



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE RAMENA KVADROKOPTÉRY S VYUŽITÍM 3D TISKU

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF A QUADCOPTER ARM USING 3D PRINT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Simon

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Vaverka

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Jakub Simon**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Vaverka**
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 bakalářské práce:

Topologická optimalizace ramena kvadrokoptéry s využitím 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Topologická optimalizace je numerická metoda, která dokáže pomoci konstruktérovi navrhnout díl s optimalizovanými parametry, např. hmotností, tuhostí, vlastními frekvencemi atd. Nejčastěji se využívá tam, kde je potřeba velice lehkých dílů, což může být např. letectví. Nemusí jít vždy o velké letouny, ale uplatnění může najít i v modelovém létání a díky snížení hmotnosti tak například zvýšit dolet modelové kvadrokoptéry.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je porovnat topologicky optimalizovaná ramena kvadrokoptéry s ohledem na výrobní technologii.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- přehled okrajových podmínek topologické optimalizace z hlediska technologie,
- koncepční varianty topologicky optimalizovaného ramene,
- porovnání variant pomocí MKP,
- výroba a otestování funkčního vzorku.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

BRACKETT, D., ASHCROFT, I., HAGUE, R. Topology optimization for additive manufacturing. In Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Solid Freeform Fabrication Symposium edition: 22, Austin, Texas, USA, 8-10 August 2011. s. 348-362.

MENDE, M. Návrh topologicky optimalizované těhlice pro závodní pneumobil. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 67 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vaverka.

ROZVANY, G. I. N., A critical review of established methods of structural topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, vol. 37, iss. 3, s. 217-237. DOI: 10.1007/s00158-007-0217-0. ISSN 1615-1488.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje porovnání technologických omezení aplikovaných během topologické optimalizace na demonstrační součást, kterou bylo rameno kvadrokoptéry. Čtyři ramena byla optimalizována každé s jiným výrobním omezením: Extruzí, Single draw, Split draw, Overhang a jedno pouze s rovinou symetrie, bez dalších výrobních omezení. U všech návrhů byl během optimalizace kladen důraz na zachování spojitě geometrie a na finální hmotnost přibližně odpovídající hmotnosti originálního ramene. Všechny 5 návrhů bylo následně podrobeno pevnostní analýze metodou konečných prvků. Na závěr byla ramena vytištěna metodou fused deposition modelling (FDM) z materiálu ABS a otestována zatížením statickou silou. K vyhodnocení deformace byla použita metoda fotogrammetrie. Výsledky experimentu byly přepočteny na poměrnou tuhost, v níž byly zohledněny malé rozdíly ve hmotnostech. Poměrné tuhosti návrhů ramen byly následně porovnány, čímž se ukázalo, že 4 z 5 topologicky optimalizovaných ramen mají větší tuhost vůči definovanému zatížení než originální tvar. Jako nejtužší se ukázal návrh bez technologického omezení, který má při stejné hmotnosti 12,5 krát vyšší poměrnou tuhost než originální rameno.

KLÍČOVÁ SLOVA

topologická optimalizace, technologická omezení, rameno kvadrokoptéry, MKP, 3D tisk

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the comparison of manufacturing constraints applied during topology optimization of a demonstration component, which was a quadcopter arm. Four designed arms were optimized, each with different manufacturing constraints: Extrusion, Single draw, Split draw, Overhang and one arm only with symmetry plane, without any other manufacturing constraint. For all designs, it was important to maintain a continuous geometry during optimization and that final weight approximately equals to the weight of the original arm. All five arms were then subjected to static structural analysis with the finite element method. After that, arms were printed using Fused deposition modelling (FDM) from ABS material and then tested by static force. The photogrammetry method was used to evaluate deformation. Results of the experiment were recalculated to relative stiffness, where small differences between weights were considered. Relative stiffnesses of designed arms were then compared, showing that 4 out of 5 topology optimized arms have higher stiffness than the original shape. The toughest design is without manufacturing constraints which at the same weight has 12.5 times higher relative stiffness than the original arm.

KEYWORDS

topology optimization, manufacturing constraints, quadcopter arm, FEM, 3D printing,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SIMON, Jakub. *Topologická optimalizace ramena kvadrokoptéry s využitím 3D tisku*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140193>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Ondřej Vaverka.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Ondřeji Vaverkovi za přínosné rady, cenné připomínky, čas, který mi věnoval i mimo rámec pravidelných konzultací, za trpělivost a celkově za odborné vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat blízkým přátelům a své rodině, kteří vždy stáli při mně a svou podporou, trpělivostí, radami a připomínkami mi pomohli dosáhnout současného stavu této práce. Děkuji.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Ondřeje Vaverky. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

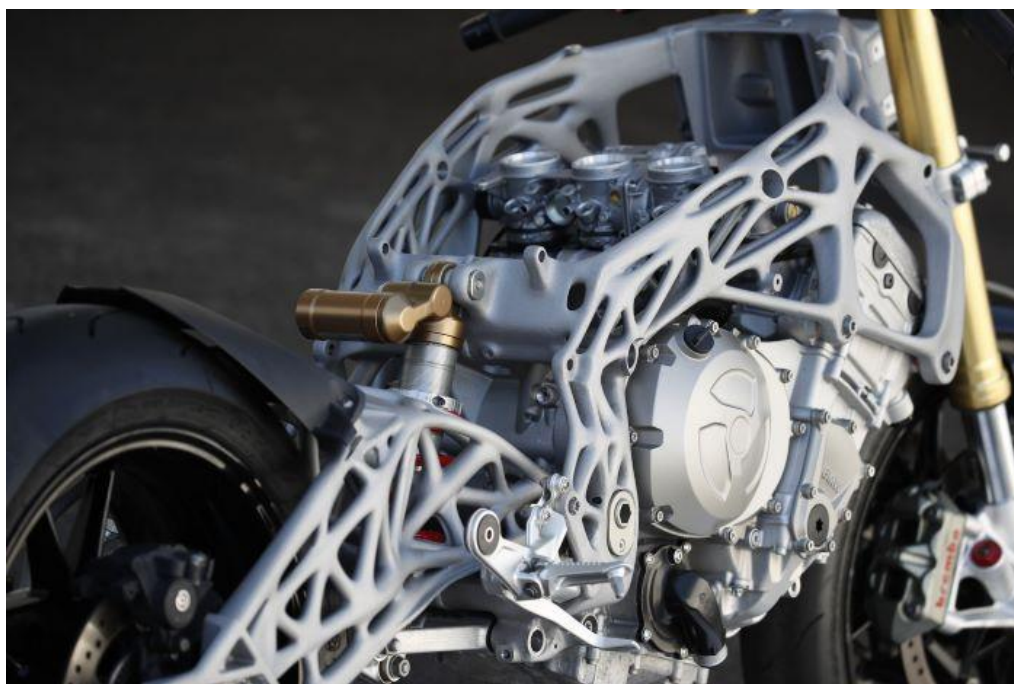
1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Topologická optimalizace (TO)	15
2.1.1	Historie	16
2.1.2	Metody	16
2.1.3	Optimalizační software	18
2.2	Srovnání výrobních omezení TO různých softwarů	19
2.3	Nejčtetnější výrobní omezení	20
2.3.1	Single draw	20
2.3.2	Split draw	20
2.3.3	Extrusion	21
2.3.4	Overhang	21
2.3.5	Radial	22
2.3.6	Další omezení tvaru	22
2.4	Rapid prototyping	23
2.4.1	Fused deposition modeling (FDM)	25
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	26
3.1	Analýza problému	26
3.2	Cíl práce	26
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	27
4.1	Demonstrační součást	27
4.2	Návrhy design space ramene	28
4.3	Materiál	31
4.3.1	ABS filament	31
4.3.2	FDM tiskárna Delti Q XXL na ústavu konstruování	31
4.3.1	Tahové zkoušky	32
4.4	Okrajové podmínky	35
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	36
5.1	Topologická optimalizace a úprava geometrie ramene	36
5.1.1	Bez technologického omezení	36
5.1.2	Split draw Y	38

5.1.3	Single draw - Z	39
5.1.4	Extrusion Y	41
5.1.5	Overhang - Z	43
5.1.1	Přehled dosažených hmotností ramen	44
5.2	Pevnostní MKP analýza	44
5.3	3D tisk optimalizovaných ramen	48
5.4	Fotogrammetrické testování	49
6	DISKUZE	53
7	ZÁVĚR	56
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	57
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	60
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	62
11	SEZNAM TABULEK	64
12	SEZNAM PŘÍLOH	65

1 ÚVOD

Topologická optimalizace (TO) je rozvíjející se metoda, která řeší jeden z častých inženýrských problémů: Jak navrhnout dostatečně tuhou a pevnou součást s co nejlepším využitím materiálu při minimální hmotnosti, a tedy i s nízkými provozními náklady? Jedná se o iterační proces, který konstruktérovi umožní po zadání zatížení, vazeb a případně dalších okrajových podmínek, redukovat materiál součásti a docílit tak velmi lehkých, ale zároveň tuhých konstrukcí. Přestože první práce na téma optimalizace rozložení materiálu v prostoru se objevily na začátku minulého století, bylo její využití dlouhou dobu značně limitováno výrobními technologiemi [1]. Tvary navržené topologickou optimalizací jsou totiž zpravidla velmi složité. K významnějšímu využití došlo až s příchodem aditivních technologií, které umožňují výrobu tvarově komplexních součástí.

Své využití nachází topologická optimalizace v mnoha oblastech průmyslu. Těmi nejvýznamnějšími jsou automotive a aerospace průmysl, kdy v obou těchto odvětvích platí velmi přísné požadavky na nízkou hmotnost a zároveň dostatečně bezpečnou konstrukci. U automobilů a motocyklů, zejména těch závodních, je požadována nízká hmotnost pro dosažení značných zrychlení. Takovým příkladem je třeba topologicky optimalizovaný rám motocyklu BMW i8 Roadster (Obr. 1-1), který předvedla společnost na události Digital Day 2018 [2]. Tento rám je již od pohledu výrazně odlehčen, ale zároveň disponuje i dostatečnou tuhostí typickou pro topologicky optimalizované konstrukce. Ovšem při navrhování letadel či raket je důvodem úspory každého gramu snížení spotřeby paliva, čímž se dosáhne delší doletové vzdálenosti. A právě topologická optimalizace umožňuje docílit žádaného výsledku při zachování tuhosti konstrukcí.



Obr. 1-1 Topologicky optimalizovaný rám motocyklu BMW [2]

Většina součástí má však mnohem více požadavků a omezení, která musí být při jejím návrhu dodržena. Díly navržené počítačem podporovaným inženýrstvím (CAE – *computer aided engineering*) je také třeba vyrobit, a proto nabízí řada softwarů pro topologickou optimalizaci tzv. *manufacturing constraints*. Jedná se o podmínky, pravidla pro návrh tvaru, které zajistí, vhodnost výsledného dílu pro různé výrobní technologie, kterými mohou být odlévání, obrábění nebo kování [3]. Daná omezení mohou do návrhu promítnout také další požadavky konstruktéra, například zachování konstantního průřezu v určitém směru nebo minimální tloušťku stěny. Tato omezení mají zásadní vliv nejen na vyrobitelnost součásti, ale i na její, tuhost. Proto se tato práce věnuje právě vlivu použitých výrobních omezení během TO, a to zejména na tuhost výsledných tvarů.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Topologická optimalizace

V současné době se topologická optimalizace (TO) dočkala značného zájmu inženýrů po celém světě. Jak již bylo zmíněno jedná se o iterační proces (Obr. 2-1), založený na numerických výpočtech, pomocí nichž může být na základě vstupních parametrů dosaženo optimalizovaného tvaru. Vstupními parametry topologické optimalizace jsou zatížení (síly, momenty a tlaky), případně další parametry (např. teplota) odpovídající reálným podmínkám provozu výsledného výrobku. Dále musí být definovány vazby s jinými tělesy a eventuálně deformační či geometrická omezení. Deformačním omezením může být maximální posuv nebo výchylka v určitém bodě tělesa a geometrickým omezením jsou myšleny osy a roviny symetrie, konstantní průřez v určitém směru nebo dělící rovina, bude-li se optimalizovaný díl kupříkladu odlévat.

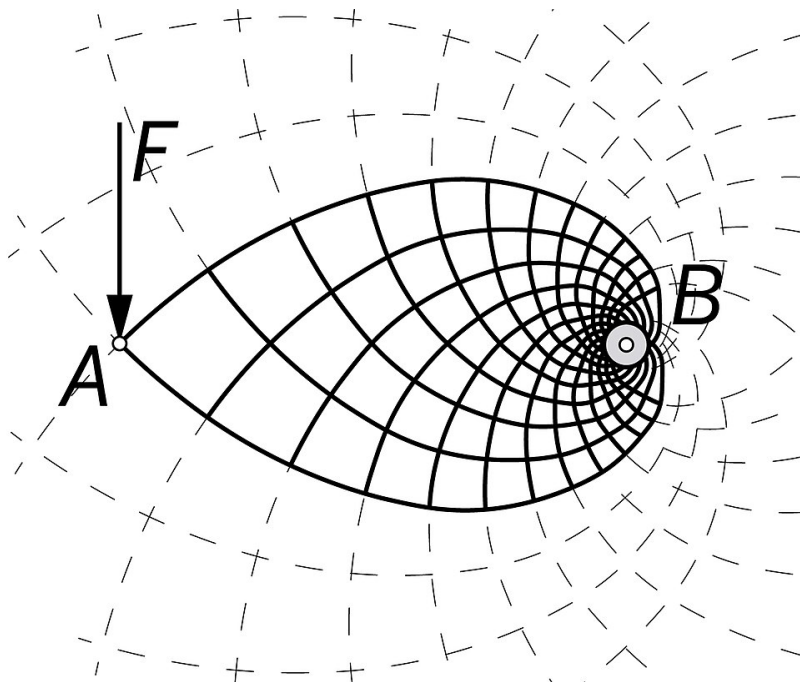
Vlastnostmi, které lze pomocí této metody vhodně optimalizovat nejčastěji bývají hmotnost, tuhost tělesa nebo jeho rezonanční frekvence [4]. Ovšem jednou z bezesporných nevýhod TO je obtížná vyrobitelnost většiny výsledků. Jak je vidět na Obr. 2-1, tvary bývají často velmi složité na výrobu konvenčními technologiemi. Proto je často třeba použití aditivních či formativních technologií.



Obr. 2-1 Příklad iterací topologické optimalizace [4]

2.1.1 Historie

Numerickou metodu, ze které topologická optimalizace vychází, poprvé popsal ve své práci z roku 1904 australský vynálezce A. G. M. Mitchell. V ní se věnoval optimálnímu rozložení materiálu v příhradové konstrukci. Konkrétně porovnával velikost deformací pro různě rozložený materiál při stejných zátěžných podmínkách [5]. Na Obr. 2-2 je znázorněn příklad této struktury pro zatížení silou F působící v bodě A kolmo na úsečku AB.



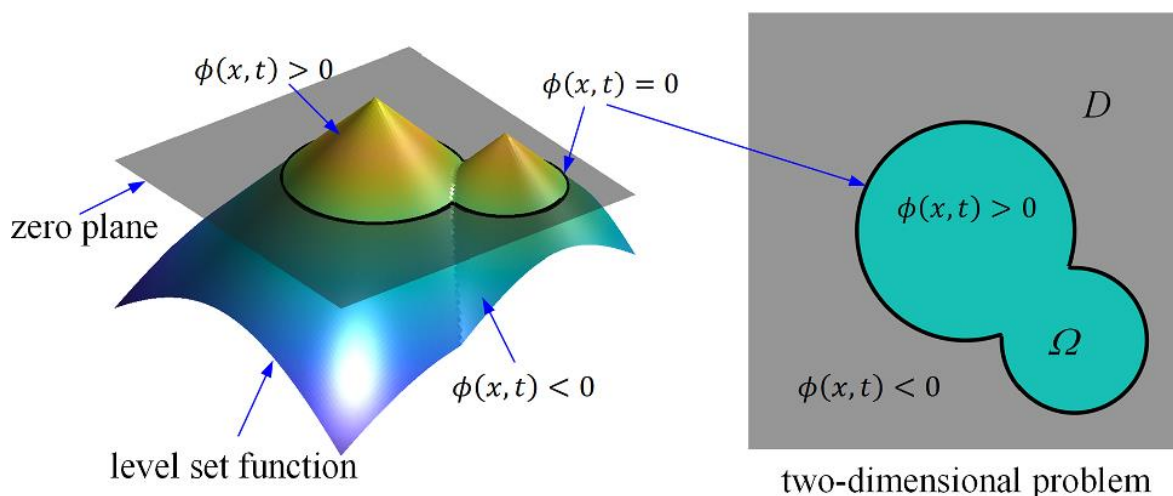
Obr. 2-2 Příklad Mitchell structure [6]

V následujících letech se vyvíjely další metody sloužící k optimálnímu rozložení materiálu a nacházely stále větší uplatnění v mnoha oblastech průmyslu. Topologická optimalizace, v podobě blízké té dnešní, byla popsána v roce 1988. Po roce 2000 došlo k jejímu velkému rozvoji, kdy díky stále větším možnostem aditivní výroby bylo možné vyrábět i složité strukturálně optimalizované tvary.

2.1.2 Metody

Od počátků topologické optimalizace se do dnešní doby vyvinula řada metod, které byly následně zkoumány a upravovány. Vývoj těchto metod se ubíral různými směry na základě přístupu jejich objevitelů a osobností, které se jimi zabývali. Množství z nich se však prakticky nepoužívá, kvůli výpočetní nebo časové náročnosti. Nejznámějším metodám je věnována pozornost níže.

- ESO/BESO – *Evolutionary Structural Optimization* je založena na výpočtu určité veličiny (redukované napětí Von Mises nebo hustoty energie) v každém elementu optimalizovaného tělesa a při jednotlivých iteracích optimalizace jsou odebírány elementy s nejnižší hodnotou počítaného kritéria. *Bi-directional evolutionary optimization (BESO)* je rozšířením ESO, které umožňuje současně přidávat efektivní materiál do struktury a neefektivní materiál odebírat. Obě tyto metody využívají k řešení problému diskrétních hodnot 0 nebo 1 [7]. Kritici této metody jí vytýkají například to, že se často nemusí jednat o optimální návrhy struktur. Proto je dnes také méně používána.
- SIMP – *Solid Isotropic Microstructure (or Material) with Penalization* značí aktuálně nejvyužívanější metodu, vyvinutou v 80. letech minulého století. Jedná se o gradientní metodu, při níž jsou jednotlivým elementům tělesa přiřazovány hodnoty z intervalu (0 – 1), které definují podíl tloušťky materiálu či hustoty v daném elementu. Následně je konvergence k hodnotám 0 a 1 dosaženo pomocí penalizačních metod, např. kontrolou perimetru, gradientním omezením nebo rozostřujícími filtry [7]. Svou značnou využitelnost při řešení optimalizačních problémů různými softwary má díky své rychlosti a efektivitě [8].
- PLSM – *Parametrized Level Set Method* je poměrně novou metodou, která řeší optimální rozložení materiálu v předepsané oblasti za pomoci rovnic množiny úrovní a další pokročilé matematiky. Základní princip této metody lze nejlépe vysvětlit na dvoudimenzionálním problému viz Obr. 2-3. Povrch optimalizované plochy je popsán tzv. level set funkcí, která má v každém bodě ve směru osy Z určitou funkční hodnotu. Z oblasti této funkce je poté vybrána a zachována množina, která obsahuje hodnoty větší než 0. Naopak části s funkčními hodnotami menšími než 0 jsou z procesu vyřazeny. Výhodou je, že tento postup zajišťuje přesné a stabilní výsledky [9]. Svou pozornost PLSM získala díky dobré stabilitě, vysoké efektivitě a hladkým výsledným tvarům.

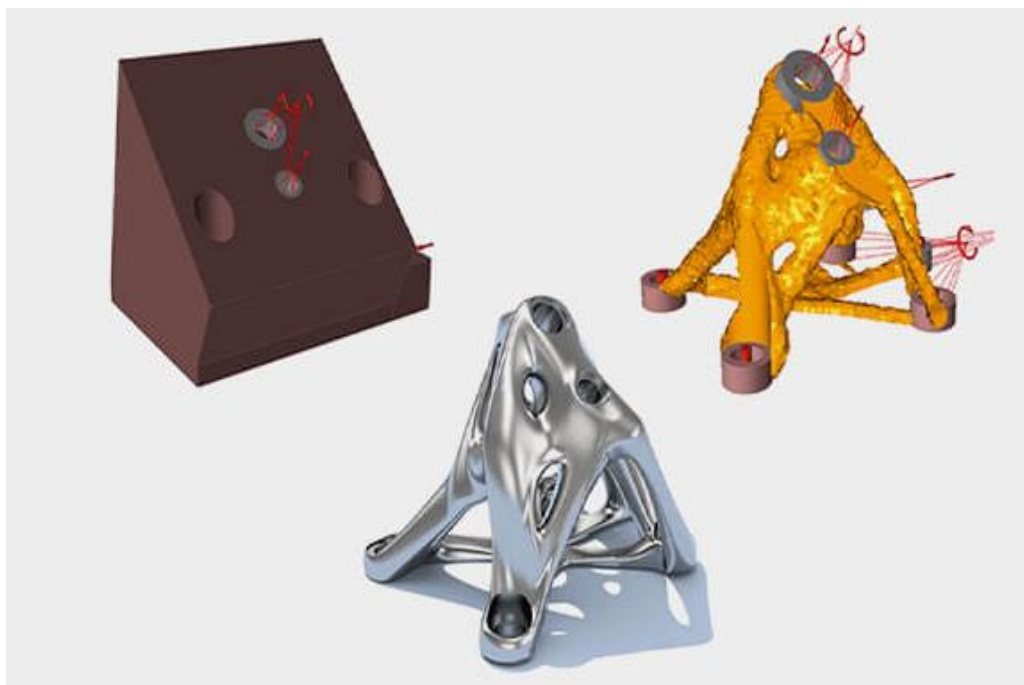


Obr. 2-3 Metoda PLSM pro dvoudimenzionální problém [9]

2.1.3 Optimalizační software

Zpočátku byla topologická optimalizace pouze součástí softwarů pro metodu konečných prvků (MKP). Teprve v posledních letech začal být koncept TO stále více začleňovaný do CAD softwarů, jako jsou například Autodesk Inventor, Creo či Solidworks, kde jsou nástroje pro topologickou optimalizaci v podobě rozšiřujících toolboxů. Existují ovšem i programy určené přímo pro topologickou optimalizaci, těmi jsou například: Altair Inspire (Obr. 2-4) a ProTOp. Dalšími softwary, v nichž lze optimalizovat topologii součástí jsou například Ansys Mechanical, Autodesk Fusion nebo Genesis a MSC Nastran [4].

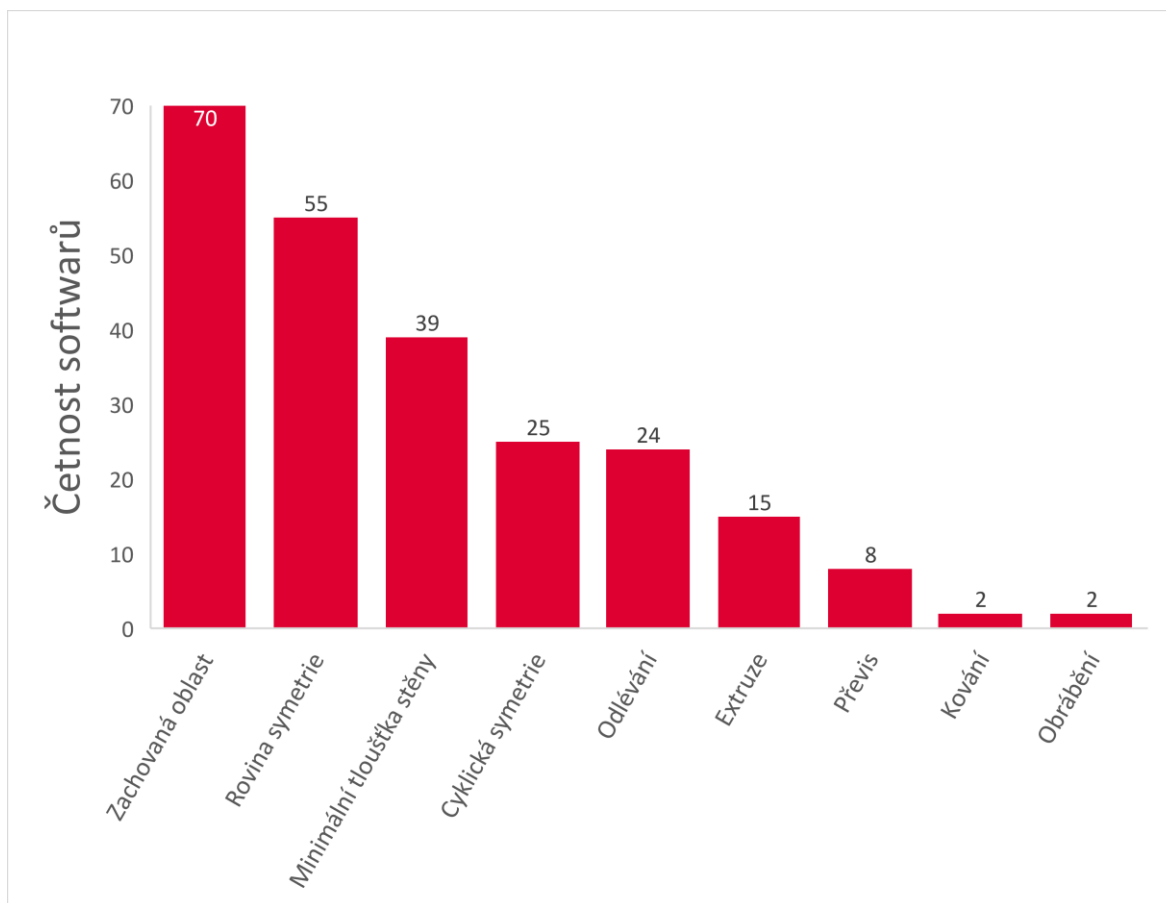
V rámci práce Tyflopoulos et al. [10] (doi: <https://doi.org/10.3390/app12020611>) vznikl veřejně dostupný dokument, který obsahuje digitální knihovnu softwarů pro topologickou optimalizaci, v níž je uvedeno 70 různých optimalizačních softwarů a jsou zde také porovnány.



