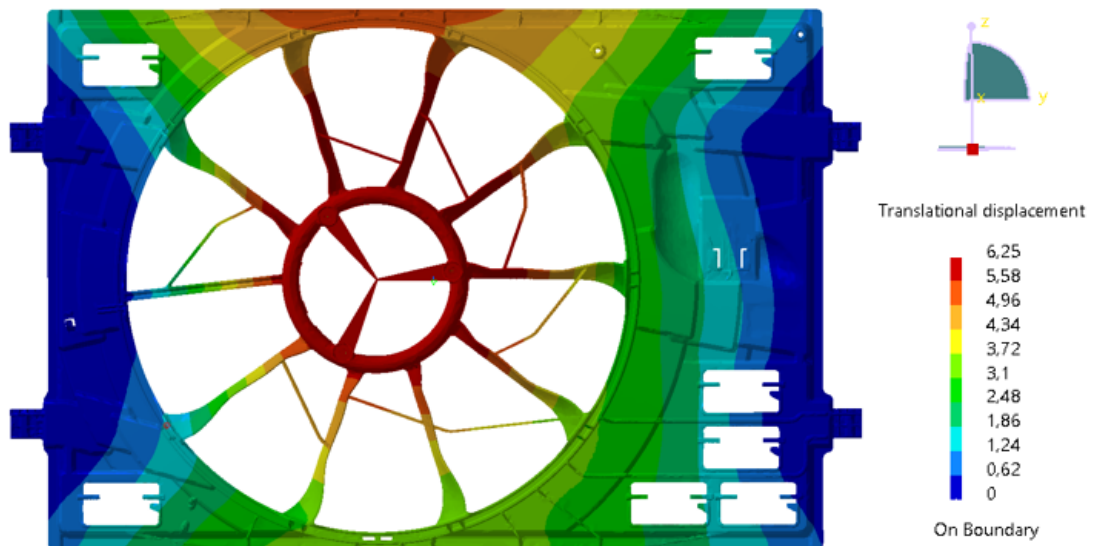
Obrázek 65. Navržený tvar kabelové vzpěrné lopatky pro optimalizaci zaměřující se na zvýšení pevnosti a snížení průhybu motorového prstence.

10.2.2 Průběh optimalizace

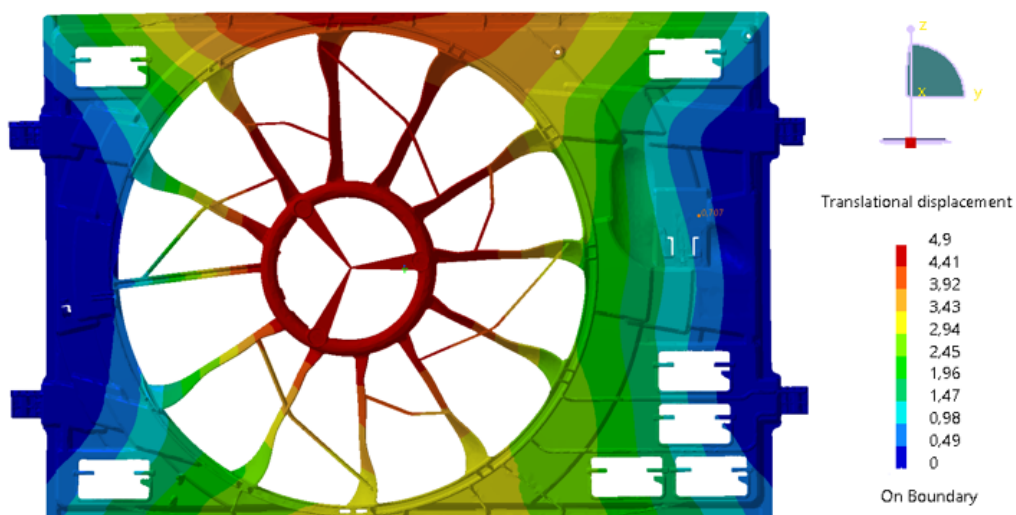
V průběhu optimalizace tohoto návrhu za pomoci MKP bylo nutné sledovat velikost prohnutí dílu v ose X za definovaných podmínek a hmotnosti dílu. Vlivem manipulace s počtem a rozložením lopatek, jejich tloušťkou a úpravou žebrování motorového prstence se tyto hodnoty měnily. Zvyšováním počtu lopatek se pevnost a prohnutí zlepšovaly, ale v určitém bodě přesáhla dovolenou hmotnost a bylo potřeba střídavě odebírat materiál.

