



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VYUŽITÍ 3D TISKU PŘI VÝROBĚ FUNKČNÍCH PROTOTYPŮ PRO AUTOMOTIVE

USE OF 3D PRINTING IN THE PRODUCTION OF FUNCTIONAL PROTOTYPES FOR AUTOMOTIVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Mikulášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Marek Mikulášek
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Kamil Řehák, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití 3D tisku při výrobě funkčních prototypů pro automotive

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Neustálý vývoj v oblasti 3D tisku významně ovlivnil možnosti aplikace této technologie do prototypové či dokonce malosériové výroby. Z hlediska aplikace je však nutné vybrat vhodnou metodu, či orientaci součásti při tisku a to jak z pohledu efektivnosti výroby, tak i z pohledu zatížení součásti. V neposlední řadě je nutné vzít v úvahu i rozdílné materiálové vlastnosti v jednotlivých směrech tisku.

Cíle diplomové práce:

Provedení rešerše

Nalezení vhodných komponent pro 3D tisk

Na základě rešerše či technického experimentu stanovení materiálových charakteristik

Zhodnocení vhodnosti 3D tisku na vybrané komponentě na základě numerických simulací

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8

GIBSON, Ian, David W. ROSEN and Brent STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. p. 459. ISBN 14-419-1120-0.

PRŮŠA, Josef. Základy 3D tisku [online]. 1. Praha: Pusa Research s.r.o., 2014 [cit. 2016-09-30]. Dostupné z: <http://www.pusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>

SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In Mezinárodní vědecká konference. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 2005. 30 s. ISBN 80-248-0895-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou 3D tisku kompozitních materiálů. Neustálý vývoj této technologie umožnil aplikaci výtisků nejen do výroby prototypů, ale také funkčních součástí. V teoreticko-metodologické části je definována studie kompozitních materiálů s principem výroby pomocí aditivní technologie a s tím spojené procesy. V experimentální části je na konkrétní komponentě popsán celkový technologický proces od konstrukčního návrhu přes MKP analýzu v simulačním programu Ansys Workbench až po samotnou výrobu a aplikaci komponenty do montážní haly výrobního závodu ŠKODA AUTO a.s.

KLÍČOVÁ SLOVA

aditivní technologie, 3D tisk, kompozitní materiál, vyztužující vlákno, automobilový průmysl

ABSTRACT

This thesis deals with the 3D printing of composite materials. The constant development of this technology has enabled the application of this method for the production of prototypes, but also functional components. The theoretical part deals with the study of composite materials and the principle of production using additive technology. In the practical part, an analysis of the suitability of part processing using the 3D printing method is performed on a specific component and then applied to the assembly hall located in ŠKODA AUTO a.s.

KEYWORDS

additive technology, 3D printing, composite material, reinforcing fiber, automotive

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MIKULÁŠEK, M. *Využití 3D tisku při výrobě funkčních prototypů pro automotive*. Brno, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Kamil Řehák.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana Kamila Řeháka a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Marek Mikulášek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Kamilovi Řehákovi PhD. za věnovaný čas a cenné rady při řešení diplomové práce.

Děkuji společnosti ŠKODA AUTO a.s. za poskytnutí technického zázemí. Děkuji také kolegům z oddělení centrálního technického servisu ŠA za podporu a rady při zpracování experimentální části diplomové práce.

OBSAH

Úvod	11
1 Kompozitní materiály.....	12
1.1 Rozdělení kompozitních materiálů	13
1.2 Výztuž.....	13
1.3 Porovnání vyztužujících vláken	16
1.4 Matrice	17
2 Aditivní technologie Rapid Prototyping.....	18
2.1 Srovnání technologie RP s klasickými konvenčními metodami.....	19
2.2 Metody Rapid Prototyping.....	20
2.3 Technologie FDM (Fused Deposition Modeling)	21
2.4 Technologie CFF (Continuous Filament Fabrication)	22
2.5 Využití 3D tisku v automotive	23
3 Příprava modelu před 3D tiskem	24
3.1 Obecné zásady při návrhu modelu	24
3.2 Konverze dat	26
3.3 Chyby tiskového formátu.....	27
3.4 Slicování (vrstvení).....	28
3.5 Reverse engineering.....	29
4 Technické zpracování komponenty pro 3D tisk	30
4.1 Představení portfolia činností a projektů centrálního technického servisu.....	30
4.2 Použité tiskárny a jejich materiálové portfolio	33
4.2.1 PRUSA MK3S MMU2S	33
4.2.2 Materiálové portfolio PRUSA MK3S	33
4.2.3 Markforged X7	34
4.2.4 Materiálové portfolio Markforged.....	36
4.3 Návrh řešení záchyty momentu	38
4.4 Návrh konstrukčního řešení	40
4.4.1 Pevné rameno a úchyt utahovacího zařízení.....	40
4.4.2 Pouzdro a kluzné ložisko.....	41
4.4.3 Otočné rameno.....	43
4.4.4 Zajišťovací mechanismus	44
4.4.5 Vývoj finálního uspořádání jednotlivých komponent	46
4.5 Numerická simulace.....	48
4.5.1 Strukturální analýza celé sestavy.....	49
4.5.2 Strukturální analýza zajišťovacího kolíku.....	51
4.5.3 Strukturální analýza otočného ramena	54
4.5.4 Strukturální analýza pevného ramena.....	58
4.5.5 Strukturální analýza úchyty rukojeti.....	60
4.5.6 Optimalizace topologie úchyty rukojeti	62
4.6 Realizace 3D tisku	63
4.6.1 Nastavení 3D tisku pro vyztužené komponenty	64
4.6.2 Nastavení 3D tisku ostatních komponent	67
4.6.3 Zhodnocení tištěných dílů a návrhy možné optimalizace	68

4.6.4 Aplikace záchytu momentu do výroby	69
Závěr	70
Seznam použitých zkratk a symbolů	75
Seznam příloh.....	77

ÚVOD

Výrobní průmysl stále prochází čtvrtou průmyslovou revolucí, běžné konvenční metody zpracování komponent jsou z důvodu nízkého využití materiálu nahrazovány efektivnějšími metodami jako je například technologie 3D tisku. Tato technologie umožňuje využít širokou škálu materiálů, jako jsou polymery, kompozitní materiály nebo kovy. Nejčastěji využívané materiály pro 3D tisk jsou polymery, hlavně díky malé pořizovací ceně, nízké měrné hmotnosti a jednoduchému zpracování. V posledních době se ovšem výrobní průmysl začíná zaměřovat převážně na kompozitní materiály zejména kvůli lepším mechanickým vlastnostem. Při volbě materiálů je nutné být seznámen s mechanickými vlastnostmi při různých způsobech zatížení výsledného výrobku.

Hlavní výhodou technologie 3D tisku je eventualita tvorby tvarově komplikovaných objektů s různými vnitřními strukturami a minimálním množstvím odpadu. Účelem aditivní technologie je co nejvíce zjednodušit všechny procesy spojené s výrobou. Podstatné je také propojení aditivní technologie s ostatními moderními technologiemi jako je Reverse Engineering, nebo 3D modelování v CAD systémech, které jsou používány především k návrhům a úpravám modelů.

Metoda aditivní technologie se používá v současnosti z větší části pro prototypovou výrobu. Výsledné prototypy slouží většinou pouze k znázornění předpokládaného designu, nebo k testování konstrukčních řešení větších sestav a podsestav. Další z častých využití aditivní technologie lze zaznamenat ve výrobě odlévaných výrobků, kde lze pomocí 3D tisku jednoduše vyrobit model odlitku, podle kterého se vytváří forma. Jelikož materiály používané pro 3D tisk jsou ještě stále ve vývoji, s funkčními výrobky vyrobené některou z metod 3D tisku se setkáváme zřídka. Hlavními důvody je neschopnost kvalitativně uspokojit požadované mechanické vlastnosti, nebo je metoda příliš nákladná. V diplomové práci se budu zabývat právě výrobou funkčních prototypů, kde bude potřeba pomocí numerických simulací analyzovat mechanické vlastnosti dílu v závislosti na jeho budoucím využití v praxi.

Současný vývoj a výzkum v oblasti automobilového průmyslu se věnuje převážně elektromobilitě. Elektromobilita je aktuální trend, který má vést k ochraně životního prostředí snížením produkce emisí spalovacích motorů. Z důvodu instalace baterií a dalších nezbytných konstrukčních objektů, se zvětšuje celková hmotnost elektricky poháněných vozidel, to má negativní vliv, jak na zvyšování produkce emisí, tak snižování dojezdu. Jednou z možností úspory hmotnosti může být právě využití technologie 3D tisku, kde lze nahradit plně těžké kovy, materiály s odlehčenou vnitřní strukturou.

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Obecně lze kompozity charakterizovat jako materiály složené ze dvou nebo více chemicky odlišných fází. Jednotlivé části se liší mechanickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Jejich vzájemnou kombinací lze získat originální komponentu s unikátními vlastnostmi s širokým spektrem využití. Výsledné mechanické vlastnosti kompozitu jsou odlišné od vlastností jednotlivých fází. [1], [2]

Strukturu kompozitního materiálu tvoří několik nespojitých fází ponořených ve fázi spojitě. Nespojitá fáze plní v kompozitu funkci vyztužení, zatímco spojitá fáze neboli matrice je pojivem. Matrice je schopna přenášet zatížení mezi jednotlivými vlákny, výsledkem jsou vlákna poskytující vysokou pevnost a tuhost. Výztuž by měla v kompozitu zastupovat alespoň 5 % podíl z celkové objemové struktury. [1], [4], [44]

Funkce matrice/pojiva:

- udržení tvaru, celková soudržnost, spojení vyztužující fáze
- rovnoměrný přenos zatížení mezi vlákna
- ochrana vyztužujících vláken před nepříznivými podmínkami prostředí
- udržení orientace vláken

Funkce vyztužení:

- přenos hlavního zatížení na matrici
- zlepšení mechanických vlastností díky vyšší pevnosti a tuhosti výztuže [1], [44]

Podmínky vyztužujících účinků jsou určeny dle rovnic:

- vyztužující materiál musí být pevnější než matrice

$$\sigma_{fiber} > \sigma_{matric} \quad (1)$$

- vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice

$$E_{fiber} > E_{matric} \quad (2)$$

- matrice se nesmí porušit dříve než vyztužující materiál

$$\varepsilon_{fiber} > \varepsilon_{matric} \quad (3)$$

1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály lze klasifikovat dle několika hledisek. Základním rozdělením může být například klasifikace dle matrice, výztuže, složení nebo původu. Nejvíce používané jsou kompozitní materiály s polymerní maticí vyztužené kontinuálním vláknem. [1], [3], [6], [45]

Klasifikace dle výztuže:

- kompozity vyztužené vláknem
- kompozity vyztužené částicemi
- kompozity vrstvené

Klasifikace dle matrice:

- kompozity s kovovou maticí
- kompozity s polymerní maticí
- kompozity s keramickou maticí

Klasifikace dle původu:

- organické kompozity
- umělé kompozity [1], [3], [6]

1.2 VÝZTUŽ

Podle objemu výztuže lze kompozitní materiály rozdělit na makrokompozity mikrokompozity a nanokompozity. Nejčastější forma výztuže je vlákno, které má za následek vyšší pevnost a tuhost kompozitu. Vlákna jsou nejčastěji vyráběna s kruhovým průřezem o průměru 5 až 25 μm . [1], [2]

Rozdělení vláken pro kompozitní materiály:

- Uhlíková
- Skleněná
- Polymerní
- Keramická
- Kovová

Uhlíkové vlákno

Obsahují 90 % podíl uhlíku a rozměrově se nachází v průměru mezi 5-10 μm . Vynikají svými mechanickými parametry. Atomy karbonového vlákna jsou spojeny v krystaly orientované paralelně k dlouhé ose vlákna. Díky takovému uspořádání mikroskopických krystalů vyniká karbonové vlákno vysokou pevností. Avšak jsou závislé na stupni orientace uhlíkových vrstev a na výskytu vadných míst. Uhlíková vlákna je nezbytné povrchově upravovat apretací tzn. směsí na bázi epoxidové pryskyřice, která současně slouží jako prostředek pro zlepšení vazby mezi vláknem a matricí, při absenci tohoto procesu jsou vlákna velmi křehká [1]. Síla této interakce musí být přizpůsobena konkrétním aplikacím, protože silné propojení rozhraní vede ke křehkému chování, zatímco slabé spojení vede k delaminaci. Dosahují skvělého poměru pevnosti vůči hmotnosti. Tato vlákna mají vysoký modul pružnosti a vysokou odolnost v tahu. Uhlík netaje, není tažný a je dokonale odolný vůči rozpouštědlům, dále je charakteristický svým vysokým stupněm anizotropie – odlišné fyzikální vlastnosti v různých směrech, tento fakt však může být problematický v případě výpočtu pevnostních. [1], [12], [13]

Uhlíková vlákna jsou nejhojněji využívána jako výztuž materiálů konstrukcí, na které je kladen vysoký požadavek nízké hmotnosti. Nejčastěji s těmito materiály pracují konstruktéři v leteckém, kosmickém ale i automobilovém průmyslu zejména v závodním sektoru. [1], [8]

Skelné vlákno

Tyto vlákna jsou vyráběna rychlým spřádáním taveniny skla z trysek. Jsou nejčastěji používaným typem vláken, především kvůli jejich nízkým nákladům a dobrým mechanickým vlastnostem. Skleněná vlákna mají pravidelný kruhový průřez. Vlákno je v surovém stavu lámavé a abrazivní, proto je nutné stejně jako v případě uhlíkových vláken použít lubrikační proces a apreturu. Samotná lubrikace je pro použití v kompozitech nedostatečná, jelikož způsobuje prakticky nulovou adhezi k polymerní matrici. Z toho důvodu jsou vlákna již ve výrobě opatřena apretační vrstvou, obvykle se používají organické silany. Nejčastěji používaným typem jsou E-vlákna, jejichž základem je soustava oxidů SiO_2 , Al_2O_3 a CaO . Hlavní předností těchto vláken je odolnost vůči teplotě. Mechanické vlastnosti nejsou ovlivněny ani při dlouhodobém teplotním namáhání kolem $250\text{ }^\circ\text{C}$. Mají relativně vysokou pevnost v tahu (2500 až 4500 MPa) a nízký modul pružnosti (73000 až 86000 MPa) [1], [45]. Tepelná vodivost je vyšší než u ostatních typů vláken, ale podstatně nižší než u kovů. Materiálové vlastnosti výsledného kompozitu jsou závislé na druhu, obsahu a orientaci skleněných vláken. Speciálním typem jsou HSHT vlákna, které odolávají vyšším teplotám. Jedná se o velmi elastické vlákno, které se po odstranění zátěže vrátí do svého původního tvaru bez trvalé deformace. [1], [15], [16]

Aramidové vlákno

Aramidové vlákno také označovány jako kevlar se řadí k nejlépejším vyztužujícím vláknům. Kevlarové vlákno je vytvořeno na bázi lineárních organických polymerů a má jedinečnou kombinaci vysoké pevnosti a tuhosti [1], [45]. Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken je výrazně nižší než mez pevnosti v tahu. Při zatížení vláken UV zářením s vysokou energií dochází k snížení pevnosti, nejsou vhodná k aplikaci na konstrukce vystavené vysokým teplotám nad 300 °C. Nevýhodou je citlivost na zatížení tlakem, působícím v podélném směru. [1], [4], [6]

Hybridní tkaniny

Jsou konstruovány ze dvou či více druhů tkanin. Kombinací jednotlivých typů tkanin jsme schopni dosáhnout ještě lepších vlastností konečného kompozitu. [1], [45] Příkladem je zlepšení tepelných vlastností kompozitů vyztužených kevlarovými vlákny hybridizací se skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Nebo zvýšení rázové houževnatost kevlarových vláken s tuhostí uhlíkových vláken. Kombinace uhlíkových s levnějšími skleněnými vlákny je použito ke snížení materiálních nákladů finálních kompozitů, aniž by to ovlivnilo požadované funkční vlastnosti. [1], [6], [14]

Klasifikace nejpoužívanějších kombinací hybridních tkanin:

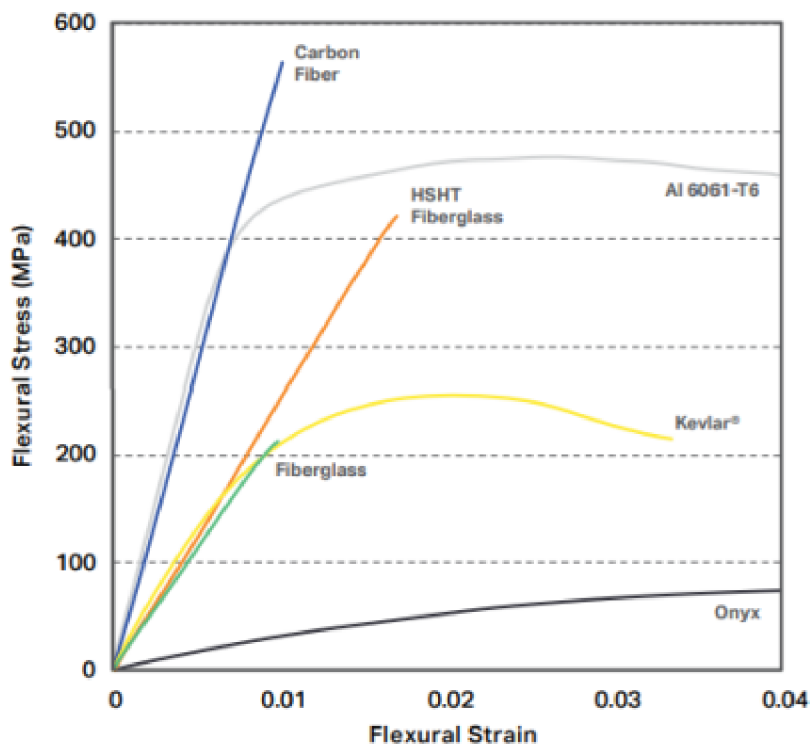
- uhlík/ sklo
- uhlík/ aramid
- aramid/ sklo

1.3 POROVNÁNÍ VYZTUŽUJÍCÍCH VLÁKEN

Rozdílnost mechanických vlastností jednotlivých výztuží je znázorněna v tabulce. Z Graf 1 lze odečíst závislost napětí pevnosti v ohybu na poměrném prodloužení kontinuálních vláken v porovnání například s plastickým materiálem Onyx, nebo hliníkem Al 6061-T5. [8]

Tabulka 1: Vlastnosti výztuží materiálů pro 3D tisk [8]

	Karbon	Sklo	Kevlar	HSHT
Pevnost v tahu	540 MPa	200 MPa	240 MPa	420 MPa
Pevnost v ohybu	800 MPa	590 MPa	610 MPa	600 MPa
Tepelná odolnost	105 °C	105 °C	105 °C	150 °C
Charakteristika	Vysoká pevnost a tuhost	Robustnost, houževnatost	Nárazu vzdornost, ořezuvzdornost	Odolnost vůči vysokým teplotám
Odolává zatížení	Dynamické míjivé	Statické konstantní	Dynamické rázové	Dynamické míjivé



Graf 1: Deformační křivky kontinuálních vláken [8]

Flexural stress = Ohybové napětí, Flexural strain = Poměrné prodloužení

1.4 MATRICE

Matrice dodává kompozitnímu materiálu fyzikální a chemické vlastnosti. Zajišťuje tvarovou stálost, geometrickou polohu výztuže a přenos vnějšího zatížení na vyztužující vlákna. Důležité pro správnou funkci kompozitního materiálu, aby dokázal vytvořit perfektní spojení matrice-výztuž a tím zajistila správnou funkci. Proto je potřeba, aby viskozita matrice během smáčení výztuže byla co nejmenší a byl zajištěn dobrý kontakt s výztuží bez jakýchkoliv mezer. Matrice bývají zpravidla z polymerů, kovů či keramiky. Jednotlivé materiály matrice se liší svými charakteristickými vlastnostmi. Nejčastěji používanou matricí u 3D tisku jsou polymery, které mají ve srovnání s kovy vysokou měrnou hustotu a pevnost. Klasifikují se na reaktoplastické a termoplastické. [5], [9]

Reaktoplastické jsou složeny trojrozměrnou sítí a ve výchozím stavu jsou dobře tvarovatelné. Při výrobě je nutné nechat výsledný materiál vytvrdit. Vytvrzování pryskyřic je spojeno s exotermní reakcí, zvýšením viskozity a smrštěním materiálu. Při harmonických změnách teplot stále drží svůj tvar. Tyto materiály jsou velmi křehké a disponují nízkou tažností na úkor vysokých hodnot tuhosti a pevnosti. Zlepšení houževnatosti může být prováděno pomocí modifikačních přísad [1], [44]. Nejpoužívanější reaktoplastický materiál je epoxidová pryskyřice, která má výbornou přilnavost proto ji lze zpracovávat mnoha způsoby např. UV vytvrzováním nebo jinou tepelnou polymerizační technologií. Největší devízy epoxidové pryskyřice jsou nízká hodnota smrštění, dobré mechanické a elektrické vlastnosti, odolnost vůči korozi a rozpouštědlům, a v neposlední řadě schopnost výroby tvarově velmi přesných výtisků. [5], [10], [17]

Termoplastické jsou složeny z různě dlouhých a odlišně orientovaných molekulových řetězců, které nejsou komplexně síťovány. Při teplotách 200 °C přechází termoplasty z pevné fáze do tekuté fáze, v tekuté fázi dochází k prosycování vláken. V kompozitu termoplasty tvoří matrici, kterou lze vyztužit spojitými vlákny, mikrovlákny nebo částicemi. Nejvíce používané materiály pro 3D tisk, jsou, polyethylene terephthalate (PETG), nylon, polycarbonate (PC), polylactic acid (kyselina polyléčná, PLA), polypropylen (PP), akrylonitrilbutadienstyren (ABS). [5], [9], [17]

2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

Aditive manufacturing (AM) je proces, při němž vzniká výrobek postupným nanášením materiálu po tenkých konstantních vrstvách. Opakem této metody je technologie obrábění, kde je materiál odebrán ve formě třísky. Metody, u kterých je materiál naopak odebrán se nazývají subtraktivní. AM označení se využívá pro označení procesů, při kterých vzniká konečný výrobek vrstvením. Díky možnosti počítačového konstruování modelů a sdílení dat na počítačové síti odpadá nutnost práce s tištěnou technickou dokumentací. [2], [19], [21]

Rapid Prototyping (RP) je technologický proces, navržení nového výrobku rychleji než klasickými technologiemi. Technologie RP je v současnosti využívána zejména pro tvorbu prototypových modelů, které se následně ověřují na funkčnost nebo umístění v sestavách [1]. Další využití těchto prototypů může být kontrola rozměrů a odchylek od reálných součástí. Pomocí RP se velmi často vytváří zmenšené modely komerčních objektů nebo rozměrných součástí spadajících do portfolia výroby firem. Směrodatným hlediskem pro vhodnou metodu aditivní výroby je výsledné použití součásti, vytvořený prototyp je potom dle typu aditivní technologie v podobě termoplastu, pryskyřice, vosku nebo kovového prášku. [24], [25], [26]