Obr. 2-4 TO v prostředí Altair® Inspire™ [11]

2.2 Srovnání výrobních omezení TO různých softwarů

Jak bylo již dříve zmíněno, v době vydání článku [10] bylo k dispozici značné množství softwarů pro topologickou optimalizaci. V následujícím grafu (Obr. 2-5) je vidět srovnání četnosti zastoupení jednotlivých výrobních omezení u všech 70 softwarů. Z tohoto zpracování průzkumu Tyflopoulose a kol. vyplývá, že všechny optimalizační softwary umožňují zachovat určitou oblast, která nepodlehne topologické optimalizaci, jinými slovy můžeme zvolit design space (optimalizovanou oblast). Dále velké procento softwarů dovoluje volbu roviny symetrie a omezení minimální tloušťky stěny. Co se týče softwarů umožňujících volbu výrobních omezení zaměřených na tvorbu tvarů vyrobitelných různými technologiemi, zde už je četnost nižší: Odlévání 34%; Extruze 21%; omezení převisu (vhodné pro 3D tisk) 11% a přizpůsobení tvaru pro kování a obrábění umožňují pouhých 2 % softwarů.



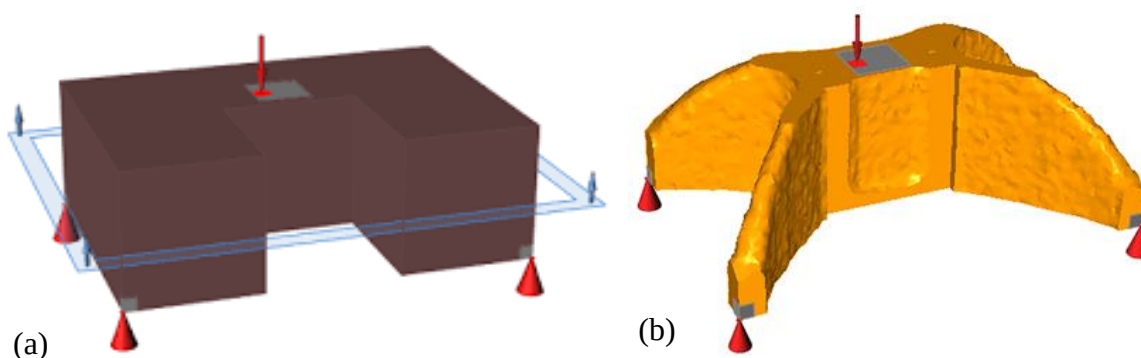
Obr. 2-5 Graf četnosti technologických omezení v optimalizačních softwarech

2.3 Nejčtetnější výrobní omezení

Z grafu výše lze vyčíst nejčtetnější výrobní omezení. Princip jejich funkce bude vysvětlen na příkladech z prostředí produktu Altair Inspire, který nabízí jako i další optimalizační softwary řadu těchto omezení tzv. shape controls neboli kontrol tvaru. To jsou omezení, která umožňují uživateli zahrnout do výpočtu topologické optimalizace potřebné požadavky pro výrobu součástí. Každé z těchto výrobních omezení může být aplikováno na design space navrhovaného dílu.

2.3.1 Single draw

Jedná se o výrobní omezení, které je cíleno převážně na součásti, jenž mají být odlévány, a to konkrétně na ty, u nichž je požadována dělicí rovina vně design space. Výsledné tvary však mohou být rovněž vhodné pro obrábění například CNC frézováním nebo výrobu aditivními technologiemi. Omezení Single draw může být aplikováno na design space v libovolném směru. Výchozí nastavení umožňuje výběr směru a orientace některé z hlavních os kartézského souřadného systému. Šipky u ikony tohoto omezení ukazují směr, kterým bude odebírána polovina formy z výsledného odlitku. Single draw lze kombinovat s vhodně nastavenou rovinou symetrie. Příklad aplikace je zobrazen na Obr. 2-6.



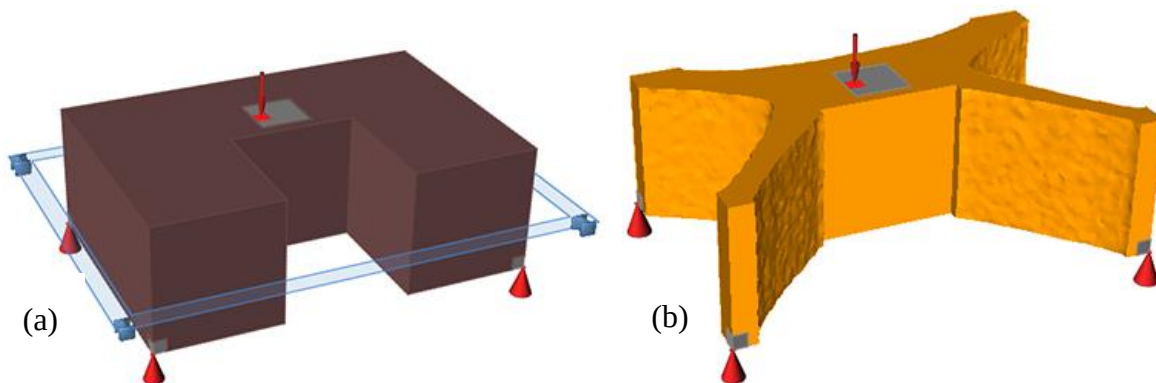
Obr. 2-6 Příklad aplikace omezení Single draw (a) před topologickou optimalizací; (b) po TO [12]

2.3.2 Split draw

Omezení Split draw je na rozdíl od výše zmíněného Single draw používáno při optimalizování součástí s dělicí rovinou uvnitř design space. Opět se může zvolit směr některé z os souřadného systému ve kterém je podmínka aplikována. Vzhledem k její obousměrné povaze již není třeba volit kladný či záporný směr osy. Toto omezení se využívá zejména pro odlévané díly (případně obráběné), kdy obě poloviny formy obsahují část odlévaného dílu. Podstatné je také zmínit, že přesnou polohu dělicí roviny uvnitř součásti není třeba volit, pouze její orientaci. Nejvhodnější polohu si nadefinuje optimalizační nástroj během procesu sám.

2.3.3 Extrusion

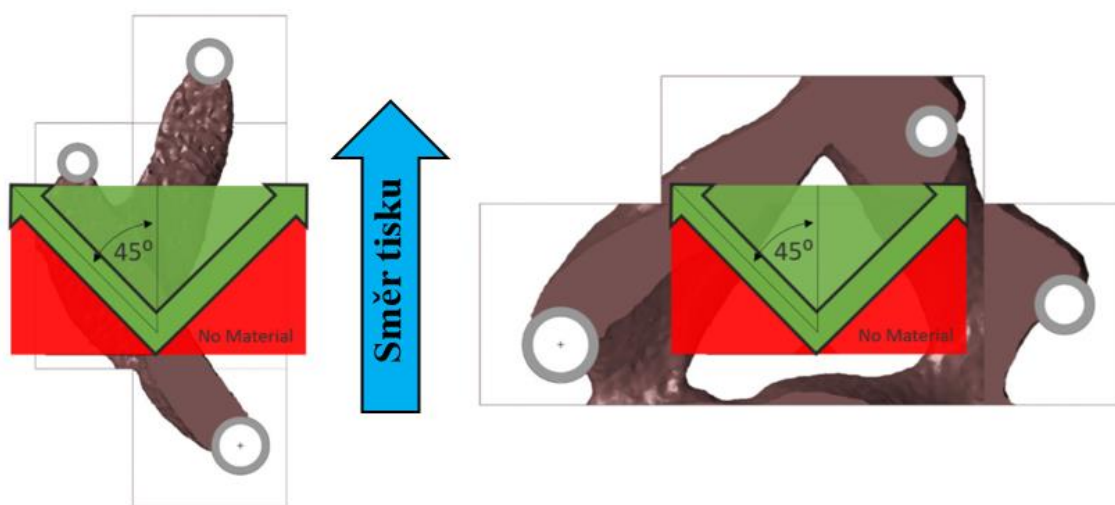
Omezení Extrusion, jak již název napovídá, zajišťuje konstantní průřez součásti v určitém směru, který si při zadávání podmínky zvolíme (viz Obr. 2-7). Optimalizované součásti s tímto omezením poté bývají tvarově jednodušší než při použití ostatních omezení, a proto i snáze vyrobitelné. Nevýhodou může být právě přísnost této podmínky, kdy má optimalizační nástroj velmi omezené možnosti.



Obr. 2-7 Příklad aplikace omezení Extrusion (a) před topologickou optimalizací; (b) po TO [12]

2.3.4 Overhang

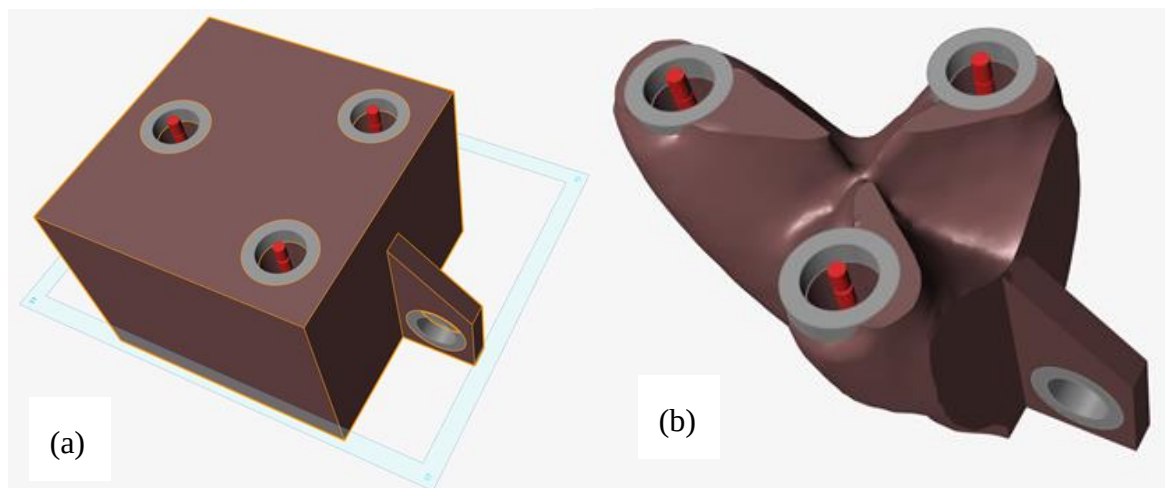
Tento typ výrobního omezení je využíván zejména pro optimalizaci dílů vyráběných aditivními technologiemi. Omezení funguje tak, že se nastaví plocha v blízkém okolí součásti, která je stejně orientována a je co možná nejbližže podložce, na níž budeme tisknout. Poté se zadá maximální úhel převisu, od kterého je nutný tisk podpor. Po optimalizaci tak vznikne lépe samonosný tvar bez nutnosti tisku velkého množství podpor (Obr. 2-8).



Obr. 2-8 Příklad různé orientace tělesa při použití omezení Overhang ([13], upraveno)

2.3.5 Radial

Omezení Radial se používá převážně v případech, kdy má být výsledný tvar obráběn a je třeba, aby obráběcí nástroj zajížděl do polotovaru v radiálním směru k centru některé roviny součásti (viz Obr. 2-9). Při zadávání tohoto omezení v prostředí Inspire se zvolí právě ta rovina k jejímuž centru se bude nástroj radiálně posouvat.

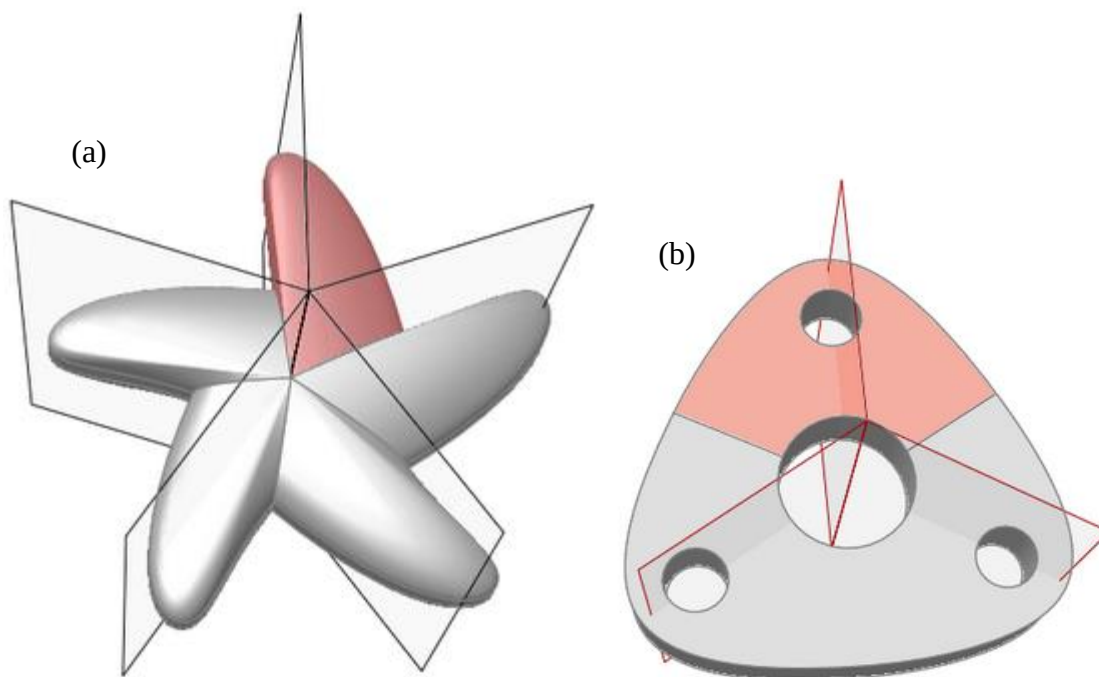


Obr. 2-9 Příklad aplikace omezení Radial (a) před topologickou optimalizací; (b) po TO [12]

2.3.6 Další omezení tvaru

Kromě omezení cílených na výrobu odléváním, 3D tiskem a dalšími výrobními technologiemi lze také nadefinovat čistě tvarová omezení a nechat tak optimalizaci větší volnost. Produkt Altair Inspire nabízí hned několik těchto omezení:

- Symmetric – Používá se v případech, kdy je požadován od výstupu rovinně symetrický tvar. Tuto podmínku lze kombinovat s některými dalšími omezeními, případně mohou být zvoleny i dvě a více rovin symetrie.
- Cyclic – Je voleno, chceme-li optimalizací vytvořit cyklicky se opakující, asymetrický tvar okolo zvolené osy. Osa může být libovolně posouvána a naklápěna. Také je zde možnost volby počtu sektorů, ve kterých se má tvar opakovat.
- Cyclic symmetric – Od Cyclic se liší tím, že tvoří v design space symetrické cyklicky se opakující tvary dle počtu zvolených sektorů, kolem nadefinované osy. Je vhodný k vytváření hvězdovitých tvarů, vrtulí či odlehčených rotačně symetrických součástí.



Obr. 2-10 Rozdíl mezi tvarovými omezeními (a) Cyclic; (b) Cyclic symmetric [14]

- Zachovaná oblast – V naprosté většině případů topologické optimalizace je nutné zachovat určité oblasti:
 - místa spojů a vazeb s okolními součástmi
 - prvky (nebo jejich části), kde působí zatížení

Pro tyto případy lze v Altair Inspire, použít funkce Partition nebo Slice, které rozdělí těleso na více částí (válcově nebo rovinně) a poté se zvolí Design space, prostor, který má být optimalizován.

- Minimální a maximální tloušťka stěny – Tato omezení, zabrání vzniku příliš tenkých nebo naopak širokých prvků v optimalizovaném tvaru. Prvků, které mohou znesnadňovat výrobu a v případě příliš tenkých stěn i podléhat mezním stavům. Definování dostatečné minimální tloušťky stěny má rovněž účel předejít numericky nestabilním výpočtům.

Omezení Single draw, Split draw, Radial, Extrusion a Overhang nelze kombinovat mezi sebou. Ovšem lze každé z nich kombinovat s dalšími omezeními tvaru, viz výše.

2.4 Rapid prototyping

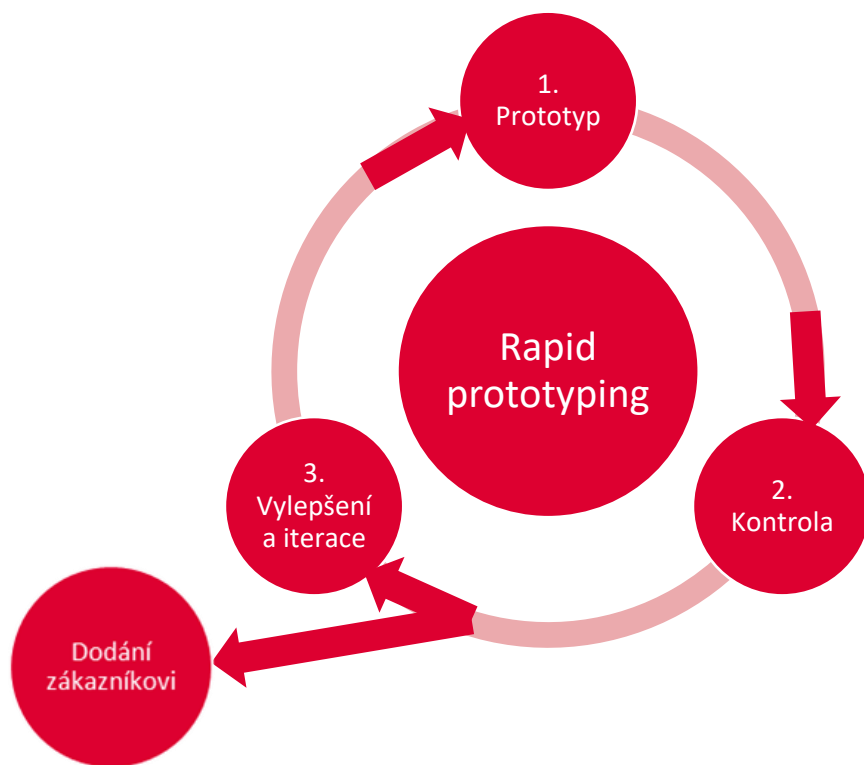
Proces rychlé výroby prototypů, rapid prototyping (RP) byl představen v 80. letech minulého století a od té doby si zajistil své pevné místo mezi ostatními výrobními technologiemi. Jedná se o slibnou alternativu běžných výrobních technologií, která rychle vytvoří fyzickou součást

na základě dat CAD modelu. Svou popularitu si rapid prototyping získal, díky využitelnosti v každé úrovni vývojového cyklu výrobku [15]. Výrobu prototypu můžeme opakovat několikrát, abychom docílili optimálního designu a funkce. Takto vyrobené prototypy mohou být použity pro zhodnocení designu, ověření funkčnosti komponent či jiné analýze nebo také pro marketingové účely a prezentaci produktu zákazníkovi [16]. Pro výrobu prototypů se často využívá 3D tisku metodou FDM a dalších aditivních technologií. Ovšem ne všechny aditivní technologie jsou používány pro rapid prototyping, kvůli svým vysokým nákladům.

Rapid prototyping může být dle [17] rozdělen do tří základních kategorií:

- výroba z pevných materiálů – například Fused deposition modeling (FDM)
- výroba z prášků – např. Selective laser sintering (SLS)
- výroba z tekutého materiálu – např. Stereolitografie (SLA)

Podrobnější rozdělení se provádí také podle charakteru zpracovávaného materiálu (polymerní, kovové, keramické nebo kompozitní).



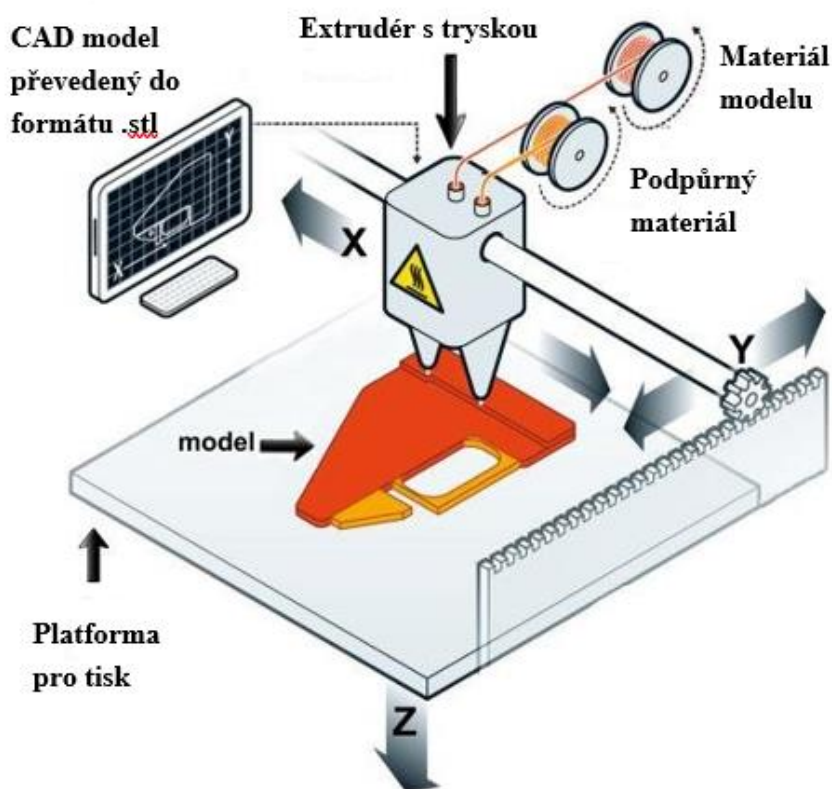
Obr. 2-11 Schéma Rapid prototyping

2.4.1 Fused deposition modeling (FDM)

Stejně jako další aditivní technologie je tato metoda založena na nanášení materiálu vrstvu po vrstvě do trojrozměrných tvarů finální součásti. Materiál, je před procesem v podobě tenkého drátu (filamentu), který je protlačován skrz trysku (extrudér) na tiskovou plochu (viz Obr. 2-12). Jedná se o nejpoužívanější metodu, a to díky své jednoduchosti a relativně nízkým pořizovacím nákladům tiskárny i nákladům na výrobu oproti SLS a SLA. Další výhodou je možnost vytvářet složité tvary. Nevýhodou je ovšem nutnost tisku podpor, pro převísle oblasti modelu. V některých případech je v extrudéru zabudovaná druhá tryska, která slouží k tisku podpor z odlišného materiálu, než je samotný model [18]. Takto vytištěné podpory lze odstranit chemickou lázní, která rozpustí pouze materiál podpor a samotná součást zůstane neporušena. Při použití FDM je také třeba brát v úvahu anizotropní chování výrobku, kdy kvůli vrstvení materiálu v ose Z dochází v tomto směru ke snížení meze pevnosti i smluvní meze kluzu. Z tohoto důvodu je třeba brát v úvahu orientaci výrobku na podložce.

Tato technologie využívá jako materiál různé termoplasty. Nejčastěji PLA, ABS, PET – G nebo Nylon.

Podobně jako u jiných aditivních technologií není zaručena kvalita povrchu vytištěných součástí a je tedy třeba zařazení postprocessingu. 3D výtisk je možné obrábět, brousit, kytovat či nabarvit.



Obr. 2-12 Schéma výroby dílu technologií FDM ([19], upraveno)

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Během procesu topologické optimalizace lze zavést řadu omezujících podmínek a pravidel. Mnohé z nich lze aplikovat přímo na výpočet topologické optimalizace. Taková omezení často výrazně ovlivní výsledný tvar, a tudíž i tuhost součástí. Proto bude porovnávána právě tuhost výsledných návrhů. Aby byly výsledky srovnatelné, je třeba optimalizovat součásti na určitou shodnou hmotnost, případně vztáhnout tuhost k 1 kg.

Tyflopoulos et al. ve svém článku [10] podrobně zmapoval a porovnal softwary umožňující topologickou optimalizaci. Sepsal různé specifikace jednotlivých softwarů a mimo jiné i jaká omezení TO umožňují uživateli aplikovat. Na základě tohoto průzkumu byl vybrán software, ve kterém bude optimalizace probíhat, a to konkrétně Altair Inspire – OptiStruct, jenž nabízí bezplatnou studentskou licenci. Inspire je program pro tuto práci ideální volba, protože obsahuje množství výrobních omezení, jež se mohou na součást aplikovat.