10.2.3 Iterace interpretující vliv počtu lopatek na výsledné prohnutí

Iterace s použitím devíti vzpěrných vyztužených lopatek a jedné kabelové vzpěrné lopatky dosahovaly totožného prohnutí oproti sériovému rámu (Obr. 66), ale ještě se zde nacházela hmotnostní rezerva pro aplikaci dalších lopatek, nebo změny jejich tloušťky. V dalším návrhu byly tedy přidány rovnou další dvě lopatky, aby bylo možné ověřit, jak razantní vliv bude mít takto velká změna počtu lopatek a jejich rozložení na výsledný průhyb. Návrh s jedenácti lopatkami dosahoval mnohem menší deformace a celkového prohnutí, ale již přesahoval dovolenou hmotnost dílu a bylo tedy potřeba přistoupit opět k redukci hmotnosti (Obr. 67).



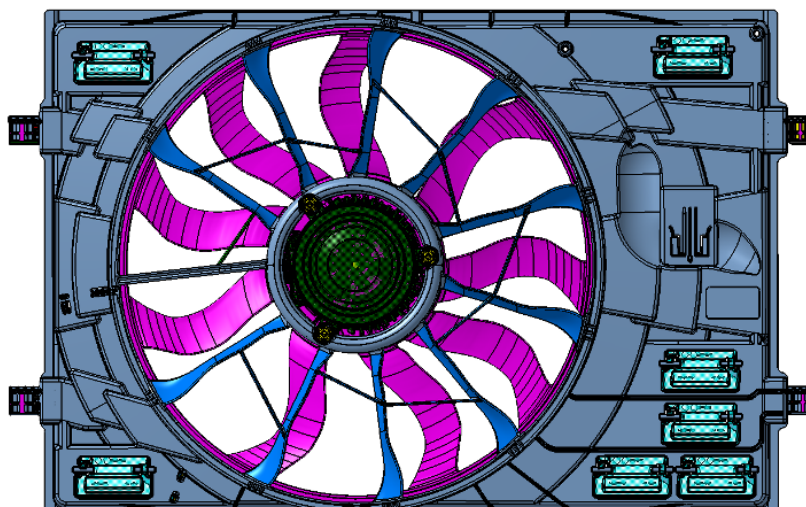
Obrázek 66. Průhyb rámu při použití devíti vzpěrných lopatek o tloušťce 2 mm a jedné kabelové lopatce.