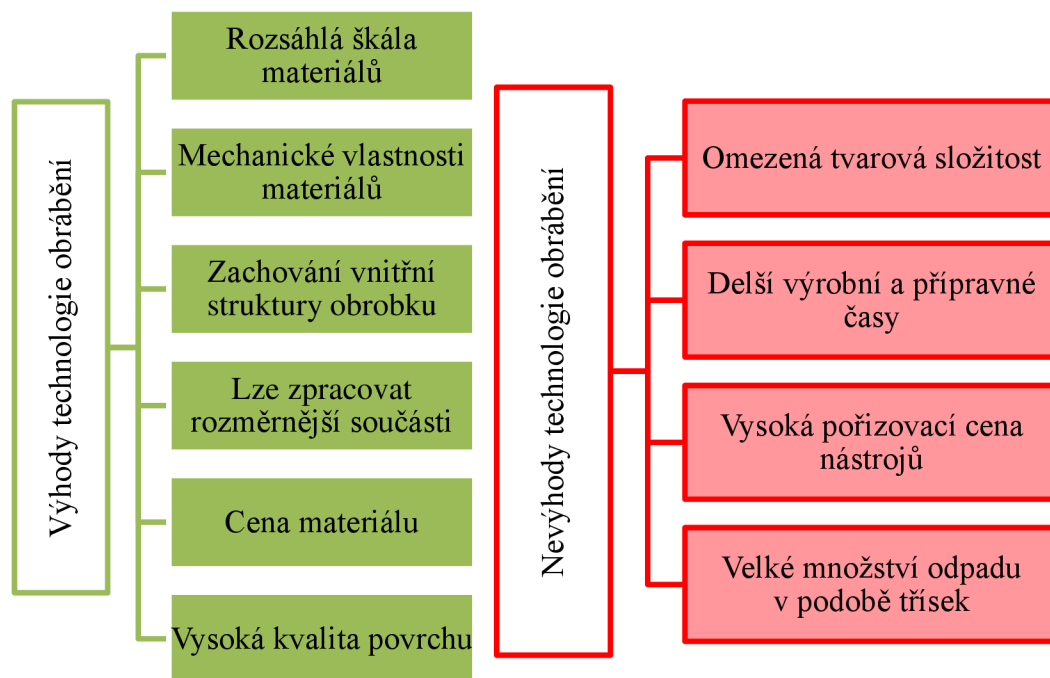
V porovnání s klasickými konvenčními metodami je hlavní výhodou RP rychlost tvorby součástí. Odpadají dlouhé přípravy výroby jako např. výroba zápusky u kování, tvorba CNC programu pro obrábění, nebo tvorba vstříkovací formy pro výrobu plastů. Nevýhodou RP oproti obrábění je nižší přesnost vytištěných dílů. Základní nezbytností pro všechny metody RP je úplný trojrozměrný geometrický popis součásti, který je za účelem zjednodušení dalšího zpracování nejdříve v CAD systému aproximován a převeden do výstupního formátu STL [1]. Tento model příslušný software elektronicky rozřeže na jednotlivé vrstvy o definované výšce. Nezbytné informace týkající se jednotlivých vrstev tzn. poloha, výška, tvar jsou po síti popřípadě pomocí USB převedeny do 3D tiskárny, která automaticky vyhodnotí a následně řídí samotnou tvorbu modelu definovanou uživatelem dříve v příslušném systémovém prostředí. [2], [19], [21]

Navazující technologie na RP mohou být technologie k ověření funkčnosti či vizualizaci součástí. K získání virtuálního 3D modelu se využívá zejména technologie Reverse Engineering (RE). RE je proces, který zahrnuje měření fyzického objektu a jeho rekonstrukci jako 3D model, tvar modelu se získává pomocí 3D scannerů. [24], [25], [26]

2.1 SROVNÁNÍ TECHNOLOGIE RP S KLASICKÝMI KONVENČNÍMI METODAMI

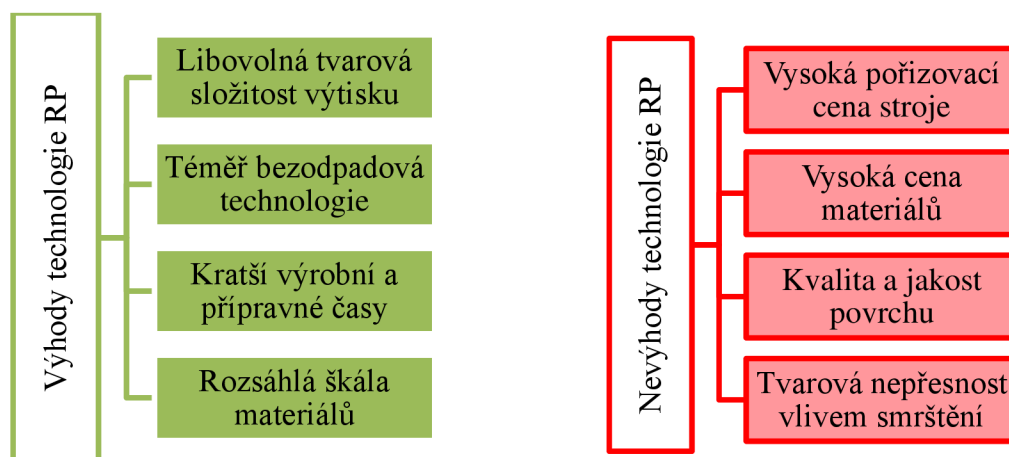
Moderní technologie RP v současné době konkurují běžným technologiím a v budoucnu je v oblastech týkajících se výzkumu a vývoje prototypů ve velké míře jistě nahradí. Hlavním důvodem je fakt, že běžné technologie nejsou tak efektivní a nesplňují stanovené požadavky. [2], [19], [21]

VÝHODY A NEVÝHODY TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ



Obrázek 1: Výhody a nevýhody technologie obrábění [2]

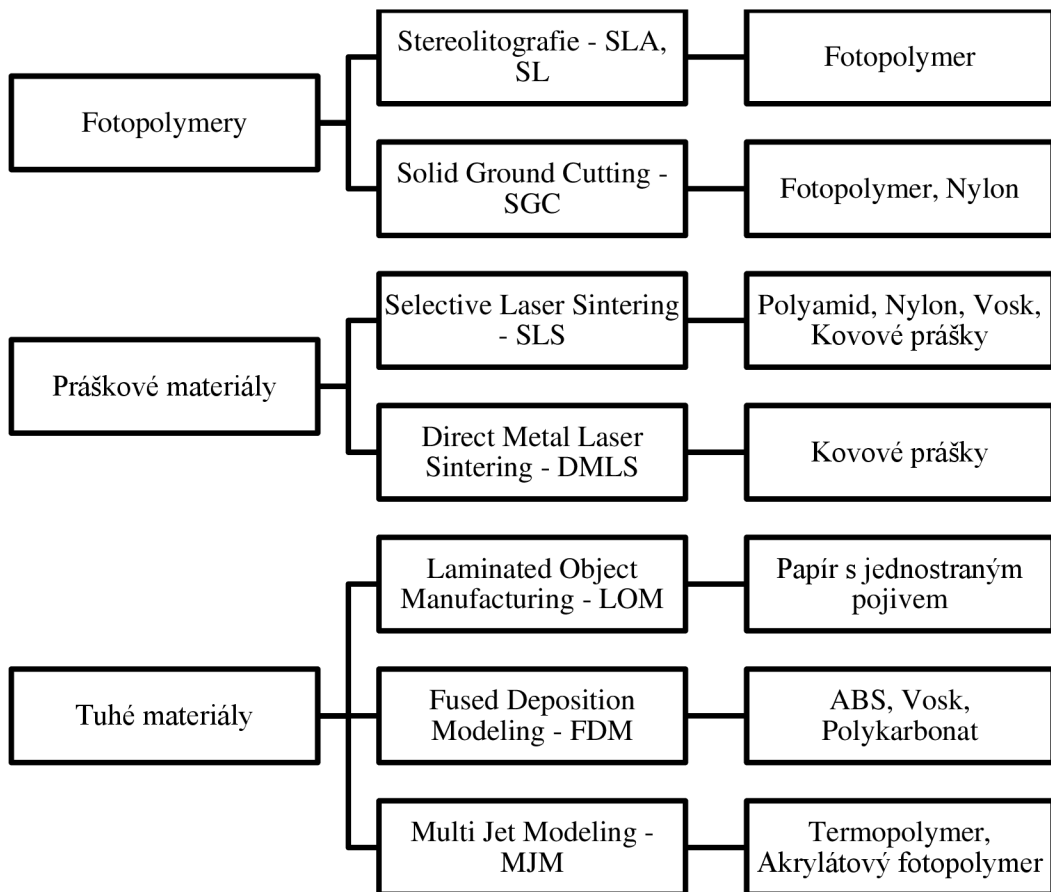
VÝHODY A NEVÝHODY TECHNOLOGIE RP



Obrázek 2: Výhody a nevýhody technologie RP [2]

2.2 METODY RAPID PROTOTYPING

Všechny metody RP jsou založeny na technologii postupného nanášení jednotlivých vrstev materiálu na konečný model. Technologii RP lze rozdělit podle procesu vrstvení materiálu nebo podle použitého materiálu. Proces tavení materiálu může být způsoben pomocí energie laseru, elektricky vyhřívanou hlavou nebo působením UV záření. 3D tiskárny dokáží pracovat s širokou škálou materiálů, jako jsou plasty, keramika, kompozity, kovy a pryskyřice. [20], [23]



Obrázek 3: Rozdělení hlavních metod RP [20]

2.3 TECHNOLOGIE FDM (FUSED DEPOSITION MODELING)

Technologie FDM patentovaná Scottem Crumpem v roce 1989. Po získání patentu v roce 2009 se 3D tisk masivně rozšířil mezi obyčejné uživatele pod označením FFF (Fused Filament Fabrication), jelikož FDM je chráněno ochrannou známkou [19], [20]. Tuto technologii používají všechny tiskárny (PRŮŠA MK3S, Markforged Two a Markforged X7), které budu v diplomové práci používat pro výrobu.

Princip metody je tavení termoplastu navinutého na cívce, ze které je kladkami vtlačován do vyhřívané trysky. Trysky mohou mít rozdílné průměry v závislosti na požadované přesnosti budoucího výtisku. V trysce dochází tedy k natavení materiálu a poté je materiál v tenkých vrstvách vytlačován na pracovní desku. Nanesený materiál působením nižší teploty okolí tuhne a vytvrzuje se. Z důvodu soudržnosti výtisku musí být otvory a převisy větší než 55° vyztuženy pomocí přidavných podpor, které jsou následně mechanicky nebo za použití speciálních rozpouštěcích roztoků odstraněny. [19], [20], [24], [25]

Tisková hlava nebo tisková podložka (záleží na typu konstrukce) se pohybuje v horizontální rovině (X, Y) do doby, než nedokončí kompletní vrstvu. Po dokončení kompletní vrstvy se vertikálně posune o výšku jedné vrstvy. [19], [20], [25], [46]

Ekologičnost a ekonomičnost je hlavní výhodou tohoto typu technologie. Používané materiály pro tuto metodu nejsou toxické a některé jsou dokonce biologicky rozložitelné. FDM je ve srovnání s ostatními metodami aditivní výroby nejlevnější. [20], [24], [25], [26]

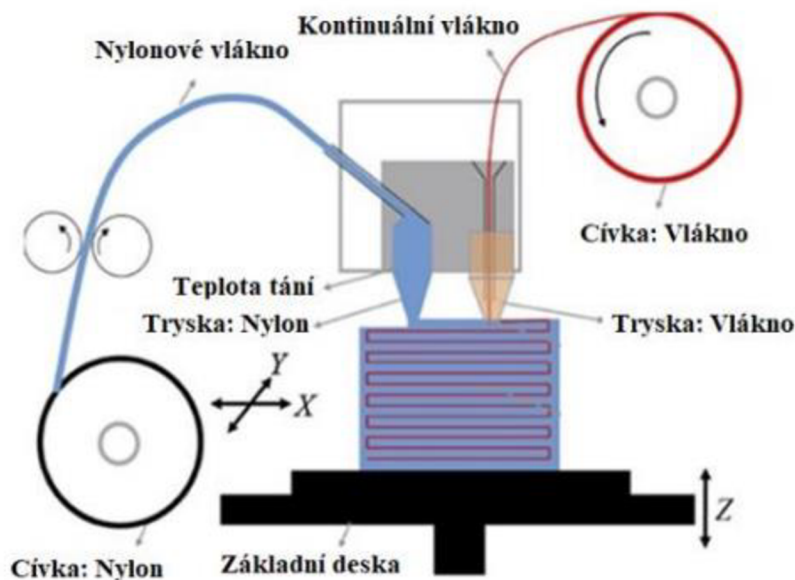
Nevýhodou FDM je závislost průměru výstupní trysky, která negativně ovlivňuje výslednou přesnost výtisku. Při užití menších průměrů trysek dosáhneme kvalitnějších výtisků, ovšem čas celého procesu bude v závislosti na změně průměru trysky o to delší [19]. Další nevýhodou spojenou s vlastnostmi tisknutých materiálů je smršťování při vychladnutí výtisku, je nutné tedy počítat s malými odchylkami, v některých případech může dojít i k větším odchylkám nebo špatnému navázání jednotlivých vrstev, výtisk je v těchto ojedinělých případech nutné tisknout opětovně. Tato problematika se dá prediktivně řešit vhodnou volbou materiálu a vhodnou orientací součásti na pracovní ploše. Vyhřívaná podložka či uzavřený tiskový prostor s možností kontroly a úpravy teploty také zabraňují procesu smršťování. [20], [25], [26]

2.4 TECHNOLOGIE CFF (CONTINUOUS FILAMENT FABRICATION)

Tato technologie vytvořena společností Markforged roku 2014, tiskne vlákna dvěma samostatnými vytlačovacími tryskami. Primární tryska je určena pro tisk kontinuálních vláken, jako je kevlarové vlákno, skelné vlákno a uhlíkové vlákno. Tato vlákna mají v součástce funkci výztuhy, tudíž zlepšení mechanických vlastností finálního výtisku. Sekundární tryska tiskne z plastových materiálů. Jednotlivé trysky nefungují současně, jedna se vždy musí zastavit na úkor druhé. Jednotlivá vlákna jsou opatřena termoplastickým povlakem, který slouží jako matrice. [18], [19]

Markforged doporučuje dvě strategie tvorby výplně (izotropní a soustředná výplň). U vzoru výplně izotropním vláknem jsou vrstvy jednosměrné podobné tradičnímu laminovanému kompozitu, vrstvy jsou kladeny v jedné úhlové orientaci s otáčením o 180 stupňů u tvorby okrajových částí. Tištěné objekty s tímto uspořádáním jsou schopny odolávat ohybu v rovině XY. Nevýhodou této metody je časová náročnost. Při užití soustředné výplně kopíruje vytlačovací tryska určitý počet skořepin ve stěnách součásti, tyto skořepiny zpevňují stěny, což umožňuje výslednému výtisku odolat ohybu kolem osy Z. [18], [19], [20]

Před samotným tiskem uživatel nastavuje pomocí příslušné funkce oblast zesílení. Například pouze vnější plášť, kde je výztuha přidána pouze na vnějším obvodu součásti pomocí soustředných prstenců. Zesíleny mohou být pouze vnitřní otvory, to znamená že se vyztužují všechny vnitřní prvky součásti soustřednými kroužky. Poslední možností je nastavení výztuhy na všechny stěny součásti. Zadaný počet soustředných prstenců je přidán jak v obvodu, tak ve všech vnitřních oblastech. [19], [20]



Obrázek 4: Princip technologie CFF [18]

2.5 VYUŽITÍ 3D TISKU V AUTOMOTIVE

První aplikace aditivní výroby byly realizovány právě v oblasti automobilového průmyslu. Jednoznačným záměrem aplikace této technologie je zefektivnění konstrukce a výroby komponentů pro účely automotive. Díky lepšímu využití materiálu je dosahováno mnohem vyšší produktivity a zkrácení doby přípravy výroby. Aditivní technologie byli na začátku používány zejména k výrobě plastových a kovových prototypů pro účely vývoje. V současnosti je 3D tisk využíván už i ve výrobě kusové v některých případech dokonce sériové výrobě. Tato metoda výroby nahrazuje konvenční technologie z důvodu zajištění produkce tvarově neomezených a ve výsledku i ekonomičtějších komponent. . [2]

Při využití tisku kompozitních materiálů je v automotive stejně jako v leteckém průmyslu velká snaha o snižování celkové hmotnosti vozidla, a to zejména u závodních vozů, kde je kladen vysoký požadavek na jízdní vlastnosti. U klasických motorových vozidel snižují výrobci hmotnost za účelem snížení spotřeby paliva při zachování výkonu a redukce výfukových plynů. U elektromobilů dochází ke snižování hmotnosti zejména za účelem většího dojezdu, tudíž využití kapacity baterie elektromobilu na maximum. Snižování hmotnosti je dosahováno zejména konstrukcí vnitřních pórovitých struktur a topologické optimalizaci komponenty. [27]

Komponenty vyrobené pomocí 3D tisku můžeme najít v chladicím systému spalovacího motoru, kde díky této technologii dochází k optimalizaci chladicích kanálů. Tepelně namáhané součásti spalovacího motoru nebo mechanicky namáhané díly převodového ústrojí, všechny tyto součásti mohou být vyhotoveny pomocí aditivních technologií. Jako demonstrační příklad uvedu německou společnost Porsche, která se při vývoji spalovacího motoru pro svůj nejvýkonější model Porsche 911 GT2 RS generace 991 spojila s firmami Trumpf a Mahle. Rozhodli se optimalizovat výrobu pístu pomocí aditivní technologie, dosáhli snížení hmotnosti pístu ve srovnání s klasickými kovanými písty o 10 %, navíc mají integrovaný chladicí kanál. Porovnání mechanických vlastností jednotlivých pístu je téměř srovnatelné. Na obrázku je znázorněn píst bezprostředně po ukončení tisku i s výztuží. Na druhém obrázku je názorná ukázka pístu po zatěžovacím testu. [27]



Obrázek 5: Díly vyrobené pomocí RP automotive [27]

3 PŘÍPRAVA MODELU PŘED 3D TISKEM

Na samém prvopočátku přípravy modelu pro výrobu metodou 3D tisku je potřeba si ujasnit, zda se bude model vyrábět a tvořit invenčně od nuly, nebo zda se jedná jen o úpravu existujícího konstrukčního prvku, v tomto případě bychom mohli využít metod reverzního inženýrství a usnadnit si značné množství práce. Možnosti nástrojů 3D modelování je mnoho a neustále se rozšiřují. Výsledkem musí být vždy 3D digitální model, který je nositel určitých vlastností a informací. Můžeme využít například webovou aplikaci TinkerCAD, tato aplikace je mezi 3D modeláři velmi oblíbená, slouží primárně k tvorbě velmi jednoduchých symetrických tvarů. Pro parametrické modelování pomocí zdrojového kódu lze využít OpenSCAD. Poslední možností je nejkompaktnější Autodesk Fusion 360. Nicméně každý výrobní segment používá rozdílné modeláře, důležité je, aby program, ve kterém je model vytvářen, umožňoval funkci uložení geometrie ve formátu STL, který je kompatibilní se všemi 3D tiskárnami. [29]

3.1 OBECNÉ ZÁSADY PŘI NÁVRHU MODELU

Minimalizace podpěr

Vhodným návrhem a modelováním lze ovlivnit množství a nutnost podpěrného materiálu. Omezením podpěr ušetříme jak materiál, tak tiskový čas a v některých případech dosáhneme i lepšího povrchu. Některé přípravné programy nabízejí z důvodu úspory času možnost minimalizace hustoty podpěr, rizikem je však špatná kvalita podpěrné plochy. [29]

Vhodná orientace modelu na podložce

Musíme předpokládat, že plochy, které budou umístěné na podpěrách nebudou tak hladké a rovné jako plochy umístěné přímo na podložce. Je nezbytné počítat také s tím, že výtisk má menší pevnost ve směru rovnoběžném s vrstvami než kolmo na vrstvy. [29]

Rozdělení modelu na více částí

U složitějších modelů s komplikovanými vnějšími plochami je nutné 3D model rozdělit na více částí, a ty si na podložce natočit nejvhodnějším způsobem. Příkladem může být obyčejná koule. Vytisknout ji jako jeden kus je náročné, protože má velmi malou styčnou plochu s podložkou. Samozřejmě je možné přidat podpěry, ale povrch koule zespodu nebude ideálně hladký. Možným řešením je rozdělení koule na dvě polokoule a jejich následné slepení. Při modelování částí, které do sebe mají zapadat je třeba kalkulovat s tolerancí. Díly s nulovou tolerancí do sebe nebude možné vsadit. Se správnou hodnotou tolerance je třeba experimentovat. Liší se zejména podle velikosti modelu, směru vrstev do sebe zapadajících dílů, kalibrací, nastavením vaší tiskárny a řadou dalších aspektů. [29]

Kulaté otvory

Kulatý otvor nebo závit tištěný v rovnoběžném směru s podložkou, nebude nikdy dokonale kulatý a přesný. Při orientaci otvoru kolmo k tiskové podložce bude otvor o poznání lepší. [29]

U specifických modelů je potřeba zajistit dodatečné nastavení jako např. podpory, řezy nebo tzv. brim parametr. Brim je vrstva materiálu táhnoucí se podél tiskového lůžka od okrajů hran. Brim pomáhá zlepšit přilnavost k lůžku a zabraňuje deformaci u delších součástí s malou styčnou plochou modelu k tiskové podložce. [29]

Příklady specifických modelů a řešení jejich nastavení:

Vysoké modely s malou základnou

- Zvýšit plochu modulu a přilnavost k podložce parametrem brim.
- Vysoké nároky na první vrstvu, v případě problémů snížit vzdálenost mezi tryskou a podložkou, tryska se však v žádném případě nesmí dotýkat podložky.
- První vrstva musí dosahovat alespoň hodnoty 0,2 mm. [30]

Převisy, velké úhly a části visící ve vzduchu

- Přidat rozpustné podpory z všude, kde jsou části visící ve vzduchu, nebo kde je vysoký úhel zkosení.
- Nastavit vyšší detaily a nižší rychlost tisku.
- Hlídat, zda chladicí fény zbytečně nestrhávají čerstvé vrstvy proudem vzduchu. [30]

Velké díly

- Zvolit spíše vyšší rozlišení 0,2 a výše.
- Pokud model obsahuje převisy, velké úhly nebo části visící ve vzduchu, je nutné přidat rozpustné podpory.
- Pokud díl leží na úzké hraně, je nutné zvýšit přilnavost parametrem brim.
- Může být použita vyšší rychlost tisku. [30]

Detailní modely

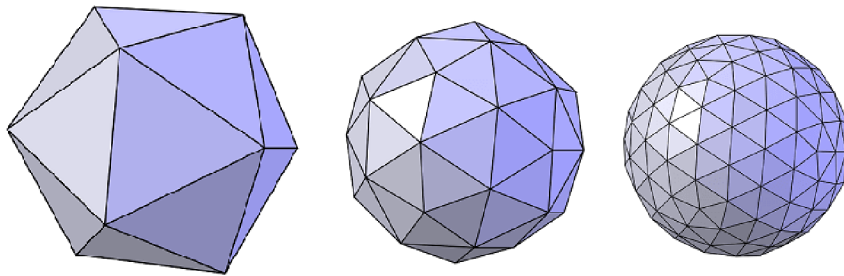
- Zvolit spíše nižší rozlišení 0,15 a méně.
- Plnější výplň modelu 20 % a více.
- Nižší rychlost tisku.
- V případě rozměrných modelů je nutné model nařezat na více dílů tak, aby se dal zpětně snadno slepit. [30]

Model stojící na úzké nebo kulaté ploše

- Pokud je možnost, tak převrátit na širší nebo hranatou část.
- Pokud nemáme žádnou optimální stojnou hranu, tak je nutné model rozříznout na dvě části. [30]

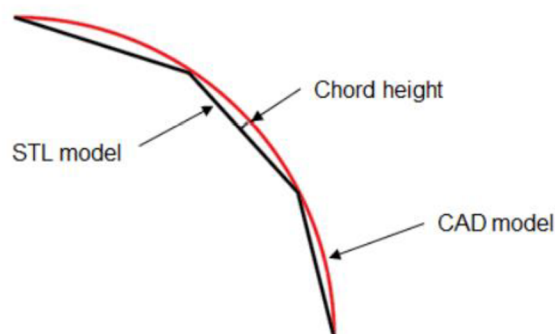
3.2 KONVERZE DAT

Stěžejní krok výrobního postupu je konverze modelu do STL formátu, popřípadě jakéhokoliv jiného formátu pro 3D tisk (AMF, OBJ atd.). Tiskový soubor přenáší informace z CAD softwaru do tiskárny, přičemž rozdíl mezi jednotlivými druhy formátu je v množství přenesených informací. Nejpoužívanějším formátem současnosti je bezesporu STL formát, který přenáší pouze geometrii modelu. Pro popis struktur těles používá trojúhelníkovou síť. Při exportu modelu z CAD můžeme modifikovat rozlišení této sítě. Rozlišením sítě se rozumí počet prvků popisující dané těleso. Zvýšením rozlišení sítě se docílí lepšího popisu povrchu, viz obrázek 6, ale také se zvýší datová velikost souboru. V případě exportu modelu v malém rozlišení, bude síť viditelně rozdělena na jednotlivé prvky, tento jev není žádoucí, síť je nekvalitní. [31] Tento problém je vhodné řešit zvýšením rozlišení až po maximální efektivní mez, od této meze není vhodné dále zvyšovat počet prvků sítě, jelikož nedojde k dalšímu vylepšení povrchu, ale pouze k zvětšování datové velikosti souboru, což má za následek složitější zpracování samotného procesu výroby. [31], [32], [34]