Tang a kol. se ve své práci [20] již věnovali optimalizaci konkrétní součásti, a to jak klasické topologické, tak i tzv. Lattice structures (prutové konstrukci). Demonstrační díl byl pro tuto práci použit totožný jako ve zmíněném článku [20] a přebrány byly také i některé okrajové podmínky.

Pro porovnání byla vybrána čtyři z pěti výrobních omezení, jimiž disponuje Altair Inspire, tedy: Single draw, Split draw, Extrusion a Overhang. Vyřazeno bylo omezení Radial, které je vzhledem k charakteru optimalizované součásti nevhodné. Aby bylo srovnání úplné rozhodlo se vytvořit i jeden návrh ramene optimalizovaný bez technologických omezení.

Dále bylo na základě rešeršního průzkumu a kvůli časté složitosti optimalizovaných tvarů zvoleno využití filozofie Rapid Prototyping při výrobě ramen, a to konkrétně technologií FDM. Ramena je třeba vyrobit za účelem experimentálního ověření výsledků MKP pevnostní analýzy.

3.2 Cíl práce

Cílem právě čtené bakalářské práce je porovnat tuhost topologicky optimalizovaných ramen kvadrokoptéry s použitím různých technologických omezení, zajišťujících vhodnost tvarů pro jednotlivé výrobní technologie.

Dílčími cíli práce jsou:

- přehled okrajových podmínek topologické optimalizace z hlediska technologií
- koncepční varianty topologicky optimalizovaného ramene,
- porovnání variant pomocí MKP
- výroba a otestování funkčních vzorků

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Před samotnou optimalizací ramene bylo potřeba provést několik dílčích průzkumů, zkoušek a rozhodnutí. Zvolen a zanalyzován byl demonstrační díl, který musel být upraven, aby byla zajištěna vhodnost pro topologickou optimalizaci. V tomto kroku byl definován také optimalizační prostor (tzv. Design space). Dále byl před samotnou optimalizací zvolen materiál ABS a technologie výroby ramen 3D tiskem metodou FDM. Provedeny byly také tahové zkoušky takto vyrobených vzorků z ABS, aby se určili pevnostní charakteristiky vzhledem k různě orientovanému tisku. Na závěr koncepčního řešení byly určeny okrajové podmínky optimalizace.

4.1 Demonstrační součást

Jako součást pro aplikaci topologické optimalizace a následného porovnání jejich výsledků s různými technologickými omezeními bylo použito rameno z kvadrokoptéry Flame Wheel F450 od čínské společnosti DJI. Jak je vidět na obrázku Obr. 4-1 jedná se o velmi lehký a konstrukčně jednoduchý dron, který obsahuje několik klíčových komponent, ale v zásadě je určen pro úpravu zákazníky, kteří si mohou dron postavit sami s různými přídatnými komponenty. Tento model obsahuje 4 ramena, každé s vlastní vrtulí, ovšem prodává se i varianta se šesti rameny. V této práci bude věnována pozornost pouze kvadrokoptérnímu provedení (viz Obr. 4-1) [21]. Jako podklad k této práci byly použity volně dostupná CAD data modelů jeho základních komponent, konkrétně těla dronu a jeho ramen.



Obr. 4-1 Dron Flame Wheel F450 [21]

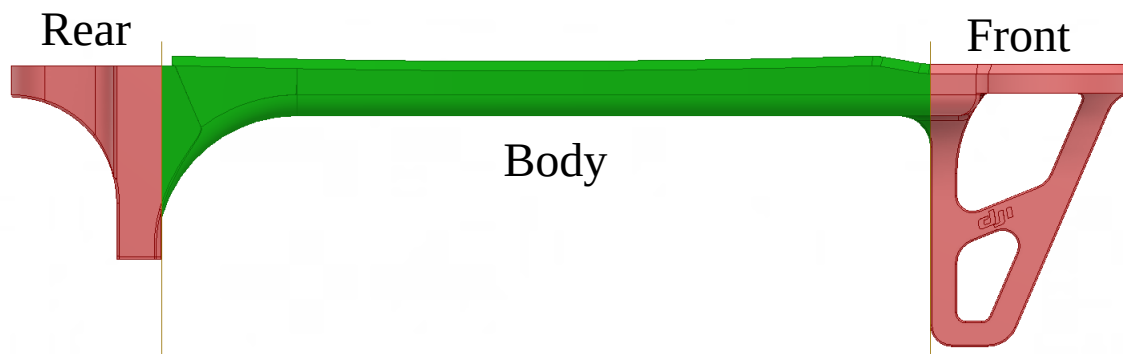
4.2 Návrhy design space ramene

Prvním krokem optimalizování součásti je definice prostoru Design space. Originální rameno kvadrokoptéry Flame wheel (viz Obr. 4-2) již je výrazně odlehčené a tvarově značně složité. Proto bylo třeba jej přemodelovat na vhodnější tvar pro topologickou optimalizaci.



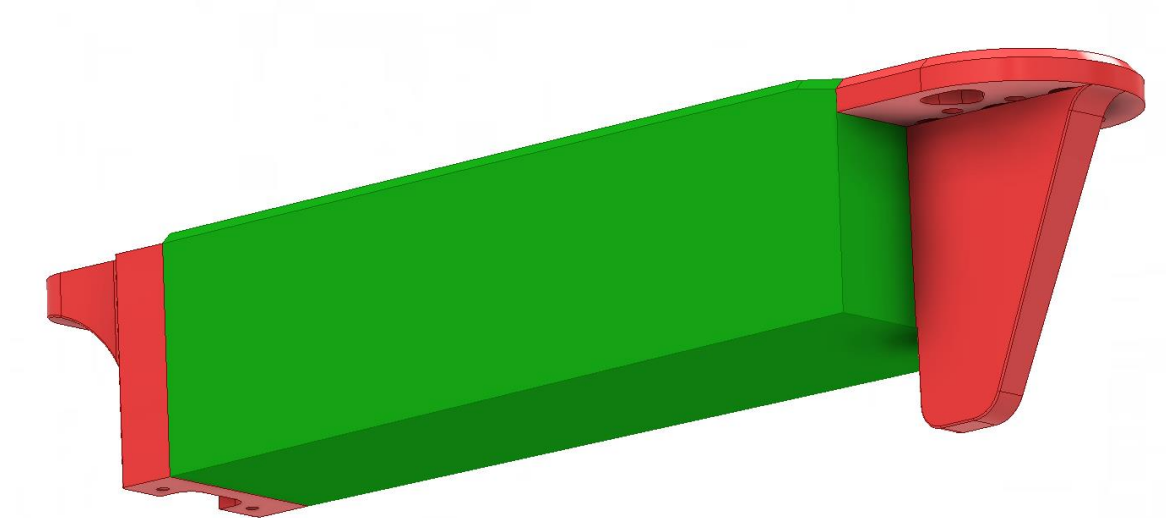
Obr. 4-2 Originální tvar ramene

Na základě článku [20] bylo rozhodnuto, že se rameno rozdělí na 3 části (viz Obr. 4-3). Okrajové části (červené Front a Rear) se zachovají stejné nebo podobné originálnímu ramenu a optimalizována bude prostřední část (zelená Body), která bude zvolena jako design space.



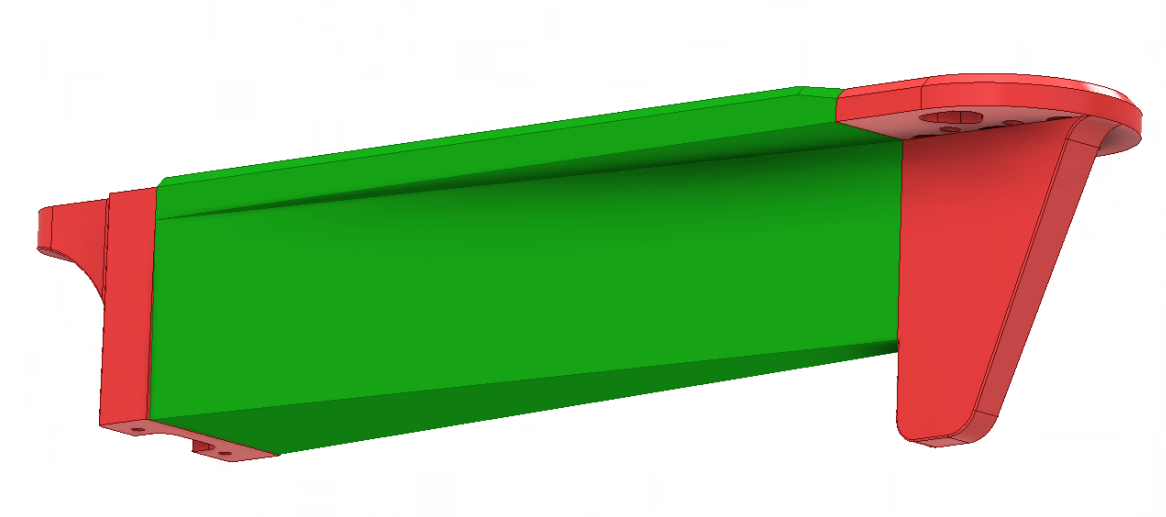
Obr. 4-3 Rozdělení ramene na 3 části

Koncepčních variant tvaru design space a krajních částí ramene bylo postupně vytvořeno 6. Prvotní myšlenkou bylo zachovat Front a Rear v původní podobě a Body nahradit jednodušším a objemnějším tvarem, aby měl optimalizační nástroj větší volnost (Obr. 4-4). Ovšem problém byl u testovacích optimalizací v návaznosti částí ramene mezi sebou.



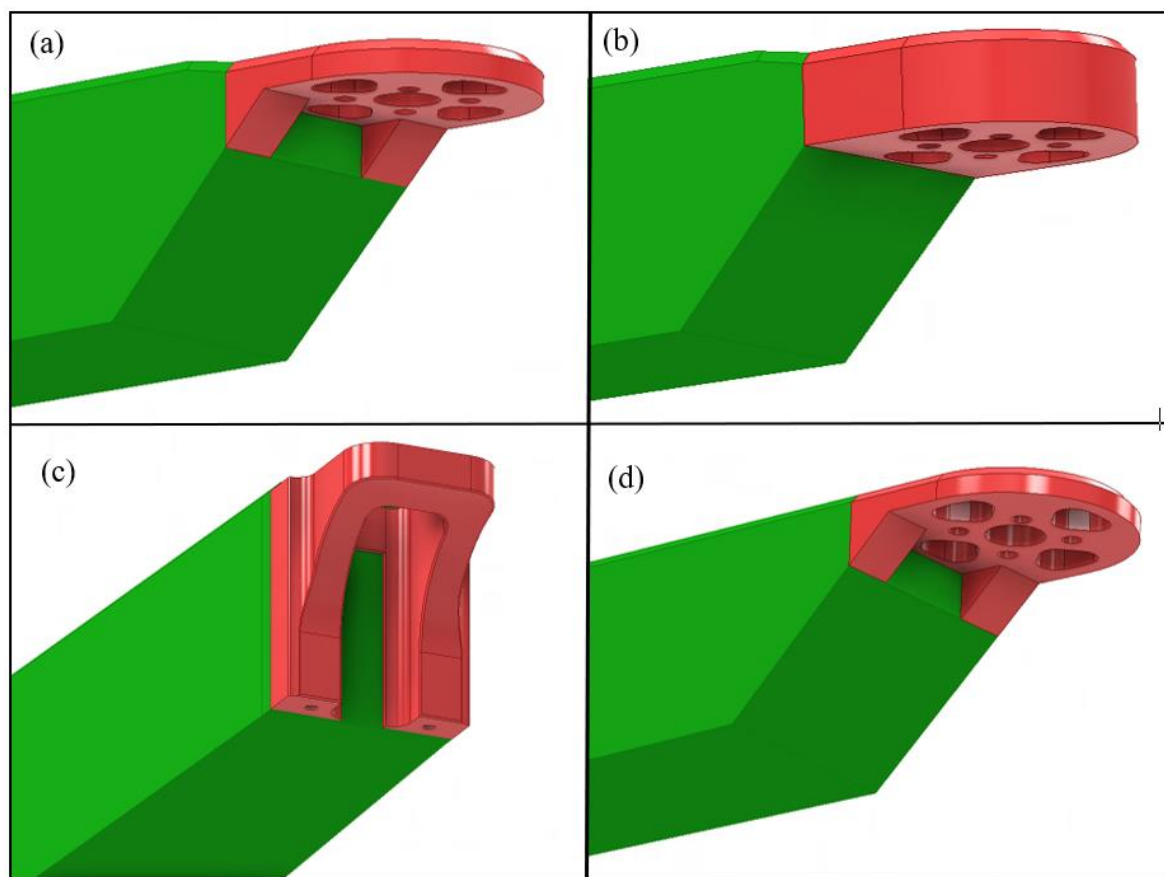
Obr. 4-4 Koncept design space 1

Po úpravě Body, při které byla zajištěna lepší návaznost na okrajové části ramene byl již tvar design space příliš komplikovaný a nevhodný pro optimalizaci (Obr. 4-5).



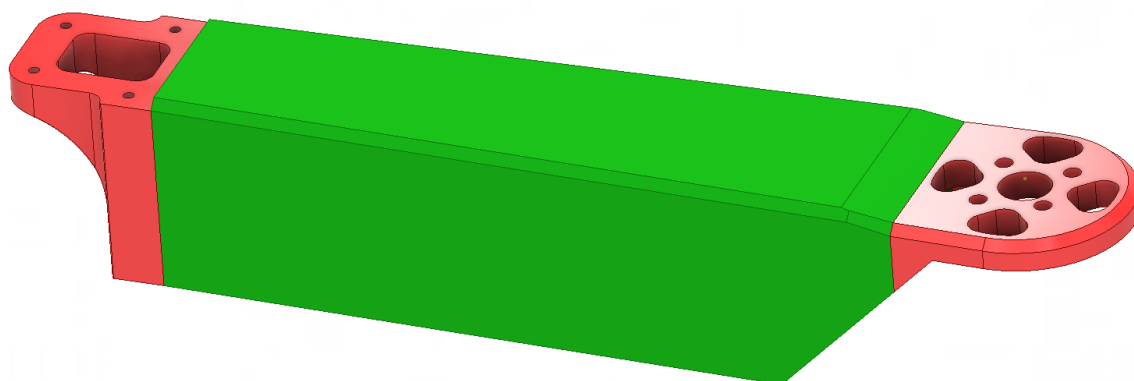
Obr. 4-5 Koncept design space 2

Proto bylo rozhodnuto o případné úpravě tvaru Front a Rear. Několik návrhů je zobrazeno na Obr. 4-6. Návrhy (b); (c) a (d) byly vyloučeny kvůli příliš velké odlišnosti od původního tvaru.



Obr. 4-6 Další koncepty tvaru ramene (a) Front návrh 1; (b) Front návrh 2; (c) Rear návrh 1; (d) Zarovnání vrchní části ramene do stejné horizontální úrovně

Jako finální tvar ramene pro optimalizaci byl použit návrh viz Obr. 4-7 s původním tvarem Rear a návrhem Front viz Obr. 4-6 (a).



Obr. 4-7 Finální tvar ramene pro optimalizaci

4.3 Materiál

4.3.1 ABS filament

Pro správný průběh topologické optimalizace bylo třeba přiřadit CAD modelu materiál s fyzikálními a mechanickými parametry odpovídajícími realitě. S ohledem na charakter úlohy a tisk metodou FDM, byl zvolen jako materiál ramen akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Konkrétně filament o průměru 1,75 mm barvy Natural.

4.3.2 FDM tiskárna DeltiQ XXL na ústavu konstruování

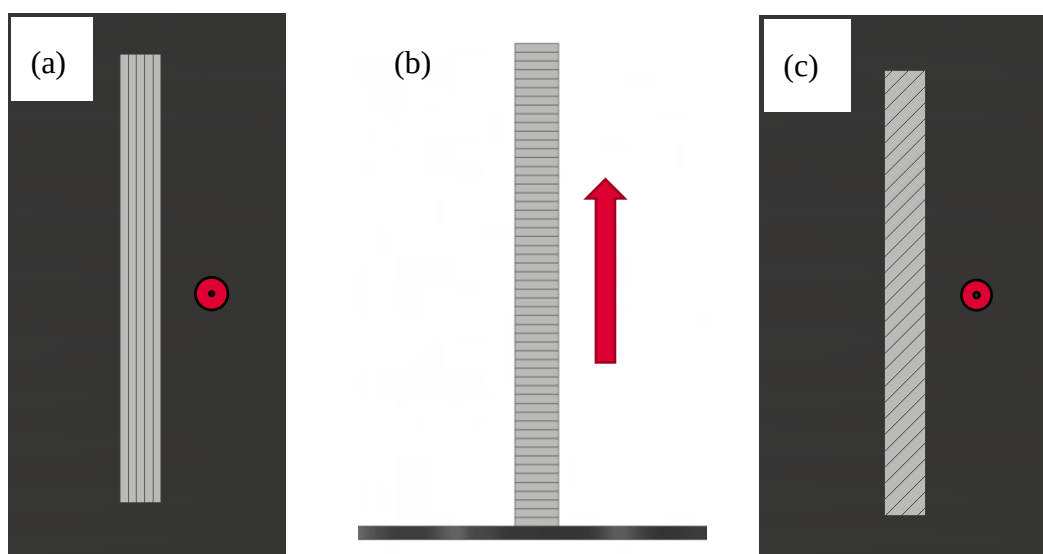
Ústav konstruování disponuje tiskárnou DeltiQ XXL (Obr. 4-8) od české společnosti TRILAB, která používá kinematiku delta. To znamená že extrudér filamentu s tryskou je zavěšen v tomto případě na třech ramenech, která konají vertikální translační pohyb po svých vedeních a pomocí přesných výpočtů, tak polohují ústí trysky. Výhodou této kinematiky je vysoká rychlost tisku a statická podložka, na níž se model staví. Tiskárny s kinematikou delta mají oproti těm s kartézským systémem výrazně lehčí tiskovou hlavu a menší setrvačné účinky. FDM tiskárna DeltiQ XXL má vyhřívanou kruhovou tiskovou podložku o průměru 250 mm a výšku tiskového prostoru 800 mm. Tisková hlava s tryskou o průměru 0,4 mm dokáže natavit filament až do teploty 300°C.



Obr. 4-8 Tiskárna DeltiQ XL v laboratoři Ústavu konstruování

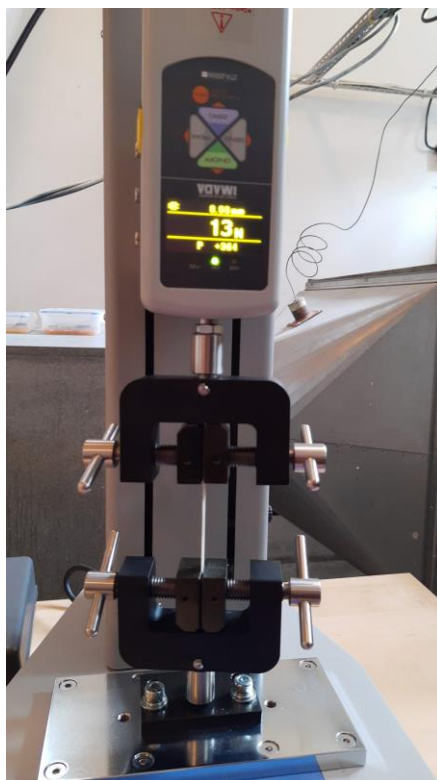
4.3.1 Tahové zkoušky

Výrobce filamentu, který bude použit pro 3D tisk prototypů ramen, neuvádí mechanické vlastnosti materiálu a zároveň, jak již bylo dříve zmíněno, při 3D tisku technologií FDM dochází k anizotropnímu chování materiálu. Proto byly provedeny tahové zkoušky vzorků vytištěných z ABS filamentu. Rozměry a tvar testovacích vzorků byly převzaty z normy ČSN EN ISO 527-3 viz [22]. Konkrétně bylo použito zkušební těleso typu 2. Na tiskárně DeltiQ XXL bylo vytištěno 5 vzorků v horizontální poloze, 5 ve vertikální a 1 zkušební vzorek opět v horizontální poloze, ovšem tentokrát s vlákny natočenými o 45° ke směru působícího napětí při tahové zkoušce. Všechny vzorky byly vytištěny se 100% výplní. Na Obr. 4-9 je zobrazena orientace na tiskové podložce a směr vláken tahových vzorků. Šipka značí směr tisku.



Obr. 4-9 Orientace vzorků pro tahovou zkoušku na tiskové podložce (a) horizontálně; (b) vertikálně; (c) horizontálně s vlákny pod 45° ke směru tahu

Tahové zkoušky probíhaly na zařízení Imada MX2-2500N (Obr. 4-10). Kdy se vždy daný vzorek upnul do čelistí na obou jeho koncích ve vzdálenosti dle normy [22] a siloměrem byla měřena působící síla (F_p) při konstantní posuvové rychlosti vrchní čelisti $v_p = 10$ mm/min. Vzorkování měření bylo 0,0005 sekundy.



Obr. 4-10 Zařízení Imada MX2-2500N

Naměřený vývoj síly v čase bylo nutné přepočítat na napětí a deformaci pomocí vzorců (4 1); (4 2); (4 3) a (4 4), kde t je čas posuvu, S_0 původní průřez (ten byl u každého vzorku jiný), l je původní délka vzorku a F_{max} maximální působící síla během zkoušky.

$$\sigma = \frac{F_p}{S_0} \quad (4-1)$$

$$\Delta l = v_p \cdot t \quad (4-2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (4-3)$$

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (4-4)$$

Spočtena byla smluvní mez pevnosti (R_m) a modul pružnosti (E) v lineární části tahové křivky pro každý vzorek. Dále se grafickou metodou určily smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$). U vzorků vytištěných vertikálně určena nebyla, a to z důvodu lineárního charakteru tahových křivek po celé jejich délce. Vzhledem k zanedbatelnému a nezměřitelnému zúžení průřezu byla hodnota Poissonovi konstanty ($\mu = 0,35$) přebrána z materiálových vlastností ABS v knihovně Altair Inspire. Odtud byla také přebrána hustota ABS ($\rho = 1,06 \text{ g/cm}^3$), ze které byly později počítány hmotnosti dílů. Výsledky tahových zkoušek zobrazují tabulky níže (Tab. 4-1; Tab. 4-2; Tab. 4-3). Tahové diagramy všech testovaných vzorků jsou v příloze 1.

Tab. 4-1 Výsledné hodnoty vzorků vytištěných horizontálně

Vzorek č.	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota
Modul pružnosti E [MPa]	2043,7	2067,4	2006,5	2173,2	2269,9	2112,2
Mez pevnosti R _m [MPa]	35,9	36,9	35,5	38,1	35,1	36,3
Smluvní mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	35,5	36,2	35,1	38,0	34,5	35,9

Tab. 4-2 Výsledné hodnoty vzorků vytištěných vertikálně

Vzorek č.	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota
Modul pružnosti E [MPa]	1909,7	2067,4	1844,7	1793,8	1616,5	1846,4
Mez pevnosti R _m [MPa]	24,1	24,5	21,8	22,3	16,4	21,8
Smluvní mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	Nelze určit					-

Tab. 4-3 Výsledné hodnoty vzorku vytištěného horizontálně s vlákny pod 45° ke směru tahu

Vzorek č.	1
Modul pružnosti E [MPa]	1940,5
Mez pevnosti R _m [MPa]	34,8
Smluvní mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	30,9

Výsledky potvrdily anizotropní chování tištěného materiálu, kdy počítané pevnostní charakteristiky dosahovaly nejnižších hodnot u vertikálně vytištěných vzorků, které byly namáhány tahem kolmým ke směru vláken. Pro následné operace (topologickou optimalizaci a pevnostní analýzu) byly použity průměrné hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti právě z vertikálně vytištěných vzorků. Voleno tak bylo z důvodu zachování konzervativního přístupu s větší bezpečností.

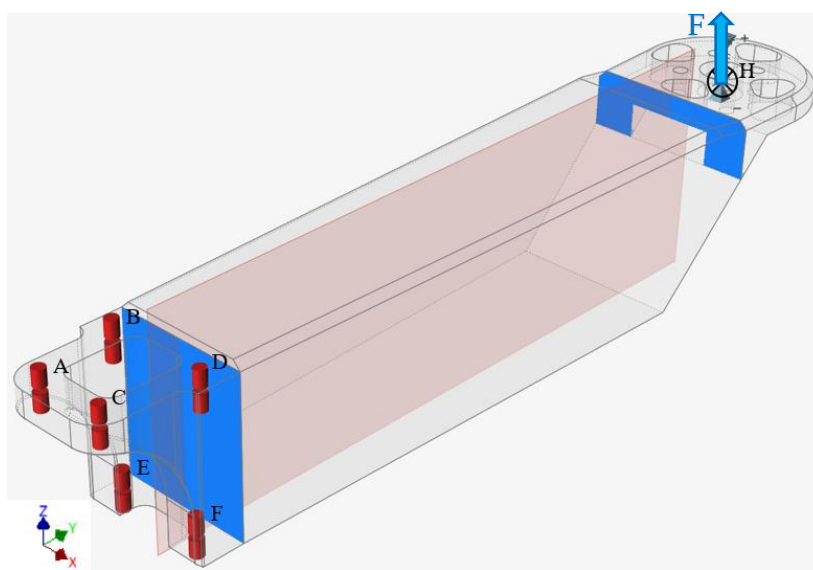
4.4 Okrajové podmínky

V dalším kroku bylo třeba definovat okrajových podmínek optimalizace. K topologické optimalizaci bude využito softwaru Altair Inspire verze 2021.2.1. Proto jsou všechny okrajové podmínky přizpůsobeny jeho možnostem. Zatížení se použilo stejné jako v práci Y. Tanga et al. [20]. Tedy osamělá síla F o velikosti 7,5 N aplikována v bodě H, orientována v kladném směru osy Z. Dále byl modelu přiřazen materiál ABS popsáný v kapitole 4.3.