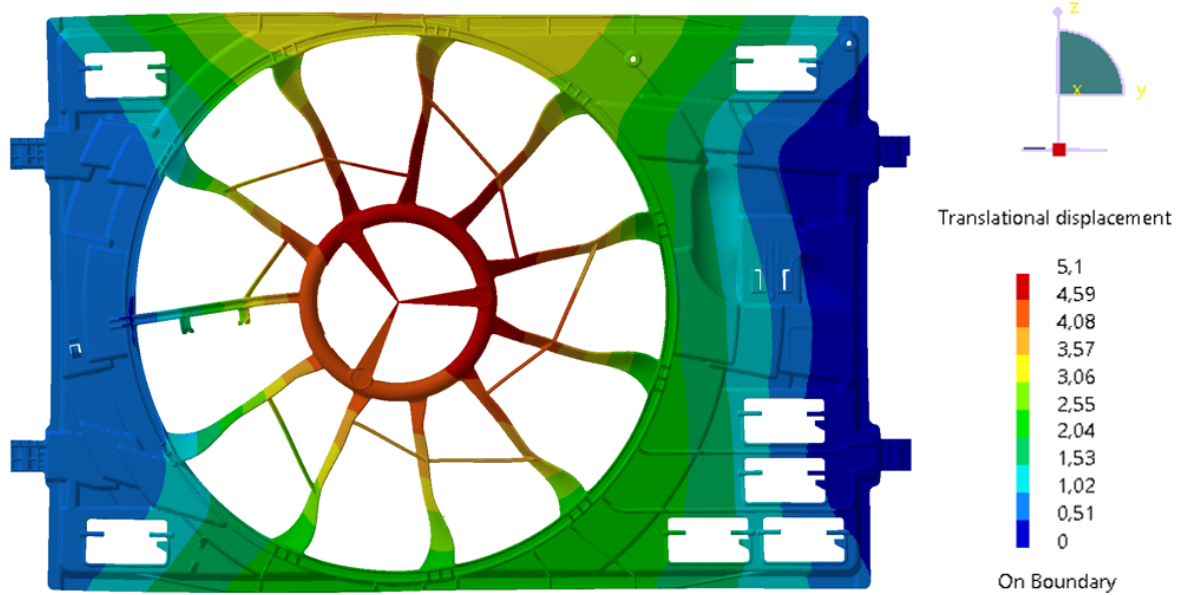
Obrázek 67. Průhyb rámu při použití jedenácti vzpěrných lopatek o tloušťce 2 mm a jedné kabelové lopatky.

10.2.4 Finální optimalizace

U návrhu kladoucího důraz na co největší zvětšení pevnosti a tím snížení průhybu v ose X ve funkční části rámu ventilátoru při zachování hmotnosti se sériovým dílem bylo dosaženo za použití deseti vzpěrných lopatek o pravidelném rozložení a tloušťce 2 mm a jedné speciálně navržené kabelové lopatce. Průhyb u tohoto optimalizovaného dílu činil 5,1 mm (Obr. 69). Oproti sériovému návrhu bylo potřeba použít vyšší množství lopatek z důvodu jejich tvaru a tloušťky spolu s novým tvarem prstence pro uchycení motoru. Sériový návrh obsahoval pět dvojných vzpěrných lopatek držících motorový prsteneček a jednu odlišnou vzpěrnou lopatku držící kabel motoru.