Obrázek 6: Srovnání modelu dle úrovně rozlišení sítě [32]

CAD aplikace používají různé způsoby definování rozlišení, například tzv. chord height a úhlovou toleranci. Chord height udává maximální vzdálenost mezi povrchem původního modelu a povrchem STL modelu, přičemž menší vzdálenost lépe popisuje zakřivení povrchu. Pro volbu optimální hodnoty vzdálenosti se doporučuje rozmezí od 0,001 mm do 1/20 tloušťky tisknuté vrstvy. V tomto rozmezí je zajištěna optimální kvalita pro většinu aplikací v oblasti 3D tisku. Zvolení menší vzdálenosti než 0,001 mm nemá na kvalitu tisku žádný vliv, jelikož 3D tiskárny nejsou schopny tak malé detaily vytisknout. [31], [32], [46]



Obrázek 7: Parametr chord height [33]

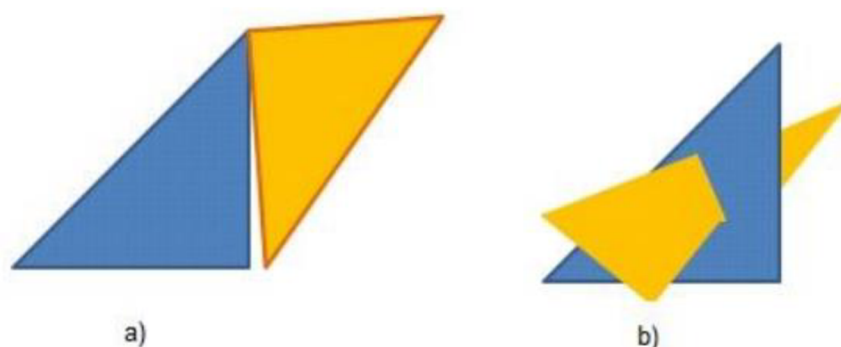
Chord height – výška tětiny

3.3 CHYBY TISKOVÉHO FORMÁTU

Chyby tiskového formátu se detekují v průběhu konverze CAD modelu do STL formátu. Mezi nejčastější chyby řadíme geometrické nepřesnosti, chybějící hrany, chybějící plochy, malé rozlišení a tak dále. [35], [46] Trojúhelníky mají normálové vektory definující vnější a vnitřní strany prvku. Povrch tělesa se skládá z vrcholů, hran a stěn. Správně převedený model je složen z uzavřených, spojených a nepřekrývajících se trojúhelníků, kde je každá hrana součástí dvou trojúhelníků. [35], [36], [37]

Nejčastější problém identifikován při převodu dat jsou chybějící trojúhelníky v síti. K této chybě dochází v případě, že sousedící trojúhelníky nesdílí dva společné vrcholy, což vede ke vzniku děr. Další chybou může být nesouhlasná orientace normálových vektorů. [35], [46]. Normálový vektor definuje stranu, na které bude docházet k další dodávce materiálu, přičemž někdy může dojít k tomu, že normálový vektor přemění svou orientaci. Tiskárna má posléze problém identifikovat vnitřní a vnější strany modelu. V případě, že nejsou všechny hrany trojúhelníků řádně spojeny, dochází ke vzniku mezer a překrývajících se povrchů. [35], [36], [38]

Problém s protínajícími se trojúhelníky se objevuje, když se dvě stěny překrývají nebo křížují jedna druhou, viz Obrázek 8. K překrytí nebo protínání dochází z důvodu složité vnitřní geometrie modelu. Obvykle je tato chyba lehce opravitelná sjednocením nebo odstraněním vadných trojúhelníků pomocí specializovaných softwarů. Nedojde-li k opravě chyby, prodlouží se doba tisku a zvýší se jeho náklady kvůli vyšší spotřebě materiálu. [35], [36], [38]



Obrázek 8: Chyby triangulární sítě a) mezera b) překrývající se trojúhelníky [39]

Poslední problém je vznik hran, které spojují více než dvě stěny modelu. Tento typ problému lze klasifikovat dvěma způsoby. První je přidáním povrchu uvnitř modelu, čímž ho rozdělí na dvě části a druhým typem je sdílení jedné hrany dvěma tělesy. Takto chybný design nezpůsobuje problémy během rozvrstvení modelu, avšak je nutné mu předejít, jelikož v případě sdílené hrany dvěma tělesy není jasné, zda mají být tyto tělesa spojeny nebo tisknuty každé zvlášť. [37], [38]

3.4 SLICOVÁNÍ (VRSTVENÍ)

Slicování je proces převodu 3D modelu na strojový kód G-code. K převodu slouží software zvaný obecně slicer. Model se rozřeže na vodorovné vrstvy a tyto vrstvy se převedou na textové souřadnice pohybů pro FFF tiskárny nebo na obrázek s maskou dané vrstvy pro SLA tisk. Mezi nejznámější slicery pro FFF tiskárny patří PrusaSlicer, Simplify3D a Cura. Vstupem programu je nejenom 3D model, ale také celá řada nastavení, která mají vliv na kvalitu, pevnost a dobu tisku. Modely je většinou možné také modifikovat v rozsahu zmenšování či zvětšování, otáčení dle os, řezání či rozdělování na separátní objekty. V neposlední řadě slouží slicer také k tomu, abychom si jednotlivé 3D modely rozmístili po tiskové ploše. Slicer a jeho správné nastavení je stejně důležité jako kvalita a mechanické zpracování samotné tiskárny. Slicerů existují desítky, každý má své přednosti a nedostatky. Téměř každý solidní výrobce 3D tiskáren má svůj slicer, do kterého dodává profily pro svoje tiskárny. [29]

V základním nastavení sliceru je potřeba nastavit základní informace týkající se procesu samotného 3D tisku. Každý výrobce filamentu udává teplotní rozsah nejvhodnější pro určitý typ materiálu. V tomto rozmezí je potřeba se udržovat při nastavení teploty podložky a filamentu. Úpravami teplot se budou měnit především vizuální vlastnosti výtisku. Teplota trysky se pohybuje nejčastěji v rozmezí od 200 °C do 240 °C a teplota podložky od 60 °C do 100 °C. Dalším krokem je nastavení perimetru tzn. obvodové stěny modelu. Výsledná stěna bude mít šířku přibližně počet perimetrů \times průměr trysky. Nastavení plné vrstvy umožňuje nastavit počet spodních a vrchních vrstev modelu, které budou plné. Nastavení výplně ovlivňuje dobu tisku, pevnost výtisku a spotřebu filamentu. Nastavuje se procentuální hodnotou – 0 % pro duté objekty a přibližně (10–20) % pro běžné tisky. Je také možnost si zvolit vzor výplně (každý slicer nabízí různé vzory). Zvolením parametru přemostování lze tisknout bez podpěr. Dochází k tahání tiskových vláken mezi dvěma body o stejné výšce. Most tedy musí být nutně rovnoběžný s tiskovou plochou. U úzkých a vysokých modelů nesmíme zapomenout na chlazení modelu, obzvláště v případech, kdy je tiskový čas vrstvy velmi malý a předchozí vrstva se nestíhá dostatečně samovolně ochladit a ztuhnout. [29]

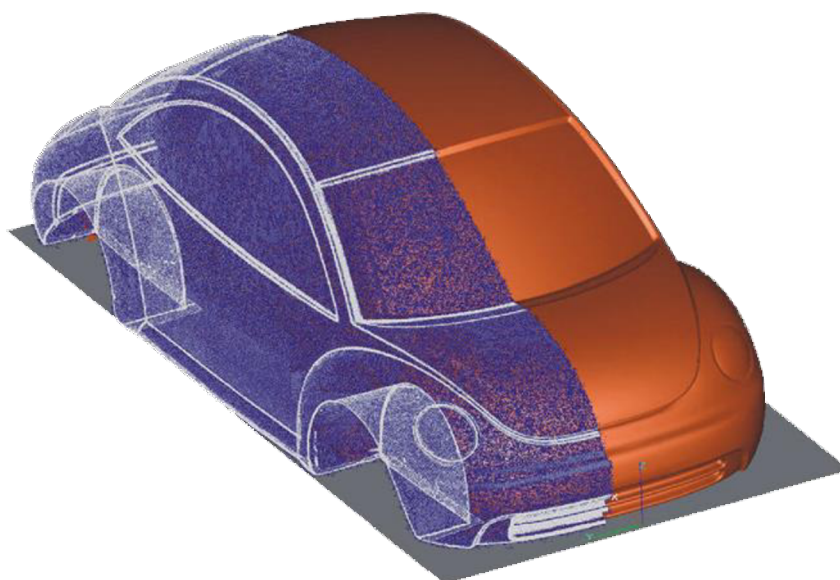
Pokročilá nastavení nabízí celou řadu dalších nastavitelných parametrů, jako jsou rychlosti tisku perimetrů, výplní, mostů a tak dále. Tato nastavení již bývají odladěná a dostupná v podobě tiskových profilů od výrobce tiskárny. Proto do nich ve většině případů není potřeba vůbec zasahovat. [29]

3.5 REVERSE ENGINEERING

Reverzní inženýrství nazýváno také jako zpětné inženýrství, je proces získávání informací o reálné součástce, za účelem sestrojení nebo přetvoření podobně fungujícího modelu. Využívá se pro digitalizaci tvarově složitějších součástí, nebo například u dílů jejichž postup výroby není dohledatelný. Nahrazuje tvorbu v 3D modelářských aplikacích v případech, kdy nelze zajistit přesné odměření modelu díky jeho tvarové složitosti. Získávání dat 3D modelu probíhá opačným sledem operací než u klasické výroby. Využití této technologie lze zpozorovat ve strojírenství, letectví, stavebnictví a mnoho dalších oborů. [20], [21], [39]

Digitalizace modelu probíhá na principu snímání jednotlivých bodů na digitalizovaném objektu. Body takto získané, tvoří celek nazývaný jako „mrak bodů“ viz obr. 9. Tento „mrak bodů“ je nutno následně upravit pomocí speciálních systémů na plošný nebo objemový model. Úprava výsledných dat závisí zejména na kvalitě získaných dat, pokud se vyskytuje v systému velký počet chyb jako například dislokace bodů, chybějící hrany, chybějící plochy nebo deformované prvky, bude nezbytné provést optimalizaci digitalizace součástí. Kvalitu výsledného modelu ovlivňuje tvarová složitost součástí, velikost součástí a použitá metoda digitalizace. [20], [21]

Vstupní informací pro speciální řešiče jsou data ve formátu STL, které obsahují již zmiňovaný „mrak bodů“ (entity). Z těchto entit je možné nadefinovat křivky, ze kterých lze následně vytvořit plochy. Pomocí vhodných funkcí programu pak vzniká finální 3D model naskenované součásti. Upravený model je možno následně vyexportovat ve výstupních formátech jako např. IGES, STEP, nebo STL. Model může být následně zařazen klasicky do výrobního řetězce, jako by vznikl z konstrukce. [20], [21]



Obrázek 9: 3D Scan vytvořený pomocí reverse engineering [39]

4 TECHNICKÉ ZPRACOVÁNÍ KOMPONENTY PRO 3D TISK

V této části diplomové práce nejprve představím portfolio činností oddělení centrálního technického servisu v rámci kooperace s výrobními závody Škoda Auto a.s. (ŠA). Charakterizují použité 3D tiskárny (Markforged X7, PRUSA MK3S) a definují konstrukční řešení s výrobním postupem konkrétního funkčního prototypu. Součástí této kapitoly bude podrobný popis přípravných operací, stanovení materiálových charakteristik a MKP analýza zvolené komponenty.

4.1 PŘEDSTAVENÍ PORTFOLIA ČINNOSTÍ A PROJEKTŮ CENTRÁLNÍHO TECHNICKÉHO SERVISU

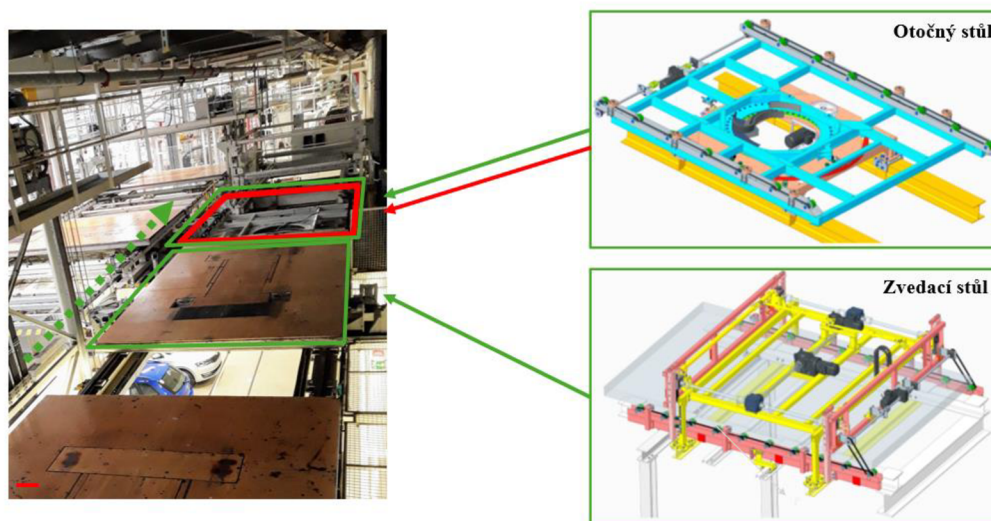
Hlavním posláním oddělení centrálního technického servisu je podpora při řešení havárií ve výrobních závodech Škoda Auto a.s. Útvar se zabývá zejména interními opravami a údržbou strojních zařízení včetně konstrukčního zpracování a technologické přípravy zakázek (příprava materiálu a kooperací) a v neposlední řadě operativním odstraňováním poruch a havárií s nepřetržitou pohotovostí.

Detailní portfolio činností:

- interní opravy a údržba strojních zařízení včetně konstrukčního zajištění
- externí opravy a rekonstrukce strojních zařízení
- metodika a standardizace
- speciální diagnostika a metrologie
- systémová podpora údržeb
- revize a servis vyhrazených technických zařízení
- péče o dlouhodobý majetek (vyřazování, prodej)
- technická evidence strojních zařízení
- správa ploch, metodika a servis úklidu
- operativní servis infrastruktury budov a staveb

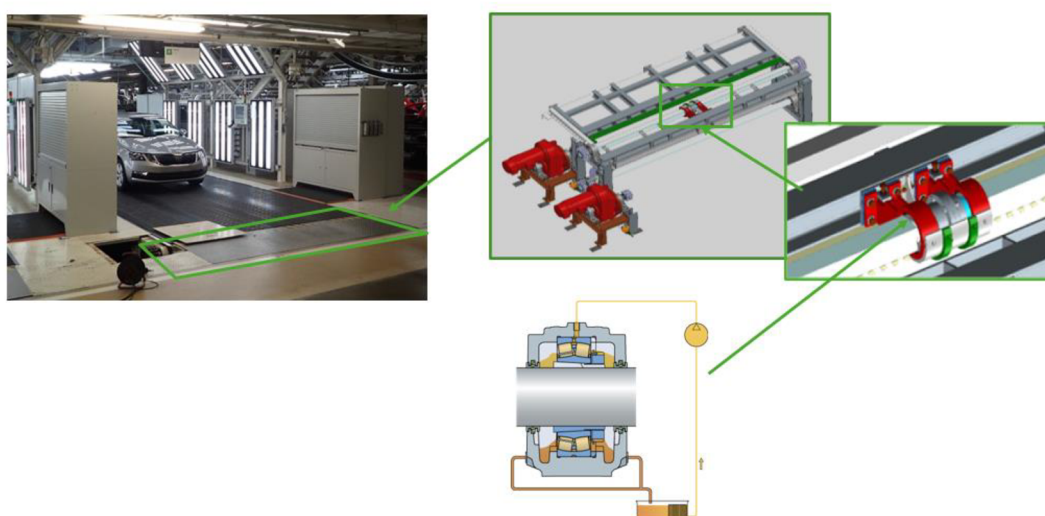
Projekty PSZ

- 1) Zrychlení zpětné větve prázdných skidů, inovativním řešením zvedacího a otočného stolu dopravníku skidů v budově montáže M1 (SCALA a KAMIQ). Sdružení dvou operací zvedání a otáčení skidu do jedné souvislé operace, uspořilo devět sekund v taktu vrácení skidů. Výsledku bylo dosaženo novým konstrukčním řešením systému unikátním nasazením lineárních převodovek na zvedací stůl a implementace přesného polohovacího systému otočného stolu doplněný o příslušný softwarový upgrade.



Obrázek 10: Projekt zvedacího otočného stolu

- 2) Integrace automatického mazání na plastových pásech v budově montáže M13 (OCTAVIA a ENYAQ). Řešeným problémem bylo časté opotřebení ložisek válců, které se při opravě kvůli komplikované okolní zástavbě těžce demontují. Díky doplnění systému automatického mazání ložisek jak hnaných, tak hnacích hřídelů, se podařilo zajistit spolehlivý chod bez nároku na časté operativní či preventivní opravy zařízení. Výsledkem je tím pádem i delší životnost mechanických dílů celé soustavy.



Obrázek 11: Integrace automatického mazání

3) Projekty řešené technologií kompozitního 3D tisku:

Z důvodu horších mechanických vlastností kompozitního materiálu v porovnání například s ocelí nemůže být logicky uspokojena všechna poptávka z výroby ŠKODA AUTO, pokud se tedy jedná o robustní vysoce namáhané součásti jako tomu bylo například v již zmíněném projektu zvedacího otočného stolu, používají se pevnější a houževnatější materiály.

Kompozitní tiskárna Markforged je v oddělení PSZ stále ve fázi vývoje a postupnými kroky dochází k implementaci technologie do výroby. Nejčastěji řešenými a realizovanými projekty pro kompozitní 3D tisk jsou součásti podrobené nízkému stupni namáhání jako například podpora zadního tlumiče a pružiny pro montáž M1 (SCALA a KAMIQ) tištěná z materiálu nylonu v kombinaci s výztuží kevlaru viz Obrázek 12 níže.



Obrázek 12: Podpěra zadního tlumiče (SCALA a KAMIQ)

Na Obrázek 13 je zobrazen výtisk sestavy přízvedáče skidů, tento přípravek se používá jako upínací segment vymezování přesné polohy příčky skidu, použitým materiálem pro tento přípravek byl nylon v kombinaci s karbonovým vláknem.



Obrázek 13: Upínací segment vymezování polohy příčky přízvedáče skidů

4.2 POUŽITÉ TISKÁRNY A JEJICH MATERIÁLOVÉ PORTFOLIO

V této části diplomové práce budou definovány použité 3D tiskárny a charakterizované jejich materiálové portfolio jak pro výrobu prototypů, tak pro finální výtisk.

4.2.1 PRUSA MK3S MMU2S

Pro vytvoření prvotních prototypů byla z důvodu nízkonákladové výroby použita tiskárna PRUSA MK3S doplněna o MMU2S (multimateriálový upgrade druhé generace). Tato stolní tiskárna je určena pro tisk plastových filamentů nejčastěji o průměru 1,75 mm. Tiskárna je vybavena senzorem přítomnosti a pohybu vlákna, který v případě nedostatku vlákna upozorní uživatele, aby provedl výměnu cívky. Dalším důležitým prvkem je detektor ucpané trysky a funkční prvky automatické kalibrace.

Tiskárny Prusa jsou navíc kompatibilní s různými uživatelsky přívětivými softwary pro přípravu dat a odladění tištěných modelů jako jsou například Cura, PrusaSlicer, Simplify 3D a tak dále. [29]

4.2.2 MATERIÁLOVÉ PORTFOLIO PRUSA MK3S

PLA (kyselina polymléčná) je bioplast a termoplast vyrobený z přírodních materiálů, jako je kukuřičný škrob a cukrová třtina. Jeho největší výhodou je snadný tisk, téměř všechny 3D tiskárny jsou schopny tento materiál vytisknout, jelikož není tolik závislé na okolním prostředí, nevyžaduje například vyhřívané lůžko. Dají se tisknout vysokou rychlostí a nevyžadují obal. PLA je ve srovnání s jinými materiály velmi levný, takže je skvělou volbou pro výrobu prototypů pro výrobce s omezeným rozpočtem. Obsahují širokou škálu barev, jsou netoxické, biologicky odbouratelné a šetrné k životnímu prostředí, protože pochází z rostlin. Nevýhodou PLA je křehkost a nízká pevnost v ohybu. Kromě toho že PLA není nejsilnějším materiálem, není ani příliš tepelně odolný, mají tendenci se za tepla deformovat.

PETG je velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností. PETG má univerzální využití, ale je zejména vhodný pro tisk mechanických částí. Je možné jej použít v interiérech i exteriérech. PETG má velmi malou tepelnou roztažnost, na podložce se tedy nekroučí, tudíž není problém s tiskem velkých modelů. Tento materiál je stejně snadné tisknout jako PLA, ale na rozdíl od PLA má mnohem lepší mechanické vlastnosti. PETG je navíc houževnatý, tak akorát pružný a díky tomu se při namáhání často jen dočasně prohne, což zabrání prasknutí. Díky kvalitní tepelné odolnosti je možné výtisky z PETG použít i pro venkovní užití.

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) je amorfni termoplast odolný vůči mechanickému namáhání. Jedná se o houževnatý průmyslový kopolymer odolný vůči kyselinám a vysokým teplotám, avšak zpracovávat ho lze do teploty 280 °C a používat do teploty 105 °C. Má vysokou odolnost proti nárazu, vyznačuje se vysokou pevností v tahu a tvrdostí povrchu. Jejich výhodou je taky poměrně nízká cenová náročnost. Využívá se pro výrobu lahví, nábytků, cestovních kufrů nebo kostek LEGO. [29]

4.2.3 MARKFORGED X7

3D tiskárna Markforged X7 je průmyslová tiskárna umožňující tisk plastových materiálů společně s výztuží, v předem stanovených vrstvách výtisku. Vybavena je zesíleným přesně obroběným portálem s jemně broušeným tiskovým ložem, které lze vyjmout s opakovatelností 10 μm . Každý kus hardwaru v systému od trysek až po pracovní desku extruderu je navržen tak aby odolal opotřebení nylonovými vlákny vyztuženy mikro karbonovými vlákny a udržovali vysokou kvalitu tisku s co nejdelší životností. Využívají technologii vytvrzování nylonu spojitými vrstvami skelných, karbonových případně kevlarových vláken. Umožňuje tisknout součásti s vyšším poměrem pevnosti vůči hmotnosti, než je například hliník. Pro zabezpečení nejvyšší kvality a přesnosti jsou vybaveny laserovou kontrolou na úrovni mikronů spolu s uzavřenou tiskovou komorou pro zajištění teplotní stability tiskového procesu. Skenovací laser na tiskové hlavě umožňuje tiskárně dynamicky upravovat první vrstvy tisku pro dosažení dokonalé přilnavosti k loži a kontrolovat výrobní přesnost dílu po tisku.