Ze stejné práce byly přebrány i některé další okrajové podmínky:

- Pevné vazby v otvorech A, B, C, D, E, F pro šrouby M3
- Omezení posuvu v bodě H o velikosti 7 mm v kladném směru osy Z
- Maximální napětí v optimalizovaných ramenech by nemělo překročit mez pevnosti materiálu (21,8 MPa).

Následně byly na model aplikovány pevné kontakty (*bonded*) mezi Body a Front i mezi Body a Rear (modré oblasti na Obr. 4-11 Okrajové podmínky optimalizací ramene). Střední část (Body) byla zvolena jako design space a na ní se nadefinovala rovina symetrie po délce ramene shodná s rovinou YZ.



Obr. 4-11 Okrajové podmínky optimalizací ramene

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V této kapitole bude věnována pozornost samotným optimalizacím ramene, které probíhali iteračním procesem, s různými podmínkami. Také bude popsána následná úprava navržené geometrie, příprava STL dat, 3D tisk ramen, MKP pevnostní analýza a testování průhybu ramen s využitím fotogrammetrie. CAD modely výsledných návrhů jsou součástí přílohy 5 a výkresová dokumentace přílohy 6.

5.1 Topologická optimalizace a úprava geometrie ramen

Jak již bylo dříve zmíněno topologická optimalizace byla prováděna v programu Altair Inspire. S ohledem na porovnatelnost výsledných návrhů ramen, byly všechny optimalizace provedeny za stejných (nebo velmi podobných podmínek). Cílem optimalizace všech návrhů bylo snížit hmotnost ramene z 217 gramů (hmotnost návrhu před optimalizací) na 41g (hmotnost originálního ramene z materiálu ABS). Optimalizována bude však pouze střední část ramene. Proto byly hmotnosti krajních částí odečteny a cíl upraven na snížení hmotnosti Body ze 198 g na 21 g s odchylkou ± 3 g, což odpovídá úzkému intervalu okolo hmotnosti střední části originálního ramene z kvadrokoptéry Flame Wheel F450.

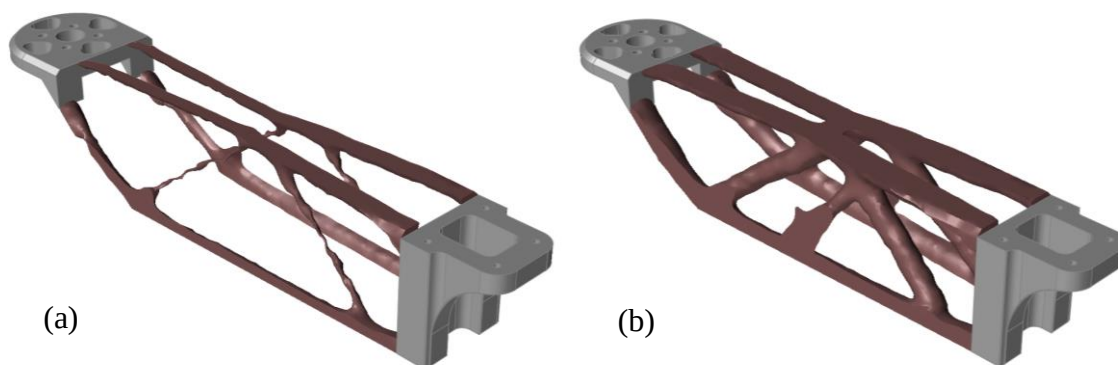
Rameno bylo v první iteraci optimalizováno na pět různých návrhů, vždy s těmito nastaveními:

- Cíl TO: minimalizovat hmotnost pro koeficient bezpečnosti 1,3
- Minimální tloušťka stěny: 8 mm

U některých návrhů bylo zapotřebí i druhé iterace, kde byly přídatná omezení nastavena individuálně (viz následující kapitoly). Společné pro tyto návrhy byl pouze cíl maximalizovat tuhost a omezení minimální tloušťky stěny na 5 mm.

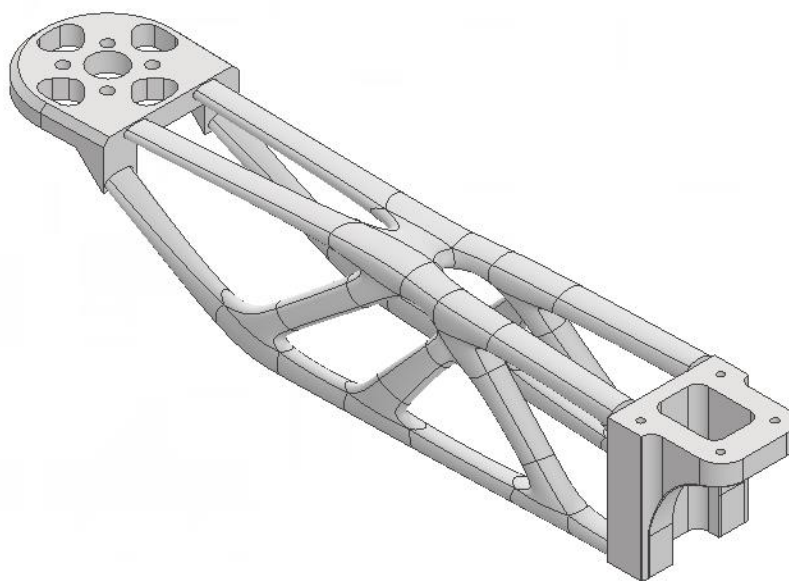
5.1.1 Bez technologického omezení

Nebo také Without constraints. V tomto prvním návrhu ramene, nebylo na optimalizovaný tvar aplikováno žádné technologické omezení. První iterace topologické optimalizace probíhala za okrajových podmínek popsaných v kapitole 4.4. Výsledný návrh tvaru obsahoval značné materiálové nespojitosti, a proto bylo nutné jej upravit přidáním materiálu, které Inspire umožňuje (viz Obr. 5-1). Podobné úpravy byly bezprostředně po optimalizaci provedeny i u ostatních návrhů ramen.



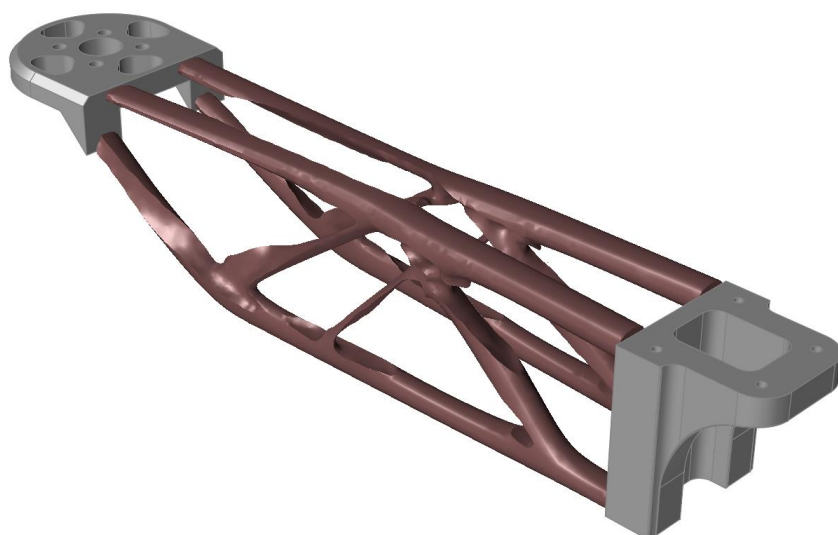
Obr. 5-1 Výsledek 1. iterace optimalizovaný bez technologického omezení
(a) Původní (nespojité); (b) Upravený

Takto upravený návrh optimalizovaného tvaru je poté nutné převést na CAD model s plným materiálem. Altair Inspire umožňuje proložení návrhu tzv. PolyNURBS (*non-uniform rational basis spline*) surfaces, což jsou povrchy popsané dvouparametrickými funkcemi [23], které lze poté převést na geometrii, např. ve formátu Step. Tento postup byl použit i v tomto případě (Obr. 5-2).

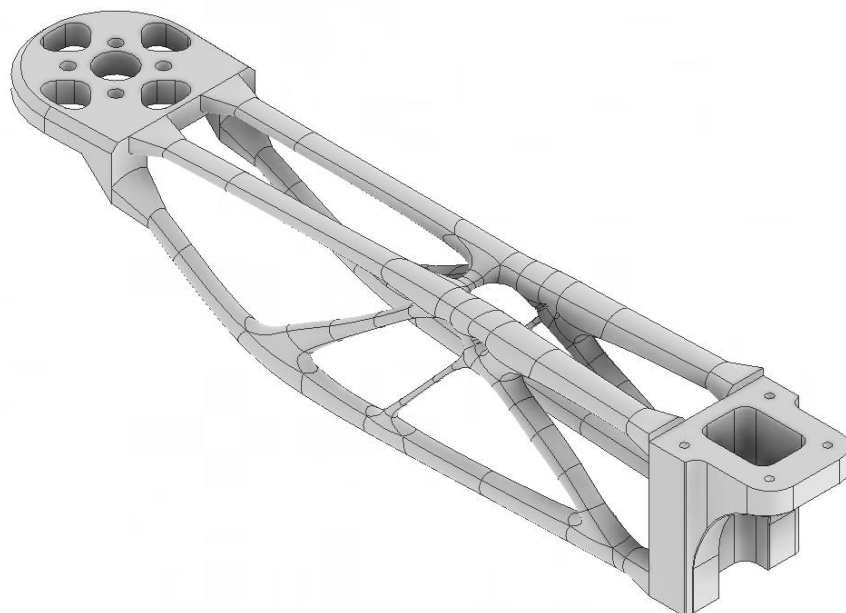


Obr. 5-2 CAD model 1. iterace návrhu bez technologického omezení

Hmotnost tohoto návrhu odpovídala 29 g, proto byla provedena i druhá iterace topologické optimalizace. Zde byl volen cíl maximalizovat tuhost s cílovou 65% hmotností, aby byla výsledná hmotnost střední části co nejblíží cíleným 21 g. Optimalizovaný návrh tvaru (Obr. 5-3) byl převeden na CAD model opět pomocí proložení PolyNURBS. Hmotnost tentokrát vyšla 20 g, ovšem model měl značné nedostatky, a proto byl upraven v programu Autodesk Inventor. Podobně jako i u následujících návrhů bylo upraveno převážně napojení Body na okrajové části a ty byly poté spojeny opět do jedné celistvé součásti. Finální tvar ramene bez použití technologických omezení vážil 21 g a je zobrazen na Obr. 5-4.



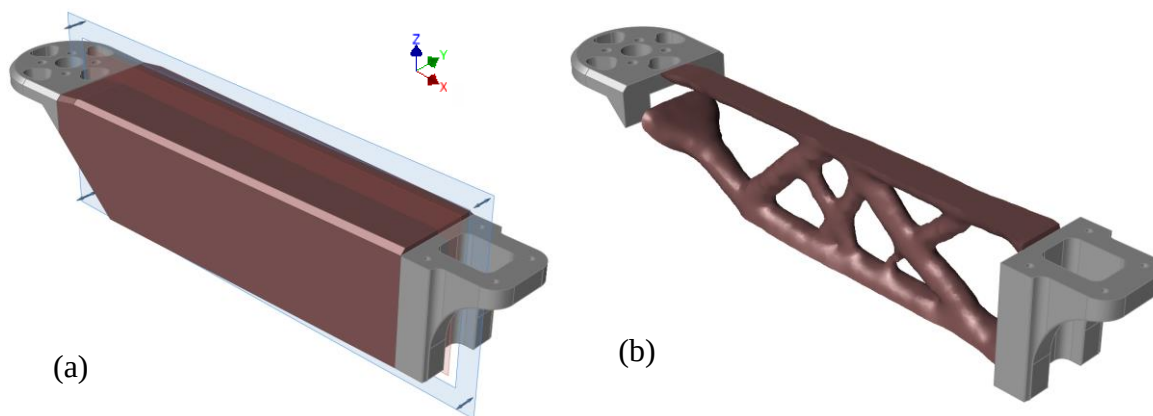
Obr. 5-3 Návrh tvaru 2. iterace optimalizovaný bez technologického omezení



Obr. 5-4 Finální CAD model 2. iterace návrhu bez technologického omezení

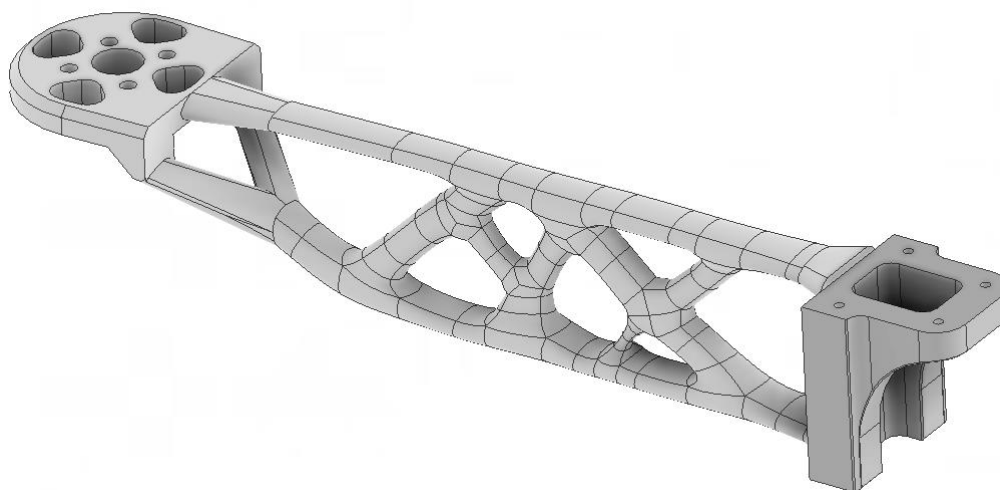
5.1.2 Split draw Y

Značí použité omezení v tomto návrhu ramene, které bylo aplikováno na design space ve směru osy Y, tedy po šířce ramene (Obr. 5-5). Stejně jako u návrhu Bez technologického omezení byl výsledný návrh upraven, aby obsahoval spojitou geometrii a poté proložen PolyNURBS plochami a převeden na CAD model.



Obr. 5-5 Optimalizace ramene s omezením Split draw Y (a) Aplikované omezení; (b) Výsledný tvar

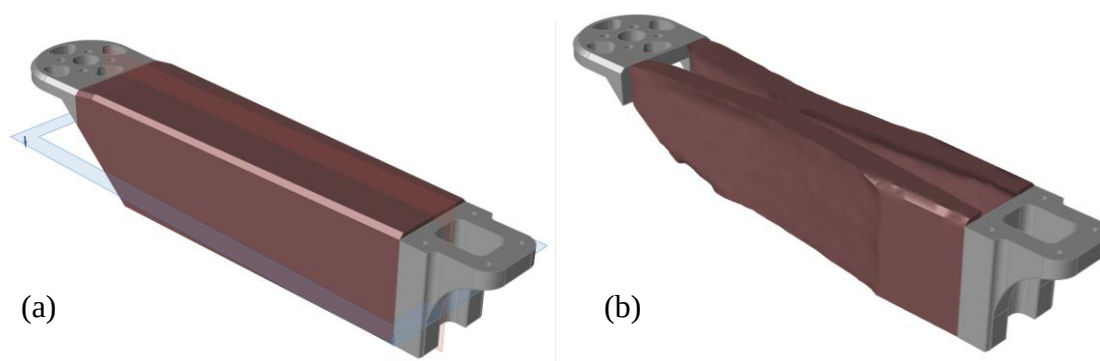
Tato geometrie byla následně upravena do finální podoby (viz Obr. 5-6) o hmotnosti 22 g. Proto nebylo již zapotřebí druhé iterace.



Obr. 5-6 Finální CAD model návrhu s omezením Split draw Y

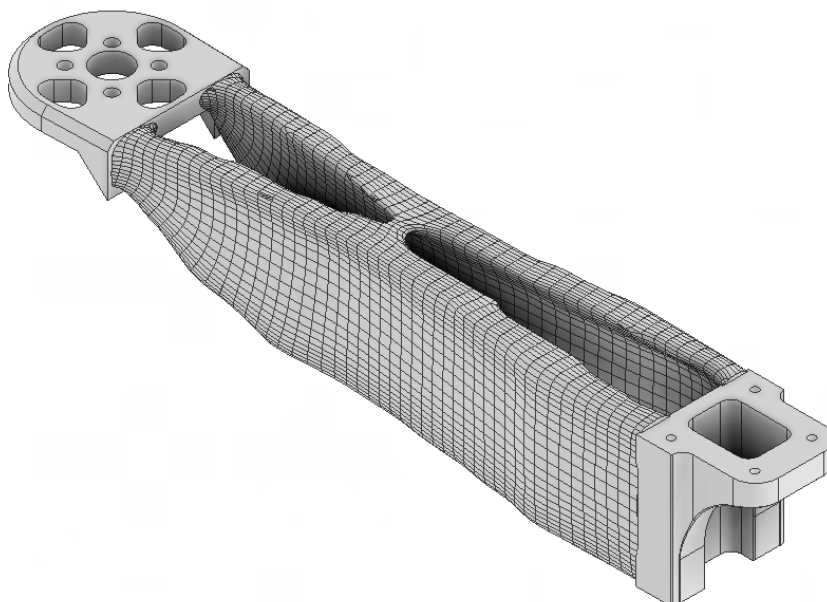
5.1.3 Single draw - Z

V tomto třetím návrhu bylo na Design space ramene aplikováno omezení Single draw v záporném směru osy Z (Obr. 5-7 (a)). Následný postup úpravy a převedení výsledku optimalizace (Obr. 5-7 (b)) na CAD model bylo obdobné předchozím návrhům.



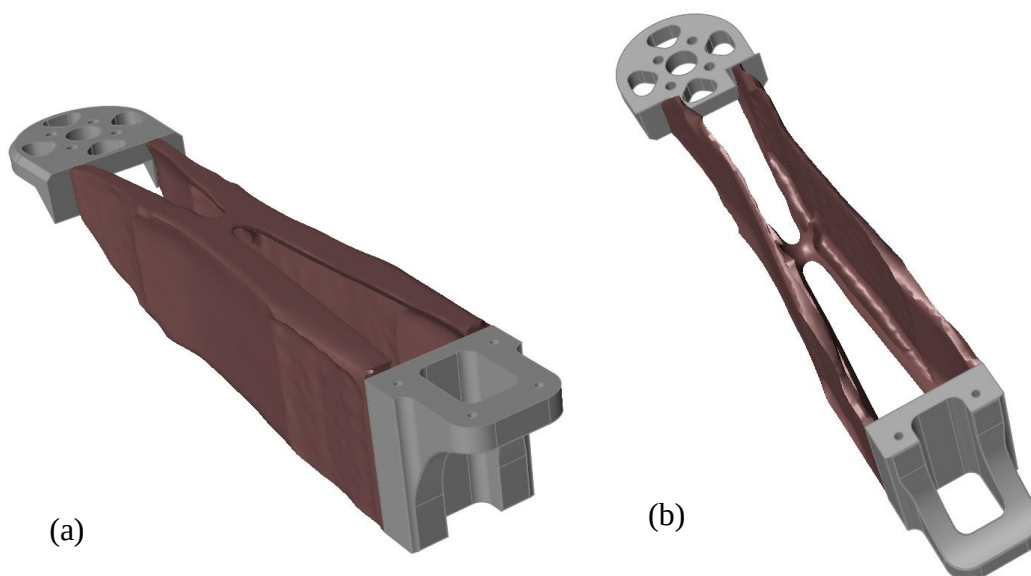
Obr. 5-7 Optimalizace ramene s omezením Single draw - Z (a) Aplikované omezení; (b) Výsledný tvar

V případě tohoto návrhu měl ovšem CAD model (Obr. 5-8) několik nedostatků. Obsahoval řadu povrchových vad a také části o téměř nulové tloušťce, které by působily problémy při MKP analýze. Nejpodstatnější ovšem byla hmotnost 55 g, a proto bylo pokračováno druhou iterací. U té byl cíl nastaven na maximalizaci tuhosti s cílovou 35% hmotností.

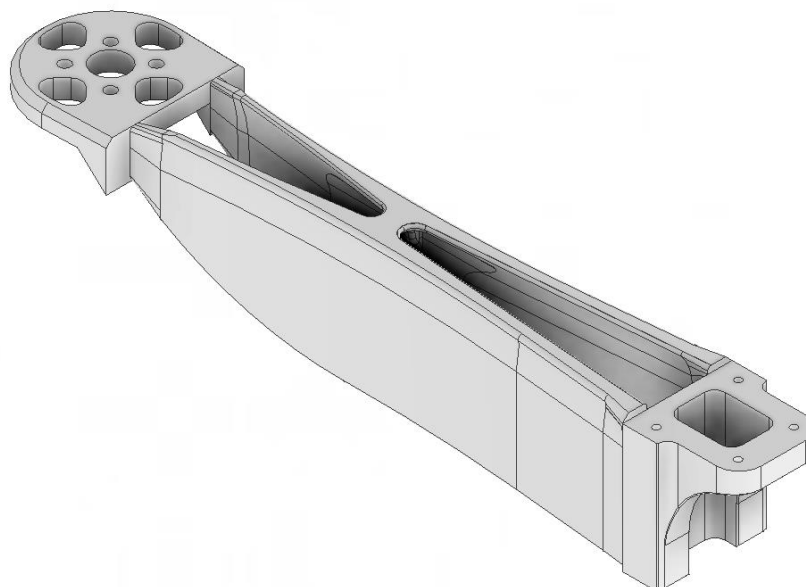


Obr. 5-8 CAD model 1. iterace návrhu s omezením Single draw -Z

Výsledek druhé iterace TO dle očekávání značně ztenčil stěnu a snížil hmotnost součásti (Obr. 5-9). Ovšem vzniku povrchových vad a komplikovaných tvarů se předejít nepodařilo, a proto bylo přistoupeno k variantě kompletního přemodelování střední části ramene, která by tvarově i rozměrově přibližně odpovídala výsledku optimalizace. Výhodou tohoto přístupu byla možnost lepší regulace hmotnosti dílu. Finální tvar ramene optimalizovaného s omezením Single draw -Z je na Obr. 5-10.