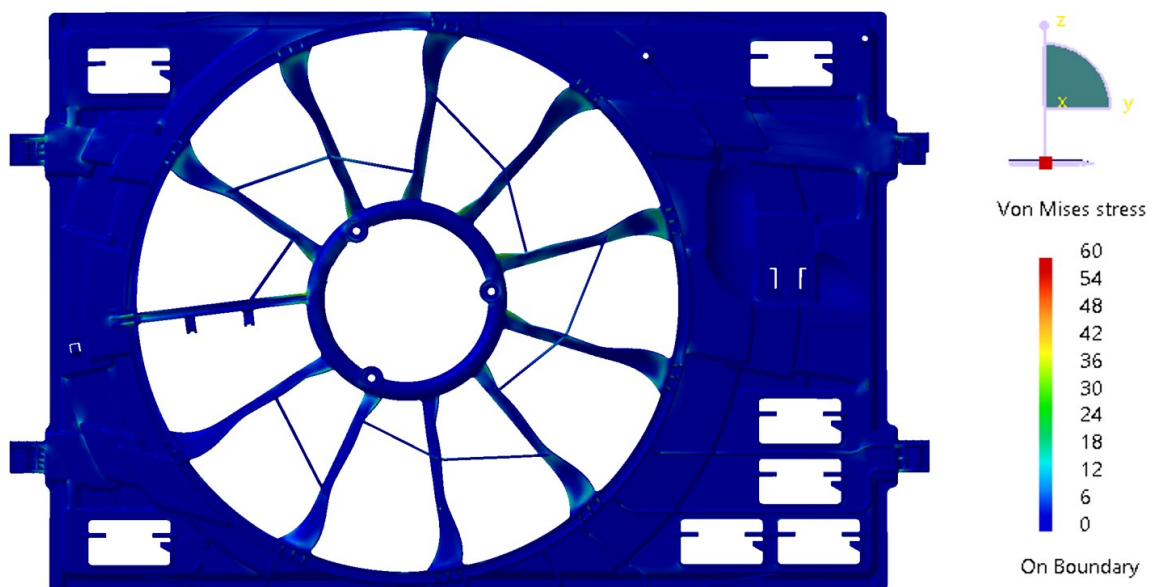


Obrázek 68. Sestava optimalizovaného návrhu na zvýšení pevnosti.



Obrázek 69. Zredukována velikost prohnutí v ose X

V průběhu zvyšování pevnosti dílu ve funkční části zároveň probíhala kontrola redukovaného napětí a lokálních extrémů, kdy tyto extrémní nad dovolené napětí byly redukovány za pomoci výztuh, žeber, zaoblení, případně jinou úpravou geometrie. Kontrola redukovaného napětí na optimalizovaném návrhu splňuje podmínky definované v cílech diplomové práce (Kap. 4) (Obr. 70).



Obrázek 70. Kontrola redukovaného napětí na optimalizovaném návrhu.

11 ZHODNOCENÍ NÁVRHŮ

První optimalizační návrh zabývající se snížením hmotnosti ve funkční části za zachování pevnostních vlastností se sériovým dílem za zvýšené teploty 100 °C v ose X byl zredukován oproti sériovému dílu o celých 77 g z původních 770 g na 693 g, což představuje 10 % úsporu materiálu. V tomto návrhu bylo použito 8 optimalizovaných lopatek a 1 speciální lopatka pro vedení kabelu společně s nově navrženým prstencem pro uchycení motoru s ohledem na správné odformování dílu. Výhodou tohoto návrhu je podle MKP také rovnoměrné prohnutí prstence držícího motor spolu s vrtulí a tím zabezpečení rovnoměrnějšího přiblížení vrtule k rámu s minimalizací možného kontaktu za působení maximální simulační síly a působících momentů.

Při roční sériové produkci 250 000 kusů se jedná o snížení spotřeby 19 250 kg materiálu. Při ceně 67,50 Kč/kg materiálu Celstran PP-GF30-0403P10 by se mohlo jednat o roční úsporu 1 299 379 Kč a celkovou úsporu při plánované výrobě dalších 5 ti let 6 496 875 Kč. Z této možné úspory je ovšem nutné odečíst náklady na novou formu a validaci nového designu.

Druhým optimalizačním návrhem zabývajícím se zvýšením pevnostních vlastností v ose X při teplotě 100 °C za zachování hmotnosti se sériovým dílem bylo dosaženo zlepšení prohnutí dílu oproti sériovému z 6,25 mm na 5,1 mm u dílu nového. V tomto případě byl použit jiný typ lopatek kompatibilních se sériovou vrtulí. Optimalizovaný návrh plnil zadaná kritéria při použití 10 lopatek a jednou speciální lopatkou pro vedení kabelu společně s nově navrženým prstencem pro uchycení motoru. Tento návrh poskytuje možnost rozšíření výrobních tolerancí na rámu ventilátoru, motoru i vrtuli. Rozšířením tolerančního pole lze dosáhnout značné úspory z důvodu nižší zmetkovitosti.

V dalších krocích, mimo danou práci, budou na základě provedených návrhů vyrobeny funkční prototypy (za využití 3D tisku metodou SLS), které budou následně podrobeny testu hlučnosti spolu s motorem a vrtulí za předem definovaného rozsahu otáček. V případě, že hlučnost při testech nepřesáhne sériové řešení, bude daný návrh vyroben jako vstříkovaný (z materiálu používaného pro sériovou produkci) a podroben sériovým validačním testům.

ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce byla v krátkosti rozebrána problematika technologie vstřikování polymerních materiálů s popisem vstřikovacího stroje a vstřikovací formy. Následně byla podrobněji popsána problematika konstrukce vstřikovaného dílu, jeho metody, principy, přístupy a doporučené postupy. V dané kapitole byly také probrány mezní stavy dílu a jejich možného řešení za pomoci metody konečných prvků. Poslední část teoretické práce se zabývala možnými vadami na polymerních výrobcích vyrobených technologií vstřikování a jejich možnosti ovlivnění konstrukčním návrhem.

V praktické části diplomové práce byly navrženy a postupně optimalizovány dva konstrukční návrhy rámu ventilátoru za použití specifického materiálu, působících sil, momentů a konkrétních vazeb v programu Catia V5 za účelem snížení výrobních nákladů. Návrh se skládal z nově navržených lopatek, případně jejich výztuh, lopatky pro kabel a prstence pro uchycení motoru ventilátoru. Tyto návrhy byly průběžně analyzovány v programu Catia V5 za pomoci metody konečných prvků a upravovány až do splnění požadavků. Pro první návrh byl dán požadavek firmy na co nejvyšší snížení hmotnosti ve funkční části rámu za zachování pevnosti v ose X, která je kritická pro kolizi vrtule s rámem. Druhému návrhu byl dán požadavek na navýšení pevnosti v dané ose za zachování hmotnosti se sériovým dílem, kdy finanční úspora u tohoto návrhu vznikne rozšířením výrobních tolerancí a tím snížení zmetkovitosti vyrobených rámu.

Ze získaných výsledků lze konstatovat, že všechny cíle diplomové práce byly splněny. Při zavedení navrhovaných řešení do reálného provozu může firma uspořit nemalé finanční náklady, což lze označit za nejvyšší přínos této práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [2] LENFELD, Petr. *Technologie II.: Zpracování plastů. Část 2* [elektronická skripta]. Technická univerzita Liberec, Katedra strojírenské technologie, 2005 [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm
- [3] JAROSCHEK, Christoph, 2018. *Design of injection molded plastic parts*. B.m.: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. eISBN 978-1-56990-894-5.
- [4] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 2016 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [5] Horké trysky jako standard. *Technický týdeník* [online]. 2018 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/horke-trysky-jako-standard_43784.html
- [6] HYNEK, Martin a kol. *STUDENÉ A ŽIVÉ VTOKOVÉ SYSTÉMY* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2013. [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publicace/KA05_Studene_a_zive_vtokove_systemy.pdf
- [7] Injection Molding. *CustomPartNet* [online]. [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>
- [8] ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, ISBN 9788072048335
- [9] LANXESS Inc. *Engineering Plastics: Part and Mold Design*. [online]. Dostupné z: http://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/Part_and_Mold_Design_Guide.pdf?docId=77015
- [10] HYNEK, Martin a kol. *PLASTOVÉ DÍLY: TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM* [online]. Fakulta strojní - Západočeská univerzita v Plzni. [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publicace/KA05_Temperace_vstrikovacich_forem.pdf