Kompozitní tiskárny Markforged umožňující tisknout díly vyztužené nekonečnými vlákny jsou využívány v automobilovém, leteckém, zdravotnickém, vojenském, i kosmickém průmyslu jako alternativa výroby těžkých kovových součástí. [18]



Obrázek 14: Markforged X7 [18]

TECHNICKÁ SPECIFIKACE	
Technologie	FFF, CFF
Rozměry tiskárny	584 x 493 x 914 mm
Pracovní prostor	330 x 270 x 200 mm
Hmotnost	48 kg
Pracovní lože	přesnost 80 µm
Laser	průběžná kontrola, aktivní kalibrace tisku, vyrovnání lože
Systém extruze	detekce přítomnosti plastu a vláken
MATERIÁLY	
Plasty	Onyx, Onyx FR, Onyx ESD, Nylon White
Výztužná vlákna	Carbon fiber, fiberglass, Kevlar®, HSHT fiberglass
Pevnost v tahu	Až 800 MPa (25.8x ABS, 2.6x 6061-T6 Aluminum)
Modul v tahu	Až 60 GPa (26.9x ABS, 0.87x 6061-T6 Aluminum)
SOFTWARE	
Eiger cloud	Správa součástí, strukturalizace součástí slicování/vrstvení, ekonomické zhodnocení

4.2.4 MATERIÁLOVÉ PORTFOLIO MARKFORGED

Onyx TM

Nejpoužívanější materiál od Markforged. Jedná se o nylon plněný mikrokarbonovými vlákny zajišťující lepší odolnost. Při užití materiálu Onyx TM jsou výsledkem všestranné a přesné díly s téměř bezchybnou povrchovou strukturou. Nabízí vysokou pevnost, houževnatost a chemickou odolnost.

Onyx FR

Varianta Onyxu odolná proti hoření. Tento materiál je považován za V-0 (samozhášecí) při tloušťce větší nebo rovné 3 mm. Může být vyztužena jakýmkoli kontinuálním vláknem a je kompatibilní se všemi průmyslovými 3D tiskárnami. Jsou používány účelově pro požadavky automobilového a leteckého průmyslu.

Onyx ESD

Silnější, tužší a odolnější varianta Onyxu pro průmyslové aplikace. Jedná se o statický materiál skládající se ze směsi nasekaného nylonu s uhlíkovými vlákny. Nabízí stejnou kvalitu tisku jako Onyx TM, aby splňoval nejpřísnější požadavky výrobců. Navržený pro úzký rozsah povrchového odporu. Je vhodný pro pokročilé výrobní aplikace od montáže elektroniky po průmyslovou robotiku a automatizaci procesů.

Nylon

Nylon je neplněný termoplast. Základní řetězec tohoto polymeru je tvořen peptidickými vazbami, proto jsou také často označovány jako polyamidy. Je to neabrazivní materiál, který je skvělý pro ergonomické povrchy a uchycení dílů, u kterých je riziko snadného poškození. Dá se natírat nebo barvit. [18]

Charakteristické vlastnosti:

- vysoká pevnost za sucha i za mokra
- vysoká otěruvzdornost
- vysoká pružnost
- vysoká biologická odolnost
- stálost vůči chemickým činidlům, hlavně alkáliím
- nízká specifická váha, velký specifický objem
- velmi snadné udržování (praní, sušení)
- nízká hygroskopičnost
- nepříjemný studený omak hladkého hedvábí (odstraňuje se tvarováním vlákna)
- vznik statické elektřiny při výrobě i použití (ruší se antistatickými preparacemi)
- velmi dobrá barvitelnost závisí na typu vlákna [18]

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti matrice [8]

MATRICE			
	Onyx [MPa]	Onyx FR [MPa]	Nylon [MPa]
Tahový modul	1400	1300	1700
Ohybový modul	3,6	4	1,4
Mez kluzu v tahu	36	29	51
Mez pevnosti v tahu	30	58	150
Mez pevnosti v ohybu	81	79	50

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti výztuže [8]

VÝZTUŽ				
	Karbon	Kevlar	Sklo	HSHT
Tahový modul	60000	27000	21000	21000
Ohybový modul	51000	26000	22000	21000
Tlakový modul	54000	28000	21000	21000
Mez pevnosti v tahu	800	610	590	600
Mez pevnosti v ohybu	540	240	200	420
Mez pevnosti v tlaku	320	97	140	192

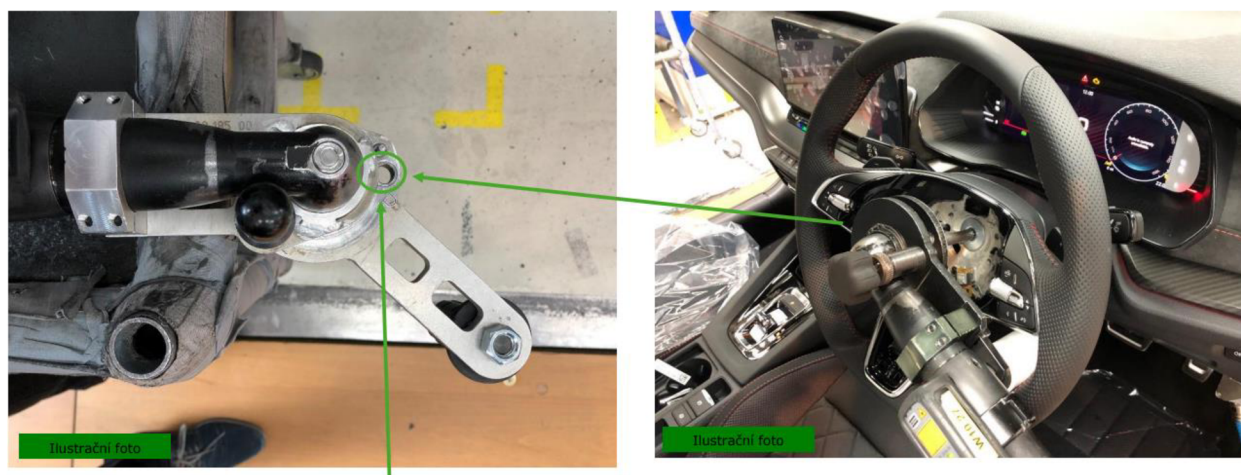
4.3 NÁVRH ŘEŠENÍ ZÁCHYTU MOMENTU

Řešenou problematikou praktické části diplomové práce je řešení záchytu momentu pro montážní halu M13 (Octavia + Enyaq). Montážní hala M13 byla založena v roce 1996 s výrobní kapacitou okolo 300 vozů denně, aktuálně je proces montáže strukturován do 16 mistrovských úseků a v běžném provozu dochází k produkci 1300 vozů za den. Běžný takt provozu je stanoven na 57 s, přičemž celková doba výroby vozů je okolo 5,5 h. Jedná se o jednu z mála montáží v Evropě, kde se na jednom místě montuje jak vůz se spalovacím motorem, tak i čistě elektronický vůz.

Operátoři výroby se obrátili na oddělení PSZ s požadavkem na nové inovační řešení přípravku záchytu momentu především z důvodu velké hmotnosti této komponenty a s tím spojenou složitou manipulací. Montážní přípravek je přichycen k elektronickému utahovacímu zařízení a zajišťuje záchyt momentu utahované matice k tyči řízení uložené rotačně volně. Záchyt momentu musí být konstruován tak, aby bylo možné utahovat jak pravotočivé, tak levotočivé řízení. Přípravek je vyráběn ze slitiny hliníku klasickými konvenčními metodami obrábění (soustružení + frézování). Tento přípravek je součástí utahovacího zařízení pro montáž volantu do modelů Octavia a Enyaq. Předepsaný utahovací moment šroubového spojení volantu a tyče řízení je 40 Nm.

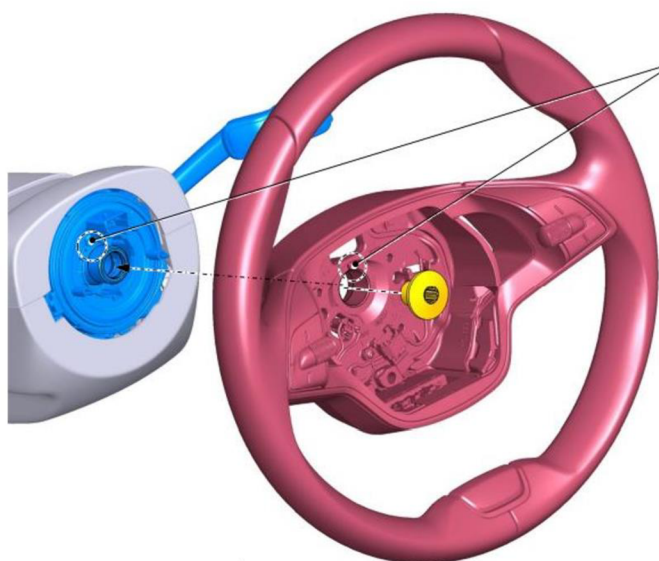


Obrázek 15: Utahovací zařízení pro montáž M13



Obrázek 16: Utahovací přípravek

Sloupek řízení musí být nastaven do nejvyšší polohy, otáčením tyče řízení momentem 40 Nm bez podpory posilovače se najede na doraz systému řízení. Z této pozice začíná počítání celkového úhlu otočení, přičemž na druhý koncový doraz převodky řízení se najede taky momentem 40 Nm, rychlost otáčení při nastavování může být až 200°/s. Přitom je třeba dbát na to, aby vrcholy momentu, způsobené například setrvačností pohonu v dorazech, nebyly přeneseny na systém řízení, pokud by tomu tak bylo, tak musí být odstraněny vhodnými opatřeními například konstrukčně třecí spojkou mezi elektromotorem a nastavcem ke sloupku řízení. Střed řízení se nastaví tak, že se polovina celkového zjištěného otočení a konstantní přetáčecí úhel otočí zpět. Tření v systému způsobí nejprve zkroucení torzní tyče dřívě, než se začne pohybovat převodovka řízení. Úhel přetočení musí zjistit plánování z řady měření. Po nastavení středu řízení se provede vyražení důlku na celé tyče řízení. Volant, je nutno namontovat tak aby středové označení lícovalo s důlkem na sloupku řízení, protože tato pozice je zohledněna při seřizování nápravy.



Obrázek 17: Nastavení středu řízení

4.4 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

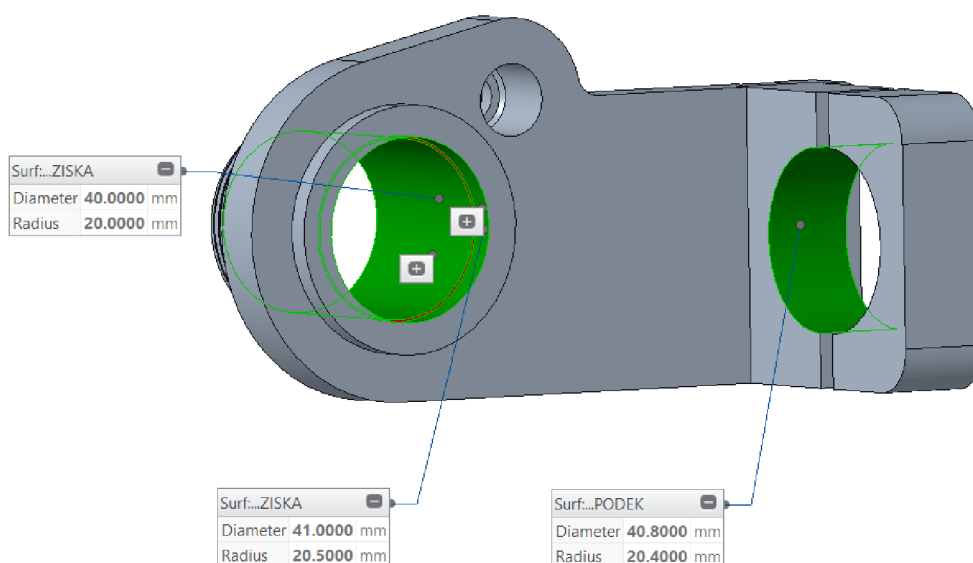
Hlavními zdroji pro konstrukční zpracování tohoto projektu byla výkresová dokumentace sestavy původní komponenty a samotný přípravek utahovacího momentu. Bohužel se z interního systému nepodařilo získat původní modely v potřebném formátu, pouze sestavu ve formátu STEP s nekompletní cestou k jednotlivým konstrukčním prvkům celé komponenty, s nefunkčními vazbami, komponenty se zobrazovali jako jeden prvek. Výkres nebyl výrobní, nýbrž výkres sestavy bez kótovaných parametrů, všechny tyto rozměry bylo nutné odměřit a analyzovat svépomocí. Celý koncept konstrukčního řešení bylo tedy zapotřebí vytvořit úplně celý znovu.

4.4.1 PEVNÉ RAMENO A ÚCHYT UTAHOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Před samotným začátkem konstrukce je zapotřebí určit referenční parametry, které musí zůstat neměnné. Základními referenčními parametry jsou vnitřní rozměry pouzdra a úchytu přípravku, které musí kopírovat vnější průměr utahovacího zařízení pro zajištění dokonalých styčných ploch. Tyto rozměry jsou definovány v tabulce níže a na obrázku jsou zeleně vyobrazeny příslušné plochy v podsestavě komponenty.

Tabulka 4: Referenční parametry

Vnitřní průměr pouzdra	40 mm
Odsazený vnitřní průměr pouzdra	41 mm
Vnitřní průměr držáku	40,8 mm
Rozteč vnějšího odsazení pouzdra od středu vnitřního průměru držáku	23,6 mm



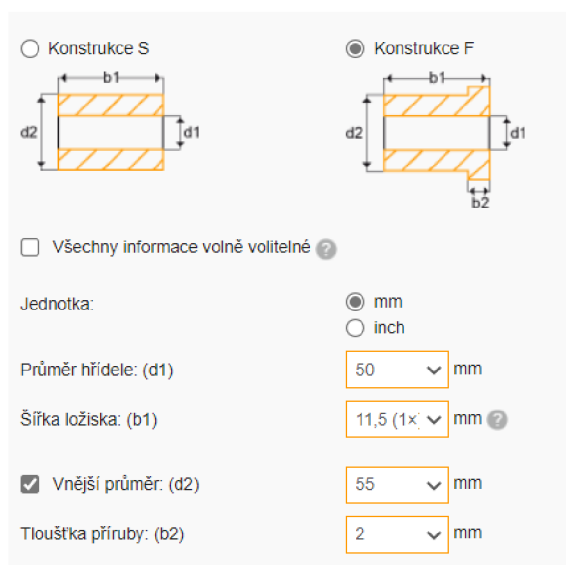
Obrázek 18: Referenční parametry

4.4.2 POUZDRO A KLIZNÉ LOŽISKO

Kromě již zmíněných referenčních parametrů vnitřních průměrů pouzdra, které jsou odvozeny od samotného utahovacího zařízení, jsme omezeni určitým portfoliem plastových kluzných ložisek. Pro přenos tlakových sil mezi pouzdem a otočným ramenem bylo použito plastové kluzné ložisko od firmy IGUS. Při výběru muselo být bráno v potaz omezené množství rozměrových variant ložisek. Z konfigurátoru IGUS byly zvoleny rozměrové parametry ložiska. Z důvodu snížení tření kontaktních ploch byla zvolena konstrukce F (kluzné ložisko se sražením) znázorněna na Obrázek 195. Zvolený plastový materiál IGLIDUR J, je charakteristický nízkým koeficientem tření při suchém provozu a velmi nízkým efektem drhnutí. Podrobnou materiálovou charakteristiku si dodavatel kluzných ložisek chrání, pro konstrukční návrh jsou však podstatné zejména mechanické vlastnosti popsané v tabulce níže.

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti kluzného ložiska[40]

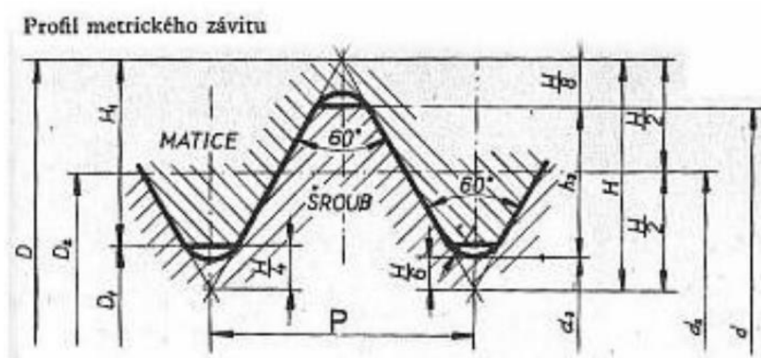
Mechanické vlastnosti kluzného ložiska IGLIDUR J	
Dynamický koeficient tření	0,06 – 0,18
Mez pevnosti v tahu	73 [MPa]
Mez pevnosti v tlaku	60 [MPa]
Maximální povrchový tlak	35 [MPa]
Maximální obvodová rychlost	1,5 [m/s]
Maximální dlouhodobá teplota	90 °C
Minimální aplikační teplota	-50 °C



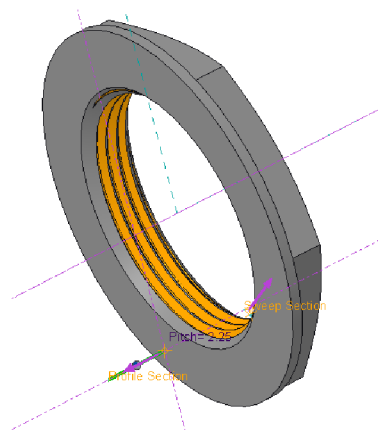
Obrázek 19: IGUS konfigurátor s parametry kluzného ložiska [40]

Průměr a délkové rozměry navazujícího sražení se odvíjí od tloušťky pevného ramena. Tloušťka pevného ramena musela být proti původní variantě zesílena z důvodu horších mechanických vlastností plastového materiálu.

Pouzdro je zakončeno závitem pro matici přibližující se normativu metrického závitu M50, závit byl modelován ručně jelikož funkce Cosmetic Thread je použitelná pouze v případě výroby pomocí klasických konvenčních metod kde stačí operátorům u stroje výrobní výkres s normativem, průměrem, stoupáním a délkou závitu. Jelikož v našem případě budeme vnitřní i vnější závity větší než M8 vytvářet aditivní technologií, bylo zapotřebí využít funkce Helical sweep určené k rotačnímu tažení profilu po křivce s určitým stoupáním viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Při modelování byly dodržovány doporučené parametry výšky zubů, průměry patníků a hlavových kružnic s poloměrem vybrání mezery mezi zuby pro metrické závity viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**



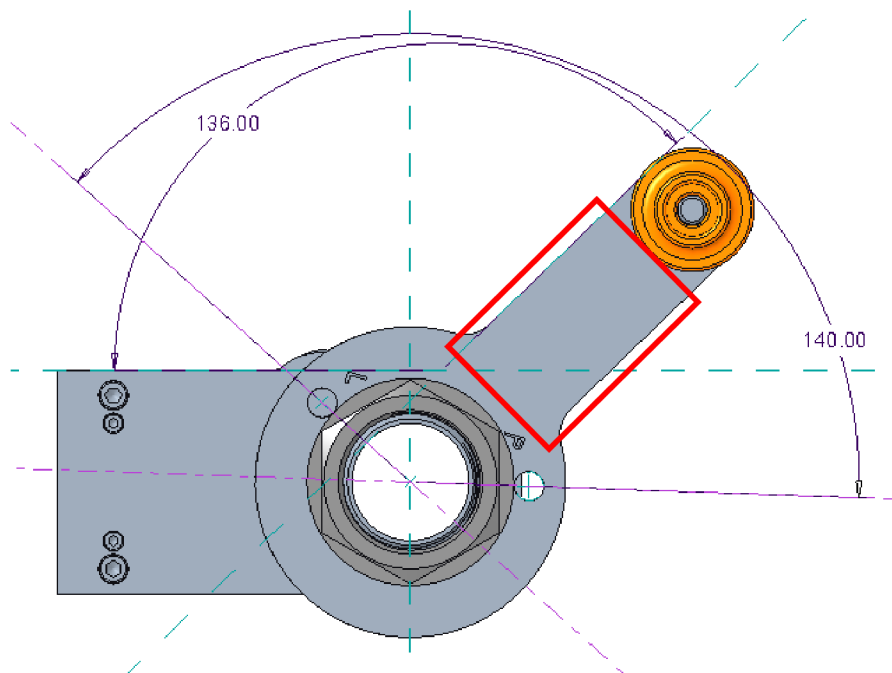
Obrázek 20: Profil metrického závitu [41]



Obrázek 21: Užití Helical sweep při ručním modelování závitu

4.4.3 OTOČNÉ RAMENO

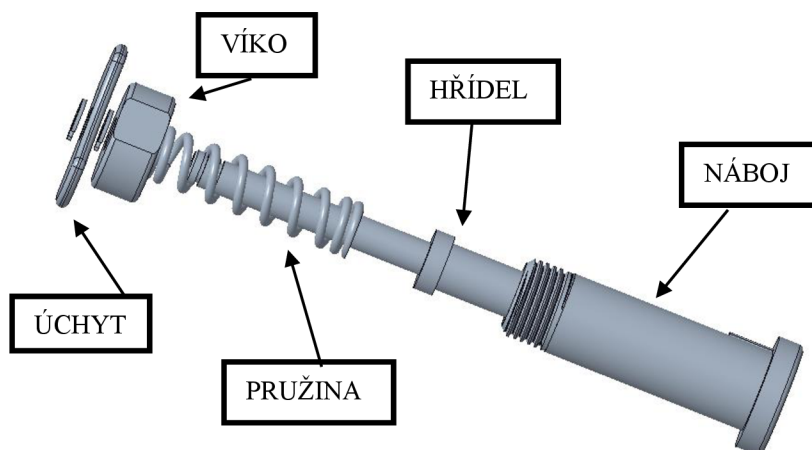
Při návrhu konstrukčního řešení otočného ramena bylo zapotřebí dodržet referenční hodnoty roztečí děr pro kolík zajišťující polohu otáčení ramena a správné polohy aretaci blokovacího hřídele vůči volantu. Úhel mezi pevným a otočným ramenem udávající polohu přikládání utahovacího zařízení byl po konzultaci s operátory montáže upraven na 136° , z hlediska ergonomie je tato počáteční poloha nejideálnější. Jelikož se jedná o jednu z nejvíce namáhaných součástí celé sestavy, proběhlo rovněž zesílení materiálu v kriticky namáhané oblasti znázorněné červeným rámečkem na obrázku níže, tato oblast bude rovněž více vyztužena při nastavování vnitřních struktur.



Obrázek 22: Kritická oblast a referenční parametry otočného ramena

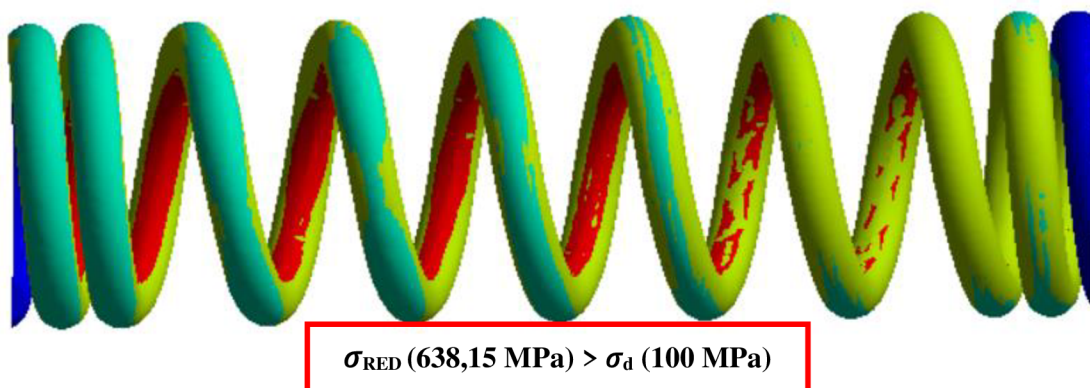
4.4.4 ZAJIŠŤOVACÍ MECHANISMUS

Zajištění správné polohy otočného ramena při utahování pravotočivého, respektive levotočivého řízení, je uskutečněno zajišťovacím mechanismem. Skládá se z náboje, v kterém je s vůlí vložen hřídel s pružinou, náboje se musí nejprve umístit zespu do pevného ramena, v kterém je pomocí pera zajištěno proti otočení a taktěž proti radiálnímu a axiálnímu posuvu. Víko náboje s vyřezaným závitem vymezuje vůli předpětí pružiny v náboji a zabraňuje axiálnímu posuvu v ose Z+.