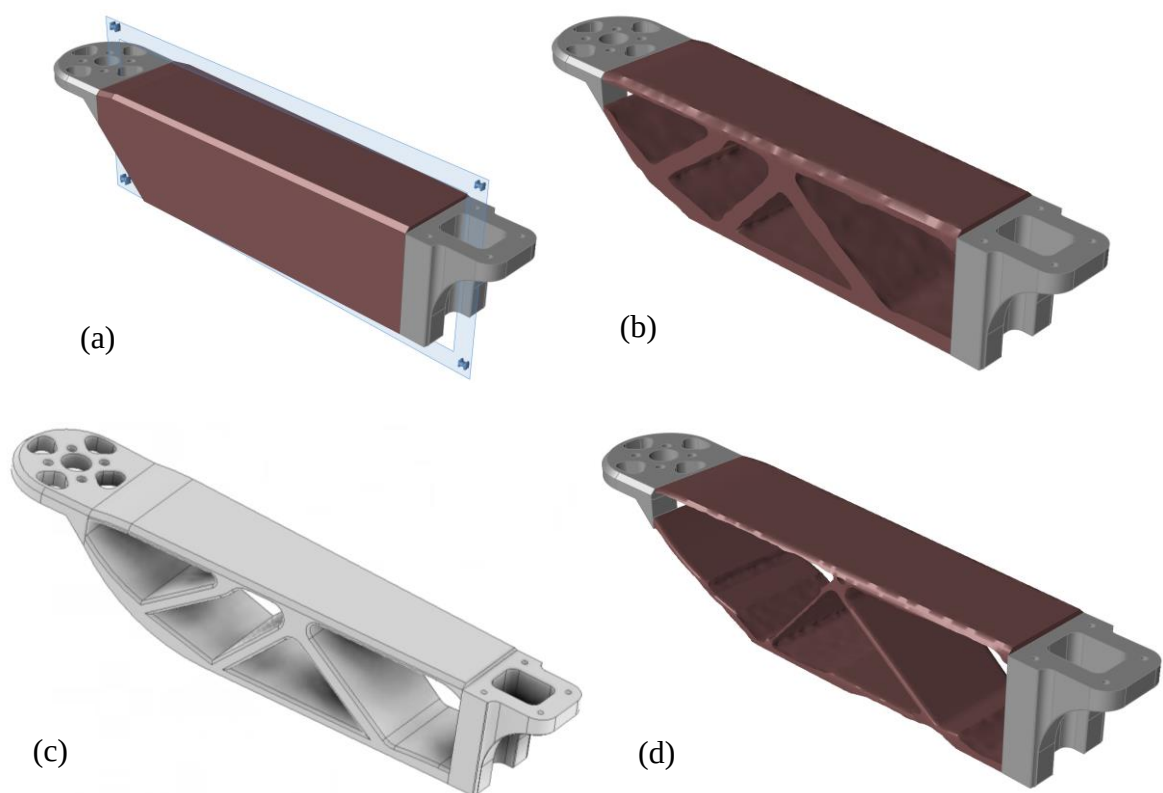
Obr. 5-9 Výsledek 2. iterace TO s omezením Single draw -Z (a) Pohled shora; (b) Pohled zdola



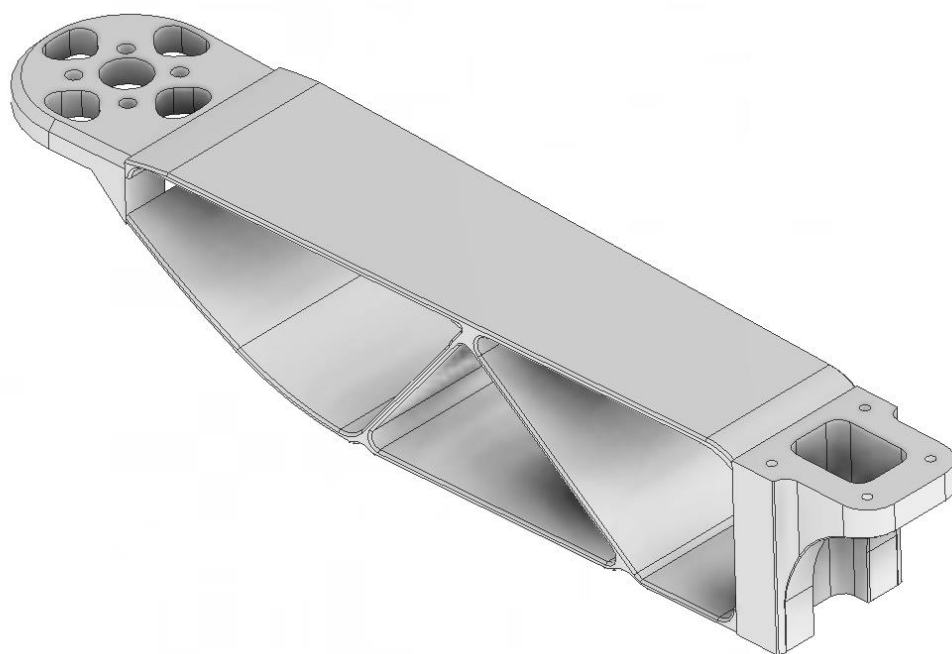
Obr. 5-10 Finální CAD model návrhu s omezením Single draw -Z

5.1.4 Extrusion Y

Pro další návrh ramene bylo při optimalizaci použito omezení extruze ve směru osy Y. Pro snížení hmotnosti na požadovanou hodnotu bylo třeba 2 iterací (Obr. 5-11). Postup převodu a úpravy výsledku optimalizace na CAD data probíhal podobně jako u předchozího návrhu. Vzhledem k jednoduchosti tvaru byly první i druhá iterace ramene vymodelovány v Inventoru dle vzoru v podobě výsledku optimalizace. V druhé iteraci bylo optimalizačním softwarem odebráno jedno žebro a výsledný tvar (Obr. 5-12) tak obsahoval pouze dvě žebra skloněná pod ideálním úhlem pro zachování tuhosti ramene.



Obr. 5-11 Optimalizace ramene s omezením Extrusion Y (a) Aplikované omezení; (b) Výsledný tvar 1. iterace; (c) CAD model 1. iterace; (d) Výsledný tvar 2. iterace TO



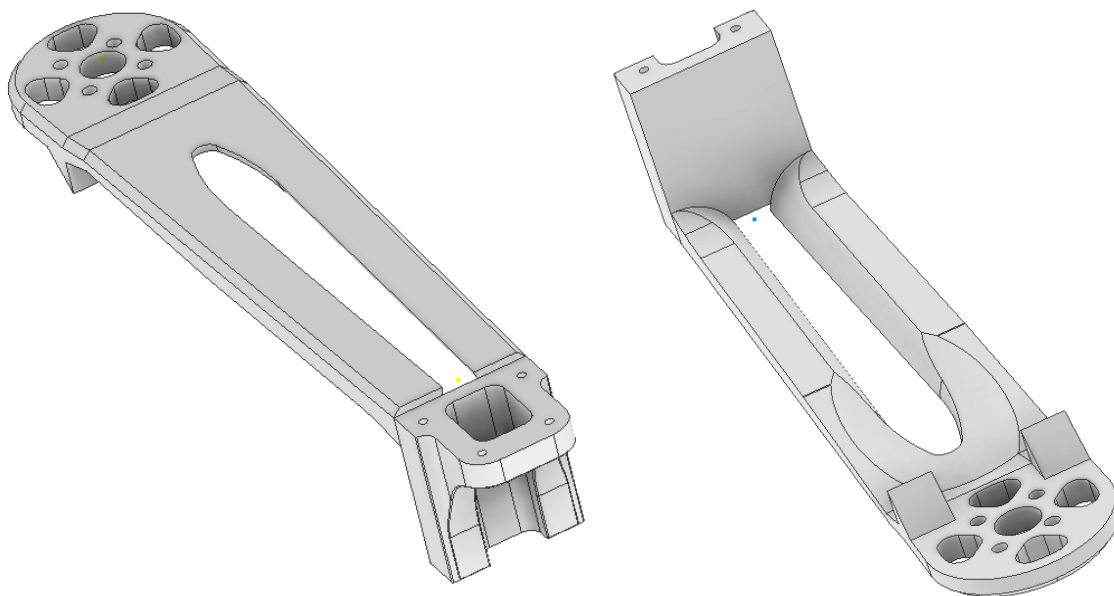
Obr. 5-12 Finální CAD model návrhu s omezením Extrusion Y

5.1.5 Overhang - Z

Během posledního návrhu ramene byla optimalizace omezena podmínkou Overhang v záporném směru osy Z. Maximální povolený převis byl nastaven na 45° . Od tohoto návrhu (Obr. 5-13) se očekávalo, že bude nejvhodnější pro 3D tisk, což se také potvrdilo a vznikl dostatečně samonosný tvar bez nutnosti tisku podpor ve střední části ramene. Ovšem na první pohled je tento tvar (Obr. 5-14) velmi poddajný vůči definovanému zatížení.



Obr. 5-13 Výsledek TO s omezením Overhang -Z



Obr. 5-14 Finální CAD model návrhu s omezením Overhang -Z

5.1.1 Přehled dosažených hmotností ramen

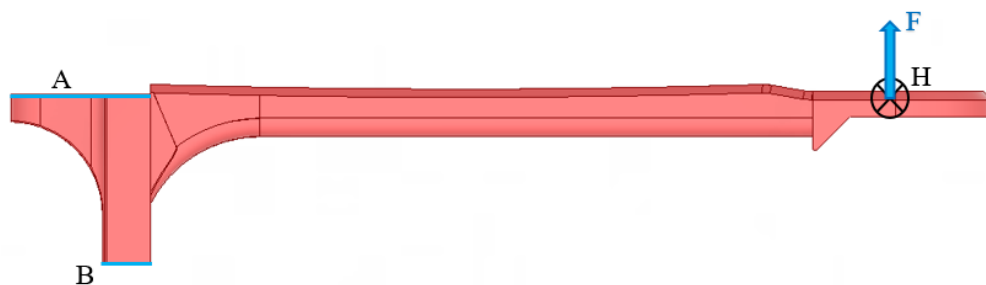
Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly 5.1 jedním z cílů topologické optimalizace všech návrhů ramen bylo snížení hmotnosti střední části ze 198 g na 21 g s odchylkou ± 3 g. Jak ukazuje Tab. 5-1 tento cíl se podařilo splnit u 2 ramen již po 1. iteraci a u zbývajících třech po 2. iteraci. Tučně je zvýrazněna výsledná hmotnost každého návrhu.

Tab. 5-1 Přehled hmotností optimalizovaných ramen

Návrh ramene	Hmotnost po 1. iteraci [g]	Hmotnost po 2. iteraci [g]
0 Originál	21	-
1 Bez technologických omezení	29	21
2 Split draw Y	22	-
3 Single draw -Z	55	21
4 Extrusion Y	70	24
5 Overhang -Z	21	-

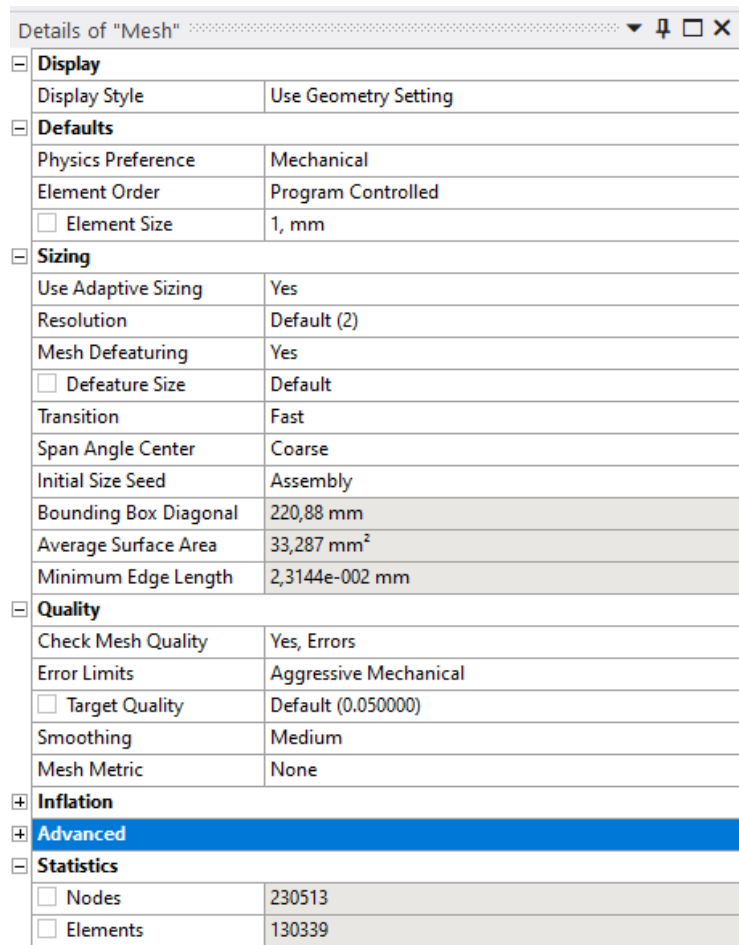
5.2 Pevnostní MKP analýza

Dalším krokem v procesu návrhu optimalizovaných součástí je pevnostní kontrola. V případě této práce byla použita analýza metodou konečných prvků (MKP) v softwaru ANSYS Mechanical (verze 2020 R2). Definován byl materiál ABS pro všechny návrhy ramen viz kapitola 4.3. Většina okrajových podmínek byla zachována z TO (popsány jsou v kapitole 4.4), změněny byly pouze vazby, aby odpovídaly těm použitým při testování ramen. Tedy pevná vazba v 6 otvorech pro šrouby byla nahrazena 2 pevnými vazbami na vrchní a spodní ploše části Rear (plochy A, B viz Obr. 5-15).



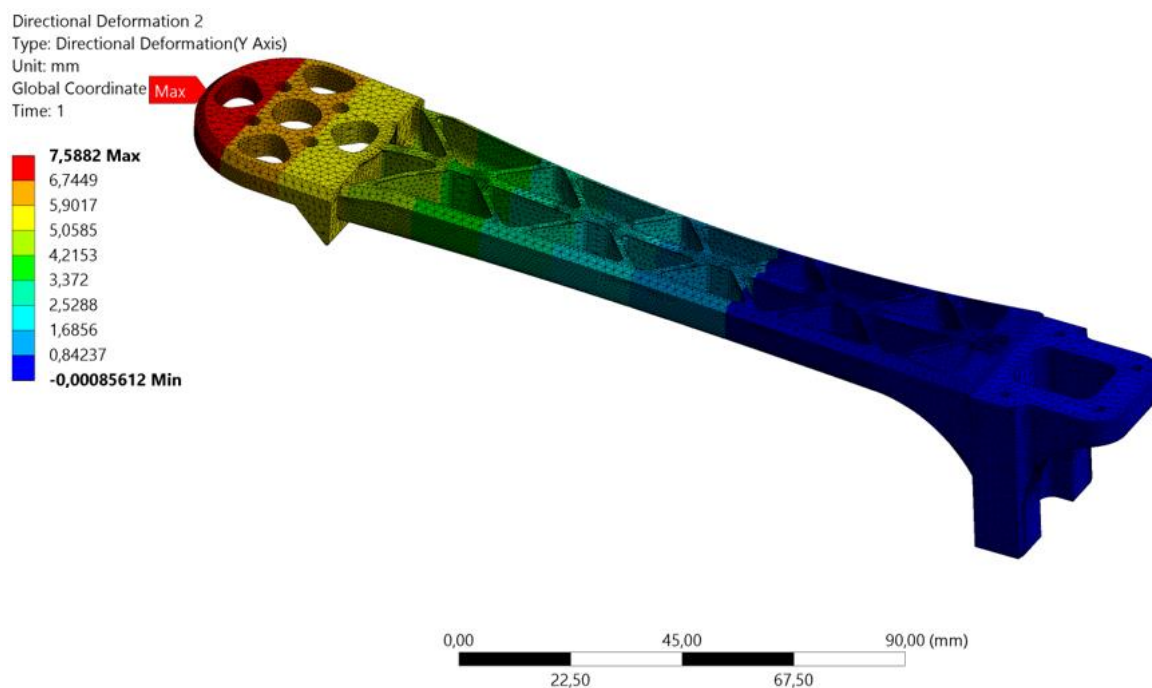
Obr. 5-15 Okrajové podmínky pro MKP analýzu

Tvorba konečnoprvkové sítě (Mesh) byla u všech analýz nastavena na automatickou metodu s elementy o velikosti 1 mm se středním vyhlazováním. Příklad nastavení konečnoprvkové sítě pro originální rameno je vidět na Obr. 5-16.



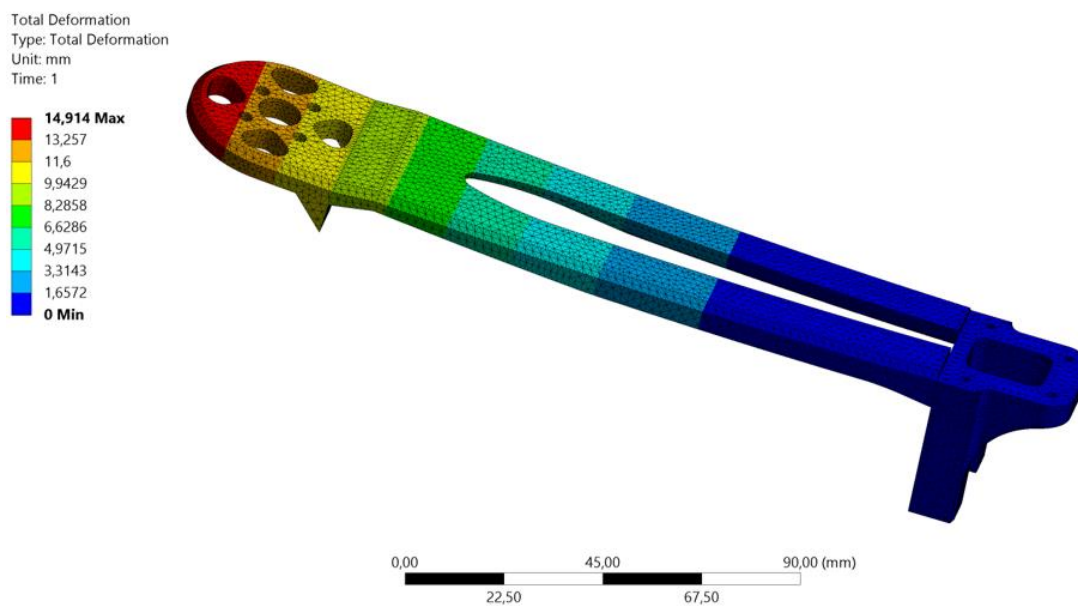
Obr. 5-16 Nastavení meshe pro originální rameno

Výsledky MKP pevnostní analýzy potvrdily že maximální průhyb každého návrhu ramene je dle očekávání v nejvzdálenějším bodě tělesa od pevných vazeb, tedy na konci kruhové části Front. Přičemž maximální průhyb ramene z kvadrokoptéry Flame wheel F450 (s upravenými konci) je roven 7,59 mm (Obr. 5-17). U ostatních návrhů, s výjimkou Overhang -Z, vyšel maximální průhyb menší.



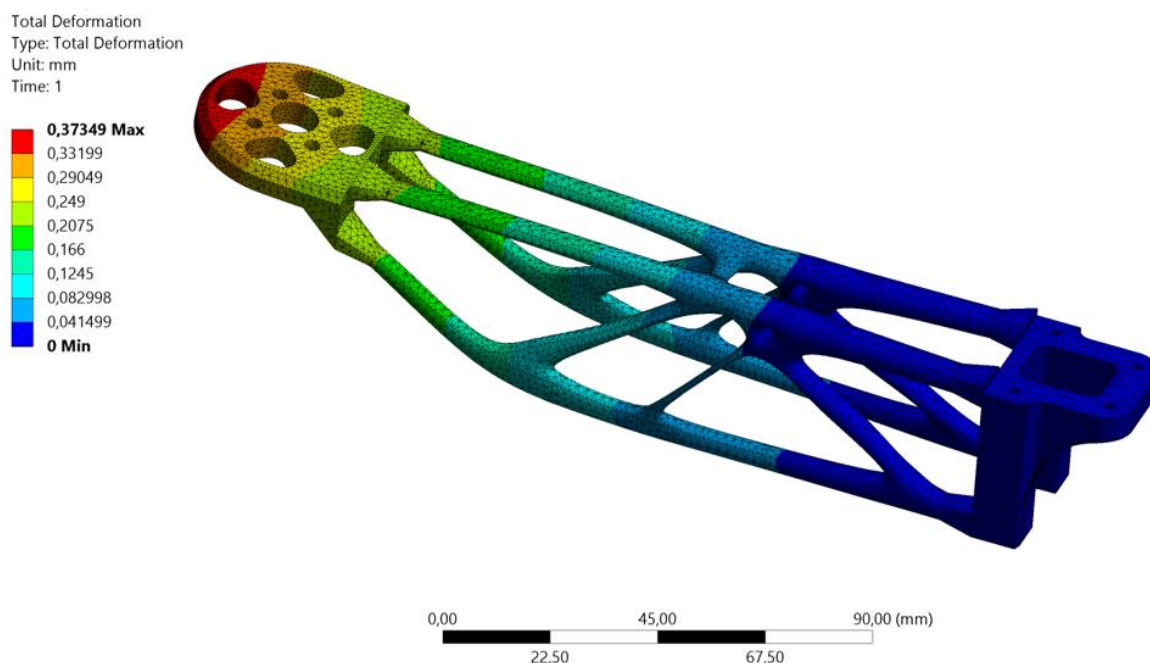
Obr. 5-17 Výsledky MKP analýzy deformace originálního ramene s upravenými konci

Nejvyšší hodnota deformace vyšla u Overhang -Z 14,94 mm (Obr. 5-18). Z důvodu příliš poddajné geometrie již nebyl tento návrh dále zkoumán a testován.



Obr. 5-18 Výsledky MKP analýzy deformace ramene Overhang -Z

Naopak nejnižší hodnota maximálního průhybu byla spočtena na rameni optimalizovaném bez technologických omezení (Obr. 5-19), a to o hodnotě 0,33 mm.



Obr. 5-19 Výsledky MKP analýzy deformace ramene Bez technologických omezení

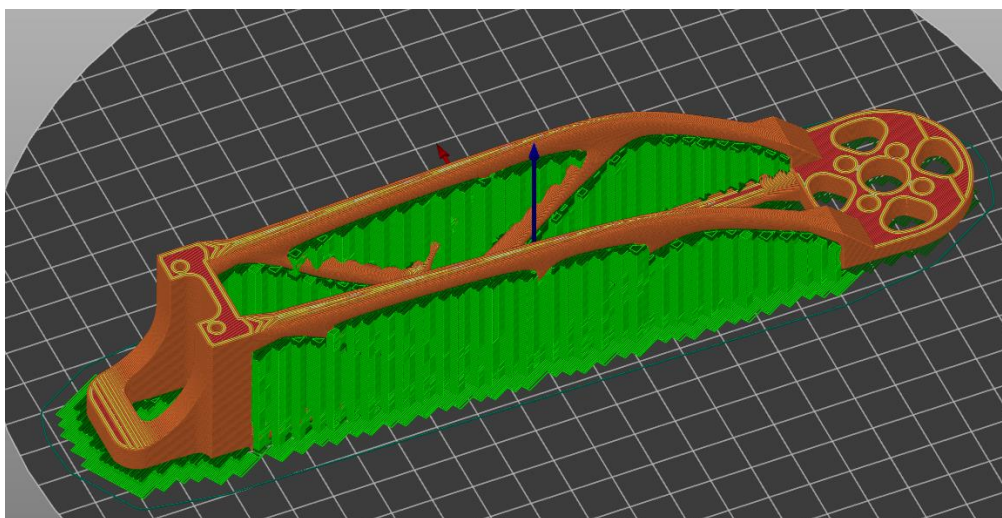
Shrnutí výsledků MKP analýzy je zobrazeno v Tab. 5-2, kde je vidět i porovnání napětí v jednotlivých návrzích ramen. Maximální napětí u jednotlivých návrhů vycházela zpravidla v některém z koncentrátorů napětí viz Obrazová dokumentace MKP analýzy v příloze 2.

Tab. 5-2 Přehled maximálních a průměrných napětí a deformací ramen

Návrh ramene	Maximální napětí [MPa]	Maximální deformace [mm]
0 Originál	13,46	7,59
1 Bez technologických omezení	3,44	0,33
2 Split draw Y	2,30	0,44
3 Single draw -Z	6,34	0,73
4 Extrusion Y	6,05	1,47
5 Overhang -Z	9,83	14,94

5.3 3D tisk optimalizovaných ramen

Po MKP pevnostní analýze bylo třeba ramena vyrobit a otestovat. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, jako technologie výroby byla zvolena aditivní výroba metodou FDM. Postupně byly CAD modely všech návrhů ramen, kromě Overhang -Z (z důvodů zmíněných v kapitole 5.2), převedeny do formátu STL (Příloha 7). Následně byl v softwaru PrusaSlicer 2.4.2 provedena příprava na 3D tisk (Obr. 5-20).



Obr. 5-20 Orientace na tiskové podložce a umístění podpory na rameni Bez technologických omezení

U všech ramen byly vygenerovány nezbytné podpory a nastavena stejná 20% výplň (Infill). Pro lepší přichycení první vrstvy k tiskové podložce byl definován i límec (Brim) o šířce 5 mm. Dále byly nastaveny 3 perimetry svislých stěn, aby se tuhost součástí příliš nesnížila méně hustou výplní a další nastavení byla přizpůsobena použité tiskárně a filamentu (viz kapitola 4.3). V tabulce níže je přehled spotřebovaného materiálu a čas tisku jednotlivých ramen.

Tab. 5-3 Přehled údajů o 3D tisku

Návrh ramene	Použitý filament (celkově) [g]	Použitý filament na podpory a límec [g]	Odhadovaný čas tisku
0 Originál	40,66	5,47	5 h 43 min
1 Bez technologických omezení	45,66	11,78	6 h 25 min
2 Split draw Y	40,60	8,53	5 h 32 min
3 Single draw -Z	36,25	1,54	4 h 29 min
4 Extrusion Y	44,99	4,52	6 h 5 min
Celkem	208,16	31,84	28 h 14 min

Jak je vidět z Tab. 5-3 nejdéle trval tisk ramene Bez technologických omezení, kde bylo také spotřebováno nejvíce filamentu na tisk podpor. Podařilo se vytisknout všechna ramena pouze s menšími povrchovými nedokonalostmi. Všechna ramena se tiskla v poloze viz Obr. 5-20, pouze návrh ramene Extrusion Y byl během tisku orientovaný na bok (Obr. 5-21) V postprocessingu byly z výtisků ručně odstraněny podpory a obroušeny některé plochy. Detailní fotky jednotlivých ramen jsou obsaženy v Příloze 3.