- [11] Málík, Ladislav, a další, a další. KONŠTRUOVANI II. Třilina : Třilinská Univerzita v Žilině, 2009. 978-80-8070-971-6.
- [12] Trebuňa, František a Šimčák, František. ODOLNOST PRVKOV MECHANICKÝCH SÚSTAV. Košice: Technická univerzita v Košicích, Strojnická fakulta, 2004. 80-8073-148-9.
- [13] Kurowski, Paul. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2016. místo neznámé: SDC Publications, 2016. 9781630570057.
- [14] NEUHÄUSL, Emil. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Vady výstřiků 1. - 6. díl. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2010 [cit. 2024-03-13]. ISSN:1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanky.html>
- [15] CARENDER, Jay W. *Injection Molding Troubleshooting Guide, 3rd Ed.*. Createspace Independent Publishing Platform, 2011. ISBN 978-1-4664-1434-1.
- [16] BARBERO, Ever J., 1998. *Introduction to Composite Materials Design*. B.m.: CRC Press. ISBN 1560327014.
- [17] Vehicle cooling: A compact guide for the workshop [online]. Germany: MAHLE Aftermarket, 2021 [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: <https://www.mahleaftermarket.com/media/homepage/facelift/media-center/klima/mahkompaktwissen-ec-fahrzeugkuehlung-en-screen.pdf>
- [18] J. Walter. Automotive cooling system component interactions. Texas Tech University, PhD thesis, 2001.
- [19] CAMPO, E. Alfredo. *The complete part design Handbook: For Injection Molding of Thermoplastics*. Hanser Publications, 2006. ISBN 978-1-56990-375-9.
- [20] MALLOY, Robert A. *Plastic part design for injection molding: An Introduction*. Hanser Pub Incorporated, 2011. ISBN 978-1-56990-436-7.
- [21] ROSATO, D.V. and Marlene G. ROSATO. *Injection molding handbook*. Springer, 2012. ISBN 978-1-4613-7077-2.
- [22] TRES, Paul A. *Designing plastic parts for assembly*. Hanser Publications, 2017. ISBN 978-1-56990-668-2

- [23] BONENBERGER, Paul R., 2016. *The first Snap-Fit handbook: Creating and Managing Attachments for Plastics Parts*. B.m.: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. eISBN 978-1-56990-596-8.
- [24] FAKIROV, Stoyko. *Fundamentals of Polymer Science for Engineers*. John Wiley & Sons, 2017. ISBN 978-3-527-34131-3.
- [25] BIRON, Michel. *Material selection for thermoplastic parts: Practical and Advanced Information*. William Andrew, 2015. ISBN 978-0-7020-6284-1.
- [26] KARGER-KOCSIS, József and Tamás BÁRÁNY. *Polypropylene handbook: Morphology, Blends and Composites*. Springer, 2019. ISBN 978-3-030-12902-6.
- [27] KARIAN, Harutun. *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites, Revised and Expanded*. CRC Press, 2003. ISBN: 0-8247-4064-5.
- [28] ŽENÍŠEK, Alexander. *Matematické základy metody konečných prvků*. Vyd. 2. Brno: PC-DIR, 1999. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1498-7.
- [29] LIU, G.R. and S. S. QUEK. *Finite element method: A Practical Course*. Elsevier, 2003. ISBN 978-008-0472-768.
- [30] UNIV, Sham Tickoo Purdue. *Catia V5-6R2015 for Designers*. 2016. ISBN 978-1-942689-21-8.
- [31] ZAMANI, Nader G. *CATIA V5 FEA Tutorials Release 20*. SDC Publications, 2011. ISBN: 978-1-58503-654-7.
- [32] MOAYYEDIAN, Mehdi. *Intelligent optimization of mold design and process parameters in injection molding*. Springer, 2018. ISBN 978-3-030-03355-2.
- [33] GOODSHIP, Vannessa. *Practical guide to injection moulding*. iSmithers Rapra Publishing, 2004. ISBN: 1-85957-444-0.
- [34] VALERO, José R. Lerma. *Plastics injection molding: Scientific Molding, Recommendations, and Best Practices*. 2019. ISBN 978-1-56990-689-7.
- [35] MOALLI, John E. *Plastics Failure Analysis and Prevention* [online]. 2001. Available at: <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA61859390>. ISBN 1-884207-92-8.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PP	Polypropylen
PA6	Polyamid 6
MKP	Metoda konečných prvků
3D	Trojrozměrný
PA6-GF30	Polyamid 6 s 30% obsahem skelných vláken
PP6-GF30	Polypropylen s 30% obsahem skelných vláken
mm	Milimetr (jednotka délky)
σ	Normálové napětí [Pa]
ε	Relativní prodloužení
MPa	Jednotka tlaku působící na jednotkovou plochu
F	Newton (jednotka síly)
°C	Stupeň Celsia (jednotka teploty)
kg	Kilogram (jednotka hmotnosti)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Vstřikovací cyklus [2].	10
Obrázek 2. Grafické znázornění jednotlivých operací vstřikovacího cyklu [3].	11
Obrázek 3. Schéma vstřikovacího stroje [2].	12
Obrázek 4. Ukázka vícenásobné vstřikovací formy [2].	14
Obrázek 5. Části vstřikovací formy [7].	15
Obrázek 6. Schéma studeného vtoku [6].	16
Obrázek 7. Základní konfigurace ohřevu v horkých vtokových systémech [5].	18
Obrázek 8. Možné přístupy ke konstrukční činnosti [11].	20
Obrázek 9. První fáze CAE výpočtu [29].	23
Obrázek 10. Druhá fáze CAE výpočtu [29].	23
Obrázek 11. Úkoso [21].	24
Obrázek 12. Změna jednoho vysokého žebra za dvě menší [21].	25
Obrázek 13. Význam tloušťky stěny žebra na deformaci dílu [21].	26
Obrázek 14. Správně a nesprávně řešené tloušťky stěn [21].	27
Obrázek 15. Minimální preferované rozměry zaoblení [20].	27
Obrázek 16. Doporučená konstrukce podkosů [20].	28
Obrázek 17. Doporučené rozměry upevňovacího výstupku [22].	29
Obrázek 18. Možná řešení upevňovacích výstupků [10].	29
Obrázek 19. Odlehčení výstupku [10].	29
Obrázek 20. Neprůchozí otvory: a) chybná řešení – ostrá vnější i vnitřní hrana, nebezpečí vzniku trhlin, b) správná řešení, c) správná řešení [20].	30
Obrázek 21. Otvory – příklad aplikace: a) neprůchozí otvor, b) neprůchozí otvor s rozšířeným průměrem v nefunkční části, c) průchozí otvor, d) průchozí otvor s rozšířeným průměrem v nefunkční části [20].	30
Obrázek 22. Krátké plnění formy [15].	32
Obrázek 23. Přetoky na vstřikovaném díle [15].	33
Obrázek 24. Propadlina na výrobku [15].	34
Obrázek 25. Vzduchová bublina [15].	35
Obrázek 26. Studený spoj [15].	37
Obrázek 27. Spálená místa na vstřikovaném díle [20].	38
Obrázek 28. Barevné vady na vstřikovaném díle [15].	39
Obrázek 29. Studené tokové linie materiálu [15].	40