Obrázek 23: Zajišťovací mechanismus

Původní záměr byl použit plastovou pružinu, jelikož na začátku jsme si definovali, že maximum možných součástí bude vytvářeno z tohoto lehkého materiálu. Při technologickém posouzení výroby jsme však narazili na několik problémů, pružinu nelze vytisknout na 3D tiskárně, museli bychom použít velké množství podpěr a výsledek by přesto nebyl ideální. Alternativou by mohla být metoda SLA neboli laserové spékání pryskyřice, tato metoda pracující principem nanášení jednotlivých vrstev a jejím následným vytvrzením pomocí laseru, není nikterak tvarově omezena. Ovšem po provedení MKP analýzy namáhané pružiny se zadanými materiálovými vlastnostmi spěkaného plastu, nebyla dodržena bezpečnostní podmínka namáhání viz obrázek níže.

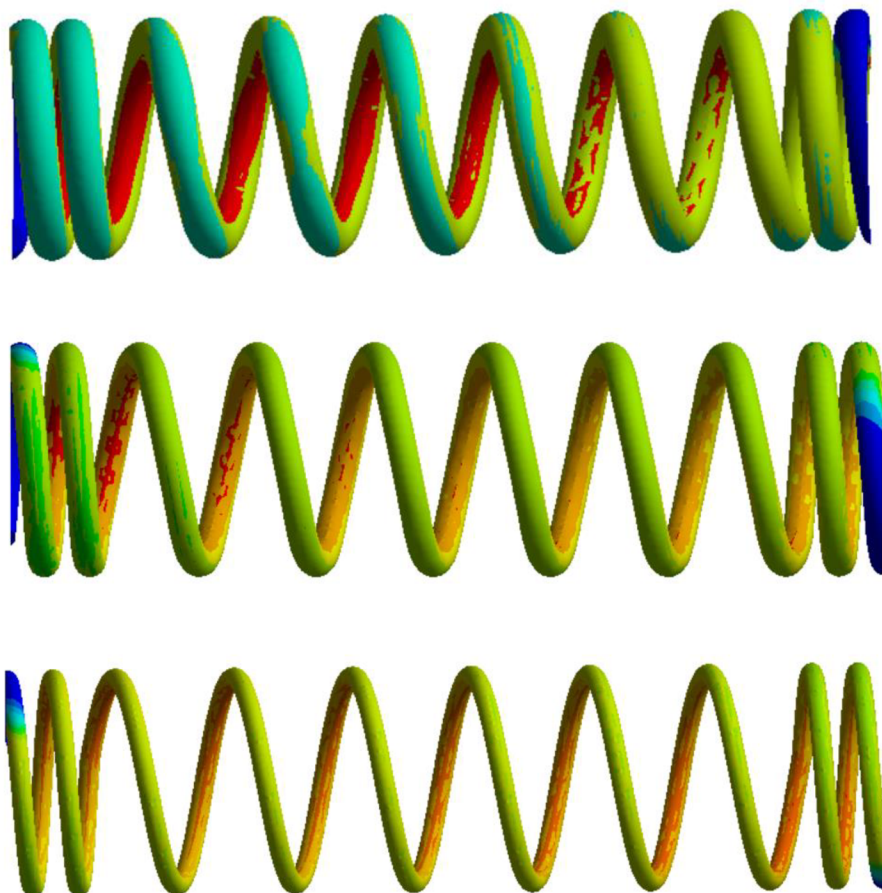


Obrázek 24: Maximální napětí pružiny

Na základě dosažených výsledků bylo nutné použít klasickou pružinovou ocel, té jsem přizpůsobil průměr taženého drátu a délku pružiny, jelikož celkový průměr není díky zástavbě zajišťovacího mechanismu volitelná hodnota. Využil jsem MKP řešič Ansys Workbench s modulem Static Structural. Po nastavení mechanických vlastností jednotlivých materiálů (Plast, Onyx, Pružinová ocel) a vygenerování sítě, jsem nastavil fixní vazbu na jednu plochu konce pružiny a na druhou posunutí o požadovaných 15 mm, což odpovídá v součtu s požadovaným předpětím pružiny hodnotě zasunutí kolíku do otočného ramena. Průměr drátu byl z původních 2 mm zeslaben na 1 mm, při určování zeslabení jsem využil modul Force reaction. Jelikož se zajišťovací mechanismus bude ovládat pouze dvěma prsty, stanovil jsem maximální sílu potřebnou pro vyvinutí stlačení pružiny na maximální hodnotu 25 N a tomu následně přizpůsobil průměr drátu.

Tabulka 6: Výsledky simulační analýzy různých variant pružin

Varianta	\varnothing drátu [mm]	Reakční síla stlačení [N]	Maximální napětí [MPa]	Dovolené napětí [MPa]
V1	2	250,03	1850	1600
V2	1,5	77,35	1310	1600
V3	1	15,38	770	1600

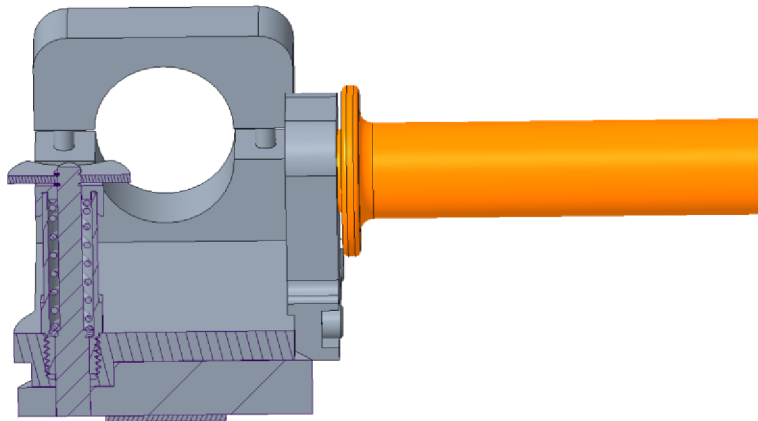


Obrázek 25: Simulace maximálního napětí jednotlivých variant pružin (V1, V2, V3)

4.4.5 VÝVOJ FINÁLNÍHO USPOŘADÁNÍ JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT

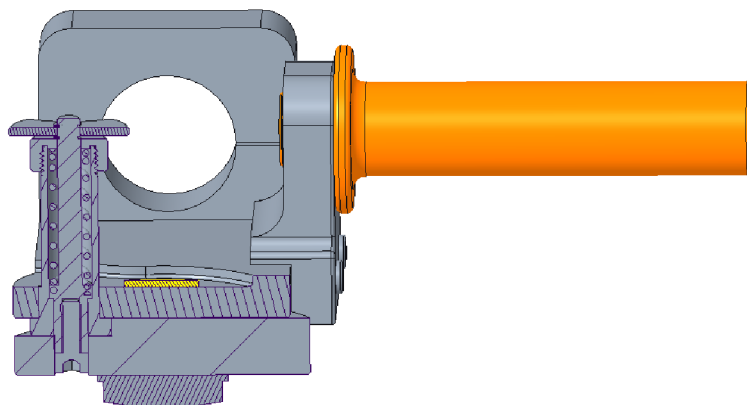
Uspořádání aretačního mechanismu

Prvotní myšlenkou bylo zašroubovat tělo aretačního mechanismu do pevného ramena pomocí metrického závitu a polohu vymežovat odsazením kružnice přímo z pevného ramena s přídatnou hřídelí k úplnému zamezení rotace otočného ramena. Nezbytným zesílením opačné plochy pevného ramena než ta, na které bylo umístěno kruhové odsazení, se stal tento model složitě zpracovatelným aditivní technologií, jelikož ideálním stavem je mít aspoň jednu plochu rovnou, tato plocha se potom při tisku stává základnou celého modelu a vytištěný model je mnohem více stabilní. Z tohoto důvodu bylo nutné kruhové odsazení z pevného ramena odstranit a vyřešit zajištění polohy otočného ramena jiným způsobem.



Obrázek 26: Uspořádání aretačního mechanismu uloženo šroubovým spojením

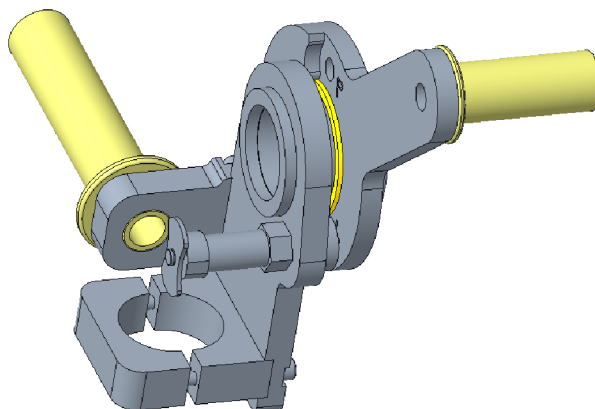
Finálním řešením je tělo aretačního mechanismu vloženo suvně do pevného ramena, axiální posuv je vymezen samotným otočným ramenem. Rotační pohyb těla je zamezen vnějším ozubením. Jelikož se hřídel bude tisknout na výšku výztuhy budou uvnitř modelu tištěny příčně ve stejném směru působí kritická, utahovací, reakční síla, hrozilo by porušení soudržnosti válcového konce hřídele. Na válcový konec hřídele zachytávací rotační pohyb otočného ramena byl tedy z bezpečnostních důvodů umístěn hliníkový šroub M6x16, který funguje jako výztuha nejvíce namáhané části hřídele.



Obrázek 27: Uspořádání aretačního mechanismu uloženo suvně s ozubením

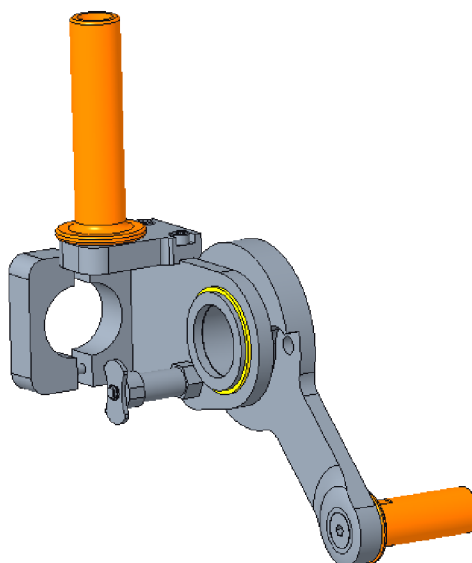
Úprava rotujících komponent

V prvním návrhu bylo kluzné ložisko navrženo tak, aby umožňovalo tření mezi pouzdem utahovacího zařízení a samotným otočným ramenem, znázorněno na Obrázek 28. Takhle zvolené konstrukční řešení, bylo z důvodu dotyku velkých styčných ploch otočného ramena a pevného ramena upraveno.



Obrázek 28: Konstrukční uspořádání s ložiskem pod otočným ramenem

Umístěním kluzného ložiska mezi pouzdro utahovacího zařízení a pevného ramena bylo dosaženo snížení tření mezi otočným a pevným ramenem, jelikož velká styčná plocha byla nahrazena malou odsazenou hranou. Tento způsob konstrukce navíc zabraňuje tření mezi pojistnou maticí a otočným ramenem, jelikož pouzdro rotuje společně s otočným ramenem, nemůže tím pádem dojít k povolení matice. Poslední možností by mohlo být nahrazení kluzného ložiska s jedním odsazením, ložiskem děleným s odsazeními na obou koncích ložiska, tím by bylo dosaženo ještě většího snížení tření styčných ploch. Finální řešení uspořádání je znázorněno na obrázku níže.



Obrázek 29: Konstrukční uspořádání s ložiskem pod pevným ramenem

4.5 NUMERICKÁ SIMULACE

V další části diplomové práce jsou řešeny numerické simulace vybraných komponent a nakonec MKP analýza celé komponenty. Základním principem metody konečných prvků je rozdělení kontinua do určitého množství elementů s určitými rozměry. Hodnoty posuvů se určují na hranicích těchto elementů v tzv. uzlech. Z hranic jednotlivých prvků je tvořena síť jejíž hustota ovlivní přesnost a čas výpočtu. Využívají se zpravidla dvě metody řešení (deformační a silová). U deformační metody bývá vyhodnocován posuv uzlů, u silového řešení proměnná napětí.[42]

Formálně se jedná tedy o převod diferenciálních rovnic na řešení soustav lineárních algebraických rovnic

$$\mathbf{K} * \Delta = \mathbf{F} \quad (4)$$

\mathbf{K} znázorňuje matici tuhosti, Δ vektor neznámých hodnot a \mathbf{F} vektor obecného zatížení. Jednoznačného řešení je dosaženo při $\mathbf{K} \neq 0$, přičemž okrajové podmínky musí být zadány tak aby byl prvek nepohyblivě uložen v prostoru. Správnost výsledku MKP je dáno podmínkami styku, 3D prvky se mohou stýkat pouze v uzlových bodech hranách a plochách, 2D komponenty v uzlových bodech a hranách, 1D prvky pouze v uzlových bodech. [43]

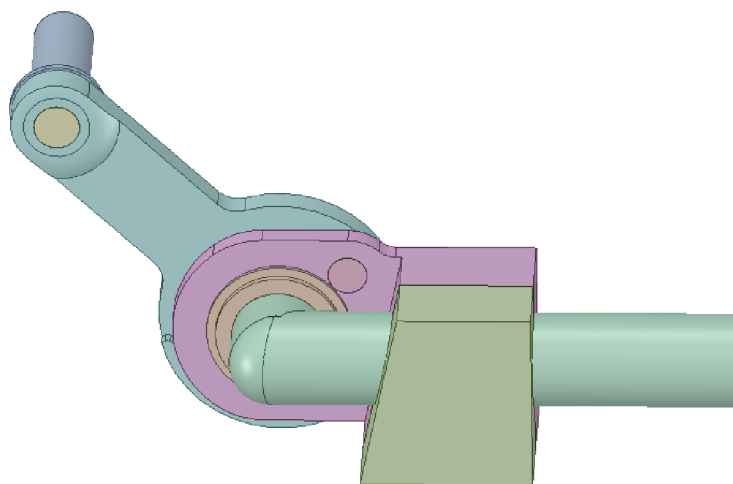
Pro řešení pevnostních analýz jsem využíval výhradně software Ansys Workbench. Ansys má integrován modelář Space Claim, v kterém jsem diskretizoval složitější komponenty, popřípadě rozdělval a vytvářel styčné hrany a plochy. Space Claim umožňuje také tvorbu skořepin s vnitřními strukturami odpovídajícími výslednému výtisku. Pro pevnostní analýzy jsem využil nástroj Static Structural a pro finální optimalizaci topologie Toplogy optimization.

Pracovní postup při řešení MKP:

1. Úprava CAD modelu
2. Síťování modelu (rozdělení kontinua do určitého množství)
3. Volba interpolační funkce a odvození matice tuhosti elementu
4. Určení globální matice tuhosti
5. Nastavení okrajových podmínek
6. Výpočet a získání jednotlivých proměnných
7. Postprocessing (odvození veličin z výsledných posuvů)

4.5.1 STRUKTURÁLNÍ ANALÝZA CELÉ SESTAVY

MKP analýza celé sestavy záchytu momentu musela být značně zjednodušená a diskretizovaná, jelikož mezi jednotlivými komponenty je velké množství kontaktů a tvarových složitostí. Přesnější definice by byla spíše předběžná analýza, v mém případě slouží spíše jako vodítko, na které komponenty se zaměřit a následně podrobněji vyšetřit, popřípadě optimalizovat jejich konstrukční, materiálové nebo strukturální zpracování s ohledem na použitou výrobní technologii 3D tisku. Před importem cad modelu do MKP řešiče, bylo zapotřebí upravit model sestavy, tak aby co nejvíce odpovídal skutečnému výtisku. Při řešení první varianty jsem nastavil skořepiny s vnitřními trojúhelníkovými strukturami o tloušťkách a hustotě odpovídající nastavení v softwaru pro 3D tiskárnu Markforged X7. Při takto zpracované variantě 3D modelů sestavy, nebyl MKP řešič vytvořit kvalitní síť do maximálního počtu elementů odpovídající studentské licenci. Uvnitř jednotlivých modelů se přidáním vnitřních struktur => dalších hran a ploch, komplikuje proces generování sítě. Pro druhou variantu byly vnitřní struktury odstraněny, ale modely ponechány jako skořepiny s tloušťkou odpovídající reálným výtiskům.


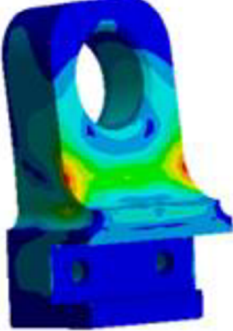
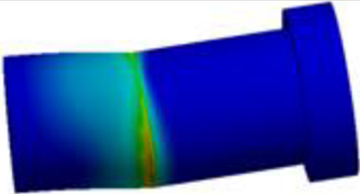
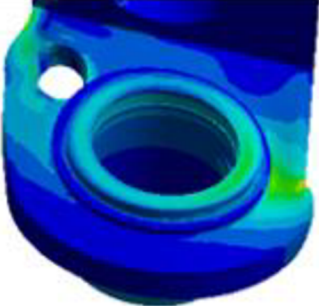


Obrázek 30: Úprava 3D modelu sestavy záchytu

Tabulka 7: Nastavení řešiče strukturální analýzy přípravku celého záchytu momentu

NASTAVENÍ ŘEŠIČE	
Materiál v inženýrských datech	Kompozitní materiál Onyx (mechanické vlastnosti viz Tabulka 2)
Vygenerovaná síť	Základní kvadratická s maximální velikostí elementů 2 mm, contact sizing kolík/otočné rameno
Kontakty	Všechny Bonded + Frictionless kluzné ložisko/pouzdro
Okrajové podmínky	Fixovaný blokovací šroub + Moment 40 Nm utahovací zařízení

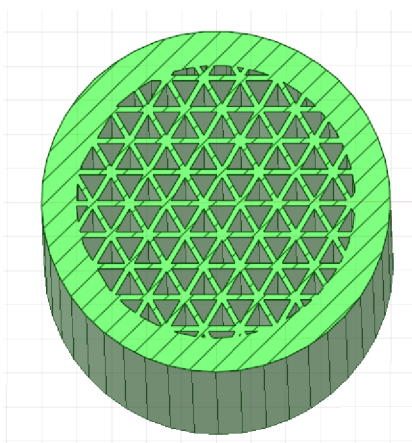
Tabulka 8: Nejkritičtější místa z hlediska namáhání

Komponenty s nejvyššími odečtenými hodnotami napětí		
Komponenta	Redukované napětí [MPa]	Simulace
Otočné rameno	40	
Úchyt rukojeti	42	
Zajišťovací kolík	5	
Pevné rameno	20	

4.5.2 STRUKTURÁLNÍ ANALÝZA ZAJIŠŤOVACÍHO KOLÍKU

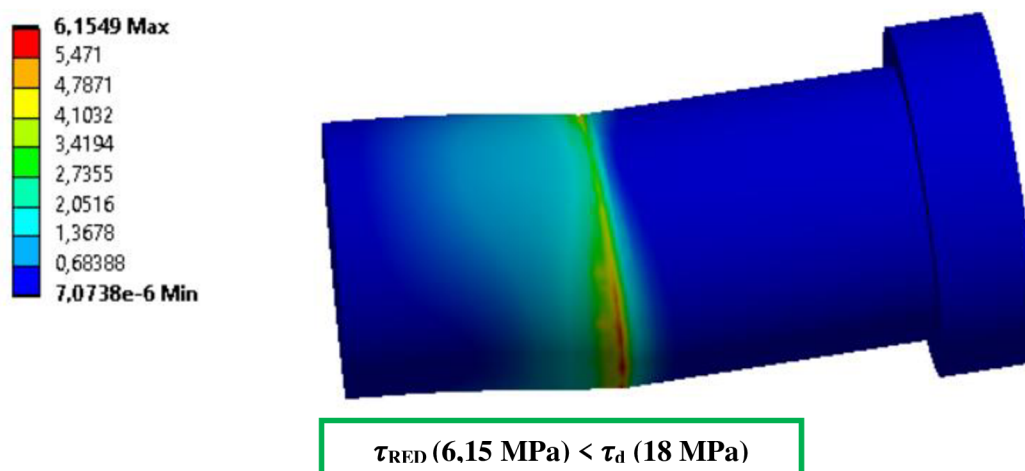
Zajišťovací kolík je jeden z nejvíce namáhaných komponent přípravku utahovacího zařízení. Jelikož válcový konec kolíku s kontaktní kruhovou plochou 9 mm je namáhán spojitým silovým zatížením vyvolaném záchytem momentu otočného ramena a druhá strana pevně zafixovaná v pevném rameni, nastává namáhání na střih, jehož hodnotu je nutné prověřit.

Před samotným výpočtem bylo nutné upravit plnou geometrii na skořepinu s vnitřní strukturou odpovídající struktuře výsledného výtisku. Vnitřní struktura modelu je trojúhelníková s hustotou výplně 20 %, velikost perimetru (vnějších hran stěn) odpovídá hodnotě 2 mm.



Obrázek 31: Triangulární vnitřní struktura

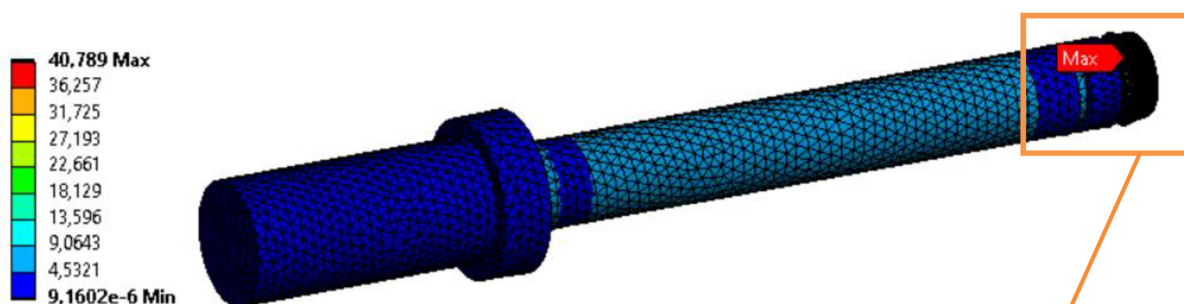
Materiálové vlastnosti nastaveny do inženýrských dat pouze pro Onyx, jelikož pro tak úzké komponenty s větší tloušťkou tištěných vrstev je omezená možnost použití vyztužujících struktur, z důvodu větší náchylnosti na porušení soudržnosti. V našem případě je navíc kolík namáhán podélně na vlákna jednotlivých vrstev, tudíž by přidáním výztuže nedošlo k velké pozitivní změně mechanických vlastností modelu. Síť byla vygenerovaná s maximální velikostí prvků 0,5 mm. Na obrázku je znázorněn průběh porovnání maximálního smykového napětí (Maximal Shear Stress) a porovnán s dovolenou hodnotou.



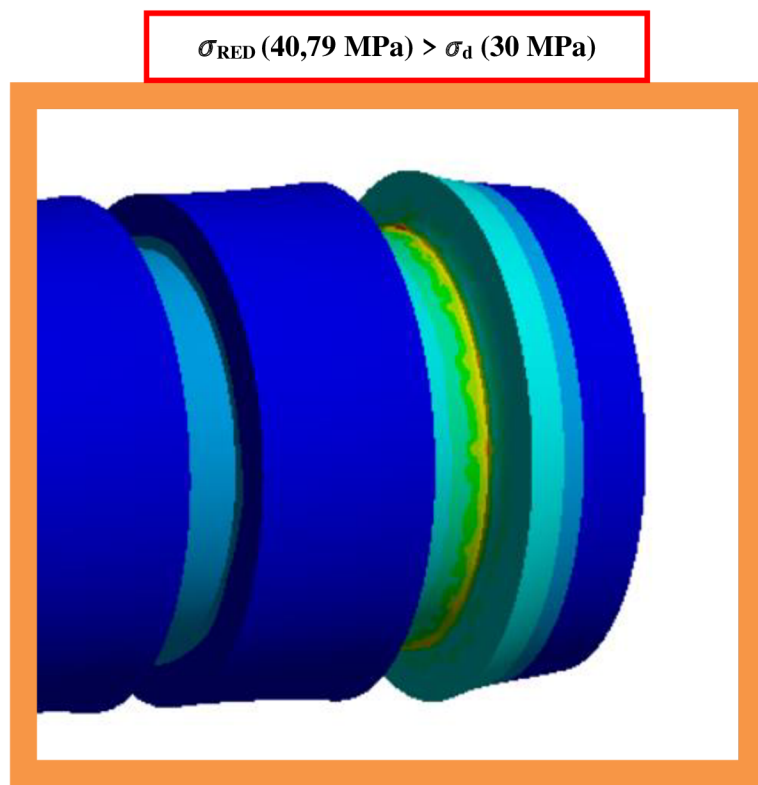
Obrázek 32: Maximální smykové napětí zajišťovacího kolíku [MPa]

Další kritickou oblastí kolíku je opačný válcový konec s koncovými zápichy pro pojistné kroužky blokující axiální posunutí kruhového úchytu. Při změně montáže z pravotočivého na levotočivé řízení je zapotřebí přemístit polohu kolíku. Stlačení pružiny silou 25 N přenášeno přes pojistný kroužek na vrchní plochu zápichu zajišťovacího kolíku => tahové napětí.