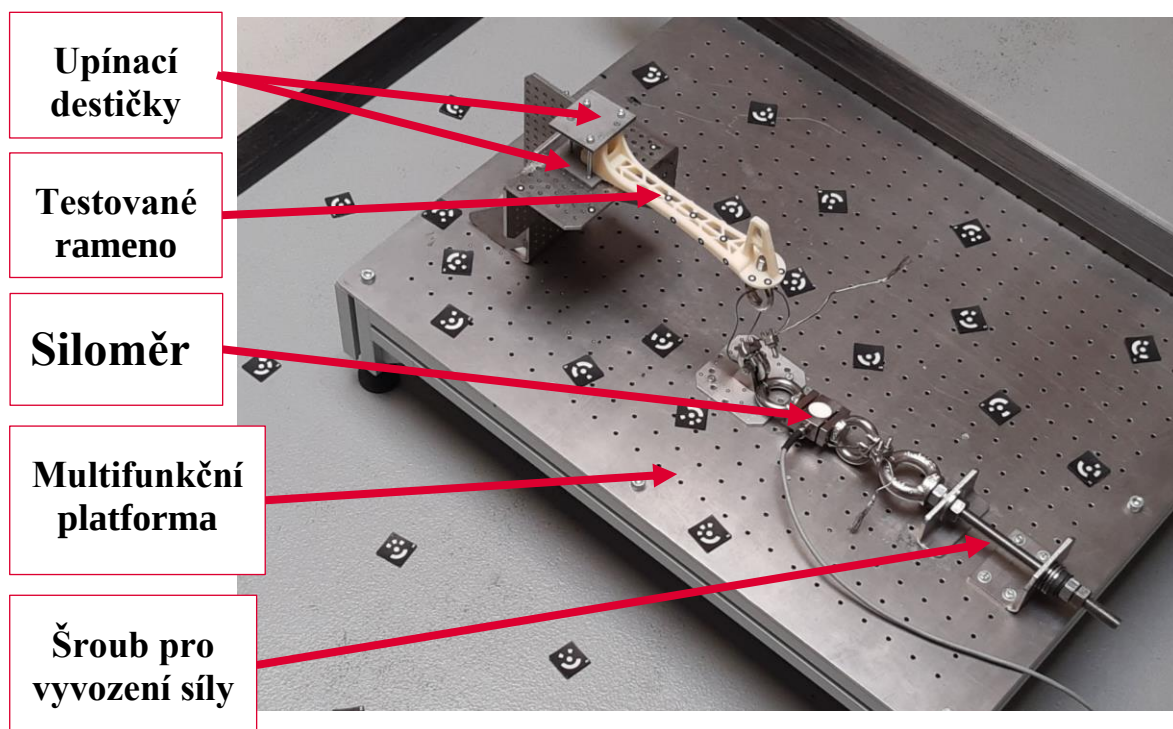


Obr. 5-21 Dokončený tisk ramene s omezením Extrusion Y

5.4 Testování průhybu s pomocí fotogrammetrie

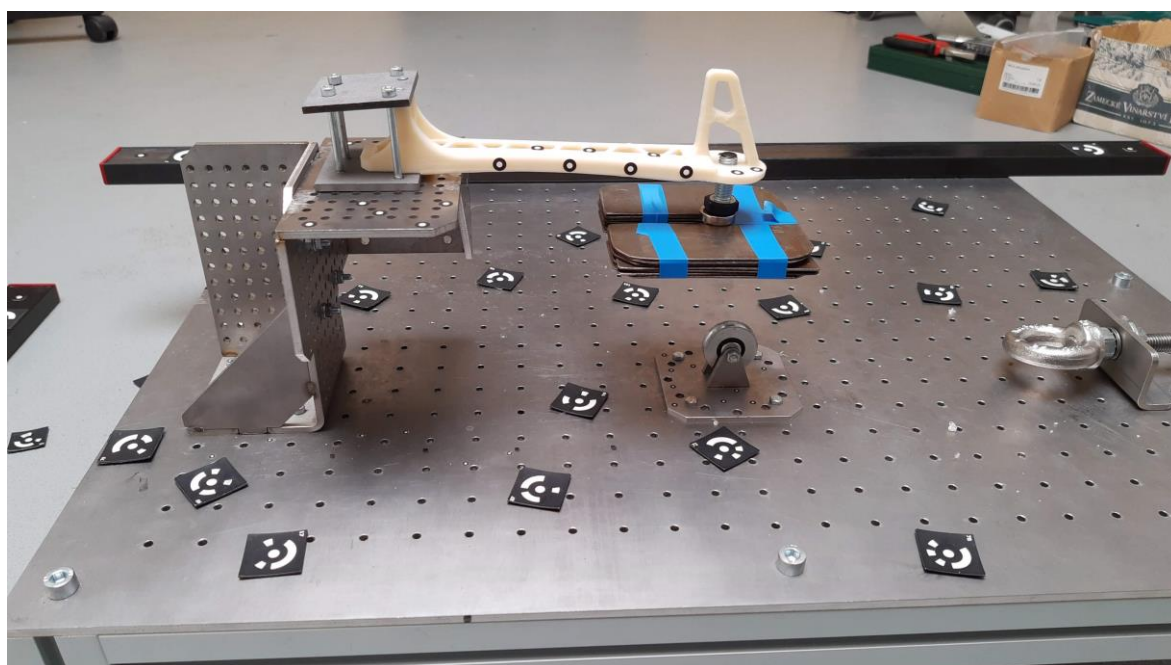
Posledním krokem návrhu topologicky optimalizovaných ramen bylo otestování vyrobených součástí. Testována byla deformace jednotlivých návrhů ramen při působení statické síly o stejné velikosti jako při optimalizaci, tedy 7,5 N. K vyhodnocení výsledků byla použita metoda fotogrammetrie společně se systémem TRITOP. Jako testovací platforma byla použita multifunkční deska. Bylo ovšem třeba vyrobit 2 upínací destičky pro simulaci vazeb ramene s tělem kvadrokoptéry (výkresy viz Příloha 6). Ramena byla k destičkám přišroubována samořeznými šrouby M3 a destičky byly poté sešroubovány s přípravky a testovací platformou šrouby M4. Důraz byl kladen, aby byly vazby dostatečně tuhé a neovlivňovaly příliš měřený průhyb.

Zbývalo vyřešit otázku vyvození statické zátěžné síly ve středu kruhové části ramen. Původní strategie testování zahrnovala vyvození síly utahováním šroubu. Velikost síly by byla ověřena připojeným siloměrem a síla měla být přenášena ocelovými lanky vedenými mezi očky přes kladku. Tento způsob byl však zavrhnut z důvodu vysoké tuhosti lanek a příliš nízké síle, kterou bylo nutné vyvodit. Původní testovací pracoviště je na Obr. 5-22.



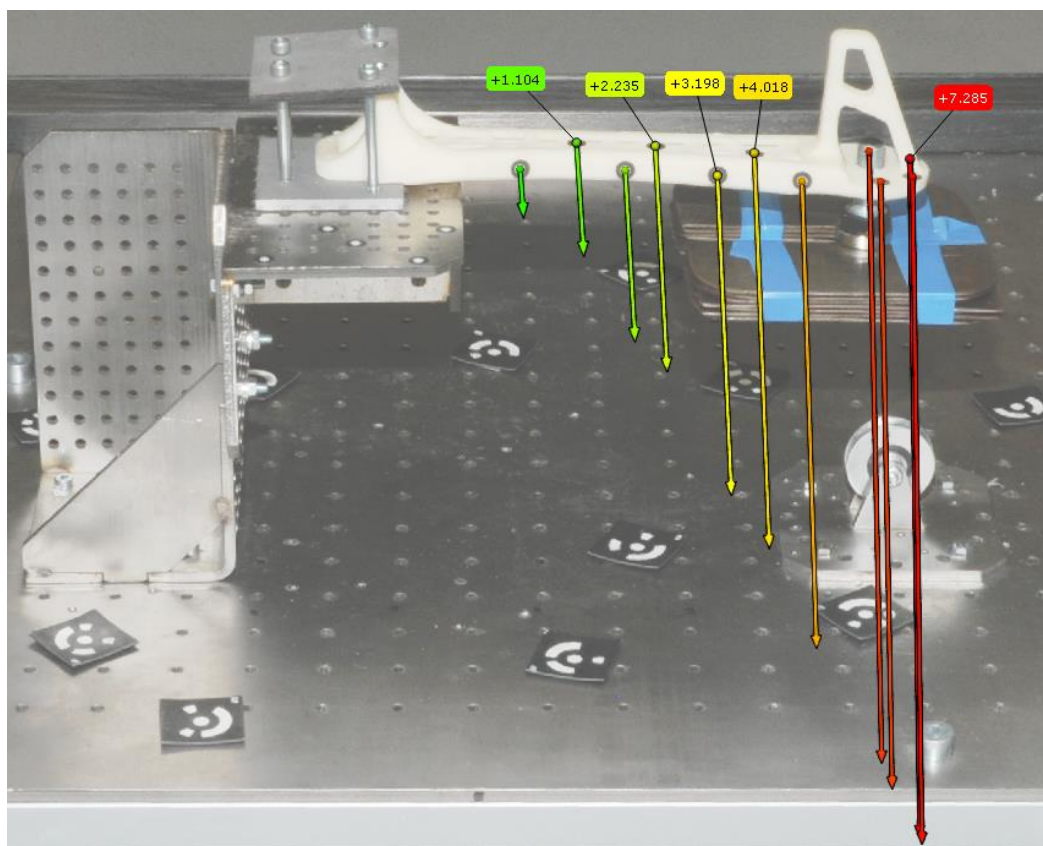
Obr. 5-22 Původní testovací pracoviště

V druhé variantě, která byla nakonec použita pro výsledné testy (Obr. 5-23), byla cílená síla vyvozena závažím v podobě kovových plíšků, připevněných neodymovým magnetem ke šroubu M8, jenž byl zašroubován do závitu vyříznutého v příslušném místě jednotlivých ramen. Závaží měla hmotnost 721,4 g a společně s magnetem a šroubem sestava vážila přibližně 750 g, což vyvodilo sílu blízkou 7,5 N.

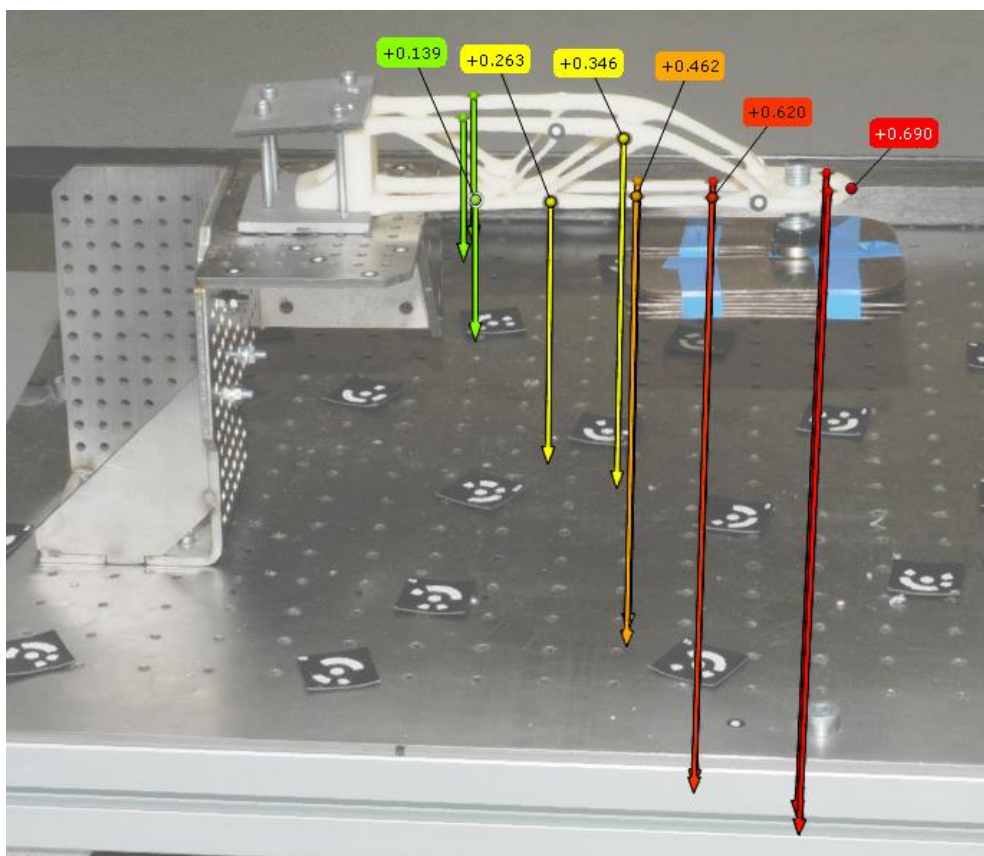


Obr. 5-23 Finální podoba testovací pracoviště se zatíženým ramenem

Při fotogrammetrickém testování byly použity značky o průměru 3 mm rozmístěné na testovací sestavě i na každém rameni. Nejprve byla zaznamenána poloha všech značek na nezatížené součásti pomocí dostatečného počtu fotografií a poté se rameno zatížilo a zaznamenala se stejným způsobem nová poloha značek. Takto byla otestována všechna vytištěná ramena. Výsledky testování byly vyhodnoceny v programu GOM Inspect, kde byla pomocí vzájemné polohy pevných značek na přípravku a značek na rameni určena deformace ramene v místech jednotlivých značek. Nejtužší byl dle očekávání návrh ramene Bez technologických omezení (Obr. 5-24), a naopak nejpoddajnější bylo Originální rameno (Obr. 5-25) Všechny výsledky z fotogrammetrického testování jsou součástí přílohy 3.



Obr. 5-24 Deformace v ose Z originálního návrhu ramene



Obr. 5-25 Deformace v ose Z návrhu ramene Bez technologického omezení

6 DISKUZE

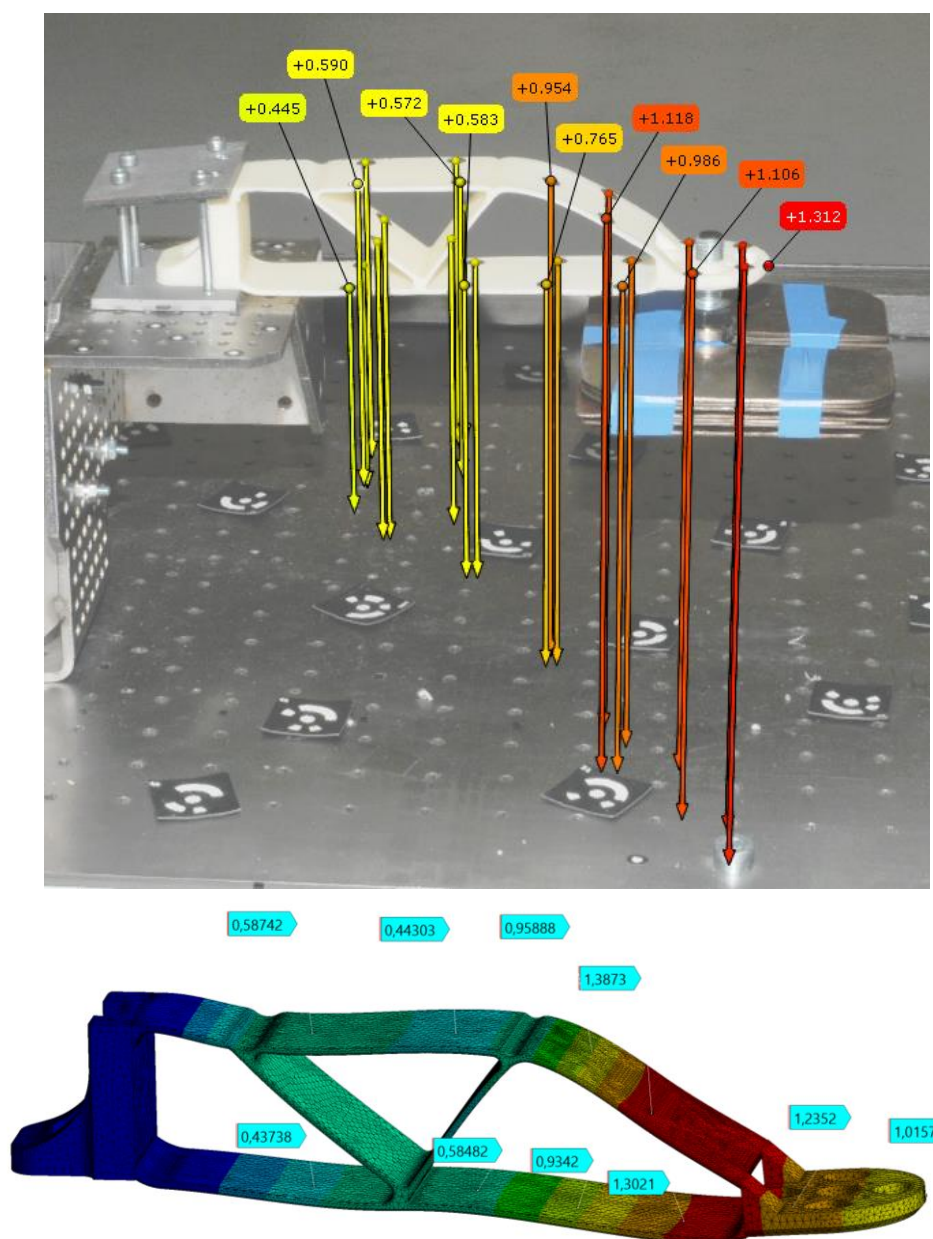
Proces návrhu a testování součástí s využitím topologické optimalizace je iterační proces složený s řady dílčích postupů a metod. Nejprve bylo třeba upravit demonstrační součást, v tomto případě rameno kvadrokoptéry, aby bylo vhodné pro optimalizaci. Proto byl vybrán vyhovující tvar design space, prostoru, ve kterém bude optimalizace probíhat. Jeho tvar byl inspirován výzkumem z práce Tanga et al. [20]. Dále se vybrala technologická omezení, která byla aplikována na neoptimalizovaný tvar ramene a definovaly se okrajové podmínky optimalizace. Ty byly u všech návrhů stejné, aby bylo možné následné porovnání poměrných tuhostí návrhů. Celkem bylo navrženo 5 ramen:

- bez technologického omezení
- s omezením Split draw v ose Y
- s omezením Single draw v záporném směru osy Z
- s omezením extruze v ose Y
- s omezením Overhang v záporném směru osy Z

Všechny optimalizace probíhaly v softwaru Altair Inspire za stejných podmínek (s výjimkou výše zmíněných omezení). U všech ramen proběhla první iterace s cílem minimální hmotnosti s koeficientem bezpečnosti 1,3 a u návrhů kde bylo třeba snížit hmotnost byla provedena druhá iterace s podmínkou zachování maximální tuhosti. Všechna ramena měla výslednou hmotnost v úzkém intervalu okolo hmotnosti originálního ramene (21 ± 3 g).

Následnou MKP analýzou navržených ramen se potvrdilo, že podmínka zadaná v 1. iteraci topologické optimalizace, tedy bezpečnost vůči definovanému zatížení s koeficientem 1,3, není příliš přesná. Koeficient bezpečnosti vyšel totiž u každého ramene podstatně vyšší. U nejpoddajnějšího Overhang -Z byl v nejkritičtějších místě roven 2,22. U tohoto návrhu vyšel rovněž nejvyšší průhyb, a to 14,94 mm. Z tohoto důvodu byl tento návrh vyřazen z dalšího testování. MKP analýza dala také prvotní představu o pořadí návrhů ramen z hlediska jejich poměrných tuhostí.

Na závěr bylo provedeno testování deformace vytištěných ramen, které se vyhodnotilo s pomocí fotogrammetrie. Měřen byl průhyb v jednotlivých bodech a výsledky byly následně porovnány s těmi z MKP analýzy (Obr. 6-1). Největší odchylka výsledků z obou metod vyšla v případě ramene s omezením Split draw Y, kde byla reálná deformace v ose Z o 0,45 mm větší, než hodnota spočtená MKP analýzou. U ostatních návrhů vznikl rozdíl deformací od 0,1 do 0,3 mm. Tato odchylka mohla být způsobena 20% výplní při 3D tisku ramen, případně vadami způsobenými výrobou a následnou manipulací s rameny. Další možnou příčinou vzniku těchto rozdílů mohla být krátkodobá dynamická síla výrazně větší než 7,5 N, která působila v okamžiku přichycení magnetu ke šroubu v rameni. Mohla mít totiž za následek lehkou plastizaci ramene.



Obr. 6-1 Srovnání průhybů v ose Z ramene Extrusion Y
(nahore hodnoty dle fotogrammetrie, dole dle MKP analýzy)

K porovnání navržených ramen bylo použito poměrné tuhosti (6-1) neboli poměru velikosti působící síly (F) a hodnoty maximálního průhybu v ose Z ($w_{i,max}$), vztaženého k hmotnosti daného ramene (m_i).

$$k_i = \frac{F}{w_{i,max} \cdot m_i} \quad (6-1)$$

Takto byly spočítány poměrné tuhosti u všech vzorků. A to jak z hodnot maximálních deformací vypočtených MKP analýzou a hmotností modelů, tak i z hodnot naměřených fotogrammetrií a reálných hmotností vytištěných návrhů. Hmotnost vytištěných ramen se od modelové lišila, kvůli použité 20% výplni při 3D tisku. Z výsledků viz Tab. 6-1 vyšlo najevo, že i přes odlišné hodnoty poměrných tuhostí z obou metod zůstalo pořadí z hlediska tuhostí zachováno.

Tab. 6-1 Shrnutí výsledků práce

Návrh ramene	Reálná hmotnost vytištěných ramen [g]	Reálný max. průhyb dle fotogrammetrie [mm]	Poměrná tuhost dle MKP [N.mm ⁻¹ .g ⁻¹]	Poměrná tuhost dle fotogrammetrie [N.mm ⁻¹ .g ⁻¹]
0 Originál	31,8	7,29	0,047	0,032
1 Bez technologického omezení	27,2	0,69	1,082	0,400
2 Split draw Y	26,0	0,89	0,775	0,324
3 Single draw -Z	33,6	0,90	0,492	0,248
4 Extrusion Y	35,6	1,31	0,212	0,161

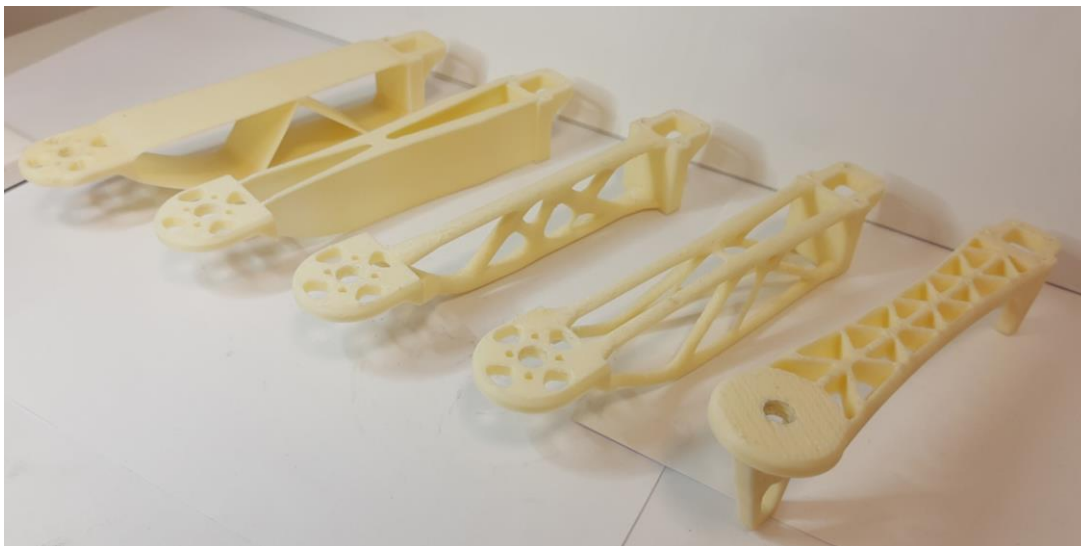
Nejtužší návrh je Bez technologického omezení s poměrnou tuhostí 1,082 N.mm⁻¹.g⁻¹ (MKP) případně 0,400 N.mm⁻¹.g⁻¹ (fotogrammetrie), což je podle MKP zhruba 23 krát vyšší hodnota než u originálního ramene a podle fotogrammetrie 12,5 krát vyšší. Druhý nejtužší návrh byl optimalizován s omezením Split draw a ramena s omezením Single draw a Extrusion obsadily 3. a 4. pozici na základě tuhosti.

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce si kladla za cíl navrhnout a porovnat topologicky optimalizovaná ramena s ohledem na výrobní technologie. To lze v procesu optimalizace nejlépe zohlednit vhodnou volbou technologických omezení.

Proto byla navržena 4 ramena optimalizována s technologickými omezeními: Single draw, Split draw, Extrusion a Overhang. Páté rameno bylo optimalizované bez těchto omezení. Návrh ramene s omezením Overhang -Z byl během procesu vyřazen z důvodu značného průhybu, který byl větší než u originálního ramene. Zbylé návrhy byly vyrobeny, a otestovány metodou konečných prvků a experimentálně. Z obou těchto kontrol se potvrdilo, že topologická optimalizace dokáže navrhnout při zachování nízké hmotnosti velmi tuhé tvary. Vytisknuté originální rameno z kvadrokoptéry Flame Wheel F450 vážilo 31,8 g a maximální průhyb při zatížení 7,5 N vyšel zhruba 7,3 mm. Návrhy ramen v této práci se podařilo topologicky optimalizovat z 282 g na hmotnost přibližně odpovídající originálu, ovšem s výrazně nižším průhybem, a tedy i vyšší tuhostí.

Z testování vyšlo najevo, že nejtěžší tvary dokáže topologická optimalizace vytvářet má-li největší volnost z hlediska technologických omezení. Jako druhý nejtěžší tvar se ukázal návrh optimalizovaný s omezením Split draw aplikovaným po šířce ramene. Naopak nejméně tuhé bylo rameno s omezením Overhang, které rozložením materiálu nejvíce připomínalo originální tvar a bylo by nejvhodnější pro výrobu aditivními technologiemi.