Obrázek 30. Delaminace materiálu [15].	41
Obrázek 31. Kresba po volném proudu taveniny [15].	42
Obrázek 32. Zkroucený díl po vychladnutí [15].	43
Obrázek 33. Sestava modulu chladiče – chladič, vrtule, elektromotor, rám.	47
Obrázek 34. Tlačné umístění ventilátoru na chladiči [18].	48
Obrázek 35. Tažné umístění ventilátoru na chladiči [18].	48
Obrázek 36. Rám ventilátoru pro tažnou konfiguraci.	49
Obrázek 37. Sériový návrh rámu ventilátoru MQB37.	50
Obrázek 38. Vybraná část dílu pro optimalizaci.	50
Obrázek 39. Sériový návrh lopatek rámu.	51
Obrázek 40. První návrh lopatek pro optimalizaci 1.	52
Obrázek 41. Druhý návrh lopatek pro optimalizaci 2.	52
Obrázek 42. Sériový návrh vrtule vsazené do sériového rámu.	52
Obrázek 43. Tahové diagramy zvoleného materiálu (zkušební teplota: 100 °C).	54
Obrázek 44. Prostředí pro modelaci návrhu.	56
Obrázek 45. Prostředí pro analýzu napětí a prohnutí dílu.	56
Obrázek 46. Plně zavazbený rám ventilátoru.	58
Obrázek 47. Vazby jednotlivých konzol v osách X, Y, Z znázorněny červeně: a) levá horní vazba b) levá spodní vazba c) pravá horní vazba d) pravá spodní vazba.	59
Obrázek 48. Virtuální rigidní část spolu s definovaným momentem a silami.	60
Obrázek 49. Hrubá síť o velikosti stany elementu 2 mm pro rychlé vyhodnocení návrhu.	61
Obrázek 50. Jemná síť o velikosti strany elementu 1 mm pro precizní vyhodnocení návrhu.	61
Obrázek 51. Analýza distribuce redukovaného napětí v rozsahu 0-15 MPa sériového návrhu při teplotě 100 °C a zatížení v ose X 150 N.	62
Obrázek 52. Analýza prohnutí sériového dílu v rozsahu 0 - 6,25 mm.	62
Obrázek 53. Odebrání funkční části sériového ventilátoru.	63
Obrázek 54. Navržený tvar lopatky pro optimalizaci zaměřující se na snížení hmotnosti.	63
Obrázek 55. Navržený tvar motorového prstence pro optimalizaci zaměřující se na snížení hmotnosti.	64