Síť generovaná elementy s maximální hodnotou 2 mm + face sizing 0,2 mm na nejvíce namáhané plochy válcového konce kolíku. Okrajová podmínka : spojitě silové zatížení 25 N na styčnou plochu pojistného kroužku s vrchní stěnou zápichu. Maximální redukované napětí (Von Mises) větší než je dovolená hodnota viz obrázky níže. Jelikož není v náboji zajišťovacího mechanismu prostor pro další zvětšování průměru kolíku a s tím spojené vyšší tuhosti. Navrhl jsem dvě řešení, prvním řešením měla být změna konstrukce vrchního úchytu z jednoduchého kruhového modelu o tloušťce 3 mm na polokouli o průměru 30 mm s vnitřním závitem a tím zajištěným axiálním posunutím. Při rozměrové kontrole jsme však narazili na problém překrývání polokoule s QR kódem při načítání typu modelu na montáži.

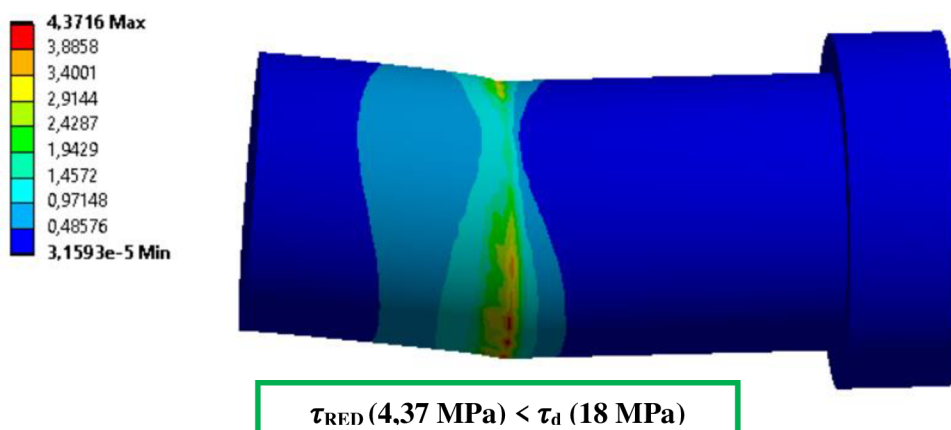


Obrázek 33: Maximální napětí (Von Mises) vrchní plochy zápichu kolíku [MPa]



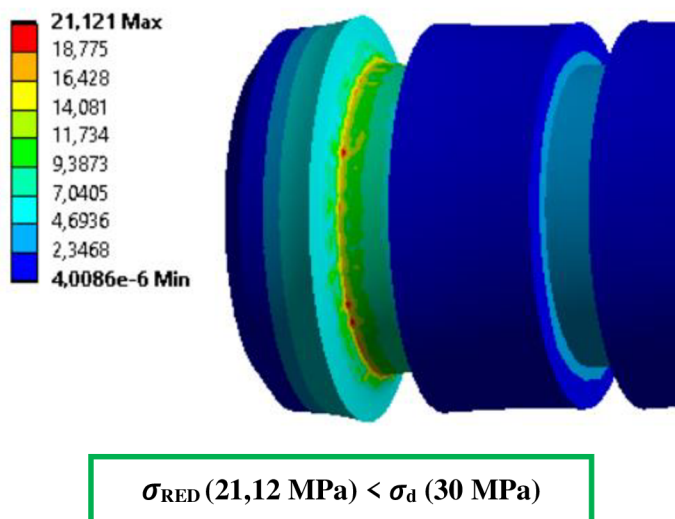
Obrázek 34: Detail napětí vrchní plochy zápichu kolíku

Nejjednodušším řešením tak bylo ponechat originální konstrukci komponenty, ale vyrobit ji klasickou konvenční metodou třískového obrábění (konkrétně soustružením z polotovaru duralové tyče ČSN 424201). Stejným postupem byly vyhotoveny šrouby úchytu i záchytný šroub momentu M10. Původní konstrukce zajišťovacího kolíku s dutým válcovým hřídelem s vnitřním závitem pro hliníkový šroub M6, byl přemodelován na plný kolík s prodlouženým válcovým koncem o tloušťku hlavy šroubu M6, tak aby hloubka zajištění nové varianty odpovídala původní konstrukci. V inženýrských datech byla definována mechanické vlastnosti použité slitiny hliníku. K CAD modelu byla vytvořena výkresová dokumentace potřebná pro výrobu. Výsledkem MKP analýzy je nižší smykové napětí vyvolané při stejných okrajových podmínkách a vygenerovanou sítí s maximální velikostí elementu 1 mm + edge sizing 0,2 mm na dělicí hranu.



Obrázek 35: Maximální smykové napětí zajišťovacího kolíku

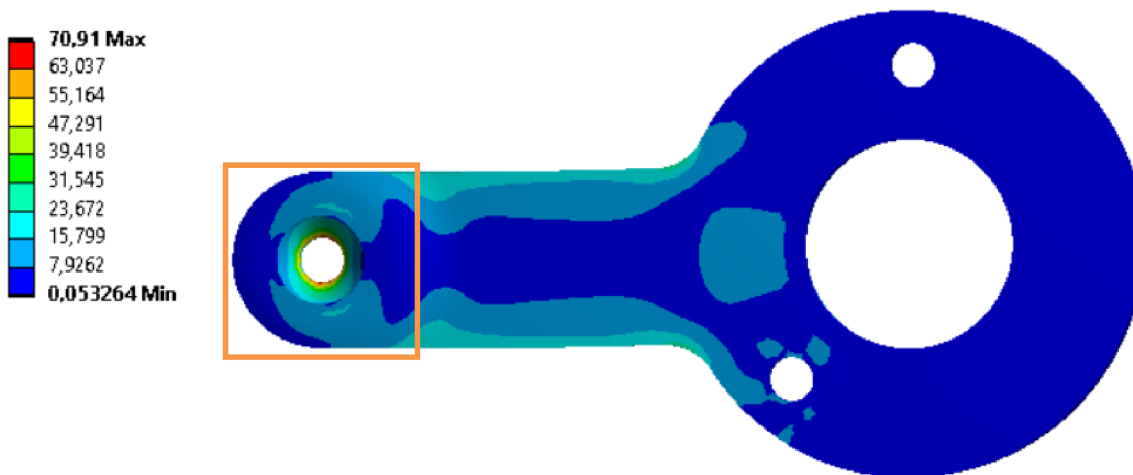
Avšak primárním cílem bylo snížit tahové napětí na vrchní ploše zápichu vyvolané od kruhového úchytu silou odpovídající hodnotě stlačení tlačné pružiny o požadovaných 15 mm. Z původních 40 MPa jsme se dostali na hodnotu 21 MPa. Slitina hliníku je materiál dostupný v předdefinovaných inženýrských datech knihovny Ansys, to znamená že jsou definovány S-N křivky, tudíž lze analýzu doplnit o výslednou životnost. Maximální počet cyklů namáhání je roven $10 e^7$.



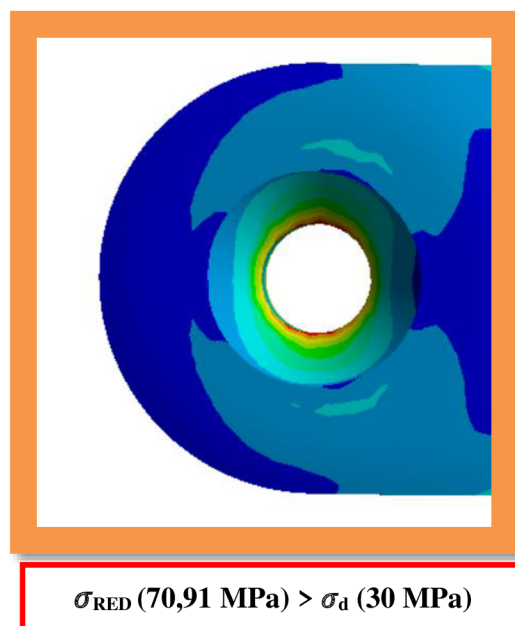
Obrázek 36: Tahové napětí válcového konce kolíku

4.5.3 STRUKTURÁLNÍ ANALÝZA OTOČNÉHO RAMENA

Otočné rameno s instalovaným záchytným hliníkovým šroubem M10 zašroubovaným v náboji povlečeným trubkovitým TPU plastem, z důvodu vyšší pružnosti TPU, zabraňuje otlacení na volantu. Náboj je dělený z důvodu zajištění axiálního posuvu trubkovitého povlaku. Jelikož se jedná o rozměrnější a tvarově složitější prvek, při nastavení vnitřních struktur nebylo Ansys ve výukové verzi schopen provést výpočet. Zjednodušil jsem proto geometrii na skořepinu s tloušťkou odpovídající tloušťce nastaveného perimetru pro tisk. Materiál v inženýrských datech nastaven izotropní Onyx. Síť generována s maximální velikostí elementů 2 mm. Okrajové podmínky, fixovaný otvor pro záchytný šroub momentu + moment 40 Nm na vnější centrickou kruhovou plochu. Výsledné maximální redukované napětí je 2x větší než dovolené. Největší hodnoty odečteny v zhloubení šroubu a dělicí hraně zhloubení s průměrem pro šroub M10. Další kritická oblast je v bodě styku těla ramena s kruhovou centrickou plochou (hodnoty redukovaného napětí cca 40 MPa).

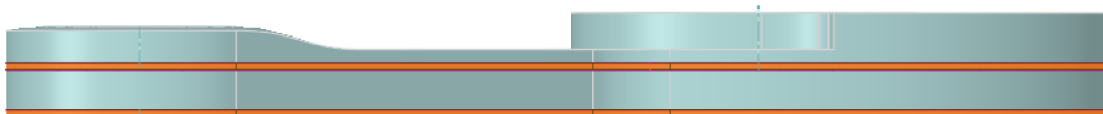


Obrázek 37: Maximální napětí (Von Mises) otočného ramena [MPa]



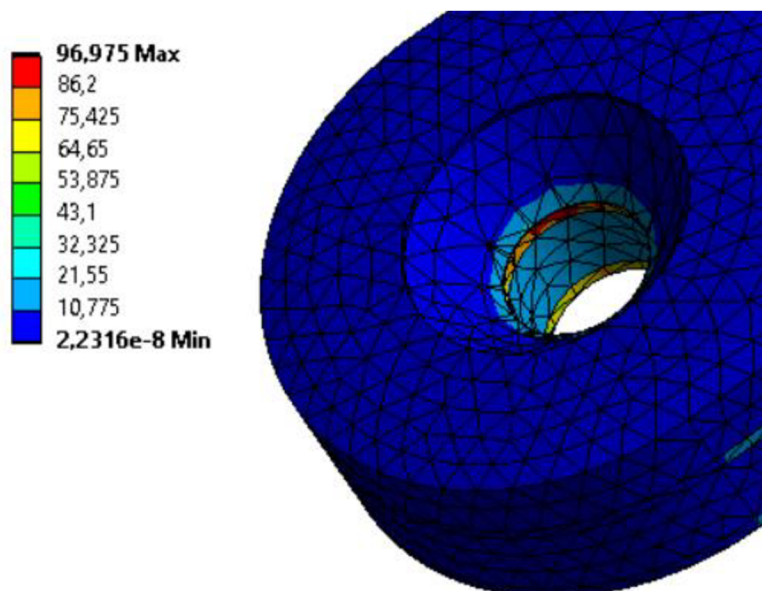
Obrázek 38: Detail maximálního napětí (Von Mises)

Z důvodu vyšších namáhání otočného ramena je nezbytné použít vrstvy výztuže. V inženýrských datech v záložce kompozitních materiálů, jsem přidal karbonové vlákno. Následně jsem ve SpaceClaimu rozdělil model na jednotlivé vrstvy, aby bylo ve výpočtáři možné nastavit materiálové vlastnosti jednotlivých vrstev. Výztužné vrstvy nastaveny vždy na hodnotu výšky jedné tištěné vrstvy, u dvou a více navazujících vrstev dochází na finálním výtisku k porušení soudržnosti. Pokud je potřebné silnější vyztužení doporučuje se jednotlivé výztužné vrstvy vždy oddělovat minimálně třemi vrstvami matrice, aby byla zachována soudržnost kompozitního materiálu. Před spuštěním bylo nezbytné spojit topologii pomocí příkazu Share Toplogy, aby nebyly vytvořeny kontakty mezi jednotlivými vrstvami, nýbrž spojitě rozhraní.



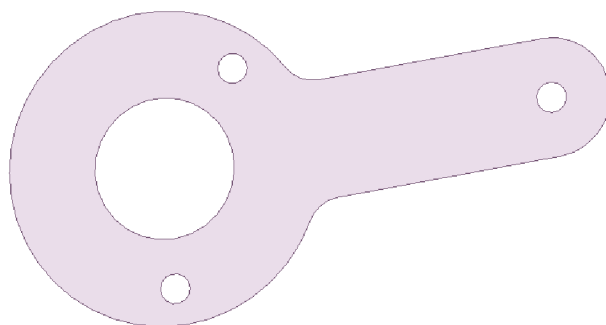
Obrázek 39: Nastavení CAD modelu

Síť generovaná s nastavením velikosti elementů max 2 mm + edge sizing 1 mm na zahlobení pro hliníkový šroub M10. Tato metoda řešení problému anizotropie materiálu se ukázala jako neúčinná, při sjednocené topologii Ansys sice nevytvoří kontakt, ale neuvažuje jednotlivé vrstvy spojitě, rozděluje prvky podél řezných hran od dělicích rovin, výsledkem je pak nepravidelná síť, směřující kvadratické a triangulární prvky a tím pádem nám vychází i vyšší hodnoty maximálního namáhání komponenty.



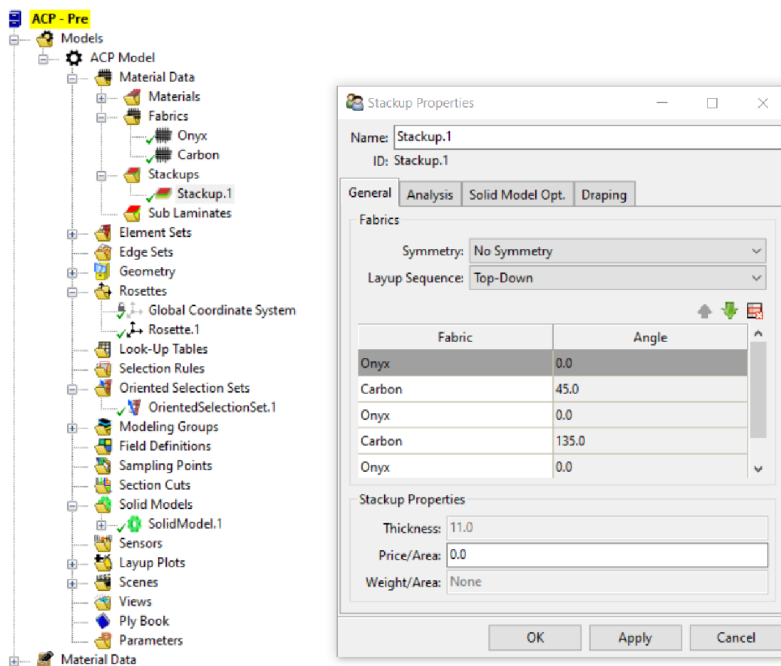
Obrázek 40: Detail maximálního napětí (Von Mises) v zahlobení

Problematika anizotropních materiálů a nastavení struktury materiálu se dá efektivně řešit v systémové analýze ACP. Vstupem musí být jednoduchá plocha na kterou se budou pomocí definice rozložení vláken postupně vytvářet vlákna kompozitního materiálu. V inženýrských datech byl nadefinován materiál matrice (Onyx) a výztužný materiál (Karbon). Po importu otočného ramena bylo zapotřebí určit referenční plochu pro ACP-Pre. Plocha definována viz obrázek níže.



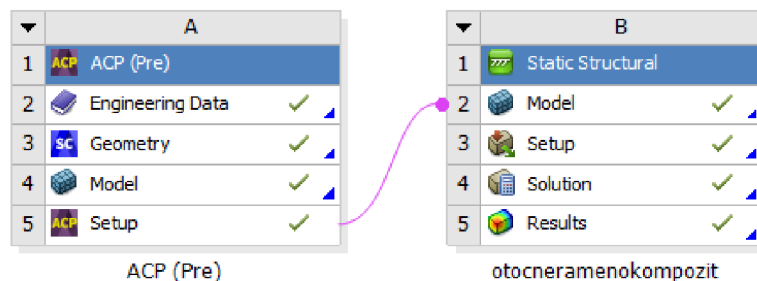
Obrázek 41: Referenční plocha otočného ramena

V záložce Fabrics neboli vlákna je nutné nastavit materiál a tloušťku vláken matice a výztuže, lze definovat rozdílné kombinace, avšak každá musí mít svoji originální podzáložku Fabric. Pomocí Stackup parametru se řeší vrstvení jednotlivých vláken, lze volit typ vlákna a úhel překrytí viz obrázek. Úhly výztuže jsou nastaveny tak aby výsledné překryvání odpovídalo triangulární struktuře vnitřních elementů. Aby mohl systém bezpečně vrstvit a navazovat jednotlivá vlákna, musí se definovat počátek Rossete. Pomocí Oriented Selection se pak volí počet a směr vrstvení.



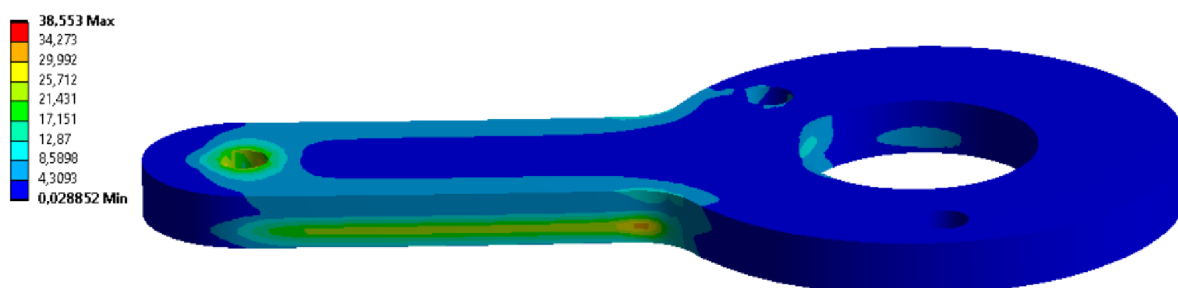
Obrázek 42: Nastavení preprocesoru ACP

Po nastavení preprocesoru ACP se do prostředí Ansys Workbench vloží strukturální analýza a spojením Setup (Nastavení) s Modelem vytvoří propojení viz obrázek níže. Ihned po propojení se Ansys vyskakovacím oknem ujistí zda se jedná o plný model nebo skořepinu, v našem případě byla zvolena skořepina s vnitřním vrstvením v trojúhelníkovém tvaru. Síť byla nastavena dříve v Modelu ACP s maximální velikostí elementů 1 mm.



Obrázek 43: Nastavení Ansys Workbench při analýze kompozitních materiálů pomocí ACP

Výsledkem strukturální analýzy s nastavením struktury kompozitního materiálu pomocí ACP jsou poloviční hodnoty napětí, než jako tomu bylo v případě simulace skořepiny s čistou maticí Onyx. Pokles hodnoty je samozřejmě způsoben také zjednodušením zaoblení pro záchytný šroub M10. Nejvyšší hodnota odpovídající 38 MPa odečtena opět ve vybrání pro záchytný šroub, konkrétně na vrchní hraně. V reálu bude tato hrana zaoblena o 1 mm. Z výsledků analýzy je podstatný pokles napětí v styčném zaoblení ramena a kruhové centrické plochy z původních 39 MPa na 34 MPa, tento fakt je důkazem zlepšení mechanických vlastností při zvyšování počtu vrstev a tudíž celkového objemu výztuže vůči matici.

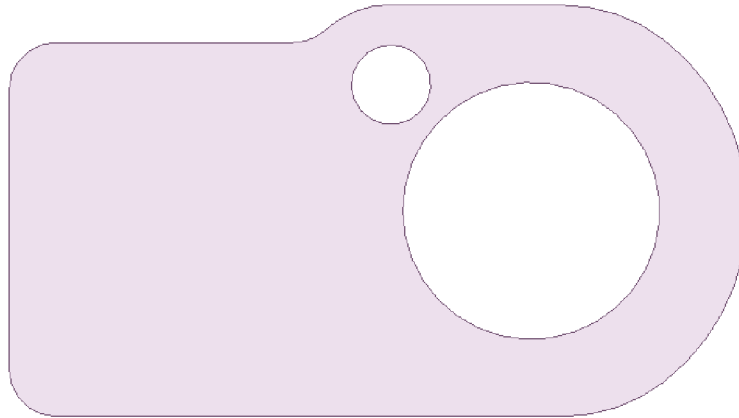


Obrázek 44: Maximální napětí (Von Mises) otočného ramena s kompozitní výplní

$$\sigma_{\text{RED}} (38,5 \text{ MPa}) < \sigma_{\text{d}} (52 \text{ MPa})$$

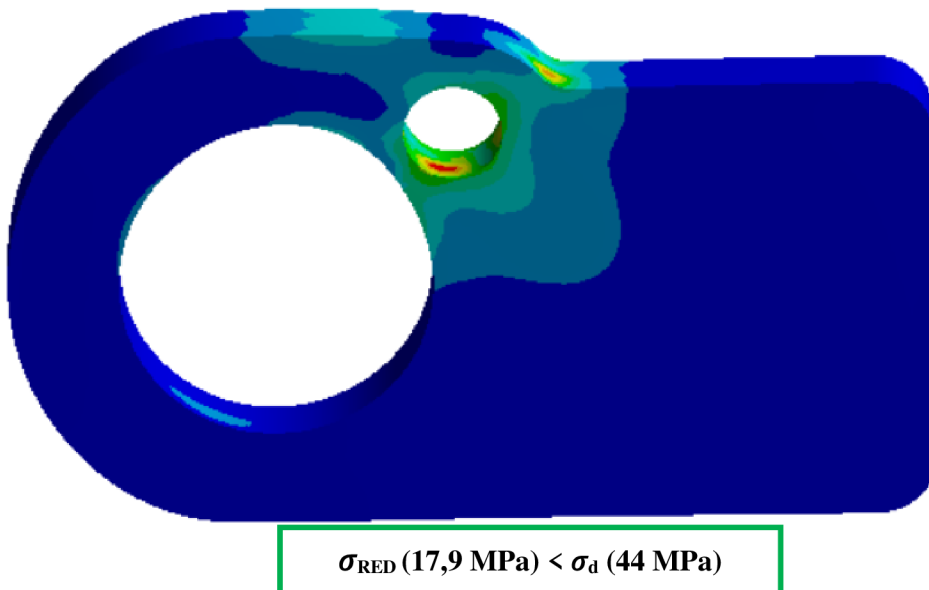
4.5.4 STRUKTURÁLNÍ ANALÝZA PEVNÉHO RAMENA

V případě analýzy pevného ramena byla použita stejně jako v případě řešení otočného ramena systémová analýza ACP pro přípravu vnitřních struktur kompozitních materiálů. Vstupem analýzy musela být definována odvozená plocha viz obrázek. Při propojení ACP-Pre se strukturální analýzou, byla nastavena skořepina o tloušťce odpovídající tištěnému modelu.