Obr. 7-1 Vytisknuté návrhy optimalizovaných ramen (4 vlevo) a originálního ramene (vpravo)

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BENDSØE, Martin Philip a Ole SIGMUND. *Topology optimization: Theory, Methods, and Applications*. 2nd ed. Berlin: Springer - Verlag, 2004. ISBN 978-3-540-42992-0.
- [2] ALBRIGHT, Brian. BMW motorcycle frame [online]. In: 18 May 2018 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://www.digitalengineering247.com/article/bmw-shows-off-printed-motorcycle-frame/>
- [3] BRACKETT, D., ASHCROFT, I., HAGUE, R. Topology optimization for additive manufacturing. In *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, Solid Freeform Fabrication Symposium edition: 22, Austin, Texas, USA, 8-10 August 2011. s. 348-362.
- [4] *Introduction to Topology Optimization* [online]. [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/>
- [5] CHAPMAN, Colin D. STRUCTURAL TOPOLOGY OPTIMIZATION VIA THE GENETIC ALGORITHM [online]. Massachusetts Institute of Technology, 1994 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/4400373.pdf>. Bachelor thesis. The University of Washington. Vedoucí práce Robert N. Noyce.
- [6] MAZUREK, Allek, based on the Fig.1 of Michell, A. G. M. (1904) The limits of economy of material in frame-structures, *Philosophical Magazine*, Vol. 8(47), p. 589-597
- [7] HUANG, X., XIE, Y.M. Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials. *Comput Mech* 43, 393 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00466-008-0312-0>
- [8] ROZVANY, George IN. A critical review of established methods of structural topology optimization. *Structural and multidisciplinary optimization*, Springer. Berlin, 2009, vol. 37, iss. 3, s 217-237. DOI: 10.1007/s00158-007-0217-0. ISSN 1615-1488.
- [9] CHEN, L., WAN, J., CHU, X. et al. Parameterized level set method for structural topology optimization based on the Cosserat elasticity. *Acta Mech. Sin.* 37, 620–630 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10409-020-01045-z>

- [10] TYFLOPOULOS, Evangelos a Martin STEINERT, FOMIN, Vladimir M., ed. A Comparative Study of the Application of Different Commercial Software for Topology Optimization. Appl. Sci. [online]. 9.1.2022, 12(611) [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: doi:[https:// doi.org/10.3390/app12020611](https://doi.org/10.3390/app12020611)
- [11] Topology optimization technologies [online]. In: . Altair Engineering [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.altair.com/topology-optimization/>
- [12] Draw Directions. Altair Inspire help [online]. Altair Engineering [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: https://2021.help.altair.com/2021.2/inspire/en_us/topics/inspire/structure/shape_draw_directions_c.htm
- [13] WASSERMAN, Shawn. Overhang angle constraint [online]. In: . 2018 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/inspire-2018-release-focuses-on-the-core-additive-manufacturing-audience>
- [14] Symmetry and Cyclic Repetition. Altair Inspire help [online]. Altair Engineering [cit. 2022- 04- 02]. Dostupné z: https://2021.help.altair.com/2021.2/inspire/en_us/topics/inspire/structure/shape_symmetry_c.htm
- [15] RANGEL, David & SUPERAK, Claire & BIELSCHOWSKY, Mayra & FARRIS, Katie & FALCONER, Ruth & BAVEYE, Philippe. (2012). Rapid Prototyping and 3-D Printing of Experimental Equipment in Soil Science Research. Soil Science Society of America Journal. 77. 10.2136/sssaj2012.0196n.
- [16] TSOUKNIDAS, A. Friction Induced Wear of Rapid Prototyping Generated Materials: A Review. Advances in Tribology [online]. 2011, 2011: 1-7 [cit. 2022-04-19]. DOI:10.1155/2011/746270. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/at/2011/746270/>
- [17] CHUA, Chee Kai. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fifth edition of Rapid prototyping. World Scientific: , 2017. ISBN 978-9813146761.
- [18] MADELEINE, P. What Is Additive Manufacturing? [online]. In: . 10 May 2021 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/what-is-additive-manufacturing/>

- GAJDOS, Ivan & MAŇKOVÁ, Ildikó & JACHOWICZ, Tomasz & TOR-
 ŚWIĄTEK, Aneta. (2016). Application of Rapid Tooling approach in process of
 [19] thermoforming mold production. International Engineering Symposium at Bánki. 8
 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-FDM-technology-and-model-building_fig1_311439855
- TANG, Yunlong, Guoying DONG, Qinxue ZHOU a Yaoyao Fiona ZHAO. Lattice
 [20] Structure Design and Optimization With Additive Manufacturing Constraints. IEEE
 transactions on automation science and engineering [online]. 2018, 15(4) [cit. 2022-
 05-07].
- DJI Flame Wheel F450 [online]. In: . [cit. 2022- 05- 07].
 [21] Dostupné z: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1080059-REG/dji_cp_nz_00012_flame_wheel_f450_with.html
- ČSN EN ISO 527-3. Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 3: Zkušební
 [22] podmínky pro fólie a desky. Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- NURBS and PolyNURBS [online]. In: . solidThinking, 2016 [cit. 2022-05-09].
 [23] Dostupné z: https://solidthinking.com/help/Evolve/2016/win/en/nurbs_and_polynurbs.htm

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

F_p	[N]	síla působící při tahové zkoušce
v_p	[mm/s]	posuvová rychlost vrchní čelisti při tahové zkoušce
t	[s]	čas trvání pohybu vrchní čelisti při tahové zkoušce
σ	[MPa]	tahové napětí
Δl	[mm]	prodloužení vzorku
ε	[-]	poměrné prodloužení
l	[mm]	původní délka vzorku
R_m	[MPa]	smluvní mez pevnosti
F_{max}	[N]	maximální síla při tahové zkoušce
S_0	[mm ²]	Původní průřez vzorku
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
μ	[-]	Poissonova konstanta
ρ	[g/cm ³]	hustota
F	[N]	zátěžná síla na rameni
$w_{i,max}$	[mm]	maximální průhyb v ose Z u jednotlivých ramen
m_i	[g]	hmotnost jednotlivých ramen
k_i	[N.mm ⁻¹ .g ⁻¹]	poměrná deformace jednotlivých ramen

3D	Tří dimenzionální
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ANSYS	Analysis System
BESO	Bi- directional Evolutionary Structural Optimization
BMW	Bayerische Motoren Werke
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CNC	Computer Numerical Control
ČSN	Česká státní norma
DJI	Da-Jiang Innovations
EN	Evropská norma
ESO	Evolutionary Structural Optimization
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite Element Method
MKP	Metoda konečných prvků
MSC	MacNeal-Schwendler Corporation
PET – G	Polyethylentereftalátu s glykolem
PLA	Polylaktidová vlákna
PLSM	Parametrized Level Set Method
PolyNURBS	Poly Non-Uniform Rational Basis Spline
RP	Rapid Prototyping
SIMP	Solid Isotropic Microstructure (or Material) with Penalization
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Triangle Language
TO	Topologická optimalizace (Topology Optimization)

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1	Topologicky optimalizovaný rám motocyklu BMW [2]	13
Obr. 2-1	Příklad iterací topologické optimalizace [4].....	15
Obr. 2-2	Příklad Mitchell structure [6]	16
Obr. 2-3	Metoda PLSM pro dvoudimenzionální problém [9].....	17
Obr. 2-4	TO v prostředí Altair® Inspire™ [11].....	18
Obr. 2-5	Graf četnosti technologických omezení v optimalizačních softwarech	19
Obr. 2-6	Příklad aplikace omezení Single draw [12].....	20
Obr. 2-7	Příklad aplikace omezení Extrusion [12]	21
Obr. 2-8	Příklady různé orientace tělesa při použití omezení Overhang [13]	21
Obr. 2-9	Příklad aplikace omezení Radial [12].....	22
Obr. 2-10	Rozdíl mezi tvarovými omezeními [14]	23
Obr. 2-11	Schéma Rapid prototyping	24
Obr. 2-12	Schéma výroby dílu technologií FDM [19].....	25
Obr. 4-1	Dron Flame Wheel F450 [21]	27
Obr. 4-2	Originální tvar ramene	28
Obr. 4-3	Rozdělení ramene na 3 části	28
Obr. 4-4	Koncept design space 1	29
Obr. 4-5	Koncept design space 2	29
Obr. 4-6	Další koncepty tvaru ramene.....	30
Obr. 4-7	Finální tvar ramene pro optimalizaci.....	30
Obr. 4-8	Tiskárna DeltiQ XL v laboratoři Ústavu konstruování	31
Obr. 4-9	Orientace vzorků pro tahovou zkoušku na tiskové podložce	32
Obr. 4-10	Zařízení Imada MX2-2500N.....	33
Obr. 4-11	Okrajové podmínky optimalizací ramene	35
Obr. 5-1	Výsledek 1. iterace optimalizovaný bez technologického omezení.....	37
Obr. 5-2	CAD model 1. iterace návrhu bez technologického omezení	37
Obr. 5-3	Návrh tvaru 2. iterace optimalizovaný bez technologického omezení	38
Obr. 5-4	Finální CAD model 2. iterace návrhu bez technologického omezení	38

Obr. 5-5	Optimalizace ramene s omezením Split draw Y	39
Obr. 5-6	Finální CAD model návrhu s omezením Split draw Y	39
Obr. 5-7	Optimalizace ramene s omezením Single draw - Z	40
Obr. 5-8	CAD model 1. iterace návrhu s omezením Single draw -Z	40
Obr. 5-9	Výsledek 2. iterace TO s omezením Single draw -Z	41
Obr. 5-10	Finální CAD model návrhu s omezením Single draw -Z	41
Obr. 5-11	Optimalizace ramene s omezením Extrusion Y	42
Obr. 5-12	Finální CAD model návrhu s omezením Extrusion Y	42
Obr. 5-13	Výsledek TO s omezením Overhang -Z	43
Obr. 5-14	Finální CAD model návrhu s omezením Overhang -Z	43
Obr. 5-15	Okrajové podmínky pro MKP analýzu.....	44
Obr. 5-16	Nastavení meshe pro originální rameno	45
Obr. 5-17	Výsledky MKP analýzy deformace originál. ramene s upravenými konci ..	46
Obr. 5-18	Výsledky MKP analýzy deformace ramene Overhang -Z.....	46
Obr. 5-19	Výsledky MKP analýzy deformace ramene Bez technologických omezení	47
Obr. 5-20	Orientace na tisk, podložce a podpory na rameni Bez tech. omezení.....	48
Obr. 5-21	Dokončený tisk ramene s omezením Extrusion Y	49
Obr. 5-22	Původní testovací pracoviště	50
Obr. 5-23	Finální podoba testovací pracoviště se zatíženým ramenem	50
Obr. 5-24	Deformace v ose Z originálního návrhu ramene.....	51
Obr. 5-25	Deformace v ose Z návrhu ramene Bez technologického omezení	52
Obr. 6-1	Srovnání průhybů v ose Z ramene Extrusion Y	54
Obr. 7-1	Vytištěné návrhy optimalizovaných ramen a originálního ramene.....	56

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Výsledné hodnoty vzorků vytištěných horizontálně.....	34
Tab. 4-2	Výsledné hodnoty vzorků vytištěných vertikálně	34
Tab. 4-3	Výsledné hodnoty vzorku vytištěného horizontálně s vlákny pod 45°	34
Tab. 5-1	Přehled hmotností optimalizovaných ramen	44
Tab. 5-2	Přehled maximálních a průměrných napětí a deformací ramen	47
Tab. 5-3	Přehled údajů o 3D tisku	48
Tab. 6-1	Shrnutí výsledků práce	55

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Tahové diagramy vzorků z materiálu ABS

Příloha 2: Obrazová dokumentace MKP analýzy

Příloha 3: Fotodokumentace 3D tisku

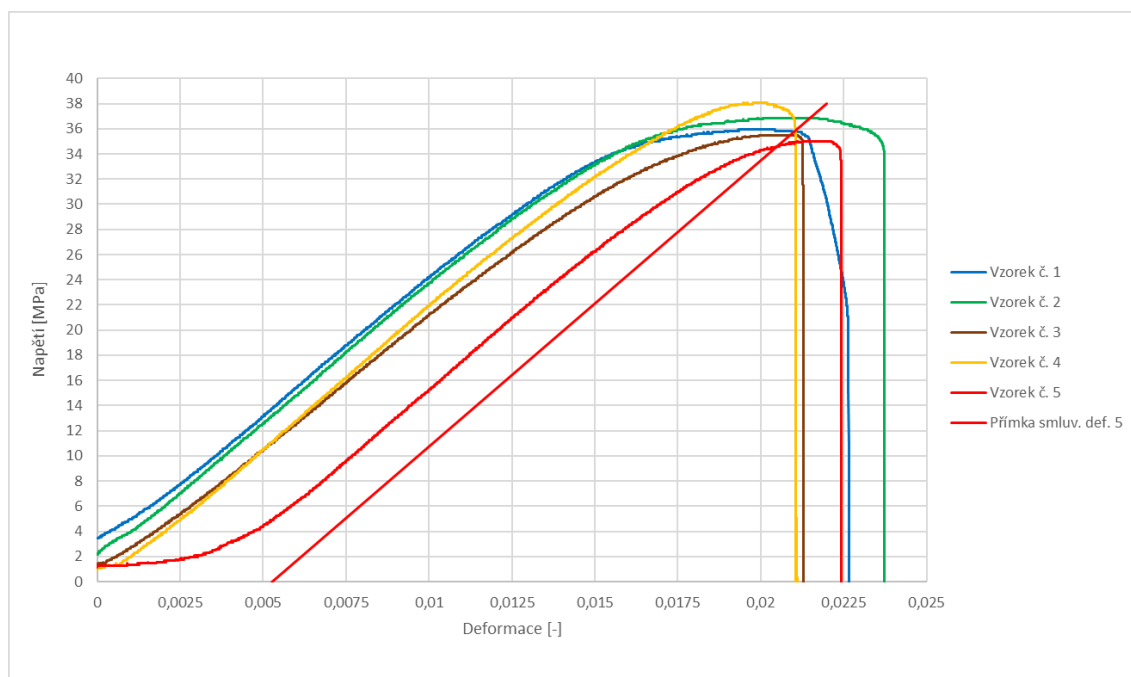
Příloha 4: Obrazová dokumentace fotogrammetrické analýzy

Příloha 5: CAD data

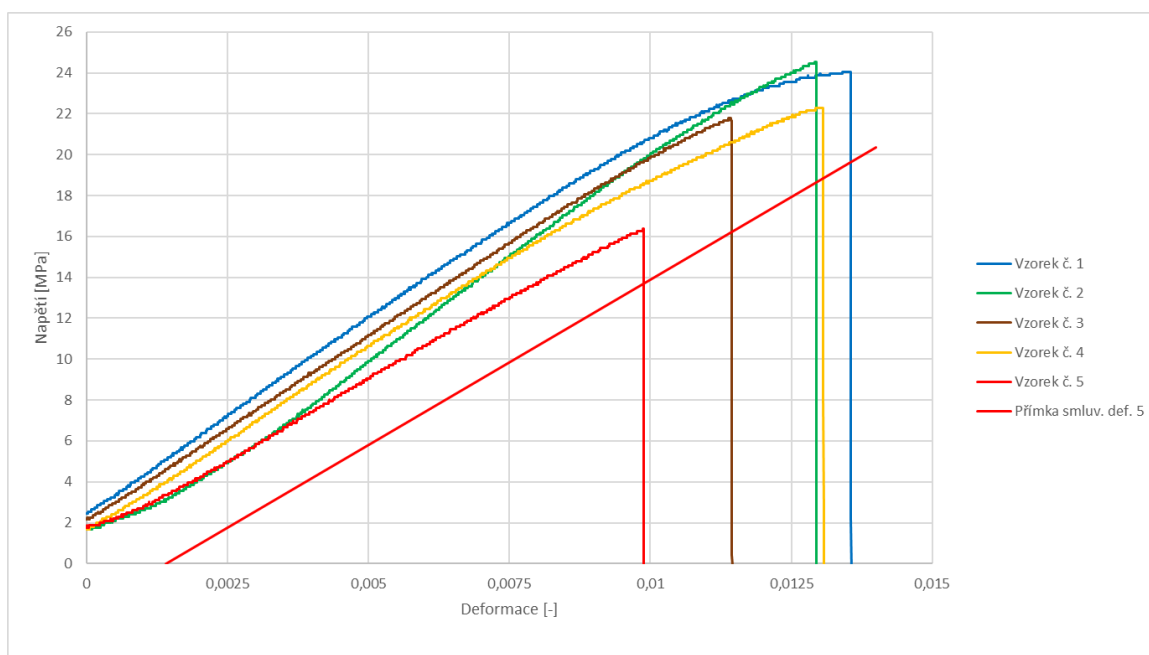
Příloha 6: Výkresová dokumentace

Příloha 7: .STL soubory

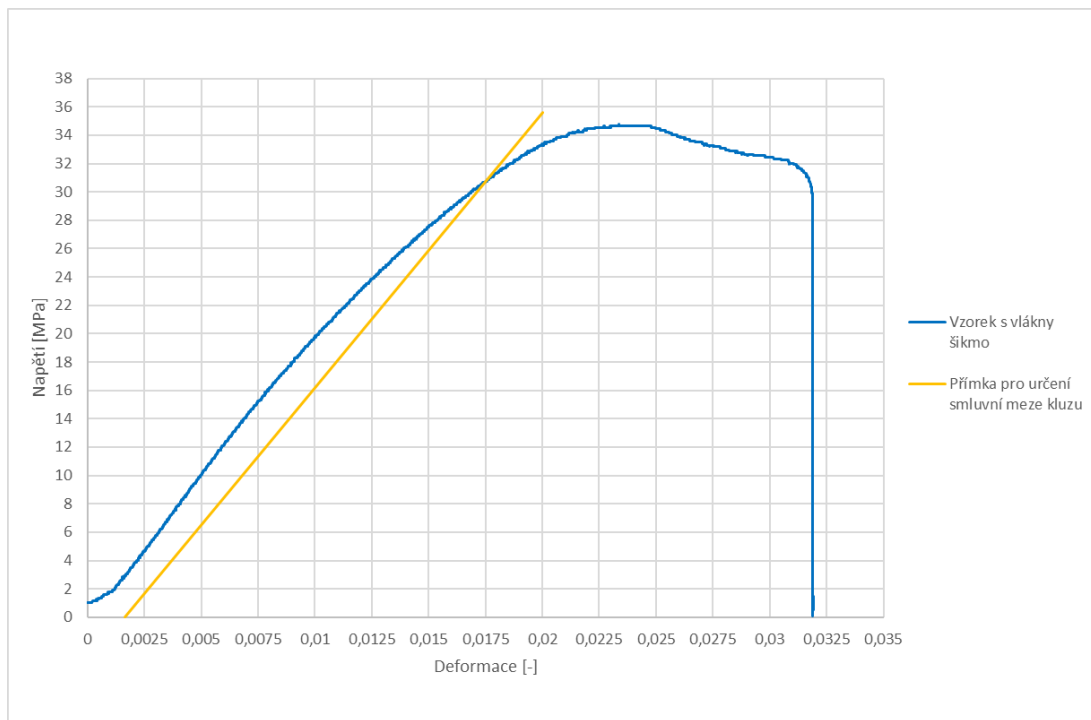
Tahové diagramy vzorků z materiálu ABS



Tahové diagramy vzorků vytištěných v horizontální poloze

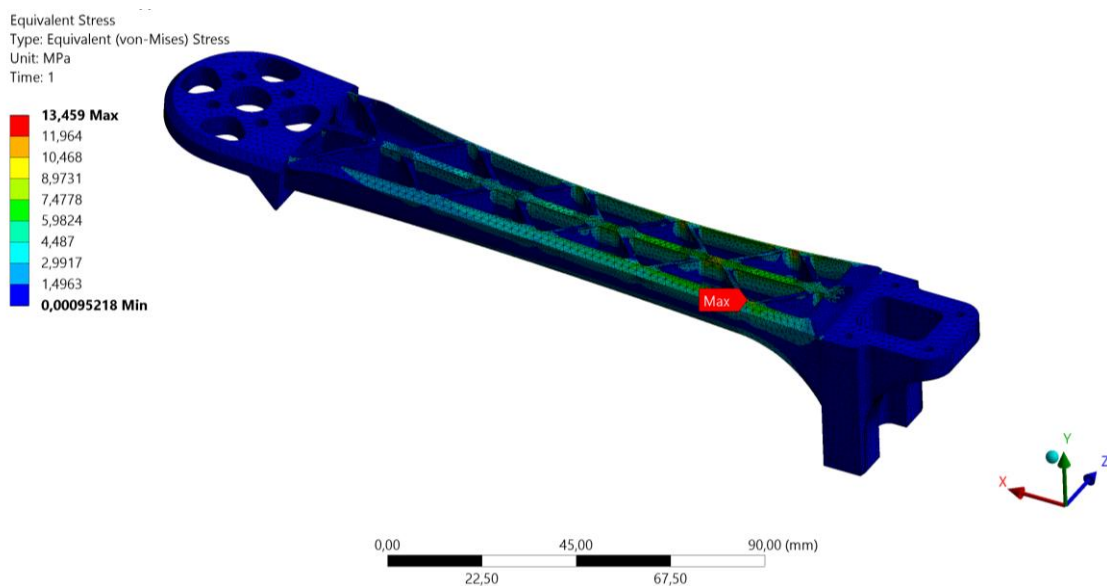


Tahové diagramy vzorků vytištěných ve vertikální poloze

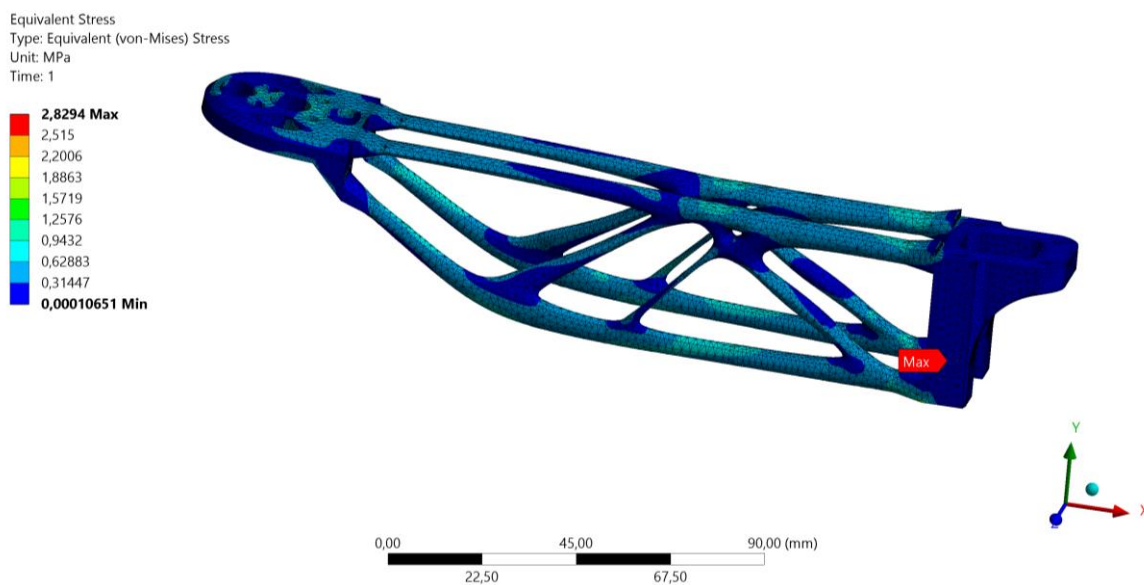


Tahový diagram vzorku vytištěného v horizontální poloze s vlákny pod 45° ke směru tahu