Obrázek 56. Navržený tvar vzpěrné kabelové lopatky pro optimalizaci zaměřující se na snížení hmotnosti.	64
Obrázek 57. Průhyb rámu při použité tloušťce lopatek 4 mm.	65
Obrázek 58. Průhyb rámu při použité tloušťce lopatek 3 mm.	65
Obrázek 59. Sestava optimalizovaného návrhu na redukci hmotnosti.	66
Obrázek 60. Velikost prohnutí sériového dílu (vlevo) a nového dílu (vpravo) v ose X.	66
Obrázek 61. Kontrola redukovaného napětí na optimalizovaném návrhu.	67
Obrázek 62. Odebrání funkční části sériového ventilátoru.	68
Obrázek 63. Navržený tvar vzpěrné lopatky pro optimalizaci zaměřující se na zvýšení pevnosti a snížení průhybu prstence.	68
Obrázek 64. Navržený tvar motorového prstence pro optimalizaci zaměřující se na zvýšení pevnosti a snížení průhybu motorového prstence.	69
Obrázek 65. Navržený tvar kabelové vzpěrné lopatky pro optimalizaci zaměřující se na zvýšení pevnosti a snížení průhybu motorového prstence.	69
Obrázek 66. Průhyb rámu při použití devíti vzpěrných lopatek o tloušťce 2 mm a jedné kabelové lopatce.	70
Obrázek 67. Průhyb rámu při použití jedenácti vzpěrných lopatek o tloušťce 2 mm a jedné kabelové lopatky.	71
Obrázek 68. Sestava optimalizovaného návrhu na zvýšení pevnosti.	71
Obrázek 69. Zredukovaná velikost prohnutí v ose X.	72
Obrázek 70. Kontrola redukovaného napětí na optimalizovaném návrhu.	72

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Doporučené hodnoty úkosů [10].	24
Tabulka 2. Možné příčiny smrštění [34].	31
Tabulka 3. Možné příčiny krátkého plnění [34].	32
Tabulka 4. Možné příčiny vzniku přetoků [34].	34
Tabulka 5. Možné příčiny vzniku propadlin [34].	35
Tabulka 6. Možné příčiny vzniku bublin [34].	36
Tabulka 7. Možné příčiny vzniku studených spojů [34].	37
Tabulka 8. Možné příčiny vzniku spálených míst na výrobku [34].	38
Tabulka 9. Možné příčiny vzniku barevných vad na vstříkovaném díle [34].	39
Tabulka 10. Možné příčiny vzniku studených tokových linií [34].	40
Tabulka 11. Možné příčiny vzniku studených spojů [34].	41
Tabulka 12. Možné příčiny vzniku Jettingu [32].	42
Tabulka 13. Možné příčiny vzniku zkroucení [32].	44
Tabulka 14. Definice okrajových podmínek pro analýzu a optimalizaci dílů	57