Obrázek 45: Referenční plocha pevného ramena

Při nastavení vnitřních struktur s třemi vrstvami výztuže o tloušťce 0,5 mm a trojúhelníkovém překryvání jednotlivých lamin, byly nastaveny okrajové podmínky momentu 40 Nm a fixovaná díra pro zajišťovací kolík v otočném rameni. Výsledkem strukturální analýzy je pokles redukovaného napětí v zaoblení tenké plochy blízké díře zajišťovacího kolíku z původních 20 MPa (materiál Onyx) na 17,95 MPa (materiál Onyx + karbonová výztuž).



Obrázek 46: Maximální napětí pevného ramena s karbonovou výztuží

Analytický výpočet mezního namáhání kompozitu

V následující části je nutné provést analytický výpočet maximálního dovoleného napětí, pomocí směšovacího pravidla materiálových charakteristik jednotlivých vrstev kompozitního materiálu v příčném a podélném směru. Mezi maticí a výztužnými vlákny je uvažována dokonalá adheze a stejné přetvoření. Materiálové charakteristiky jednotlivých komponent odečteny ze systému EIGER při nastavování jednotlivých výztužných vrstev, jsou popsány v tabulce níže.

Tabulka 9: Materiálové charakteristiky jednotlivých komponent

Otočné rameno		
Vrstva	Mez pevnosti [MPa]	Objemový podíl
Matrice	30	0,971
Výztuž	800	0,029
Pevné rameno		
Vrstva	Mez pevnosti [MPa]	Objemový podíl
Matrice	30	0,981
Výztuž	800	0,019

Analytický výpočet podélného přetvoření otočného ramena:

$$\sigma_{\text{cpo}} = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_m \cdot v_m = \sum \sigma_i \cdot v_i \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{cpo}} = 800 \cdot 0,029 + 30 \cdot 0,971 = 52,1 \text{ MPa} \quad (6)$$

Analytický výpočet podélného přetvoření pevného ramena:

$$\sigma_{\text{cpo}} = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_m \cdot v_m = \sum \sigma_i \cdot v_i \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{cpo}} = 800 \cdot 0,019 + 30 \cdot 0,981 = 44,6 \text{ MPa}$$

Analytický výpočet příčného přetvoření otočného ramena pomocí inverzního směšovacího pravidla (Reuss model + paralelní matrice):

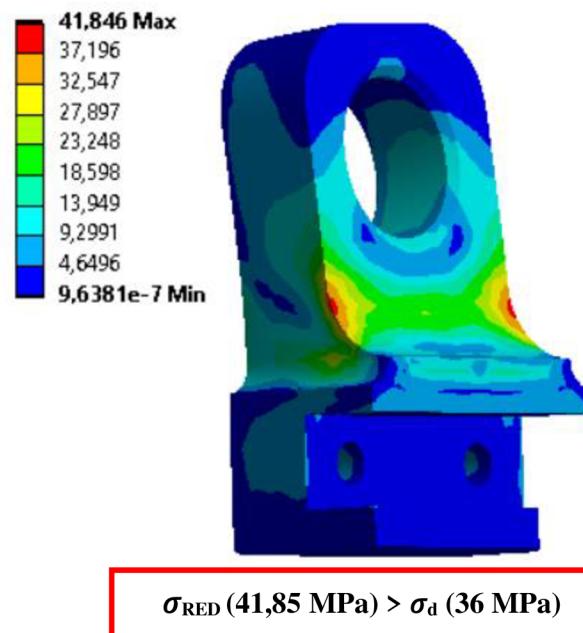
$$\sigma_{\text{cpř}} = (1 - v_f) \cdot \sigma_m + \frac{\sqrt{v_f} \cdot \sigma_m \cdot \sigma_f}{v_f \cdot \sigma_m + \sqrt{v_f} \cdot (1 - \sqrt{v_f}) \cdot \sigma_f} = 65 \text{ MPa} \quad (8)$$

Analytický výpočet příčného přetvoření pevného ramena pomocí inverzního směšovacího pravidla (Reuss model + paralelní matrice):

$$\sigma_{\text{cpř}} = (1 - v_f) \cdot \sigma_m + \frac{\sqrt{v_f} \cdot \sigma_m \cdot \sigma_f}{v_f \cdot \sigma_m + \sqrt{v_f} \cdot (1 - \sqrt{v_f}) \cdot \sigma_f} = 63 \text{ MPa} \quad (9)$$

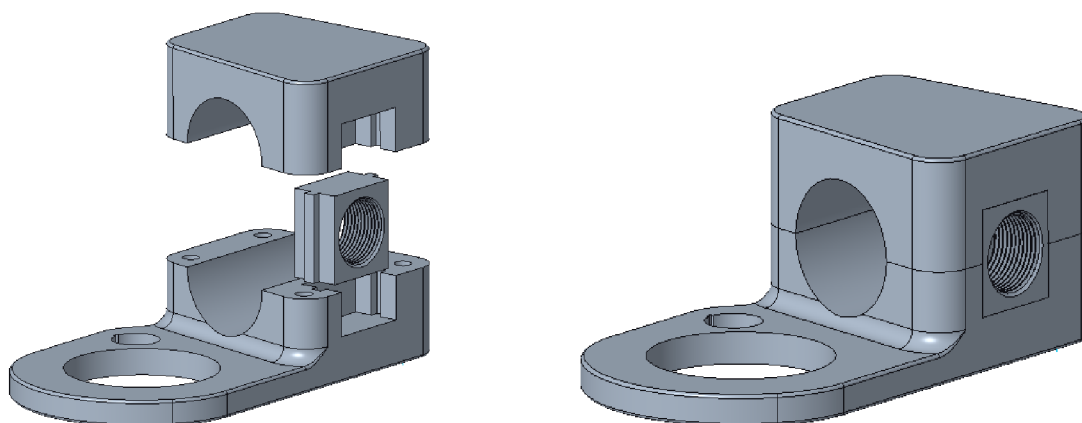
4.5.5 STRUKTURÁLNÍ ANALÝZA ÚCHYTU RUKOJETI

Úchyt rukojeti by měl mít primárně ergonomický účel, to znamená, usnadnit montážnímu dělníkovi při utahování zajištění utahovací polohy do středu. Není vyloučené, že nastane situace, kdy obsluha bude používat rukojeť k zvedání celého utahovacího zařízení z odkládacího stolu. Pro tuto situaci byla provedena simulace na komponenty pevného ramena v kontaktu s úchytem a rukojetí. Všechny komponenty nastaveny v inženýrských datech jako Onyx. Síť generovaná s maximální velikostí elementu 1 mm, okrajové podmínky (definovaná hmotnost pevného ramena odpovídající hmotnosti celého utahovacího zařízení => 5 kg a fixovaná rukojeť). Výsledkem je vysoká hodnota redukovaného napětí v zaoblení viz obrázek níže. Tento problém by byl řešitelný zvětšenou tloušťkou vrchní části úchytu, ovšem z hlediska namáhání velkou tahovou silou axiálně na šroubové spojení by bylo vhodné použít konstrukci šroubového spojení s tištěným pouzdem do pevného ramena, v plastu by totiž hrozilo vytržení šroubů ze závitu. Pro aplikaci tištěných pouzder je však zapotřebí větší plochy, než je tloušťka pevného ramena (12 mm).



Obrázek 47: Maximální napětí (Von Mises) úchytu rukojeti [MPa]

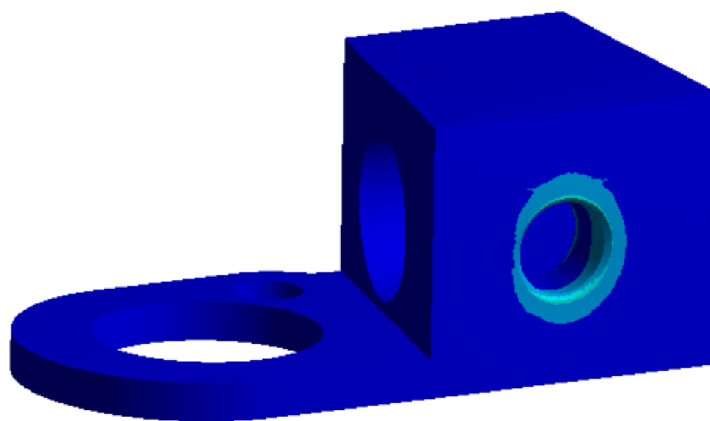
Výše zmíněný problém by byl řešitelný zvětšenou tloušťkou vrchní části úchytu. Z hlediska namáhání velkou tahovou silou axiálně na šroubové spojení v tomto případě může způsobit vytržení hliníkových šroubů z vnitřního plastového závitu, bylo by vhodné použít konstrukci šroubového spojení s tištěným pouzdem do pevného ramena. Pro aplikaci tištěných pouzder je však zapotřebí větší plochy, než je tloušťka pevného ramena (12 mm), v tomto případě by hrozilo opětovným namáháním porušení soudržnosti okolních vnějších plastových stěn pevného ramena. Rozhodl jsem se pro úplnou konstrukční změnu způsobu uchycení rukojeti viz Obrázek 48.



Obrázek 48: Finalní konstrukce úchytu utahovacího zařízení

Nová konstrukce je řešena výtiskem pevného ramena společně se spodním členem úchytu utahovacího zařízení. Důležitým parametrem při konstrukci je zachování původní referenční hodnoty kruhového vybrání v úchytu, to znamená střed s nulovou odchylkou oproti středu průniku hlavy utahovacího zařízení k matice + odsazení na vložení kluzného ložiska. Vnitřní závit se na 3D tiskárně nedá při rovnoběžné poloze osy středu závitu vůči tiskové desce stolu přesně vytisknout, v tomto případě je navíc nezbytné úchyt rozdělit dělicí rovinou z důvodu montáže na utahovací zařízení, které je nedělené. Spojení je tedy řešeno vloženým pouzdem s vnitřním závitem z kompozitního materiálu Onyx.

Výsledkem strukturální analýzy nového řešení úchytu utahovacího zařízení je značně snížená hodnota redukovaného napětí v místě šroubového spoje rukojeti s pouzdem úchytu. Větší robustnost nového úchytu umožnil snížení výšky s ohledem na zatížení.

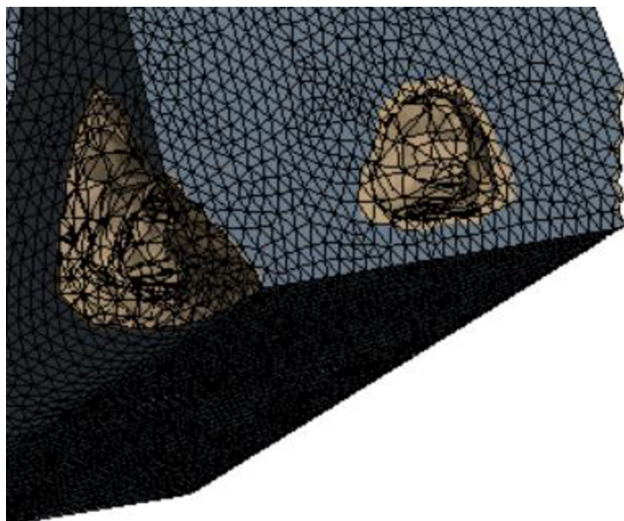


$$\sigma_{\text{RED}} (5 \text{ MPa}) < \sigma_d (36 \text{ MPa})$$

Obrázek 49: Maximální napětí na úchytu od hmotnosti utahovacího zařízení

4.5.6 OPTIMALIZACE TOPOLOGIE ÚCHYTU RUKOJETI

Optimalizace topologie byla provedena v systému Topology Optimization (Ansys Workbench). Vstupem této analýzy je již provedena strukturální analýza celého záchytu, s rozdílem plné výplně materiálu. Již při samotné konstrukci jednotlivých komponent byl brán v potaz vysoký nárok na minimální hmotnost výsledného přípravku utahovacího zařízení, proto při finální kontrole topologie nebyly nalezeny komponenty s vyšší procentuální možností úběru materiálu než 4 %. Výjimkou je úchyt rukojeti, v oblasti spodní hrany úchytu bylo detekováno 10 % nadbytečných elementů viz obrázek níže.



Obrázek 50: Optimalizace topologie úchytu rukojeti

Z obrázku výše je patrné že, nejméně potřebné elementy se nacházejí v rozích úchytu a na straně delší hrany zachytávající moment od utahovacího zařízení. Na základě výše zmíněných faktů jsem v těchto oblastech materiál odebral, tak aby byly zachovány bezpečnostní podmínky.

Rohy zaobleny z původních R5 na R10 a delší hrana úchytu zajištěna dvěma šrouby redukována na poloviční vzdálenost zabezpečená jedním šroubem. Při opětovné implementaci optimalizované komponenty do strukturální analýzy se stejnými okrajovými podmínkami optimalizovaný model nesplňoval bezpečnostní limity, důvodem je zřejmě vyšší tlak na redukované stěně při levotočivém utahování, z obrázku je navíc patrné že i v topologické optimalizaci MKP řešič používá žebra mezi redukovanými plochami. V konečné fázi byla tedy základě výsledků provedena pouze konstrukční změna zaoblení rohů úchytu rukojeti.

4.6 REALIZACE 3D TISKU

Jednotlivé CAD modely byly už při konstrukci vytvářeny tak, aby byly vyrobitelné technologií RP, všechny nezbytné úpravy a doporučení jsou detailně popsány v teoretické části diplomové práce. Následoval import komponent ve formátu STL do systémového prostředí Eiger, což je software společnosti Markforged určený k správě 3D tištěných dat, nastavování struktur a optimalizaci rozměrových i strukturálních odchylek. Po nahrání STL proběhlo nastavení procesu 3D tisku, možnosti nastavení popsány detailněji v tabulce níže.

Tabulka 10: Nastavení tisku

Nastavení tisku v systému EIGER	
Materiál matrice	Onyx, Onyx FR, Onyx FR-A, Onyx ESD, Nylon, Nylon EOF
Materiál výztuže	Karbon, Sklo, Kevlar, HSHT Sklo
Typ tiskárny	Markforged X7, Mark Two
Orientace modelu na tiskové ploše	X, Y, Z
Výška jedné vrstvy	Lze nastavit hodnoty 0,05 mm až 0,250 mm, pokud se tiskne s výztuží, tak je z důvodu zachování kvalitní soudržnosti přijatelná maximální hodnota 0,125 mm
Měřítko	Měřítko je procentuální hodnota, kterou lze měnit rozměrové tolerance v obou směrech
Úhel podpěr	0 podél osy X, 90 podél osy Y
Tenké stěny	Při aktivaci modulu tenkých stěn tiskárna zvýší hustotu výplně za účelem vyšší přesnosti
Brim	Opsaná geometrie na podložku o určité tloušťce, používá se při detekci nízkého počtu bodů ve styku s podložkou, výsledkem je nedeformovaná součást
Vzor výplně	Trojúhelníkový, Hexagonální, Obdélníkový, Gyroid, Plný
Hustota výplně	(28 až 55) %
Výška Start/End	Nastavení výšky první a poslední vrstvy
Tloušťka stěn	Nastavení tloušťky stěn
Orientace a způsob výztužné vrstvy	Nastavení výšky a počtu vrstvy, nastavení způsobu výplně Izotropická = výplň v celé ploše zvolené vrstvy včetně výplně, Koncentrická = výplň stěn zvolené vrstvy

4.6.1 NASTAVENÍ 3D TISKU PRO VYZTUŽENÉ KOMPONENTY

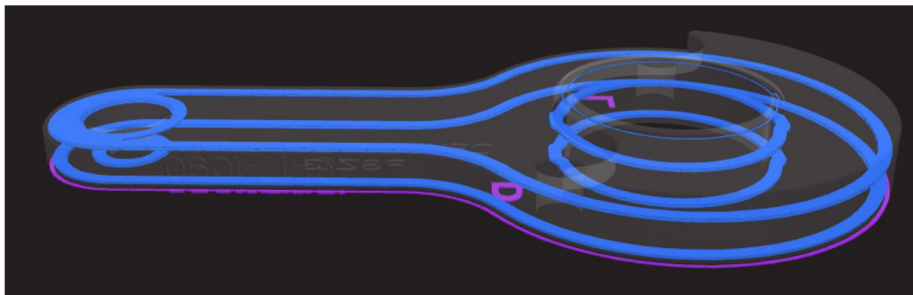
Otočné rameno

V tabulce níže je popsáno nastavení parametrů tisku v prostředí EIGER. Před každým tiskem je nutné analyzovat stav tiskové hlavy i pracovní plochy, nejčastějšími problémy jsou zanesené trysky, utržený filament nebo mechanicky poškozená tisková plocha.

Tabulka 11: Nastavení parametrů tisku pro otočné rameno

Materiál matrice	Onyx
Materiál výztuže	Karbon
Typ tiskárny	Markforged X7
Výška jedné vrstvy	0,125 mm
Měřítka	1
Tenké stěny	Deaktivovány
Brim	Deaktivován
Vzor výplně	Trojúhelníkový
Hustota výplně	37 %
Výška Start/End	0,5 mm
Tloušťka stěn	0,8 mm
Orientace a způsob výztužné vrstvy	Koncentrická

Na obrázku jsou znázorněny modrými spojitými plochami vrstvy karbonové výztuže a fialovými spojitými plochami podpěrné vrstvy. K výrobě této komponenty byly použity 88,97 cm³ materiálového objemu matrice a 2,65 cm³ materiálového objemu výztuže. Výsledný čas tisku byl díky vyšší hustotě výplně a použití výztužných vláken 11,5 hodin.

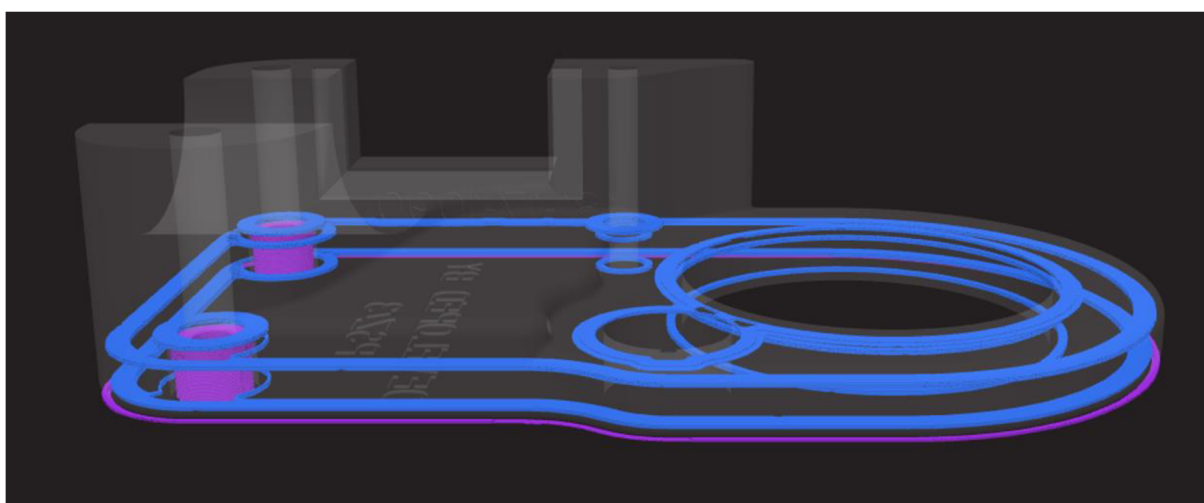


Obrázek 51: Nastavení výztužných vrstev otočného ramena

Pevné rameno*Tabulka 12: Nastavení parametrů tisku pevného ramena*

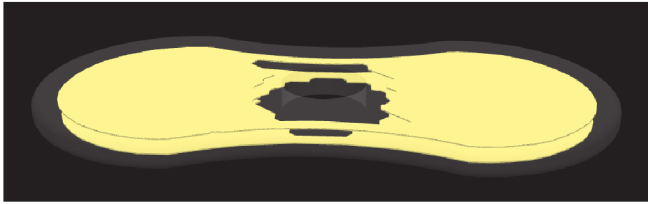
Materiál matrice	Onyx
Materiál výztuže	Karbon
Typ tiskárny	Markforged X7
Výška jedné vrstvy	0,125 mm
Měřítko	1
Tenké stěny	Deaktivovány
Brim	Deaktivován
Vzor výplně	Trojúhelníkový
Hustota výplně	37 %
Výška Start/End	0,5 mm
Tloušťka stěn	1 mm
Orientace a způsob výztužné vrstvy	Koncentrická

Na obrázku jsou znázorněny modrými spojitými plochami vrstvy karbonové výztuže a fialovými spojitými plochami podpěrné vrstvy. K výrobě této komponenty byly použity 91 cm³ materiálového objemu matrice a 2,65 cm³ materiálového objemu výztuže. Výsledný čas tisku byl díky vyšší hustotě výplně a použití výztužných vláken 12 hodin.

*Obrázek 52: Nastavení výztužných vrstev pevného ramena*

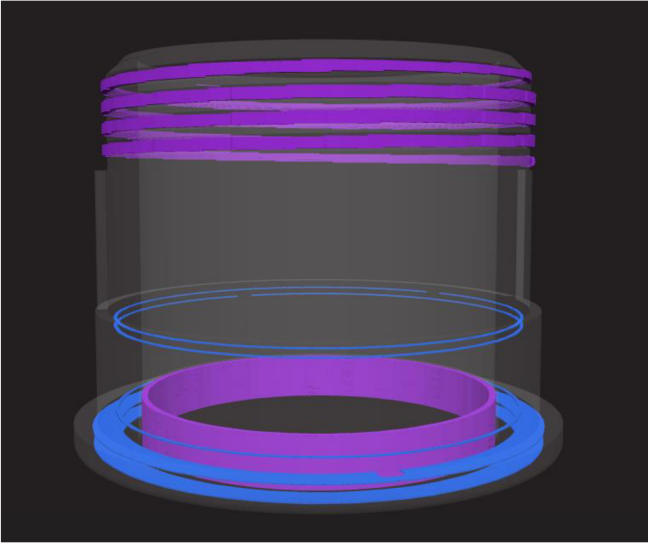
Kruhový úchyt

Tabulka 13: Nastavení parametrů tisku kruhového úchytu

Materiál matrice	Onyx	
Materiál výztuže	Sklo	
Typ tiskárny	Markforged X7	
Výška jedné vrstvy	0,125 mm	
Měřítko	1	
Vzor výplně	Trojúhelníkový	
Hustota výplně	37 %	
Výška Start/End	0,5 mm	
Tloušťka stěn	1,4 mm	
Orientace a způsob výztužné vrstvy	Izotropická	

Pouzdro utahovacího zařízení

Tabulka 14: Nastavení parametrů tisku pouzdra utahovacího zařízení

Materiál matrice	Onyx	
Materiál výztuže	Karbon	
Typ tiskárny	Markforged X7	
Výška jedné vrstvy	0,125 mm	
Měřítko	1	
Vzor výplně	Trojúhelníkový	
Hustota výplně	38 %	
Výška Start/End	0,5 mm	
Tloušťka stěn	1,6 mm	
Orientace a způsob výztužné vrstvy	Koncentrická	

V případě pouzdra utahovacího zařízení byla karbonová výztuž vtisknuta do komponenty z důvodu vyšší odolnosti ploch proti otláčení a opotřebení vyvolané tlačnou silou od matice a otáčením při změně polohy zajišťovacího kolíku.

4.6.2 NASTAVENÍ 3D TISKU OSTATNÍCH KOMPONENT

U komponent rukojeti, vrchního víka úchytu, těla pružiny, víka těla pružiny a matice nebyly použity výztužná vlákna. Tyto komponenty nebyly v MKP analýze detekovány jako součásti namáhané větším zatížením, proto se v jejich případě spokojíme s čistou materiálovou maticí Onyx. Výška jedné vrstvy zvolena 0,2 mm s výjimkou těla pružiny, víka těla pružiny a matice, protože tyto komponenty jsou tištěny se závitem, tak pro dodržení správné hodnoty stoupání závitu a vyšší kvality byla pro tyto komponenty použita výška jedné vrstvy 0,125 mm. Měřítka pro matici a víko těla pružiny po prvním tisku zvýšeno na hodnotu 1,05 z důvodu hladšího chodu šroubových spojení, vlivem smrštění se totiž při zkoušce prvních prototypů projevila původní vůle mezi závity nedostatečná. Tloušťka stěn zvolena 0,8 mm s výjimkou komponent s vnitřními závity o velmi malém průměru a stoupání závitů. Tyto závity je potřeba vyřezat ručně, do modelů tak byly zadány ISO průměry s definovaným přesahem o potřebnou výšku profilu závitu.