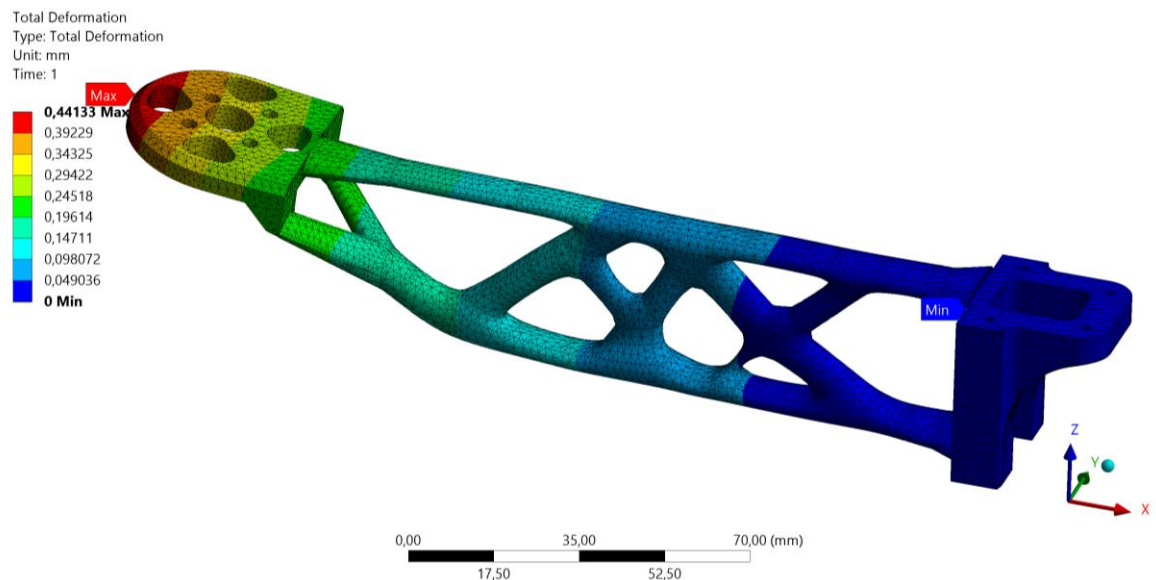
Obrazová dokumentace MKP analýzy



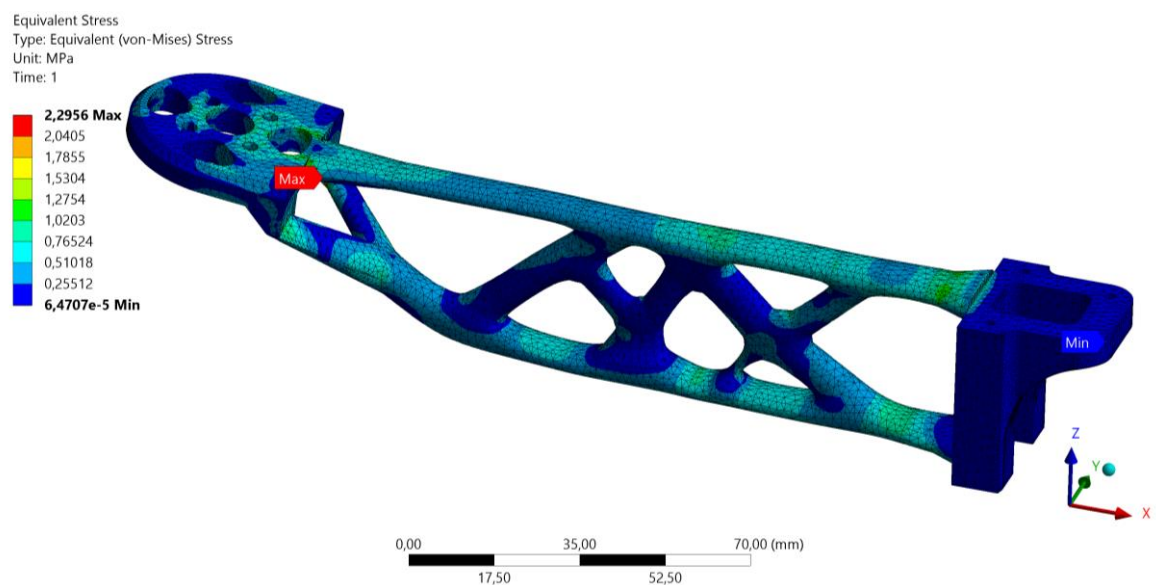
MKP analýza ekvivalentního napětí originálního ramene s upravenými konci



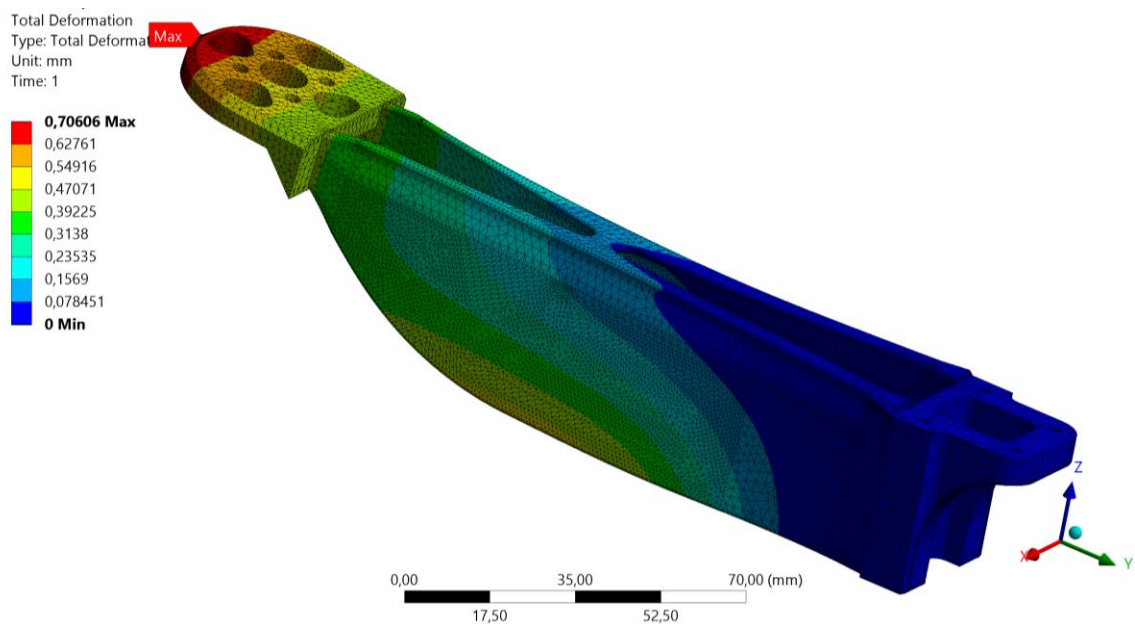
MKP analýza ekvivalentního napětí návrhu Bez technologického omezení



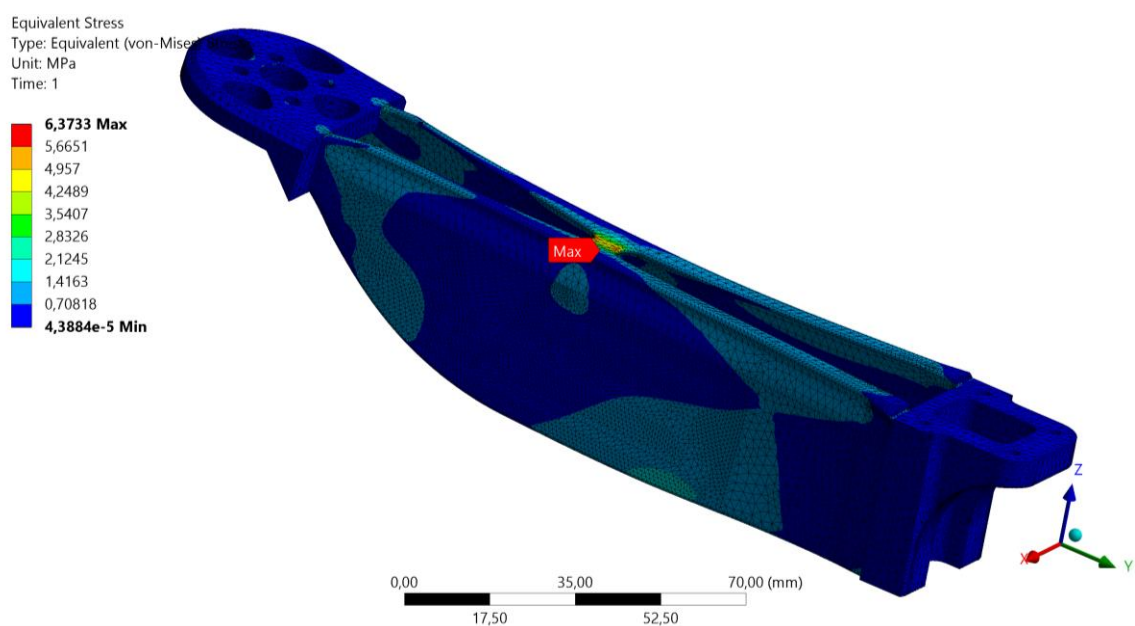
MKP analýza celkové deformace návrhu Split draw Y



MKP analýza ekvivalentního napětí návrhu Split draw Y

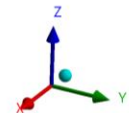
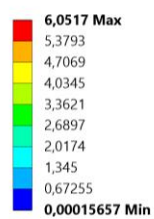


MKP analýza celkové deformace návrhu Single draw -Z



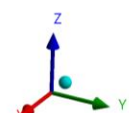
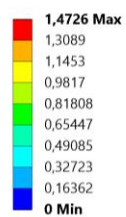
MKP analýza ekvivalentního napětí návrhu Single draw -Z

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1

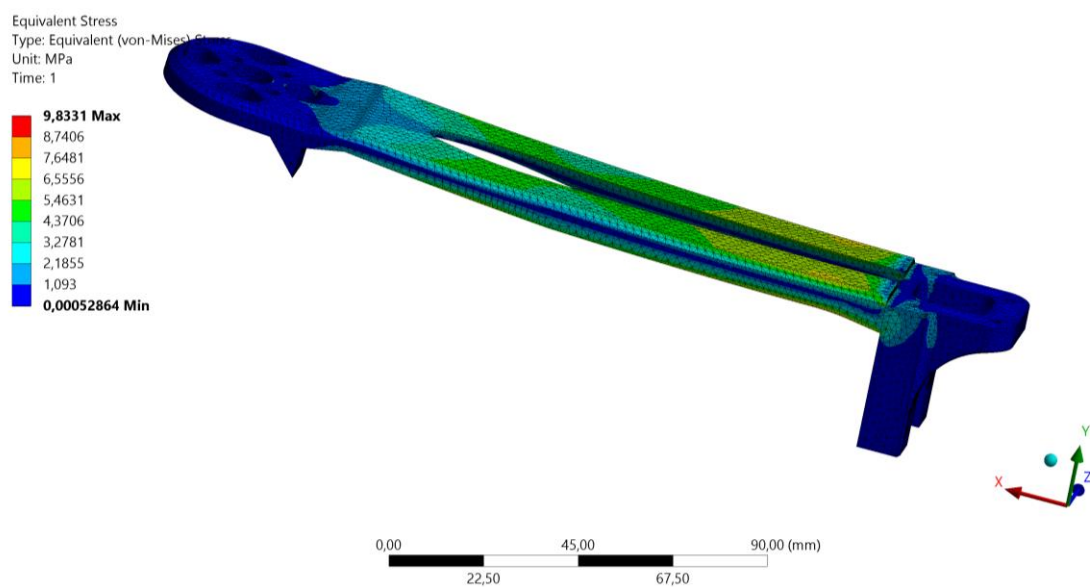


MKP analýza ekvivalentního napětí návrhu Extrusion Y

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1

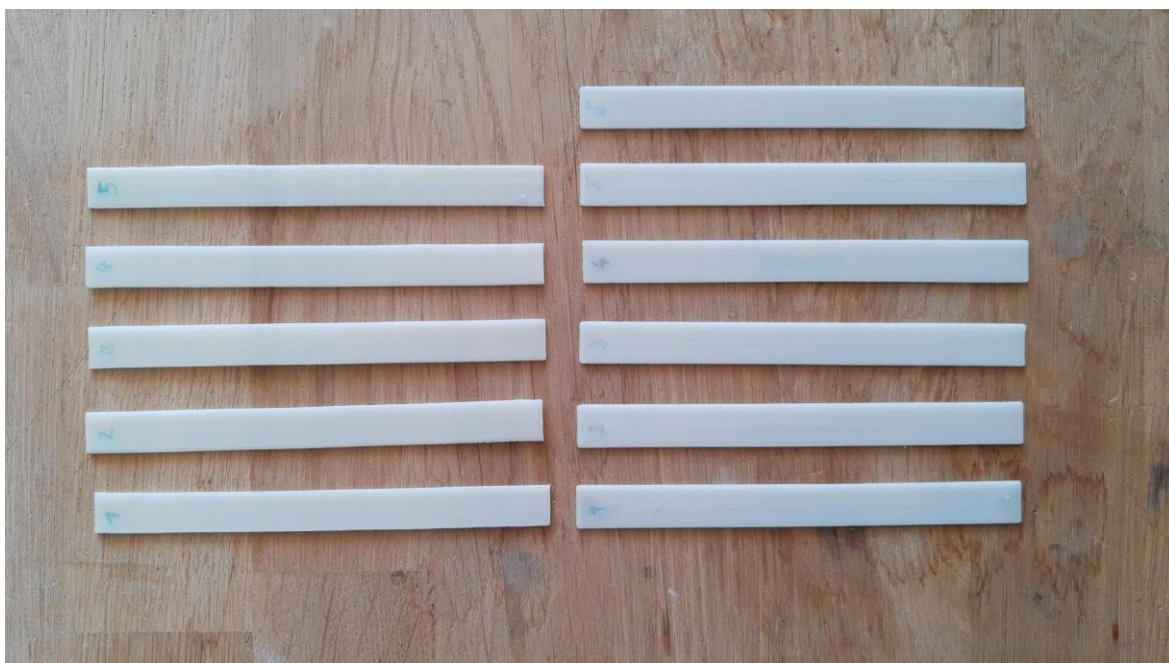


MKP analýza celkové deformace návrhu Extrusion Y



MKP analýza ekvivalentního napětí návrhu Overhang -Z

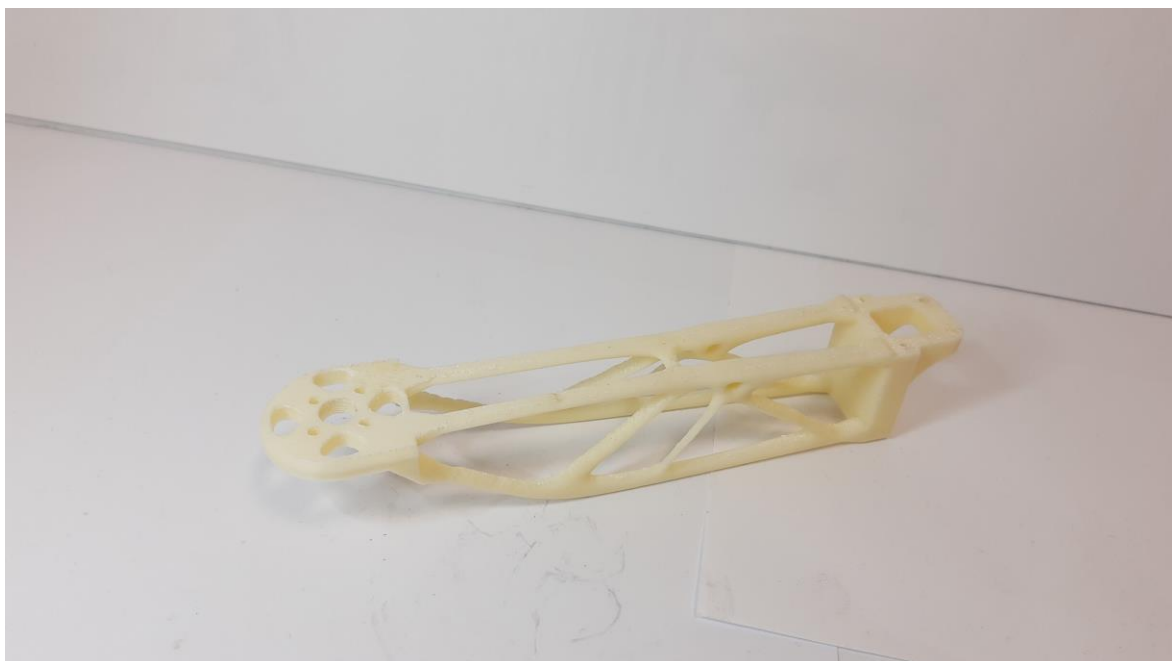
Fotodokumentace 3D tisku a fotogrammetrického testování ramen



Vytištění a očíslované tahové vzorky z materiálu ABS (typ 2 dle ČSN EN ISO 527-3)



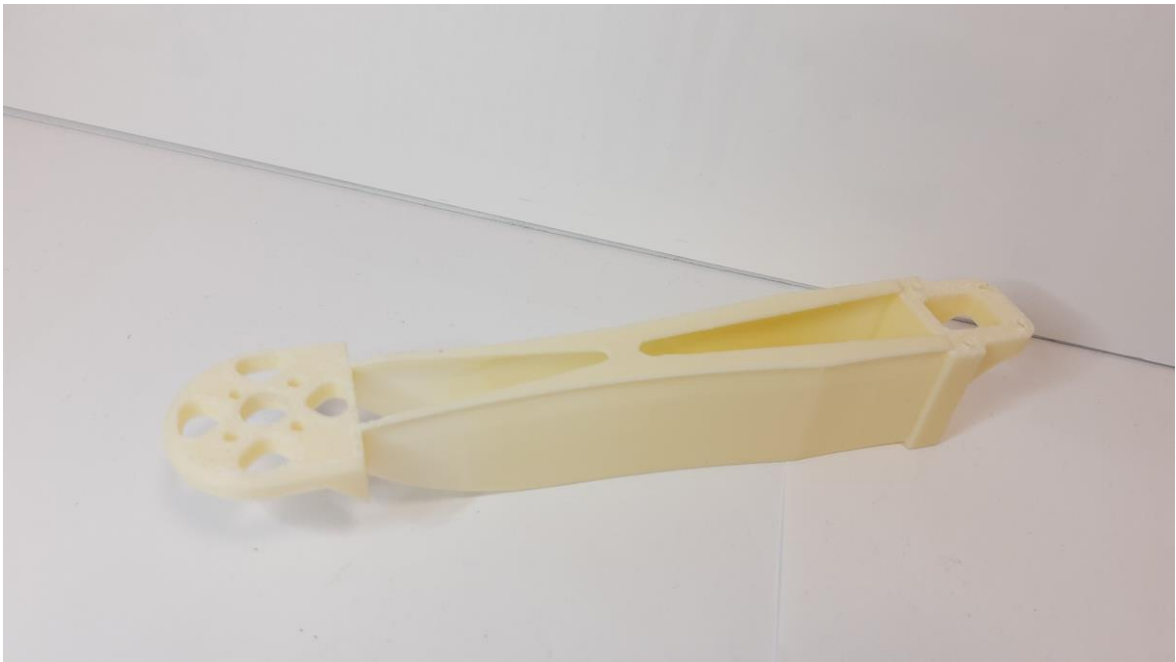
Finální tvar ramene Original



Finální tvar ramene Bez technologického omezení



Finální tvar ramene Split draw Y

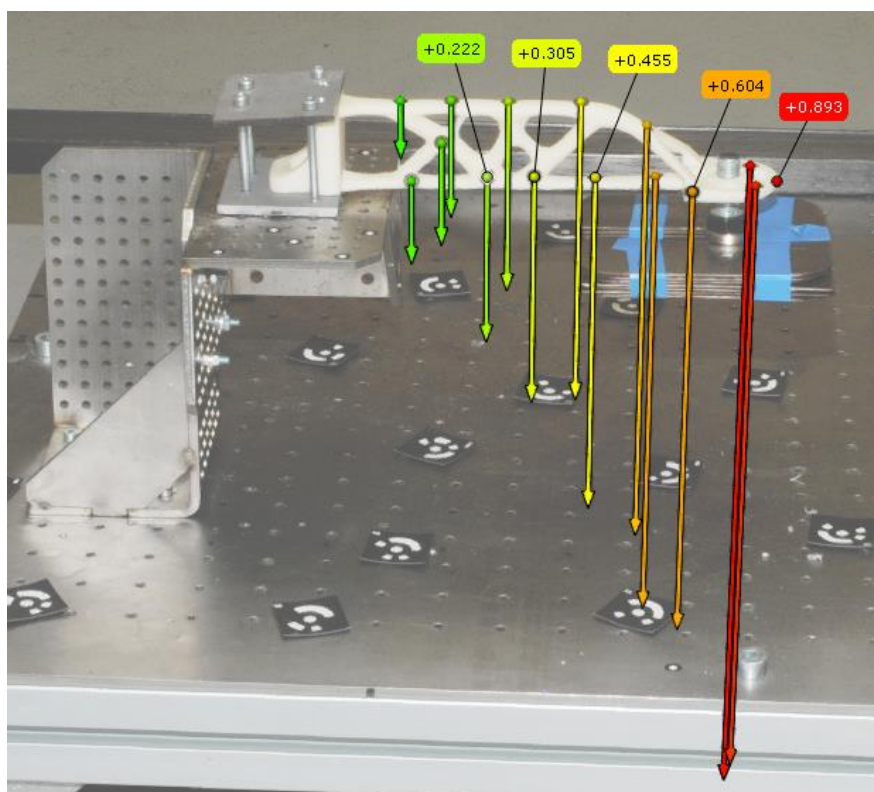


Finální tvar ramene Single draw -Z

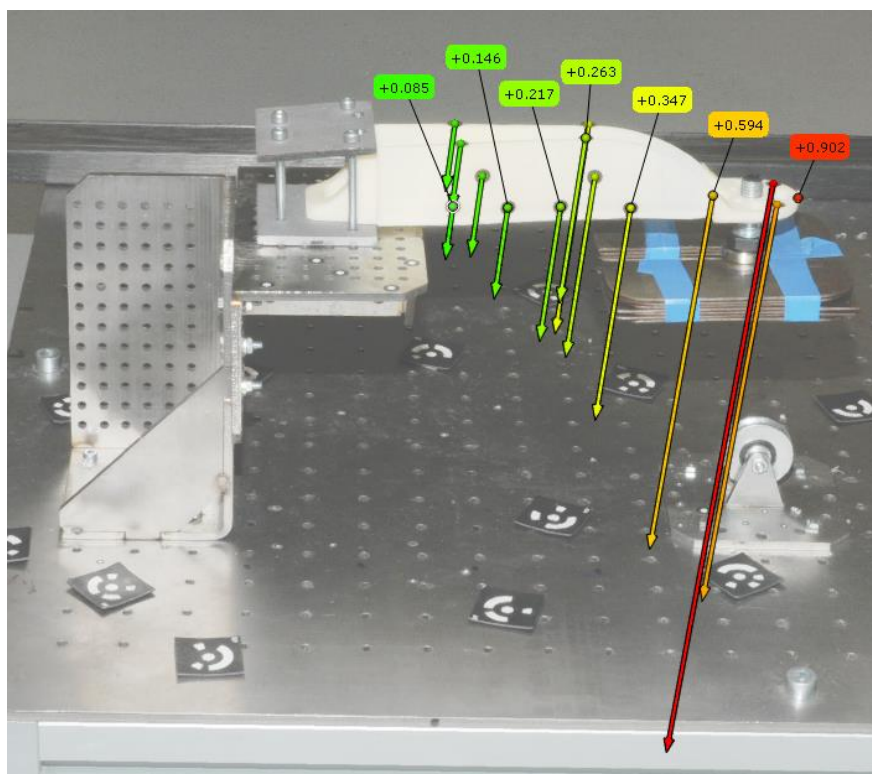


Finální tvar ramene Extrusion Y

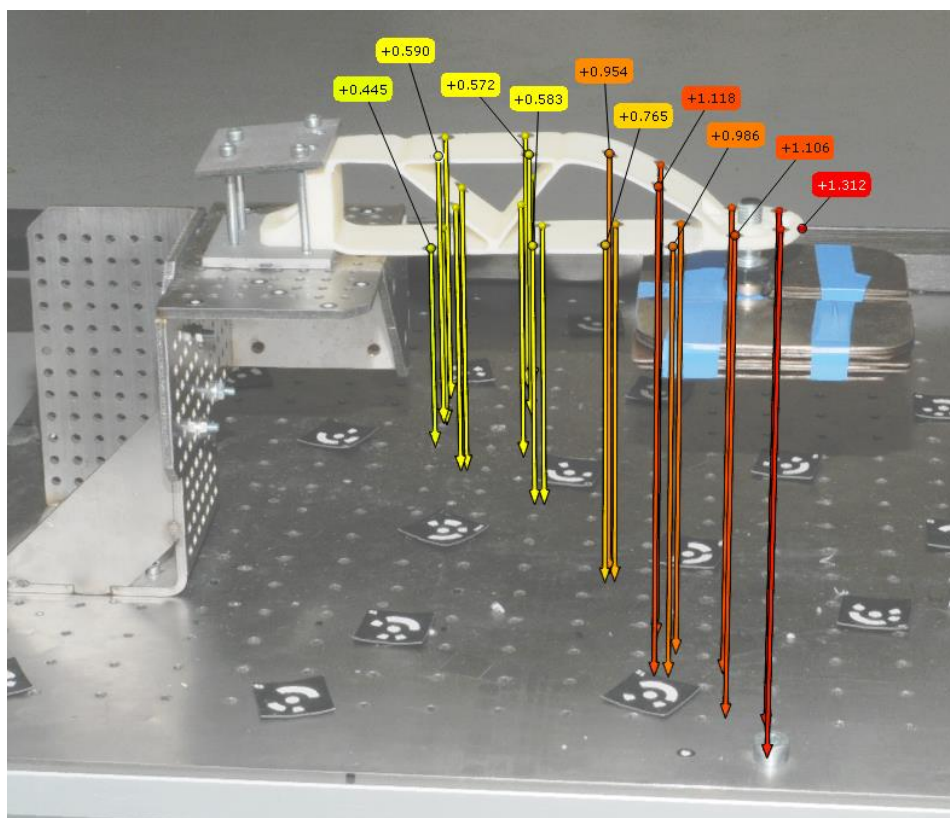
Obrazová dokumentace fotogrammetrické analýzy



Výsledky fotogrammetrické analýzy ramen Split draw Y



Výsledky fotogrammetrické analýzy ramen Single draw -Z



Výsledky fotogrammetrické analýzy ramen Extrusion Y