Tabulka 15: Nastavení parametrů 3D tisku komponent bez výztužných vláken

Materiál matrice	Onyx
Materiál výztuže	Žádný
Typ tiskárny	Markforged X7
Výška jedné vrstvy	0,2 mm s výjimkou komponent s vnitřními a vnějšími závity
Měřítka	(1) s výjimkou komponent s vnějšími závity
Tenké stěny	Deaktivovány
Brim	Deaktivován
Vzor výplně	Trojúhelníkový
Hustota výplně	37 %
Výška Start/End	0,5 mm
Tloušťka stěn	0,8 mm s výjimkou komponent s vnitřními závity

4.6.3 ZHODNOCENÍ TIŠTĚNÝCH DÍLŮ A NÁVRHY MOŽNÉ OPTIMALIZACE

Již při návrhu bylo postupováno tak, aby kvalita tisku byla co nejpřesnější (eliminace podpěr a velkých převisů, eliminace úzkých hran a ploch, eliminace ostrých hran, odebrání vnějších hran na stykové ploše s podložkou a tak dále. Výsledkem jsou díky aktivní kalibraci tisku na úrovni mikronů velmi přesné výtisky. U některých funkčních ploch však muselo dojít k úpravě tolerančních parametrů (přesahů a vůlí). Jednalo se především o tištěné závity, kde vlivem smrštění a lehké tvarové nepřesnosti nedocházelo ve výsledku k plynulému zašroubování. Tento problém byl vyřešen nastavením větší vůle vnějšího závitu v systémovém prostředí EIGER, nebylo tedy nutné upravovat samotný model. Horší kvalita povrchů byla detekována na dosedajících plochách komponent s tiskovou podložkou, příčinou je opotřebením tiskové podložky, při modelování byl však tento fakt brán v potaz, tudíž tyto plochy nejsou funkční a na jejich přesnosti či drsnosti povrchu není kladen takový důraz. Druhou opravovanou komponentou byl zajišťovací kolík vykonávající axiální pohyb v pouzdru víka pružiny s kolíkem sloužící k zajišťování polohy při změně směru utahovacího momentu. Vůle kolíku v pouzdru pružiny s kolíkem byla nedostatečná, řešením byla úprava nastavení vůle v systémovém prostředí EIGER tentokrát na vnitřní část mechanismu, tudíž záporná toleranční míra. Opačný problém byl řešen v případě kluzného ložiska umístěného v pevném rameni sestavy. Původní záměr byl tuto komponentu tisknout interně z materiálu čistého nylonu bez výztužných karbonových mikrovláken. Nylon disponuje velmi dobrými kluznými vlastnostmi. Bohužel při realizaci tisku docházelo k opakovaným problémům porušení soudržnosti na vnější hraně odsazení kluzného ložiska. Důvodem může být stárnutí filamentu nylonu nebo špatné uskladnění, nylon je totiž náchylný na vsřebávání vlhkosti z okolí. Řešením bylo objednání kluzného ložiska externě od firmy IGUS a přizpůsobení uložení v pevném rameni. V tomto případě bylo nutné upravit rozměr uložení pevného ramena přímo v modelu, jelikož nastavením přesahu v EIGERU by mohlo dojít k deformaci ostatních funkčních ploch pevného ramena.

Výše zmíněné fakty se týkaly optimalizace geometrie způsobené převážně chybou technologie, popřípadě konstrukce. Optimalizace výsledků na základě MKP simulací byly upraveny komponenty pevného ramena (aplikace karbonové výztuže), otočného ramena (aplikace karbonové výztuže + odsazení k zajištění větší plochy momentu), zajišťovacího kolíku (kompozitní materiál nahrazen slitinou hliníku), pružiny (plastový materiál nahrazen pružinovou ocelí) a úchytu rukojeti (konstrukční změna doplněná o aplikaci karbonové výztuže). Nutno však dodat že výpočtové modely byly zjednodušeny vůči reálným výtiskům, důvodem je zejména tvarová složitost vnitřních struktur a anizotropie použitých materiálů. Jednotlivé vrstvy byly při výpočtu komponent s karbonovou výztuží idealizovány jako příčně izotropní. Mezní stavy vyhodnoceny z hlediska maximálních napětí.

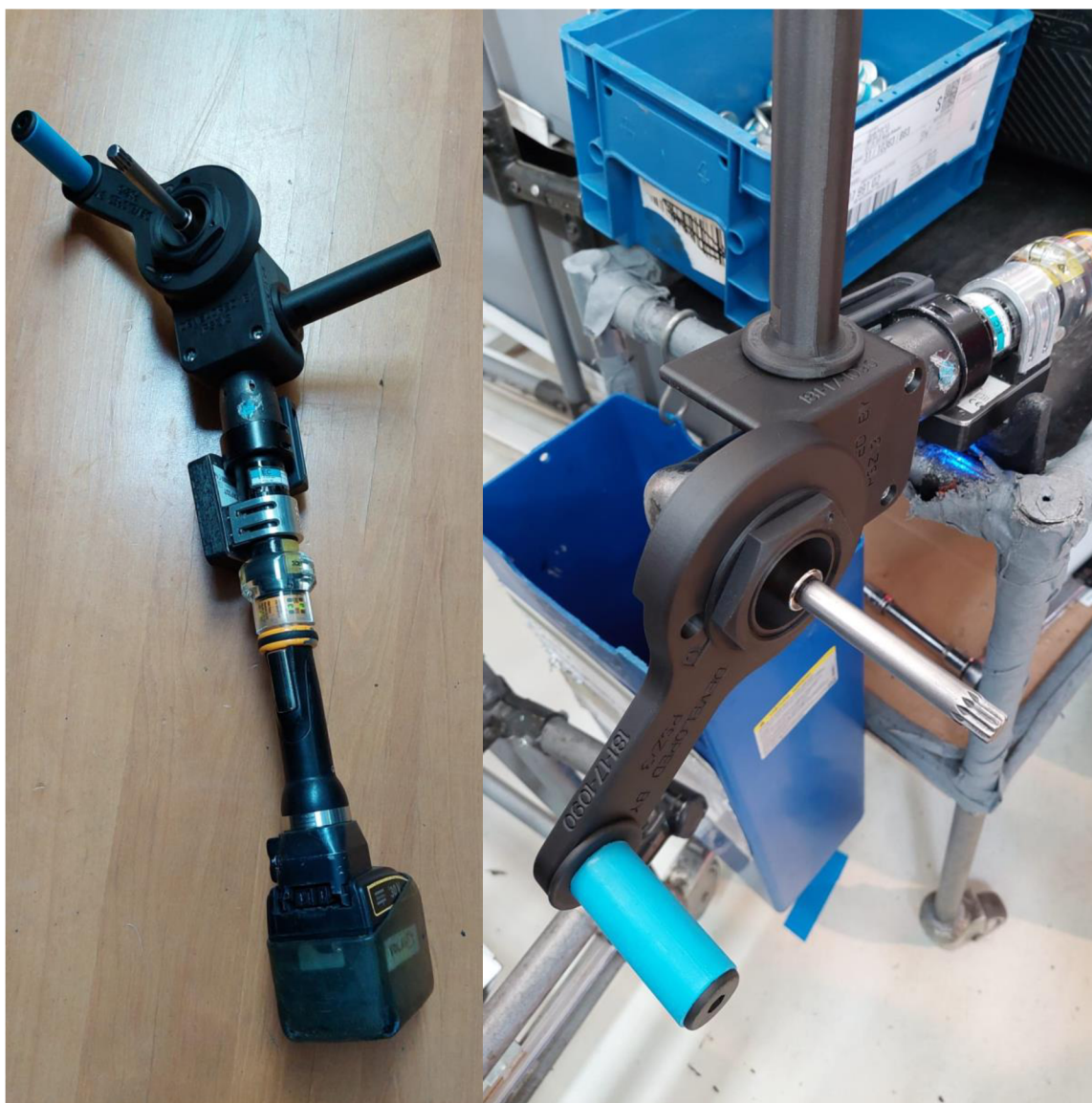
Největší důraz byl kladen na snížení hmotnosti celého přípravku, u dílů s menšími hodnotami maximálních napětí byl proto použit kompozitní materiál Onyx jako náhrada za původní hliníkovou slitinu. Podařilo se dosáhnout snížení hmotnosti o 68 % viz tabulka níže.

Tabulka 16: Redukce hmotnosti záchyty momentu

Původní hmotnost [kg]	Hmotnost optimalizované komponenty [kg]
1	0,42

4.6.4 APLIKACE ZÁCHYTU MOMENTU DO VÝROBY

V současné době stále probíhá proces náběhu přípravku záchytu momentu na montáži volantu. Po prvních testech bylo nutné upravit přesah úchytu utahovacího zařízení, po opakujících se utahovacích cyklech by mohlo docházet k protáčení utahovacího zařízení v úchytu. Při dalším testování opakujících se zatěžovacích cyklů budou sledovány primárně kritické části s nejvyššími detekovanými hodnotami maximálních napětí z MKP analýzy (otočné rameno, úchyt utahovacího zařízení a zajišťovací kolík). Pokud dojde vlivem namáhání k pružným či plastickým deformacím, bude nutné znovu optimalizovat geometrii, použít hustší výplň, aplikovat více výztužných vláken v bodě lomu, popřípadě změnit směr nanesení jednotlivých vrstev v závislosti na orientaci příslušného namáhání.



Obrázek 53: Aplikace přípravku záchytu momentu

ZÁVĚR

V diplomové práci byla podrobně zpracována a klasifikována problematika kompozitních materiálů. Další kapitola je věnována technologii 3D tisku s důrazem na kompozitní materiály, jsou zde popsány výhody a nevýhody aditivní technologie vůči konvenčním metodám. Na kapitolu aditivní technologie navazuje příprava modelu před 3D tiskem a s ní spojené nezbytnosti jako konverze dat, zásady navrhování modelů, slicování a Reverse engineering.

Experimentální část se věnuje technickému zpracování komponenty záchyty momentu pro montáž volantů na montážní hale ŠKODA AUTO a.s. Po charakteristice dostupných 3D tiskáren a jejich materiálovém portfoliu následovalo konstrukční řešení komponenty. Při návrhu bylo nutné dodržet referenční parametry původní komponenty, což byl vnitřní průměr úchytu rukojeti a rozteč s otvorem pro hlavu utahovacího zařízení. Při návrhu konstrukčního řešení bylo postupováno tak, aby byli vytvořené modely technologicky zpracovatelné metodou 3D tisku. Po několika geometrických úpravách řešící především problémy nedostatečných vůlí funkčních ploch sestavy, nebo naopak nedostatečný přesah v případě uložení kluzného ložiska v pevném rameni, byla součást analyzována pomocí numerických simulací v systémovém prostředí Ansys Workbench. Nejprve byla provedena předběžná analýza celé sestavy záchyty momentu se zjednodušenou geometrií, za účelem detekování hlavních kritických míst přípravku a jejich následně bližší analýze a optimalizaci. Pomocí systémové analýzy ACP byly upraveny a vyhodnoceny vnitřní struktury kompozitního materiálu z hlediska směru nanášení výztužných vrstev a objemového podílu výztuže vůči matici použitého materiálu.

Hlavním cílem nového řešení záchyty momentu měla být maximální redukce hmotnosti celého přípravku. Všechny navazující technologické kroky byly voleny tak, aby bylo dosaženo určeného cíle. Výsledkem je snížení hmotnosti celého přípravku o 68 %.

Pro výrobu prvních prototypů byla z ekonomického hlediska použita tiskárna PRUSA MK3S, která pracuje s materiálem PLA, ten je velmi levný, ekologický a snadno a rychle se z něj dá vytvářet široká škála inovativních návrhů. Finální návrh byl vyhotoven pomocí průmyslové tiskárny Markforged X7 tisknoucí kompozity s maticí nylonu s karbonovou, skelnou, HSHT a kevlarovou výztuží. V systémovém prostředí EIGER proběhlo nastavení výztužných vrstev vycházející z MKP analýzy kriticky namáhaných komponent (otočné rameno + pevné rameno). Po první aplikaci přípravku ve výrobní hale montáže byly upraveny některé geometrické odchylky. Montážní přípravek je v současné době aplikován a analyzován z hlediska pevnosti a životnosti, důraz bude kladen hlavně na kontrolu deformací v oblastech maximálních namáhání vyvozených z numerických simulací. V současné situaci lze práci považovat za zdařilou, vyrobená součást z kompozitního materiálu značně redukovala hmotnost celého utahovacího zařízení, jednotlivé komponenty byly pevnostně analyzovány a nachází se na bezpečné straně napětí, nutno však podotknout, že nastavení výpočetního modelu muselo být v některých případech značně zjednodušeno, přesnější výsledky týkající se bezpečnosti a životnosti přípravku bude nezbytné potvrdit či vyvrátit experimentálním měřením přímo na montáži. Na základě výsledků diplomové práce lze vyvodit takový závěr, že možnost aplikace 3D kompozitního tisku pro výrobu funkčních součástí je v současnosti uskutečnitelná, stále jsme ovšem omezeni mechanickými vlastnostmi tisknutelných materiálů a omezenou možností predikce napjatosti složitých vnitřních struktur kompozitů. Před samotným procesem AM výroby je vždy potřeba důkladně analyzovat aplikační prostředí.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [3] MÍŠEK, Bohumil. Polymery, keramika, kompozity. Brno: VUT Brno, 1993, 155 s. ISBN 80-214-0521-X.
- [4] BAREŠ, Richard, Richard A BAREŠ a Jaroslav NĚMEC. Kompozitní materiály. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1988
- [5] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [6] 3D-tisk.cz [online]. Nová média, s. r. o, 2014 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/>
- [7] CHACÓN, J. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties. Composites Science and Technology [online]. 2019, 2019, (181), 181 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107688>
- [8] Composite Materials for 3D Printing. Metal and Carbon Fiber 3D Printers for Manufacturing | Markforged [online]. Markforged, 2020 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://markforged.com/materials/composites/>
- [9] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. Nauka o materiálu. Vyd. 4. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4
- [10] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů [online]. In: . Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008, s. 94 [cit. 2021-12] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [11] Composite Materials for 3D Printing. CompositesLab | All You Need to Know About Composites [online]. American Composites Manufacturers Association, 2016 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/where-are-composites-used/>
- [12] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. 3D tisk. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.
- [13] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1. vyd. Brno, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [14] KRISHAN KUMAR CHAWLA. Composite materials science and engineering. 3rd ed. New York: Springer, 2012. ISBN 978-038-7743-653.

- [15] Fiber properties guide | Texonic. Texonic | Carbon, glass, aramid, innegra, basalt, flax reinforcements [online]. Texonic, 2020 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://texonic.net/en/tableau/technical/>
- [16] Fiber Reinforced 3D Printing: What You Need to Know. Metal & Carbon Fiber 3D Printers [online]. Markforged, 2020 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://markforged.com/learn/fiber-reinforced-3d-printing-what-you-need-to-know/>
- [17] Ultimate3DPrintingMaterialsGuide. SIMPLIFY3D [online]. [cit. 2021-12] Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
- [18] Markforged [online]. [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://markforged.com/3dprinters/x7>
- [19] GEBHARDT, Andreas. Rapid prototyping. 1st ed. Munich: Hanser Publishers, 2003, 379 s. ISBN 34-462-1259-0.
- [20] SLOTA, J., MANTIČ, M., GAJDOŠ, I. Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojířtve. Kořice: Edícia řtudijnej literatůry, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.
- [21] SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelu pomocí CAD/CAM systému. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojířní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.
- [22] RAPID PROTOTYPING. 3dtech [online]. 2016 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <http://www.3dtech.cz/rapid-prototyping>
- [23] PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2
- [24] Fused Deposition Modeling (FDM). [online]. [cit. 2021-12]. Dostupné z: http://www.protoprint.de/Fused_Deposition_Modeling.html
- [25] Additive manufacturing. [online]. [cit. 2021-12]. Dostupné z: <http://www.kaso.com/category/news-post-tags/additive-manufacturing>
- [26] Technologie Rapid Prototyping. [online]. [cit. 2021-12]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/technologie-rapid-prototyping>
- [27] Automotive Rapid Prototyping Services. [online]. [cit. 2021-12]. Dostupné z: <http://www.model-ease.com/automotive.htm>
- [28] MM Průmyslové spektrum: Nekonvenční metody obrábění. [online]. 2008 [vid. 2021-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metodyobrabeni-9-dil.html>
- [29] PRŮŠA, Josef. Základy 3D tisku [online]. 1. Praha: Pusa Research s.r.o., 2014 [cit.2021-12]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [30] FUTLAB, Úprava modelů pro 3d tisk. Dostupné z: <https://futlab.cc/uprava-modelu-3d-tisk/>

- [31] 2020 Most Common 3D Printer File Formats. In: All3DP [online]. Feb 13, 2020 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printer-file-format/>
- [32] Standardising File Formats for Additive Manufacturing Software — An Ongoing Challenge. In: AMFG [online]. 03 March 2017 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2017/03/03/additive-manufacturing-software-formats/>
- [33] CHAKRAVORTY, Dibya. STL File Format (3D Printing) – Simply Explained. In: All3DP [online]. Feb 14, 2019 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
- [34] How To Prepare STL Files. Stratasys [online]. [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/resources/tutorials/how-to-prepare-stl-files>
- [35] The Most Common STL File Errors You Will Meet in 3D Printing Process. Facfox [online]. 2019-12-24 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://facfox.com/docs/the-most-common-stl-file-errors-you-will-meet-in-3d-printing-process>
- [36] The Top 5 STL File Errors You Should Know Before You Print. In: AMFG [online]. 19 April 2018 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/04/19/top-5-stl-file-errors-you-should-know/>
- [37] NELLI, Fabio. How to check and repair STL files for 3D printing. In: Meccanismo Complesso [online]. 31 January 2014 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://www.meccanismocomplesso.org/en/how-to-check-and-repair-stl-files-for-3d-printing/>
- [38] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Understand and fix common STL file errors. In: 3D Hubs [online]. [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fixing-most-common-stl-file-errors/>
- [39] MM průmyslové spektrum. Digitalizace [online]. 2004 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
- [40] IGUS, Materiálová data IGLIDUR J. Dostupné z: [Kluzné pouzdro iglidur® J - Údaje materiálu \(igus.cz\)](#)
- [41] VESELOVSKÝ, Ján. Závity v technickej dokumentácii – prednáška. [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. STU v Bratislavě, Katedra mechaniky, 2006. 38s.
- [42] KOLÁŘ, Vladimír, Ivan NĚMEC a Viktor KANICKÝ. FEM: principy a praxe metody konečných prvků. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 1997. ISBN 80-722-6021-9.
- [43] ONDRÁČEK, Emanuel, Přemysl JANÍČEK a Jan VRBKA. Mechanika těles. Pružnost a pevnost II. Brno: VUT Brno, 1988, 262 s.
- [44] KAŠPÁRKOVÁ, Kristýna. 3D tisk kompozitních materiálů [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124974>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Zouhar.

- [45] MUDRÁK, Michal. Analýza mechanických vlastností kompozitních materiálů vytisknutých aditivní technologií 3D tisku [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132588>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.
- [46] TÁBORSKÝ, Pavel. Využití aditivní technologie pro výrobu dílu pro automobilový průmysl [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124956>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

1D		Jednodimenzionální prostor
2D		Dvoudimenzionální prostor
3D		Třidimenzionální prostor
AM		Additive manufacturing
ABS		Akrylonitrilbutadienstyren
Al ₂ O ₃		Oxid hlinitý
CAD		Computer aided design (Počítačem podporované konstruování)
CaO		Oxid vápenatý
CFF		Continuous filament fabrication
CNC		Computer numerical control
FDM		Fused deposition modeling
FFF		Fused filament fabrication
HSHT		High strength high temperature
MKP		Metoda konečných prvků
PC		Polykarbonát
PETG		Polyethylene terephthalate
PLA		Kyselina polyléčná
PP		Polypropylen
RE		Reserve engineering
RP		Rapid prototyping
SiO ₂		Oxid křemičitý
ŠA		Škoda Auto a.s.
UV		Ultraviolet
σ_{fiber}	[MPa]	Mez pevnosti výztuže
σ_{matrix}	[MPa]	Mez pevnosti matrice
E_{fiber}	[GPa]	Tuhost výztuže
E_{matrix}	[GPa]	Tuhost matrice
ε_{fiber}	[mm]	Poměrné prodloužení výztuže
ε_{matrix}	[mm]	Poměrné prodloužení matrice
σ_{cpo}	[MPa]	Celková mez pevnosti v podélném směru kompozitu
$\sigma_{cpř}$	[MPa]	Celková mez pevnosti v příčném směru kompozitu
σ_f	[MPa]	Mez pevnosti výztuže

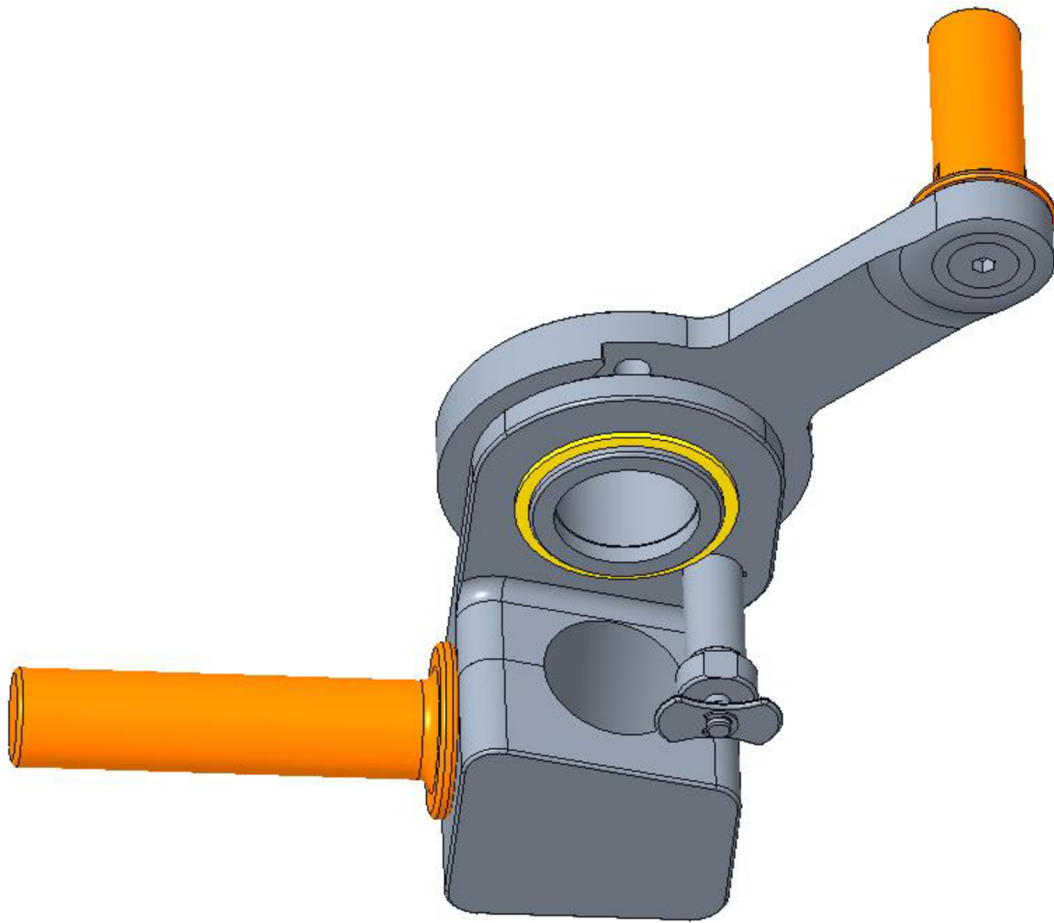
σ_m	[MPa]	Mez pevnosti matrice
v_f	-	Objemový podíl výztuže
v_m	-	Objemový podíl matrice

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Finální konstrukce záchytu momentu

Příloha 2 – Rozpad finální konstrukce záchytu momentu

Příloha 1:



Příloha 2:

