



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝROBA DÍLŮ S ODLEHČENOU STRUKTUROU A TOPOLOGICKOU OPTIMALIZACÍ

MANUFACTURING OF PARTS WITH LATTICE STRUCTURE AND TOPOLOGICAL OPTIMIZATION

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Pospíšil

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Jan Pospíšil</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Zouhar, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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:

## **Výroba dílů s odlehčenou strukturou a topologickou optimalizací**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce se bude zabývat porovnáním metod výroby dílu, které byly navrženy za pomoci odlehčených prutových struktur (lattice) a topologické optimalizace. Tyto metody výrazně mění náhled na konstrukci dílů a dovolují optimalizovat hmotnost a pevnostní charakteristiky dílu. Z hlediska výroby jsou díly určeny primárně pro 3D tisk, jak kovů, tak plastů.

### **Cíle diplomové práce:**

1. Rešeršní část – topologická optimalizace a prutové prvky.
2. Aplikace metod na danou součást – kombinace metod a variant.
3. Výroba dané součásti pro zvolené technologie.
4. Technicko–ekonomické hodnocení.

### **Seznam doporučené literatury:**

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80--4-4025-8.

CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. 512 pp. ISBN 978-981-277-897-0.

JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING, C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004. pp. 112. ISBN 186-058-465-9.

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.

GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. ISBN 14-419-1120-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

**ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem držáku hořáku svařovacího stroje za využití topologické optimalizace a odlehčených mřížkových struktur. Cílem práce je seznámit se s problematikou použití topologické optimalizace v různých softwarech a aplikovat metody na danou součást držáku. Závěr práce je věnován navrhnutí výroby a ekonomickému zhodnocení.

**Klíčová slova**

topologická optimalizace, mřížkové struktury, generativní design, aditivní technologie

**ABSTRACT**

This thesis deals with the design of welding torch holder using topology optimization and lattice structure. The objective of this thesis is gaining knowledge about topology optimization in different software and application of methods to that part. Conclusion of this thesis is about production design and economic evaluation.

**Key words**

topology optimization, lattice structure, generative design, additive manufacturing

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

POSPÍŠIL, Jan. Výroba dílů s odlehčenou strukturou a topologickou optimalizací. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124986>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Jan Zouhar, PhD.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Výroba dílů s odlehčenou strukturou a topologickou optimalizací** vypracoval/la samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.6.2020

-----  
Datum

-----  
Bc. Jan Pospíšil

**PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Janu Zouharovi, PhD. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

**OBSAH**

ÚVOD .....	8
1 ODLEHČENÉ STRUKTURY .....	9
1.1 Struktury založené na vzpěrách .....	10
1.2 Struktury založené na minimalizaci povrchu .....	10
1.3 Jednoduché tenkostěnné struktury .....	13
2 GENERATIVNÍ DESIGN .....	14
3 TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE .....	16
3.1 Nejpoužívanější metody topologické optimalizace .....	17
3.1.1 Metoda konečných prvků .....	17
3.1.2 Metoda SIMP .....	18
3.1.3 Metoda OMP .....	18
3.1.4 Metoda NOM .....	19
3.1.5 ESO (BESO) .....	19
3.1.6 SKO .....	19
3.2 Programy pro topologickou optimalizaci .....	19
4 ANALÝZA DRŽÁKU SVAŘOVACÍHO HOŘÁKU .....	22
4.1 Materiály použité při optimalizaci .....	22
4.1.1 Únavová pevnost .....	23
4.2 Analýza působícího zatížení .....	26
4.2.1 Výchylka .....	26
4.2.2 Rychlost .....	27
4.2.3 Zrychlení .....	27
4.2.4 Síla .....	28
4.3 Topologická optimalizace ve vybraných softwarech .....	29
4.3.1 Ansys Workbench .....	29
4.3.2 Solidworks .....	38
4.3.3 Autodesk Fusion 360 .....	45
5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A NÁVRH ŘEŠENÍ .....	50
5.1 Shrnutí výsledků z programů .....	50
5.2 Návrh řešení .....	53
5.2.1 Výroba konvenčními technologiemi .....	53
5.2.2 Výroba aditivními technologiemi .....	54
SLS + DMLS .....	55
5.3 Analýza navrženého řešení .....	57

5.4	Odlehčená mikroprutová struktura.....	59
5.5	Shrnutí dosažených výsledků.....	63
6	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	64
6.1	Aditivní technologie.....	64
6.2	Konvenční technologie.....	65
7	ZÁVĚR .....	66
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	67
9	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	71



## ÚVOD

V posledních několika letech zažíváme velký rozvoj aditivních technologií. Tyto technologie nám umožňují vyrábět součásti, které dokážeme jinými metodami vyrábět jen velmi těžko. Díky nim se uplatňuje nový náhled na konstrukci, kdy se využívá pokročilých metod, např. generativního designu a topologické optimalizace (dále jen TO). Právě těmito metodami se zabývá i tato práce.

Návrh pomocí generativního designu umožňuje především velký rozvoj počítačů a umělé inteligence v posledních letech. Díky softwarům, do kterých designer zadává počáteční podmínky, stroje dokáží vyhodnocovat různá řešení a předkládat několik možných návrhů na posouzení, čímž se podílejí i na konstrukční činnosti. Generativní design využívá stroje k napodobování přístupu přírody k designu a předkládá velké množství možných řešení.

Naproti tomu TO je výpočetní metoda, která na základě zadaných parametrů dokáže vytvářet odlehčené konstrukce zdánlivě připomínající buněčné struktury. Ve spojení s aditivními technologiemi dokáže TO šetřit velké množství materiálu potřebného ke zhotovení daných součástí, avšak zachovává, nebo dokonce vylepšuje pevnostní vlastnosti takovýchto dílů.

## 1 ODLEHČENÉ STRUKTURY

Přírodní porézní materiály jako dřevo, korek, nebo například kosti byly formovány po celá staletí. Jejich struktura se zkoumá dodnes a je využívána v moderních metodách pro tvorbu průmyslově vyráběných produktů. Tyto struktury jsou využívány nejen jako designové aplikace, ale především jako pevné, a přitom velmi lehké materiály právě díky jejich struktuře. Ukázkou aplikace odlehčené struktury můžeme vidět na obr. 1.1. Zde je využita TO s příhradovou konstrukcí, čímž bylo dosaženo minimální hmotnosti. [39] Deformační vlastnosti nám rovněž dovolují uplatnění těchto struktur v aplikacích pro absorpci energie nebo tam, kde je nutná nízká hmotnost. Existuje mnoho druhů takovýchto materiálů a také mnoho metod, jak je lze vyrábět. [1, 2]



Obr. 1.1 Součást „Spider bracket“ vyrobená s využitím aditivních technologií [39]

Kovová pěna je druh materiálu, který je vyráběn vhaněním plynu nebo pěnícího činidla do roztaveného kovu. Ačkoliv jsou kovové pěny relativně levné na výrobu, sestávají spíše ze stochastického uspořádání otevřených či uzavřených buněk než z pravidelného buňkového uspořádání. Toto vede k nekonzistentním mechanickým vlastnostem v celém objemu, což je nežádoucí v průmyslovém využití a vyžaduje to určitý konzervativní přístup. [1]

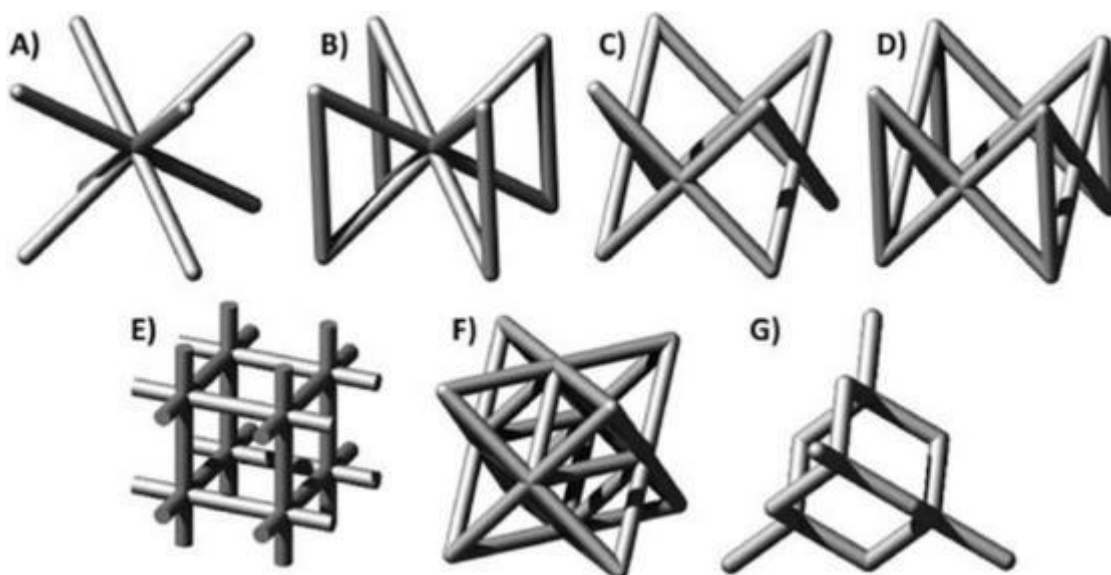
Naproti tomu odlehčené struktury (*lattice structure*) jsou typem materiálu, který se od kovové pěny liší pravidelným uspořádáním mřížky. Ve výsledku nám to umožňuje získat mnohem lepší vlastnosti (větší absorpce energie, pevnost, tuhost), jednodušší kontrolu vlastností profilů, lepší schopnost udržet zatížení než stochastické porézní struktury. Právě díky těmto vlastnostem se v současnosti stále více uplatňují jak v automobilovém, tak především leteckém průmyslu, případně zdravotnictví. Výroba takovýchto struktur by byla konvenčními metodami velmi časově i finančně nákladná, proto se nejhojněji využívá aditivních metod, kdy se materiál nanáší vrstvu po vrstvě. [2][3] Mezi nejčastěji používané

patří metoda SLM (*selective laser melting*), tedy selektivní tavení laserem, díky které lze vyrobit i díly, které kvůli jejich designu není možné vyrábět jinými metodami. [6]

Odlehčené struktury lze obecně rozdělit na základě mechanického zatížení, a to na ohybové a tahové. Struktury, kde se vyskytují mnohem větší ohybové momenty při zachování soudržnosti materiálu, jsou mnohem poddajnější než struktury, které se vyznačují větší odolností vůči axiálnímu zatížení, tudíž jsou pevnější v tahu a tlaku. Zde si odlehčené prutové struktury kategorizujeme jako struktury založené na vzpěrách, na minimalizaci povrchu nebo tenkostěnné. [1, 5] K jejich výpočtu a optimalizaci jsou používány 3D simulační programy, které jsou popsány v kapitole 2.1.

### 1.1 Struktury založené na vzpěrách

Tyto mřížkové struktury vychází ze stavby krystalů, které se vyskytují v přírodě. Mezi nejběžněji vyskytované a používané patří například prostorově (obr. 1.2 A) a plošně středěná mřížka (obr. 1.2 C) nebo jejich variace. Existují i další struktury, které jsou zobrazeny na obr. 1.2. [1, 5]

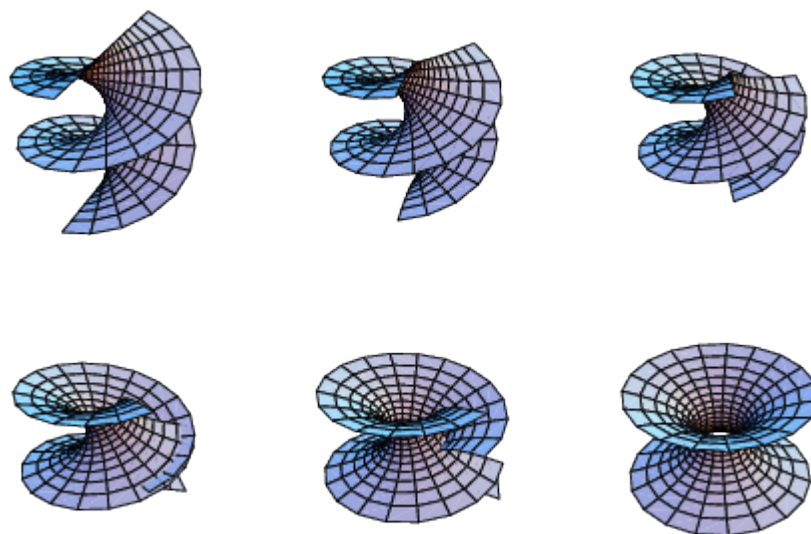


Obr. 1.2 Základní mřížky: A) prostorově středěná, B) prostorově středěná se vzpěrami v ose Z, C) plošně středěná, D) plošně středěná se vzpěrami v ose Z, E) kubická, F) oktagonální, G) diamant [1]

Nejčastějším důvodem, proč se využívají, je jednoduchost jejich designu. Jsou generovány pomocí topologické optimalizace s využitím prutové optimalizace, díky které se zefektivňuje rozdělení materiálu v součásti a naplno se využívají výhody aditivních technologií. [1]

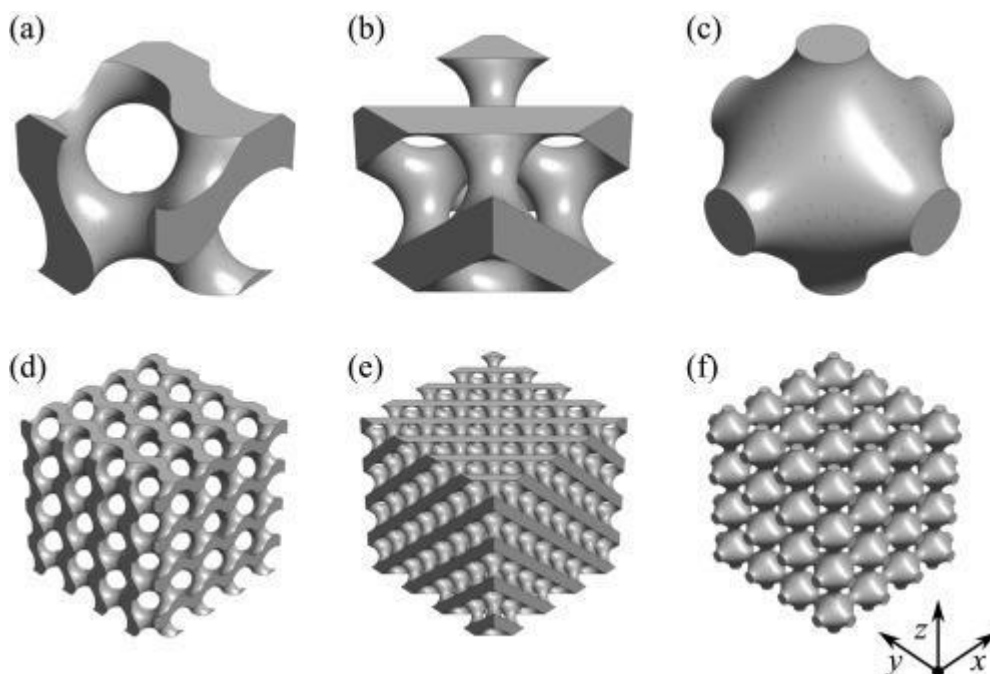
### 1.2 Struktury založené na minimalizaci povrchu

Minimalizací povrchu se zabývali matematici a fyzici, jako například Leonhard Euler či Joseph-Louis Lagrange, již od 18. století. Triviální příklad minimalizace je například rovina. Euler definoval další základní povrchy, a to katenoid (povrch vzniklý rotací určité křivky kolem osy) nebo helicoid (povrch vzniklý rotací určité křivky kolem osy ve šroubovici). Helicoid můžeme rovněž definovat jako deformovaný katenoid. (obr. 1.3) [7]



Obr. 1.3 Katenoid, který deformací přechází v helicoid [7]

Minimalizované povrchy užívané v aditivních technologiích mohou být ale daleko složitější. Často užívané jsou povrchy označované zkratkou TPMS (*triple periodic minimal surface*), jako je například gyroid (Alan Schoen, v roce 1970), diamant (Hermann Schwarz), nebo primitivní, které jsou vyobrazeny na obr. 1.4, nebo případně další struktury (Hermann Schwarz, E. R. Neovius a další).



Obr. 1.4 Buňky TPMS: gyroid (a), diamant (b) a primitivní (c) a jejich struktury 4 x 4 x 4 buněk [8]

Tyto struktury můžeme popsat i matematicky: [1, 8]

$$U_G = \cos(k_x x) \sin(k_y y) + \cos(k_y y) \sin(k_z z) + \cos(k_z z) \sin(k_x x) - t \quad (1)$$

$$U_D = \sin(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) + \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) - t \quad (2)$$

$$U_P = \cos(k_x x) + \cos(k_y y) + \cos(k_z z) - t \quad (3)$$

Kde

t proměnná popisující změnu objemu, relativní hustoty

$k_i$  periodičita

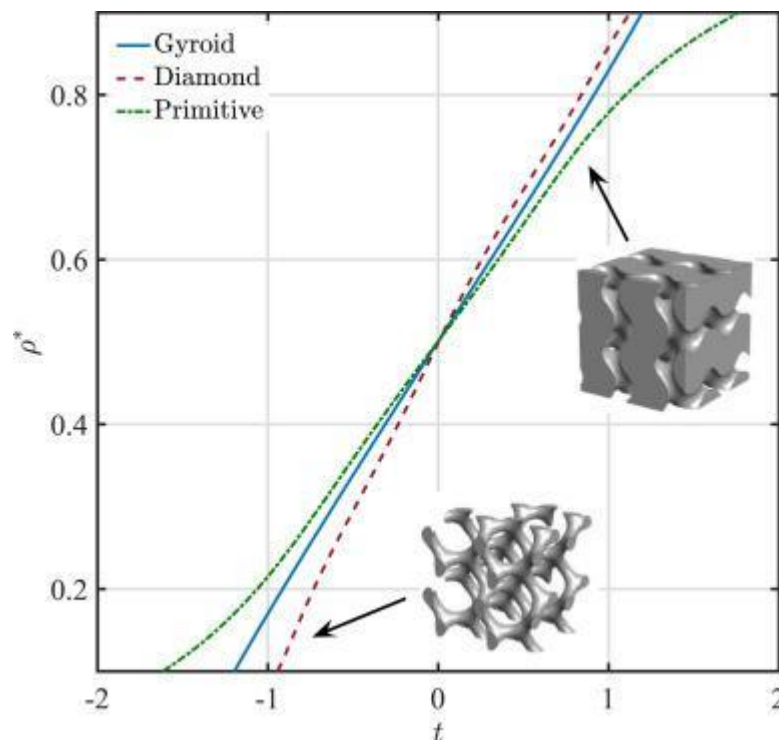
$$k_i = 2\pi \frac{n_i}{L_i} \quad (\text{kde } i = x, y, z) \quad (4)$$

Kde

$n_i$  počet buněk ve směru x, y, z

$L_i$  celková velikost struktury v daném směru

Závislost mezi proměnnou t a relativní hustotou je pro různé struktury odlišná, což nám dokazuje obr. 1.5. [8]

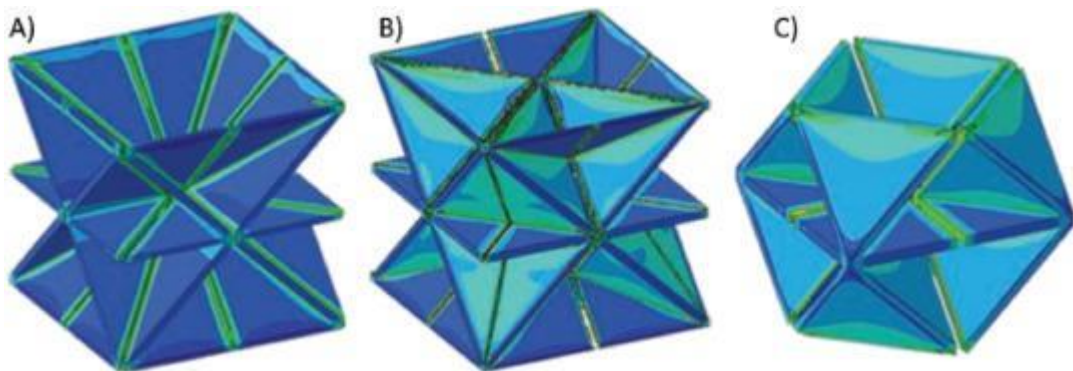


Obr. 1.5 Závislost mezi parametrem t a relativní hustotou [8]

Potenciální výhodou těchto struktur je fakt, že se sklon mřížky neustále mění, což znamená, že následující vrstvy více podporují vrstvy předcházející a tím zlepšují vlastnosti takového materiálu. [8]

### 1.3 Jednoduché tenkostěnné struktury

Aditivní technologie nám umožňují vytvářet a vyrábět buňkové struktury, jejichž části jsou složeny z různých povrchů místo pouhých prutů. Složitější a hojně využívané jsou popsány v části výše, avšak existují i jednodušší struktury, které při různých aplikacích lze využívat také. Jsou to struktury tvořené zejména rovinami. Jejich vlastnosti jsou v porovnání s prutovými strukturami také lepší, ale mají velkou nevýhodu, a to hlavně při výrobě aditivními metodami založenými na práškovém podkladu. Jejich stavba nedovoluje, abychom prášek zcela vyjmuli, jelikož zůstává uvězněn uvnitř jednotlivých buněk. [1] Proto se využívá zejména u těch technologií, kdy je jako polotovar volen drát a kdy nevzniká žádný nebo téměř žádný odpad. Výhodou je zde také mnohem menší hustota materiálu ve vyráběném produktu, než kdybychom použili neoptimalizovaný model. Některé tenkostěnné struktury, které jsou tvořeny vložením rovin do různých forem krystalu, můžeme vidět na obr. 1.6 [1]



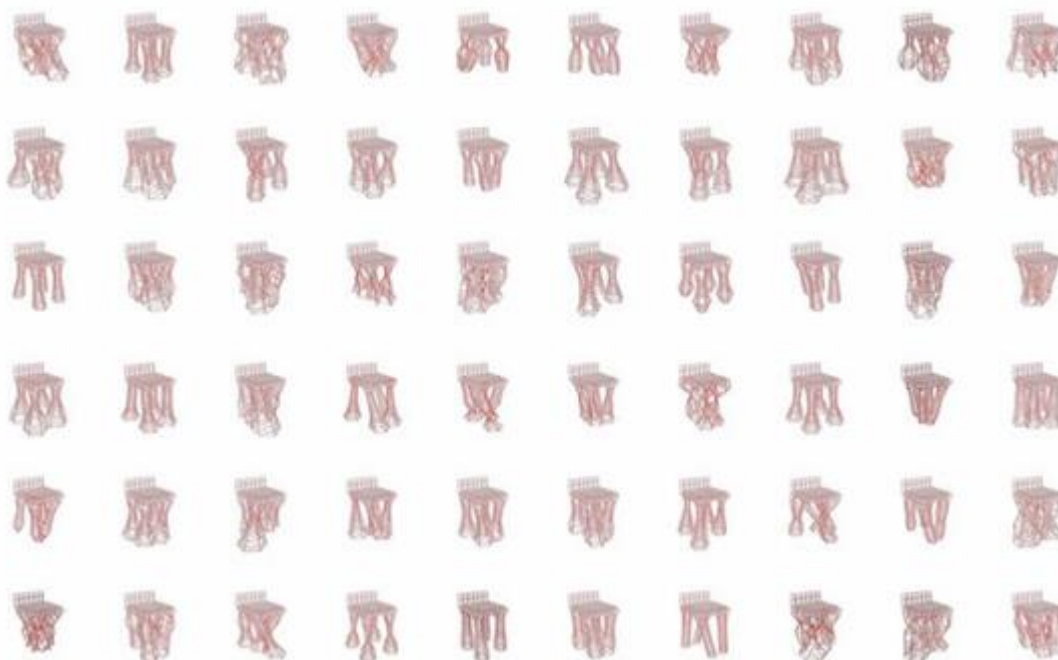
Obr. 1.6 Tenkostěnné struktury na základě kubické krystalové mřížky [1]

## 2 GENERATIVNÍ DESIGN

Rozvoj počítačů a umělé inteligence nám nabízí stále větší a lepší možnosti při navrhování. Tradičním postupem je využití počítače jako pasivního stroje, který pomáhá designérovi (konstruktérovi) vytvořit určitý design výrobku pomocí běžných postupů, od kreslení po 3D model. Tato tvorba má však poměrně omezené možnosti. Využitím nových postupů můžeme počítače zapojovat již do designérských návrhů, ze kterých si designér vybere ten nejvhodnější. Tento postup je označován jako generativní design. [20]

U generativního designu na začátku návrhář zadá pouze vstupní parametry, jako jsou konstrukční cíle včetně funkčních požadavků, výrobní omezení, hmotnost a materiálové vlastnosti, případně konstrukční prostor. Jde tedy o to, že počítač, nebo lépe řečeno externí výkonné výpočetní zařízení (*cloud computing*) s mnohem větší výpočetní silou, prohledá návrhový prostor a vyhodnotí tisíce vytvořených návrhů za splnění konstrukčních požadavků. Tyto návrhy poté předloží designérovi na posouzení a on si z nich vybere ten nejvhodnější pro dané použití. Generativní design tedy není limitován představivostí ani zkušenostmi konstruktéra, ale dokáže vytvářet nové produkty. [20, 21]

Generativní design využívá stroje k napodobování přístupu přírody k designu. Návrháři dostávají z generativního softwaru stovky, nebo dokonce tisíce generovaných možností, ze kterých filtrují ty, které nejlépe odpovídají jejich a zákaznickým potřebám. Příkladem může být designová židle. Namísto tvorby několika různých modelů, konstruktér zadá pouze požadovanou hmotnost a okrajové podmínky v podobě určitého materiálu. Počítač poté již může dodat obrovské množství vyrobitelných možností (obr. 2.1), které splňují zadaná kritéria a které bychom si mnohdy ani nedokázali představit. [21]



Obr. 2.1 Ukázka generativního designu židle [21]

Je třeba si uvědomit, že generativní design není to samé jako mnoho technologií, které se za generativní design často schovávají. Vezmeme-li topologickou optimalizaci či jiný

optimalizační nástroj, vždy je zde kladen důraz na vylepšení již existujícího tvaru, nikoli na tvorbu nových možností. U generativního designu jde však primárně o návrh, jehož součástí je i optimalizace. [21]

V praxi byl již generativní design mnohokrát použit, jako příklad jsou zde uvedeny lehčí a pevnější přepážky v letadle od firmy Airbus (obr. 2.2) či návrh rámu automobilu určeného pro extrémní skoky od kalifornské firmy Bandito Brothers. [20]



Obr. 2.2 Lehčí a pevnější přepážky v letadle Airbus [K]



### 3 TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE

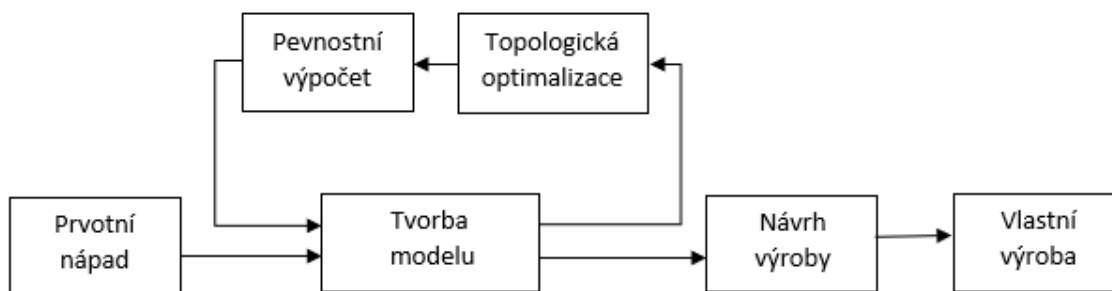
V důsledku rozmachu aditivních technologií je možné vyrábět i takové součásti, které bychom konvenčními technologiemi, jako je soustružení, frézování či tváření, vyráběli jen velmi těžko. Ukázkou využití můžeme vidět např. na obr. 3.1, kde je zobrazen výsledek spolupráce mezi firmami Altair a APWorks (dceřiná společnost firmy Airbus). Tato spolupráce vedla k topologicky optimalizovanému rámu motocyklu zhotovenému 3D tiskem, kde bylo ušetřeno 30 % hmotnosti. [27]



Obr. 3.1 Ukázka možností topologické optimalizace [27]

TO je matematický přístup, který byl zaveden kolem roku 1988. Jde o nejčastější typ strukturální optimalizace. [10] Jejím cílem je snížení objemu optimalizované součásti a úprava geometrie při zachování určité tuhosti či jiných předem daných vlastností, které definujeme formou vedlejších podmínek. K tomu se využívá předem definované sítě konečných prvků. TO patří do kategorie zobecněné optimalizace tvaru součásti, označované jako GSO (*Generalised Shape Optimization*). [9]

TO je proces založený na síti konečných prvků. Pevnostní analýza na základě metody konečných prvků (FEA – z ang. *Finite Element Analysis*) a TO jsou však ve své podstatě procesy, které na design výrobku nahlíží z různých směrů. Ve FEA importujeme tvar součásti, zadáme veškerá zatížení a omezení a výpočtový software potvrdí či vyvrátí, zda zadaný tvar vyhovuje. Zde se tedy jedná o pevnostní výpočet. Naproti tomu v TO jsou nejprve zadána požadovaná zatížení a omezení, nahrán objem, ve kterém může být součást definována, a následně je ze simulace pomocí softwaru tvořeno těleso tak, aby bylo dosaženo co nejmenšího požadovaného objemu, ale aby byla zachována co nejlepší tuhost součásti. [10] Je tedy důležité si uvědomit, že TO je pouze návrhový nástroj, po kterém musí proběhnout ještě pevnostní výpočet pro kontrolu. Pokud bychom chtěli proces tvorby výrobku s topologickou optimalizací shrnout do diagramu, vypadal by následovně:



Obr. 3.2 Diagram procesu tvorby výrobku

Z diagramu na obr. 3.2 je patrné, že TO následuje po vytvoření modelu. Pro správnou optimalizaci je vždy nutné velmi pečlivě zanalyzovat působící zatížení, tedy vnější podmínky, které jsou v této práci popsány v kapitole 4.

### 3.1 Nejpoužívanější metody topologické optimalizace

Na začátku každé metody je nutné definovat návrhový prostor, dále okrajové podmínky a zatížení součásti, případně rozvržení sítě. Základem uvedených metod je metoda konečných prvků. Dále zde jsou uvedeny metody SIMP, OMP a NOM, které jsou určeny pro řešení zobecněné optimalizace v případě izotropních pevných či prázdných elementů. Mezi další zde uvedené metody řadíme ESO (BESO) a SKO, avšak v technické praxi je využívána i celá řada dalších.

#### 3.1.1 Metoda konečných prvků

MKP je základní numerická metoda využívaná pro řešení rozsáhlé palety inženýrských problémů. Metoda vznikala kvůli potřebám složitých výpočtů různých konstrukcí převážně v leteckém a kosmickém průmyslu a odtud se postupně rozšířila i do průmyslové praxe. Mezi numerickými metodami MKP dosahuje zcela dominantního postavení. [44]

Princip metody spočívá v diskretizaci spojitého modelu do sítě konečných prvků, jak již napovídá název. Základním stavebním kamenem této metody je tedy síť, která je tvořena konečným počtem podoblastí (prvků) s konečnými rozměry. Každý prvek má kromě svých rozměrů daný i počet a polohu jeho uzlů. Uzel je bod sítě, ve kterém se hledá neznámý parametr řešení (např. posuv, napětí apod.). Stavba sítě, zejména počet elementů a uzlů, zásadně ovlivňuje kvalitu výsledků a časovou náročnost výpočtů. [44]

Každému prvku jsou na počátku výpočtu přiřazené neznámé funkce, které dohromady představují spojitě řešení daného problému. Tyto funkce posléze hledáme přibližně, konkrétně ve formě lineární kombinace vhodně zvolených (tzv. bázevých) funkcí a hledaných neznámých parametrů (např. posuvů nebo teploty, v závislosti na typu analýzy). Z posuvů lze vypočítat přetvoření či napětí. Od hledání spojitě řešení se tedy přechází na hledání konečného počtu posuvů uzlů sítě, tj. parametrů. [44]

Hlavní výhodou metody je možnost řešení různých zadaných problémů i na poměrně složitých tělesech. Největším omezením je hlavně kapacita dostupného hardwaru, která zásadně ovlivňuje časovou náročnost výpočtů. [44]

### 3.1.2 Metoda SIMP

Metoda SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*; metoda pevné izotropní mikrostruktury s penalizací) pro optimalizaci topologie je jednou z nejběžněji používaných metod ve většině dostupných softwarů. Vychází z homogenizační metody, což je metoda pro optimalizaci tvaru. Jedná se o méně náročnou metodu na výpočet, je však velmi závislá na jemnosti sítě, ale to lze částečně řešit pomocí některých vedlejších okrajových podmínek. [11] Využívá se v úvodní fázi návrhu pro předpověď optimálního rozložení materiálu uvnitř daného navrženého prostoru výsledného dílce a berou se přitom v úvahu zadaná zatížení, výrobní omezení a mezní podmínky. [10]

Zde se TO tradičně řeší diskretizací do sítě konečných prvků. Při této metodě je použita jedna proměnná  $\rho_e$  pro každý prvek sítě, která značí fiktivní hustotu materiálu (poměr reálného materiálu vůči objemu, v některých pramenech bývá označována jako tloušťka). Tato hustota je pro izotropní pevné materiály buď nulová, nebo rovna dané hodnotě  $\rho_0$ . Možným východiskem bude uvažovat spojitě se měnící tuto fiktivní hustotu. Hodnota proměnné se bude pohybovat v rozmezí  $\langle \rho_{\min}; \rho_{\max} \rangle$ , kde  $\rho_{\min} > 0$  a  $\rho_{\max} = 1$ . Mezilehlé hodnoty můžeme penalizovat zavedením specifické hustoty  $\rho$  (odtud písmeno P v názvu metody). [10, 11]

$$\rho = \rho_e^p \quad (5)$$

Kde  $p > 1$ .

Penalizace obvykle začíná na hodnotě  $p = 1$  a postupně se tato hodnota zvyšuje až do  $p = 5$ . Zvyšováním docílíme toho, že se nám většina mezilehlých hodnot přiblíží jedné z mezních hodnot. Tímto však získáváme nelineární a nekonvexní úlohu, tudíž zde nemusíme nalézt hledané globální optimum. [11]

Hlavní výhodou této metody bývá označována výpočetní efektivnost, jelikož na jeden element připadá jediná návrhová proměnná. Dále můžeme uvést masivnost, jelikož metoda může být použita pro jakoukoliv kombinaci vedlejších podmínek. Důvodem, proč se metoda hojně využívá, je také její jednoduchost, jelikož algoritmus nevyžaduje žádné odvozování, které by obsahovalo vyšší matematiku. Vhodnou volbou penalizace také můžeme dostat velmi přesné řešení. Nevýhodou může být závislost řešení na stupni penalizace a nejistota ohledně konvergence k reálnému bodu optima. Tento nedostatek se však vyskytuje i u ostatních metod využívajících topologii izotropních pevných elementů. [11]

### 3.1.3 Metoda OMP

Metoda je založena na optimální mikrostruktuře s penalizováním mezilehlých hodnot (*Optimal Microstructures with Penalization*). Využitím optimální mikrostruktury je myšleno, že nejprve nalezneme optimální řešení pro každý jednotlivý prvek na základě určitých (vedlejších) podmínek, a to analyticky. Na rozdíl od metody SIMP, kde se nachází pouze jedna proměnná, zde máme pro 2D úlohy tři proměnné na každý element – dvě pro hustotu materiálu a jednu pro orientaci; pro 3D úlohy pak dokonce pět proměnných – tři pro hustotu a dvě pro orientaci. [11]

Zastánci této metody bývají většinou lidé z řad matematiků. Jejich argumentem je fakt, že metoda je oproti metodě SIMP, kterou zastávají více fyzici, mechanici a technici, náročnější, ale za úsilí dostáváme větší korektnost řešení.

Nevýhodami zde jsou: [11]

- více návrhových parametrů, z čehož plyne značné ztížení výpočtů
- nutné použití vyšší matematiky pro výpočty při zavádění nových podmínek návrhů
- není známa optimální mikrostruktura pro obecnou úlohu
- metoda ústí v úlohu, která je nekonvexní

- je vyžadována homogenizace mikrostruktury
- metoda je závislá na stupni penalizace

### 3.1.4 Metoda NOM

Tato metoda (*NonOptimal Microstructures*) pracuje bez penalizace za využití neoptimální mikrostruktury (např. element s otvorem). Oproti OMP zde obvykle bývá menší počet neznámých parametrů, což můžeme považovat za výhodu, ale oproti metodě SIMP jich zahrnuje stále více. Jelikož metoda NOM představuje nekonvexní formalizaci úloh, je vyžadována homogenizace. [11]

### 3.1.5 ESO (BESO)

ESO (*Evolutionary Structural Optimisation*) lze přeložit jako optimalizace vyvíjející se struktury. Jedná se o poměrně jednoduchou metodu poprvé představenou roku 1992. Je založena na postupném odebírání neefektivního materiálu ze struktury součásti na základě určeného kritéria (napětí, posuvy aj.). [12]

Problémem u této metody je právě odebírání materiálu, jelikož v počátečních iteracích mohou být odebrány důležité části, které se do struktury již nemohou vrátit. Tato nevýhoda je částečně řešena v metodě BESO (*Bilinear ESO*), což je v podstatě stejná metoda, pouze doplněna o krok, kdy se materiál přidává. Vzhledem k této možnosti zde není ani nutné začínat se zcela vyplněným návrhovým prostorem, což může ušetřit čas potřebný pro výpočet. [13]

### 3.1.6 SKO

SKO (*Soft Kill Option*) lze přeložit jako metoda pozvolného odstraňování materiálu. Jde o poměrně jednoduchou a efektivní metodu, která probíhá v celém objemu součásti. V praxi se s touto metodou často využívá ještě postprocessing v podobě dalších metod pro zefektivnění výsledného tvaru součásti. Algoritmus této optimalizace simuluje mineralizaci kostí. [14] Principem procesu optimalizace u této metody je změna modulu pružnosti v tahu pro jednotlivé konečné prvky sítě, kdy se prvky bez přetvoření nebo s velmi malým přetvořením postupně vyřazují. Kritériem je zde tedy referenční napětí  $\sigma_{ref}$ . Běžně je metoda využívána pro celistvé struktury, ale lze ji využít i pro prutové prvky. [13]

## 3.2 Programy pro topologickou optimalizaci

Programů zvládajících různé druhy tvarové optimalizace je celá řada. Takovýto druh zlepšování a zefektivňování výrobků je rovněž integrován ve velkém množství softwarů, které se využívají v celé škále průmyslových odvětví. Většina programů využívá k optimalizaci primárně metodu SIMP, ale celá řada z nich nabízí i další metody vedoucí k řešení, ze kterých můžeme volit.

### Abaqus

Tento software patří do rodiny produktů od firmy Dassault Systemes. Pro topologickou optimalizaci využívá modul ATOM (*Abaqus Topology Optimization Modul*). Jako hlavní metoda řešení je zde využívána metoda SIMP. [29]

### Ansys Workbench

*Ansys Workbench* je program od společnosti Ansys, pomocí kterého můžeme simulovat prakticky cokoli v inženýrské oblasti. Mezi často využívané mohou být simulace pohybu, proudění, tepelného toku, topologické optimalizace, designové optimalizace a další. V modulu topologické optimalizace je primárně využívána metoda SIMP [17, 30]

### **Autodesk Fusion 360**

Program *Fusion 360* od firmy Autodesk využívá cloudové úložiště. Je určen primárně menším podnikům a nadšencům. V programu můžeme provádět jak návrh výrobku, tak i různé simulace apod. Integrovan je i modul generativního designu, který umožňuje navrhovat s pomocí umělé inteligence. Je zde spojen celý proces vývoje produktu do jednoduchého softwaru. Pro tvarovou optimalizaci je využívána metoda SIMP. [28]

### **Autodesk Inventor**

Tento program je již využíván ve velkých podnicích pro návrh a tvorbu složitých 3D modelů a sestav. Další z programů od firmy Autodesk, který ale k optimalizaci využívá nadstavbu *Nastran In CAD* pracující na základě metody SIMP. [32]

### **Inspire**

Software primárně určený na topologickou optimalizaci, patří pod společnost Altair Engineering. Kromě modulu topologické optimalizace zvládá i mnoho dalších užitečných simulací, jako např. tuhnutí odlitků, či dynamická analýza apod. *Inspire* je nadstavba výpočtového jádra *Optistruct* od výše uvedené firmy, které pracuje na výpočtové metodě SIMP. [31]

### **MSC Nastran**

Společnost MSC nabízí ve svých produktech kompletní řešení pro optimalizaci. TO v tomto programu může být definována 1D, 2D nebo 3D geometrií. Nastavení je mírně složitější, avšak umožňuje získávat velmi přesné výsledky. Software pracuje na základě metody SIMP. [30, 34]

### **Solidworks**

Tento program je v současnosti jeden z nejpoužívanějších 3D CAD programů nejen na českém trhu, ale i celosvětově. Jedná se o produkt, který patří pod dceřinou společnost Dassault Systemes. Umožňuje komplexní zpracování jak dílů (plechové dílce, svařence, formy apod.), tak i celých sestav z různých oborů strojírenství. Rozšířením tohoto programu pak můžeme například programovat CNC stroje pro různá odvětví atd. Dalším rozšířením je také *Solidworks Simulation*, které umožňuje simulaci a ověřování návrhů. V topologické optimalizaci je využíváno metody SIMP. [16]

### **ToOptiX**

Jedná se o přídavný modul do modelovacího softwaru *Blender*, který patří do skupiny open-source. Hlavní nevýhodou tohoto modulu je absence definice okrajových podmínek, které musíme definovat a následně importovat z jiného softwaru podporujícího analýzy na základě MKP. [35]

### **Z88Arion**

Verze tohoto softwaru je open-source, tedy volně šiřitelná. Program vznikl na univerzitě v německém Bayreuthu společně se simulačním nástrojem *Z88Aurora*. Software nabízí poměrně rozsáhlé možnosti nastavení topologické optimalizace včetně nastavení výpočtové metody. Na výběr zde máme mimo jiné metody SIMP a SKO. [36]

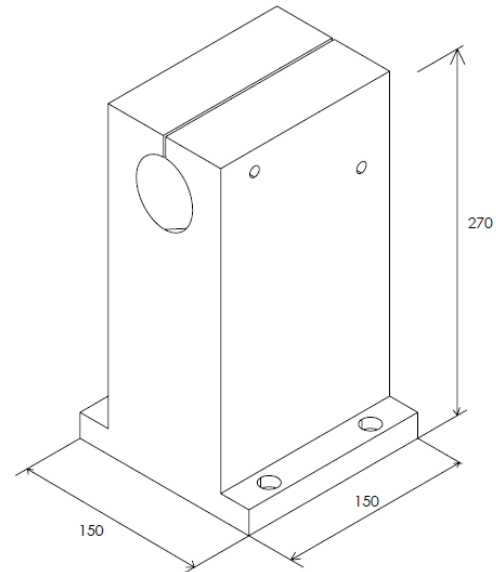
Softwarů, které dokáží provádět různými způsoby TO je celá řada, v této kapitole je uvedeno pouze několik z nich. Srovnání výše uvedených programů je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1: Přehled programů pro topologickou optimalizaci

Název	Vhodnost využití	Pozn.
Abaqus	Střední a velké podniky	Mnoho možností simulací, primární metoda TO: SIMP, jde o komerční software
Ansys Workbench	Střední a velké podniky	Velké množství dostupných simulací, primární metoda TO: SIMP; komerční software
Fusion 360	Malé a střední podniky, soukromníci, nadšenci	Komplexní program pro návrh a simulace, primární metoda TO: SIMP, komerční software
Inventor	Střední a velké podniky	3D CAD software s částečnými možnostmi simulace, primární metoda TO: SIMP, komerční software
Inspire	Malé, střední a velké podniky	Primární metoda TO: SIMP; komerční software
MSC Nastran	Střední a velké podniky	Mnoho možností simulací, primární metoda TO: SIMP, komerční software
Solidworks	Střední a velké podniky	3D CAD software s několika možnostmi simulace, primární metoda TO: SIMP, komerční software
ToOptix	Malé podniky, soukromníci, nadšenci	Omezené možnosti optimalizace, primární metoda TO: SIMP, open-source
Z88Arion	Malé a střední podniky, soukromníci, nadšenci	Omezené možnosti simulace, hlavně TO, metody řešení TO: SIMP, SKO, open-source

## 4 ANALÝZA DRŽÁKU SVAŘOVACÍHO HOŘÁKU

V této práci byla řešena součást držáku svařovacího hořáku pro pendlovací hlavu. Svařovací hlavici pro testovací navařování můžeme vidět na obr. 4.1 vlevo, vpravo je navržený model, jehož hmotnost bude v této práci optimalizována (rozměry v mm). Jelikož tato součást bude zatěžována po velmi dlouhou dobu, musíme brát v úvahu kromě působícího zatížení popsání v kapitole 4.2 také únavovou pevnost, která je blíže popsána v podkapitole 4.1.1.



Obr. 4.1 Vlevo: Svařovací hlavice pro testovací navařování, Vpravo: Navržené uchycení hořáku pro optimalizaci (základní design, rozměry v mm)

### 4.1 Materiály použité při optimalizaci

Pro topologickou optimalizaci dílu uvedeného výše jsme vybrali dva materiály, které byly v programech využity. Prvním materiálem je hliníková slitina AlSi10Mg. Jedná se o slitinu hliníku vhodnou i pro konstrukce s tenkými stěnami a složitou geometrií. Nabízí dobrou pevnost, tvrdost a dynamické vlastnosti, proto se může využívat i pro součásti vystavené vysokému zatížení. Součásti z tohoto materiálu se mohou dále obrábět, případně tepelně upravovat. [19]

Druhým materiálem je ocel AISI 316L (1.4404). Jde o korozivzdornou ocel s nízkým obsahem uhlíku, do 0,03 %. Tato ocel je vysoce odolná proti koncentrovaným kyselinám, má výrazně vyšší odolnost vůči korozi. Dále je velmi dobře svařitelná, má velmi dobré mechanické vlastnosti. Často se používá v chemickém průmyslu, pro zařízení pro styk s mořskou vodou apod. [40]

Mechanické vlastnosti obou těchto materiálů jsou popsány v tabulce 2.

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti použitých materiálů [19, 24, 40, 41]

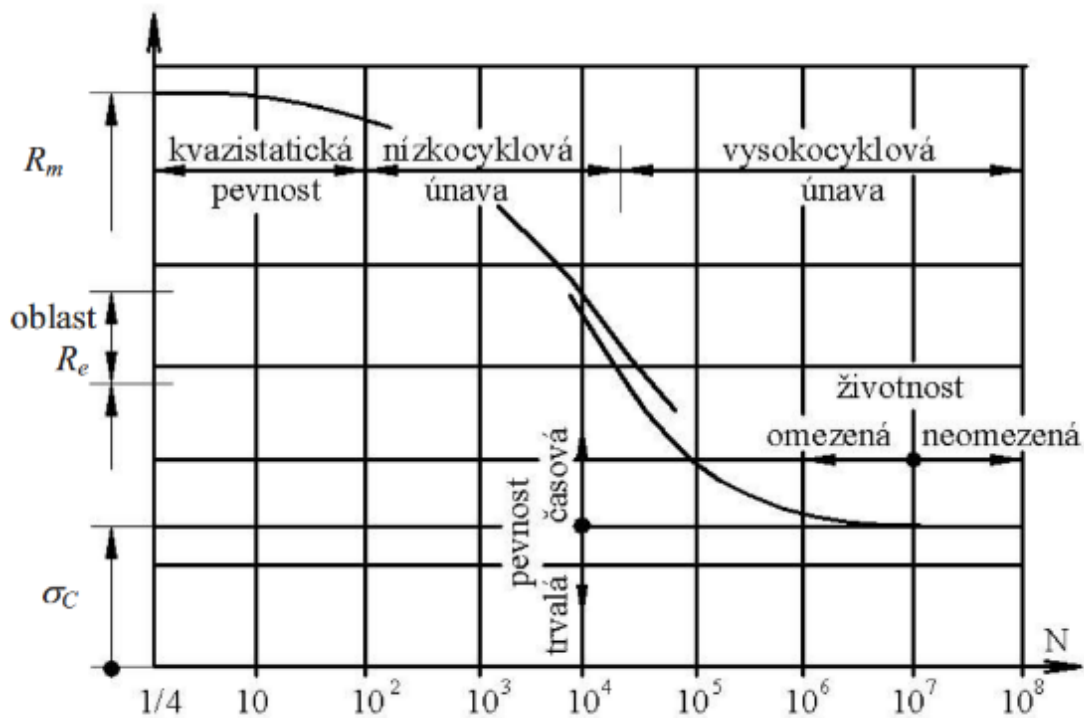
	AlSi10Mg	Ocel 316L
R <sub>m</sub> [MPa]	345	515
R <sub>p0,2</sub> [MPa]	230	205
E [GPa]	65	193
ρ [kg.m <sup>-3</sup> ]	2670	8000
σ <sub>c</sub> [MPa]	100	146
μ [-]	0,33	0,27

#### 4.1.1 Únavová pevnost

Držák hořáku bude zatěžován cyklicky po velmi dlouhou dobu. Při takovémto namáhání je maximální hodnota přípustného napětí výrazně nižší, než je statická pevnost materiálu. Při výpočtu musíme tedy brát v úvahu únavovou pevnost. Opakovaným zatěžováním může v materiálu vlivem napětí, které nepřesahuje mez kluzu, vznikat pomalu postupující poškození, které s postupem času vede k iniciaci trhliny a následnému lomu. Z tohoto důvodu se zkoumá únavová pevnost, která zásadně ovlivňuje životnost cyklicky namáhaných konstrukcí. [37]

Únavovou pevnost materiálu nejčastěji popisujeme pomocí Wöhlerovy křivky, někdy označované jako S-N křivka. Její obecný tvar můžeme vidět na obr. 4.2. Na její tvar má velký vliv kromě druhu materiálu i mnoho dalších parametrů, mezi které můžeme mimo jiné řadit velikost amplitudy napětí, typ zatěžování (tah, tlak), teplotní zpracování, tvar a teplota vzorku apod. Nejčastěji se získává experimentálně. [38]

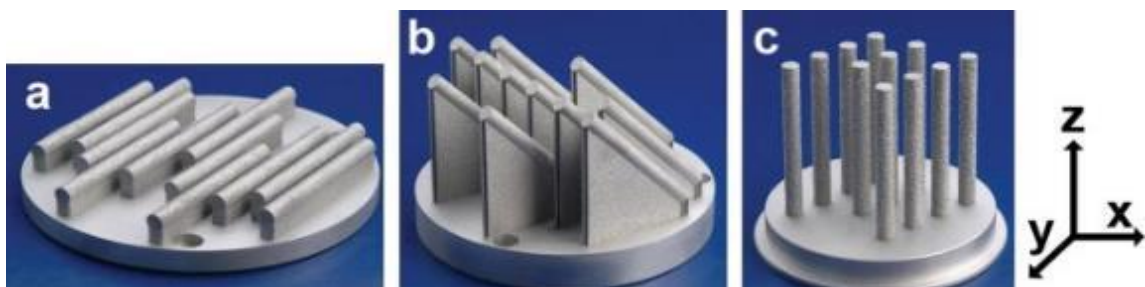




Obr. 4.2 Obecný tvar Wöhlerovy křivky [38]

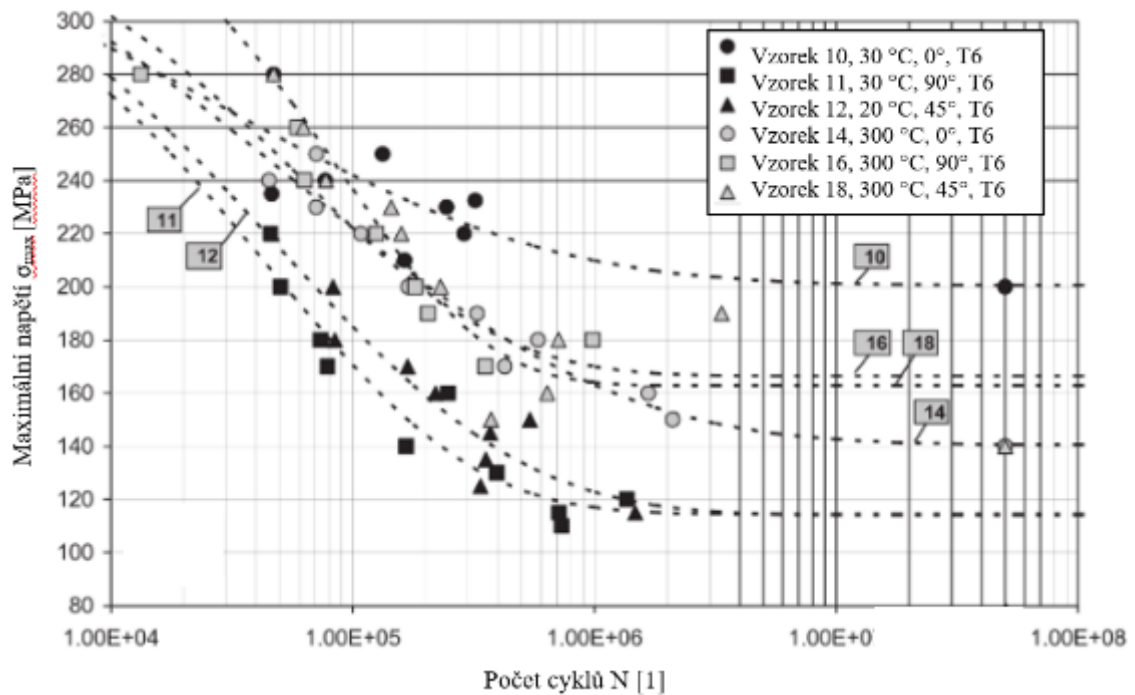
### AlSi10Mg

Únavovou pevnost materiálu AlSi10Mg zkoumali ve svých studiích např. Brandl [22] nebo Ngnekou [23]. V těchto studiích byly zkoušeny vzorky, které byly tvořeny metodou SLM. Vzorky se liší orientací stavby, jak můžeme vidět na obr. 4.3. Vzorky byly zpracovány pomocí procedury T6 (rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí). Ngnekou ve své studii srovnává vzorky ošetřené touto procedurou s neošetřenými. Brandl ve svém článku poukazuje, že únavové trhliny vznikly vždy na povrchu vlivem nepřesností a porů.



Obr. 4.3 Ukázky vzorků lišících se orientací stavby [22]

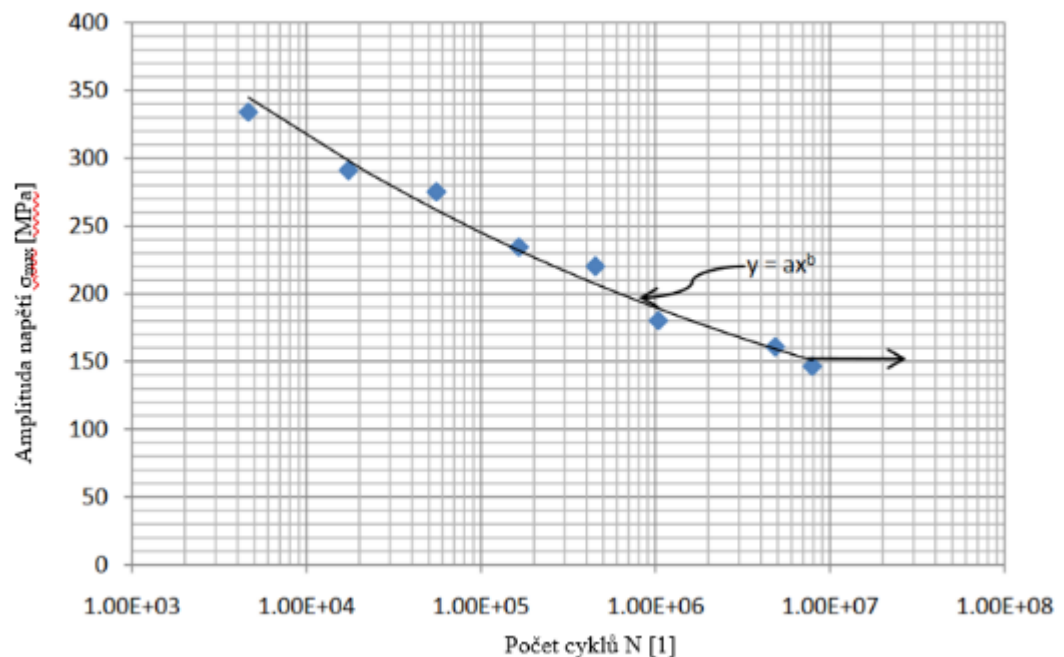
Z obou studií vyplývají Wöhlerovy křivky, uvedené na obr. 4.4 [22]. Tento materiál byl zkoumán i v Ústavu konstruování VUT, kde byly vyrobeny mimo jiné vzorky i na únavové zkoušky. Ve všech případech vychází mez únavy materiálu pro teoreticky neomezenou životnost okolo 100 MPa. [24]



Obr. 4.4 Wöhlerovy křivky AlSi10Mg pro různý přehřev a různou orientaci [22]

### Nerezová ocel 316L

Únavovou pevnost nerezové oceli 316L, tedy materiálu hojně využívaného i pro 3D tisk, zkoumali ve svých pracích např. Mohammad [41] nebo Benda [42], který ve své práci na Technické univerzitě Ostrava testoval přímo materiál vytištěný na 3D tiskárně. Z práce [42] je patrné, že únavová pevnost materiálu je silně závislá na směru, ve kterém je zkušební těleso vytištěno. Únavová pevnost tohoto materiálu se pohybuje kolem 150 MPa, pro tuto práci jsme zvolili hodnotu 146 MPa, která je uváděná v článku [41]. Na obr. 4.5 můžeme vidět Wöhlerovu křivku pro tento materiál ze studie p. Mohammada. [41]



Obr. 4.5 Wöhlerova křivka pro nerezovou ocel 316L [41]

## 4.2 Analýza působícího zatížení

Pro popsání sil působících na držák hořáku svařovacího stroje vycházíme ze zadaných hodnot. Držák hořáku bude kmitat o  $\pm 10$  mm v ose x frekvencí 3 Hz, váha hořáku nacházejícího se v díře je cca 1,5 kg. Zadané hodnoty tedy jsou:

Frekvence	$f = 3$ Hz
Amplituda	$x_{max} = 10$ mm = 0,01 m
Hmotnost hořáku	$m_h = 1,5$ kg

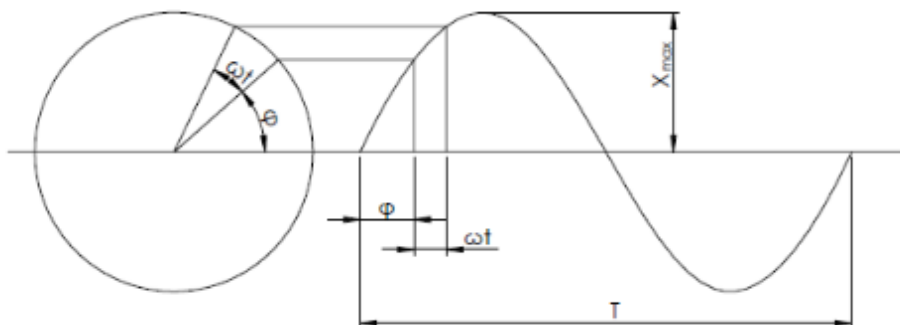
Ze zadané frekvence lze velmi snadno dopočítat periodu kmitavého pohybu  $T$  [s].

$$T = \frac{1}{f} \quad (6)$$

Pokud sledujeme pohyb hmotného bodu v čase, v určitém časovém okamžiku zaznamenáváme jeho výchylku z rovnovážné polohy, rychlost kmitání a zrychlení, z čehož lze snadno dopočítat i působící síly.

### 4.2.1 Výchylka

Základním parametrem, z kterého budeme vycházet při určování dalších veličin, je výchylka, což je vzdálenost od referenční, nulové polohy. U pravidelného vychýlení objektu můžeme kmitání popsat pomocí sinusoidy, viz obr. 4.6.



Obr. 4.6 Grafické znázornění výchylky

Výchylku můžeme definovat rovnicí

$$x = x_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

kde

$x_{max}$  [m] je maximální hodnota výchylky, též amplituda,

$\omega$  [ $s^{-1}$ ] je úhlová frekvence,

$t$  [s] je čas,

$\varphi$  [-] je fázový posuv.

Výchylka je dána nejen velikostí, ale i směrem. Pro úhlovou frekvenci  $\omega$  platí

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (8)$$

Výraz  $(\omega t + \varphi)$  nazýváme fází proměnné veličiny.

#### 4.2.2 Rychlost

Rychlost je definována jako změna výchylky za čas, získáme ji tedy derivací výchylky podle času:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega \cdot x_{max} \cdot \cos(\omega t + \varphi) = v_{max} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

Jednotkou rychlosti  $v$  je [ $m \cdot s^{-1}$ ].

#### 4.2.3 Zrychlení

Zrychlení můžeme definovat jako změna rychlosti v závislosti na čase. Dostaneme je tedy derivací rychlosti podle času neboli druhou derivací výchylky:

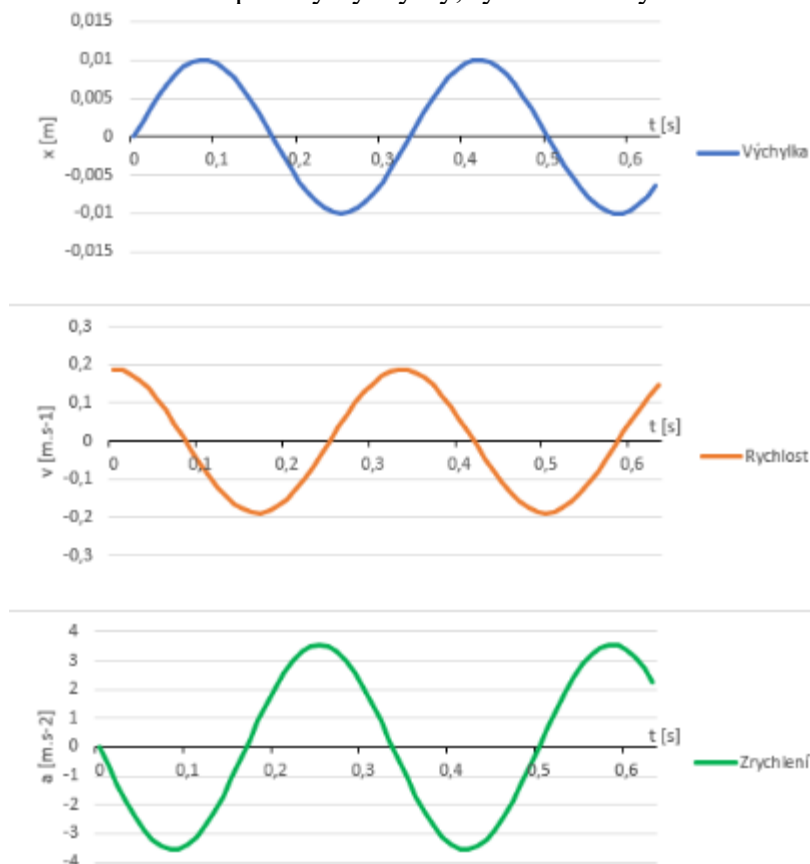
$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega \cdot v_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\ &= a_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

Jednotkou zrychlení je [ $m \cdot s^{-2}$ ].

Dosazením (8) do (10) dostaneme rovnici (11), do které již můžeme dosadit zadané hodnoty.

$$\begin{aligned}
 a &= -(2\pi f)^2 x_{max} \cdot \sin(2\pi f t + \varphi) \\
 &= -(2 \cdot \pi \cdot 3)^2 \cdot 0,01 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot t + 0) \\
 &= -0,36 \cdot \pi^2 \sin(6\pi \cdot t)
 \end{aligned} \tag{11}$$

Na obr. 4.6 můžeme vidět fázové posuny výchylky, rychlosti a zrychlení.



Obr. 4.7 Fázové posuny výchylky, rychlosti a zrychlení

Nesmíme zapomenout ani na vlastní tíhu držáku. V obou případech materiálu bude hmotnost držáku násobně větší než hmotnost samotného hořáku, je tedy nutné maximální hodnotu zrychlení zadávat do výpočetních softwarů. Z rovnice (11) je patrné, že maximum v absolutní hodnotě je  $0,36 \cdot \pi^2$ , tedy přibližně  $3,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

#### 4.2.4 Síla

Máme-li vypočítáno zrychlení, můžeme spočítat působící sílu  $F_h$  od hořáku dosazením do rovnice:

$$F_h = m \cdot a \tag{12}$$

Jelikož hledáme maximální velikost síly, do rovnice (12) dosadíme  $a_{max}$ , tedy:

$$F_{h \max} = m_h \cdot a_{max} = m_h \cdot 0,36 \cdot \pi^2 = 1,5 \cdot 0,36 \cdot \pi^2 = 5,33 \text{ N} \tag{13}$$

Stejným způsobem vypočítáme i velikost tíhové síly  $G_h$  od hořáku působící proti směru osy  $y$ , uvedené v rovnici (14).

$$G_h = m_h \cdot g = 1,5 \cdot 9,81 = 14,72 \text{ N} \quad (14)$$

Přehled působícího zatížení je vyobrazen v tabulce 3:

Tabulka 3 Přehled působícího zatížení zadávaného do výpočetních softwarů

	Síla v důsledku kmitání (směr osy $x$ ) [N]	Tíhová síla (směr osy $y$ ) [N]	Zrychlení (směr osy $x$ ) [ $\text{m.s}^{-2}$ ]	Gravitační zrychlení (směr osy $y$ ) [ $\text{m.s}^{-2}$ ]
Hořák	5,33	14,72	-	-
Držák hořáku	-	-	3,55	9,81

Kvůli zajištění bezpečnosti bude pro výpočet použit bezpečnostní koeficient  $k$  o velikosti 5. Tento koeficient je volen hlavně vzhledem k dlouhodobé únavě materiálu. Výsledné hodnoty zatížení zadávané do výpočetních softwarů tedy budou:

Tabulka 4: Výsledné hodnoty zatížení po přepočtení zadávané do výpočetních softwarů

	Síla v důsledku kmitání (směr osy $x$ ) [N]	Tíhová síla (směr osy $y$ ) [N]	Zrychlení (směr osy $x$ ) [ $\text{m.s}^{-2}$ ]	Gravitační zrychlení (směr osy $y$ ) [ $\text{m.s}^{-2}$ ]
Hořák	26,65	73,60	-	-
Držák hořáku	-	-	17,75	49,05

### 4.3 Topologická optimalizace ve vybraných softwarech

Pro topologickou optimalizaci jsme vybrali tři různé softwary, konkrétně Ansys Workbench, Solidworks a Autodesk Fusion 360. Úkolem optimalizace u součásti držáku bylo co nejvíce snížit hmotnost dílu při zachování tuhosti dané zadáním.

#### 4.3.1 Ansys Workbench

Nedílnou součástí topologické optimalizace je i modul strukturální analýzy, který slouží i k definici základních vlastností pro modul topologické optimalizace. Celý postup se dá popsat v několika krocích, jejichž detaily budou popsány níže.

- I. Statická strukturální analýza
  - A. Definice materiálu
  - B. Přiřazení geometrie zkoumaných dílů
  - C. Podprogram „Mechanical“
    1. Přiřazení definovaného materiálu jednotlivým částem
    2. Tvorba sítě
    3. Zadání vnějších podmínek
    4. Dílčí řešení a zobrazení výsledků
- II. Topologická optimalizace

- A. Propojení s modulem statické strukturální analýzy
- B. Podprogram „*Mechanical*“
  - 1. Nastavení analýzy (*Analysis Settings*)
  - 2. Nastavení oblasti optimalizace (*Optimization Region*)
  - 3. Nastavení cílů optimalizace (*Objective*)
  - 4. Nastavení výrobních omezení (*Manufacturing Constraint*)
  - 5. Nastavení vedlejších podmínek (*Response Constraint*)
  - 6. Spuštění a zhodnocení výsledků

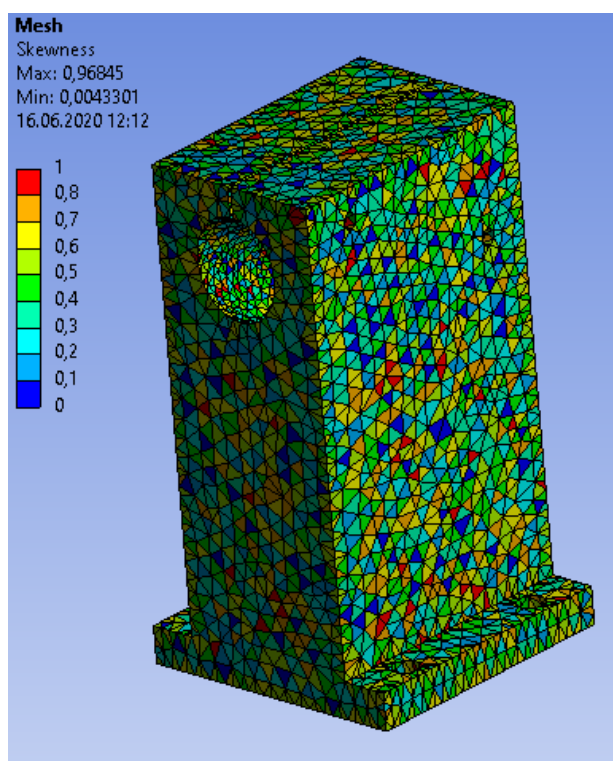
### Statická strukturální analýza

Jedná se o jeden z modulů mechaniky. Pomocí něj můžeme analyzovat zkoumané parametry na navrhovaných objektech. Mezi takové parametry můžeme zahrnout např. určité dovolené napětí či dovolený posun určité části. Získané parametry lze poté v určitých případech využít pro nastavení vedlejších podmínek definujících topologickou optimalizaci.

- **Definice materiálu:** Na začátku strukturální analýzy musíme provést definici materiálu používaného ve všech částech geometrie. Materiál hořáku je v celém objemu stejný, pro náš případ tedy volíme pouze jediný. Definici lze provést v sekci „*Engineering Data*“. Je zde definováno velké množství materiálů, z kterých můžeme vybírat, avšak je možné nastavit i vlastní materiál. Pro správnou funkci strukturální analýzy při vlastní definici musíme zadat minimálně hustotu, Poissonovo číslo a Youngův modul materiálu, případně také modul pružnosti ve smyku. Vlastnosti pro materiály AlSi10Mg a ocel 316L zadáme podle tabulky 2.
- **Přiřazení geometrie zkoumaných dílů:** V dalším kroku přiřazujeme geometrii zkoumaných dílů, po které následuje přímé nastavení parametrů strukturální analýzy. Toto nastavení se volí v podprogramu „*Mechanical*“, do kterého se dostaneme pomocí karet „*Model*“, „*Setup*“, „*Solution*“ nebo „*Results*“.

### Podprogram „*Mechanical*“

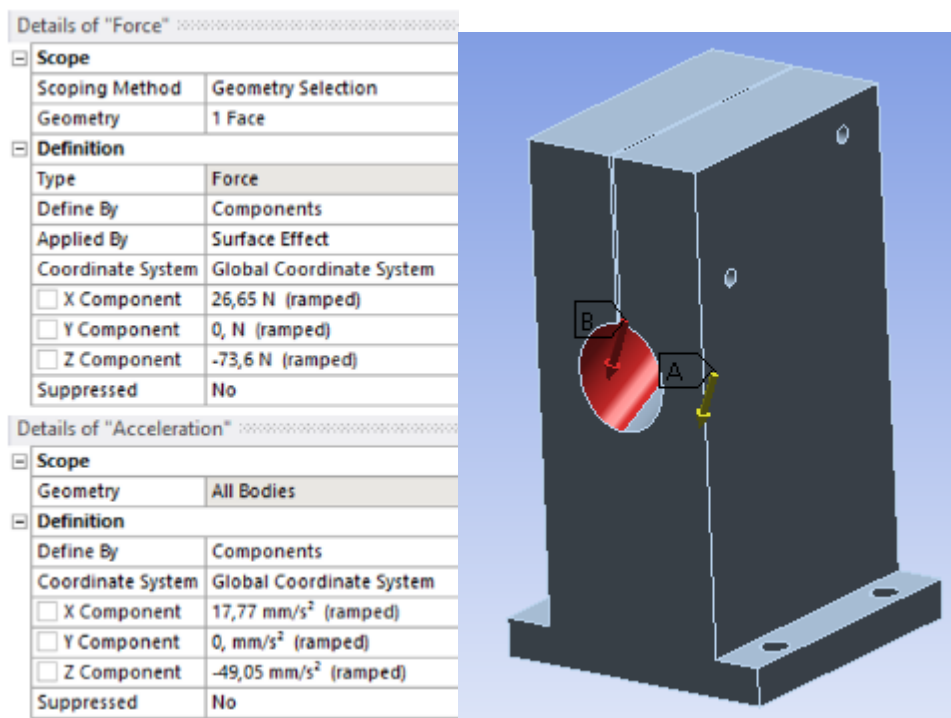
- **Přiřazení definovaného materiálu jednotlivým částem:** Nejprve se v podprogramu „*Mechanical*“ přiřazuje materiál, který jsme si již dříve definovali, jednotlivým částem naší zkoumané geometrie. Pro případ našeho hořáku je materiál v celém objemu stejný, tudíž je nastavení poměrně jednoduché.
- **Tvorba sítě:** Pro správný a co nejpřesnější výpočet by síť měla být co nejjemnější. Čím je síť jemnější, tím se nám zlepšuje přesnost výpočtu, avšak roste tím jeho celková náročnost. Zkontrolovat kvalitu sítě můžeme v nastavení sítě (*Mesh*), volbou zobrazení metrik (*Metrics Display*) a výběrem grafu (*Metric Graph*), kde se nachází mnoho možností k zobrazení a případné kontrole. Jako příklad můžeme uvést graf „*Skewness*“, který napovídá, jak moc jsou konečné prvky sítě deformované, zkreslené. Čím více elementů se v tomto grafu blíží hodnotě 0, tím je síť kvalitnější. Většina elementů by se měla pohybovat v hodnotách do 0,5. V tomto programu můžeme pro kontrolu zobrazit síť i barevně (Obr. 4.8), přičemž se zobrazují přímo prvky, které jsou nejvíce a nejméně zdeformované. [26]



Obr. 4.8 Kontrola sítě metodou zkreslení (*Skewness*)

- **Zadání vnějších podmínek:** Typickou vnější podmínkou je působení gravitace na těleso, dále směr působení určitého zrychlení, daných sil, nebo například zadané spojení. Pro případ našeho hořáku zadáváme hodnoty z tabulky 4, tedy síly od hořáku ve směru os  $x$  a  $y$  a zrychlení působící na držák. Způsob zadání můžeme vidět na obr. 4.9. Po zavedení vnějších podmínek již můžeme provést samotnou strukturální analýzu pomocí příkazu „*Solve*“. Před tímto úkonem je však dobré navolit, jaké výsledky budeme požadovat na vykreslení, v sekci výsledků (*Solution*).



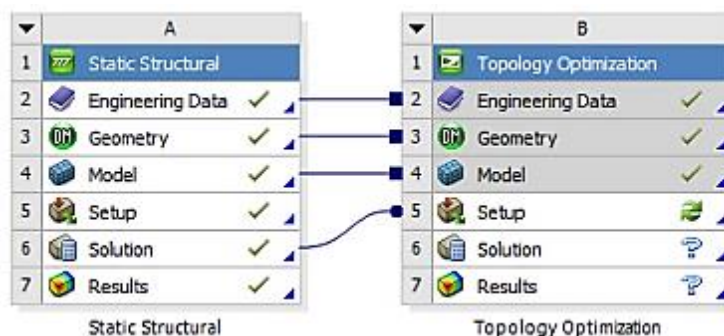


Obr. 4.9 Zadání vnějších podmínek (nahore – zadání síly – B, dole – zadání zrychlení – A) v určených směrech

- **Dílčí řešení a zobrazení výsledků:** Výsledky z této analýzy, jako je maximální napětí či posunutí, můžeme zobrazit na geometrii objektu, případně můžeme zkontrolovat pouze určitou plochu či bod. Řešené parametry můžeme použít jako podklad pro správné nastavení vedlejších podmínek samotné topologické optimalizace. Strukturální analýza se často využívá pro ověření, zda optimalizovaná geometrie splňuje veškeré zadané vedlejší podmínky.

### Topologická optimalizace

- **Propojení s modulem statické strukturální analýzy:** Po přidání modulu topologické optimalizace jej propojíme s modulem strukturální analýzy, viz obr. 4.10. Tím již máme zadané základní parametry, jako jsou data týkající se použitých materiálů, dále geometrie, případně nastavení sítě apod.

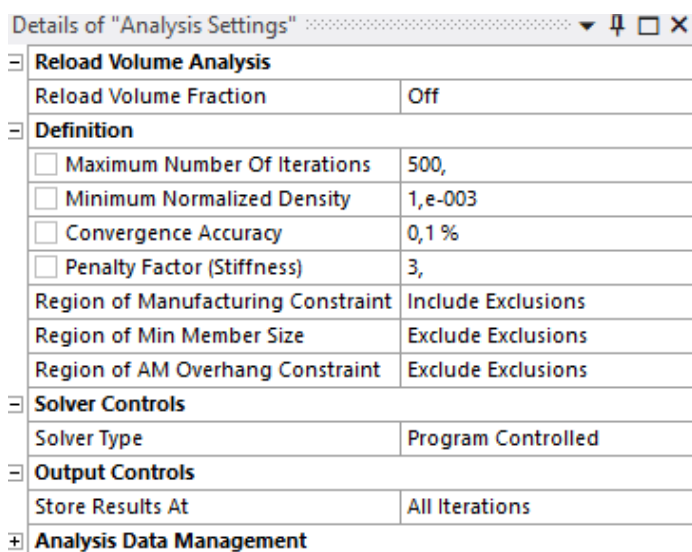


Obr. 4.10 Propojení strukturální analýzy s modulem topologické optimalizace

Propojením se v podprogramu „*Mechanical*“ po jeho spuštění ve stromě zobrazí nabídka topologické optimalizace, kterou si blíže popíšeme v následujících odstavcích.

### **Podprogram „*Mechanical*“**

- **Nastavení analýzy:** V tomto nastavení můžeme pozměnit parametry týkající se přímo modulu topologické optimalizace, viz obr. 4.11.
  - Maximální počet iterací: v základním nastavení je roven 500. Tento parametr nám umožňuje zamezit neúměrnému prodlužování výpočtů optimalizace.
  - Přesnost konvergence: Jedná se o procentuální odchylku od zadané hodnoty, ke které jsme se snažili přiblížit. V základním nastavení je hodnota 0,1 %, avšak můžeme sem zadat hodnotu až 2. pokud máme za cíl optimalizovat hmotnost či objem s využitím vedlejší podmínky v podobě globálního či lokálního napětí (dle teorie HMM, zde označení „*von Mises Stress*“), můžeme pro lepší přesnost tuto hodnotu přepsat na 0,05. [26]
  - Typ řešiče: zde jsou na výběr tři možnosti:
    - Ponechání výběru na programu
    - Metoda sekvenčního konvexního programování: Touto metodou by software měl k výsledku dojít rychleji, avšak je náročnější výpočet. K výpočtu totiž využívá derivace všech funkcí dostupných v řešené úloze.
    - Metodu optimalizačního kritéria: Tato metoda umožňuje řešení, které je založené na statické strukturální analýze, a to s určitým omezením („*Compliance*“, viz nastavení cílů optimalizace)
  - Možnosti výstupu: Zde volíme, zda chceme výsledky ukládat po každé iteraci, případně také výsledky poslední iterace, nebo konečné výsledky. [26]



Obr. 4.11 Nastavení okrajových podmínek analýzy

- **Nastavení oblasti optimalizace:**

- „*Design Region*“. V této části se určuje, která část bude podrobena topologické optimalizaci. Toto nastavení je důležité v těch případech, kdy máme sestavu a optimalizujeme pouze určitou součást. V případě hořáku máme součást pouze jedinou, tudíž můžeme ponechat výběr všech těl (*All Bodies*).
- V části „*Exclusion Region*“ naproti tomu nastavujeme ta těla v modelu či sestavě, která optimalizovat nechceme. V základním nastavení jsou vyjmuty části, kde dochází ke kontaktu s jinými součástmi, a zatížené plochy na základě statické strukturální analýzy. Kromě automatického vyjmutí těchto částí můžeme zvolit i vyjmutí pouze zatížených ploch, případně pouze kontaktních ploch. Jako další možnost je využití pojmenovaných sekcí, kdy si pod určitým názvem uložíme více částí geometrie, které posléze vybíráme pouze pod tímto pojmenováním. Pokud nám nestačí toto základní nastavení vyjmutých těl, můžeme upřesnit nastavení toho, co chceme v topologické optimalizaci vyloučit přidáním dalších oblastí.
- Část „*Optimization Option*“ v tomto nastavení slouží k detailnějšímu nastavení výstupu, zda chceme topologicky optimalizovaný model, nebo případně mřížkovou strukturu. V této struktuře je výstupem model o stejné geometrii, avšak mřížka uvnitř materiálu je vymodelována tak, aby byly splněny vnější podmínky. Tím samozřejmě šetříme materiál, tím pádem i hmotnost a v neposlední řadě i výrobní náklady.

Při zvolení optimalizace pomocí mřížkové struktury (*Lattice Structure*) se zobrazí další nastavení nutné pro provedení optimalizace. Jako první se volí typ mřížky. Na výběr je v tomto programu sedm struktur, viz obr. 4.12. Jako další se volí minimální a maximální hustota. Hodnota zde nabývá od 0 do 1 a jde o poměrnou část, která bude v optimalizovaném modelu zachována. V posledním kroku tohoto nastavení musíme zvolit velikost jedné buňky v mřížce.

Optimalizace pomocí mřížkové struktury v této práci bohužel provedena nebyla, jelikož studentská verze softwaru ji nepovoluje.

Cubic		Crossed	
Midpoint		Octahedral 1	
Octet		Octahedral 2	
Diagonal			

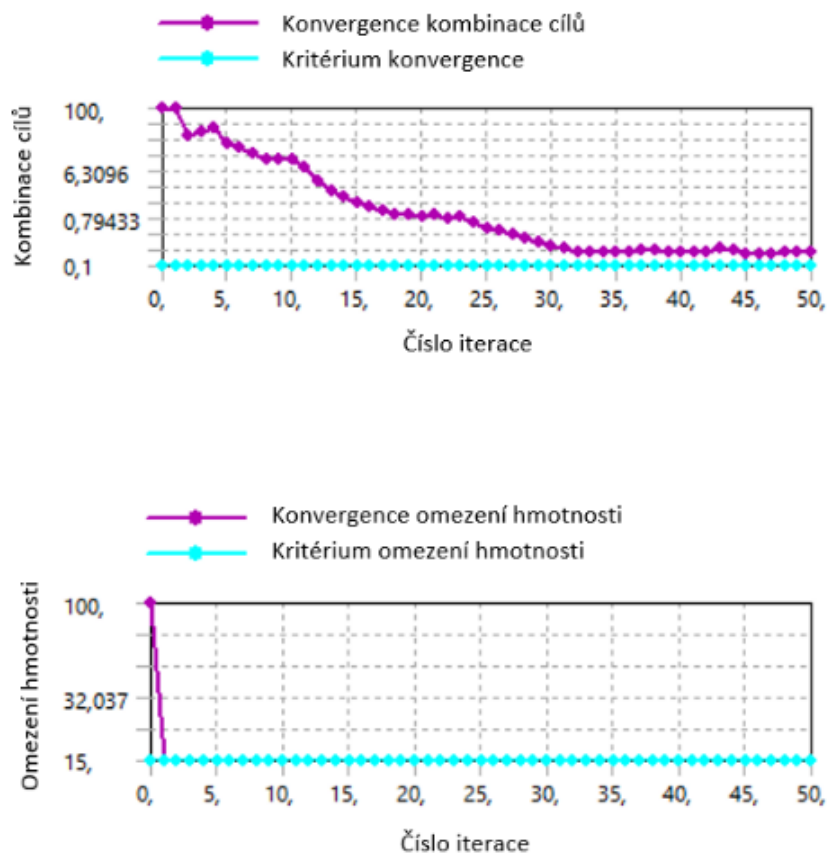
Obr. 4.12 Mřížky pro optimalizaci struktury [26]

- **Nastavení cílů optimalizace:** Na výběr máme tři možnosti. První možnost, „*Compliance*“, umožňuje maximalizovat pevnost definovanou buď posuvem, nebo velikostí reakční síly, případně můžeme tento výběr nechat na programu. Dalšími cíli je minimalizace objemu nebo hmotnosti. Můžeme zadávat i více cílů zároveň, přičemž jim můžeme přiřazovat i různou váhu. Musíme pamatovat na to, že pokud zde zadáme např. minimalizace hmotnosti, nemůžeme to samé použít i pro vedlejší podmínku.
- **Nastavení výrobních omezení:** Nastavení provádíme z toho důvodu, aby byl optimalizovaný model zhotovitelný ve výrobním prostředí. Na výběr zde máme omezení velikosti prvků, kde můžeme zvolit jak minimální, tak i maximální velikost, dále směr vytahování z formy, omezení pro výrobu metodou tažení, určité cyklické opakování nebo omezení symetrie. Pro držák hořáku volíme symetrii zvolenou rovinou s osami y a z.
- **Nastavení vedlejších podmínek:** Při nastavování vedlejších podmínek volíme z možností omezení hmotnosti nebo objemu, omezení globálního nebo lokálního maximálního přípustného napětí dle teorie HMM (*von-Mises Stress*), omezení posunutí nebo omezení reakční síly. Pro tuto práci bylo voleno omezení hmotnosti, a to tak, aby zůstalo 15 % materiálu (viz obr. 4.13)

Details of "Response Constraint"	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span>▼</span> <span>🔍</span> <span>🗄</span> <span>✕</span> </div>	
[-] <b>Scope</b>	
Scoping Method	Optimization Region
Optimization Region Selection	Optimization Region
[-] <b>Definition</b>	
Type	Response Constraint
Response	Mass
Define By	Constant
<input type="checkbox"/> Percent to Retain	15 %
Suppressed	No

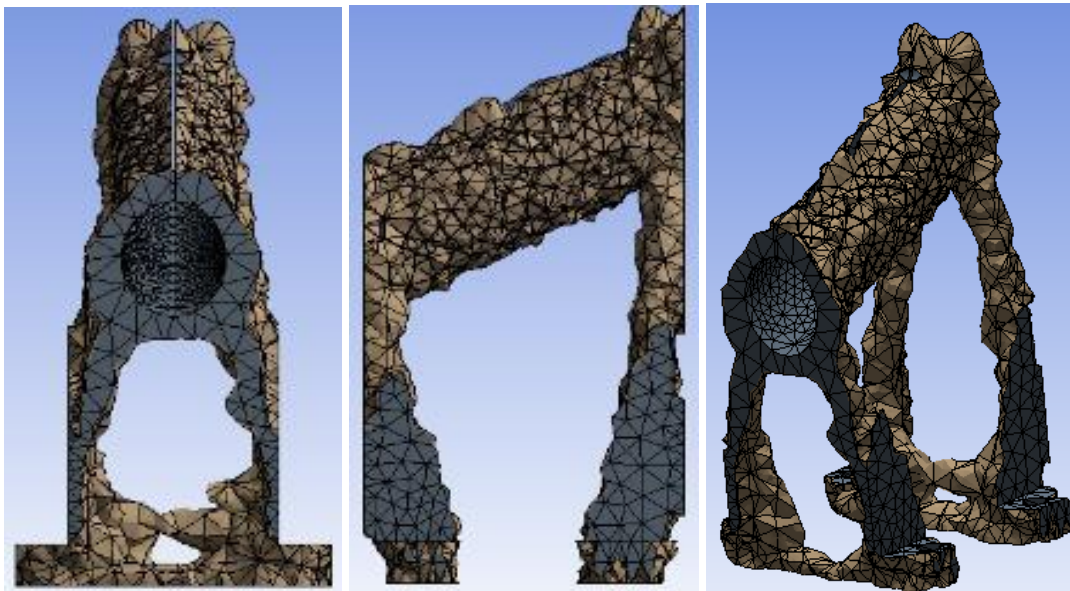
Obr. 4.13 Nastavení vedlejší podmínky omezení hmotnosti na 15 %

- **Spuštění a zhodnocení výsledků:** Po provedení všech výše uvedených kroků můžeme spustit topologickou optimalizaci. Její průběh můžeme sledovat v levém dolním rohu programu. Postupně se provádějí všechny potřebné iterace až do finálního vyhodnocení. Průběžné výsledky můžeme zobrazovat kliknutím na informace o řešení (*Solution Information*) ve stromě v programu. Podle zadaného cíle se zobrazují grafy konvergence (Obr. 4.14). Na prvním grafu můžeme vidět závislost kombinace cílů na číslu iterace, druhý pak zobrazuje závislost zadané vedlejší podmínky, v našem případě omezení hmotnosti, opět na číslu iterace. [26] Na základě těchto grafů se můžeme rozhodnout, zda lze řešení považovat za dostatečně uspokojivé.

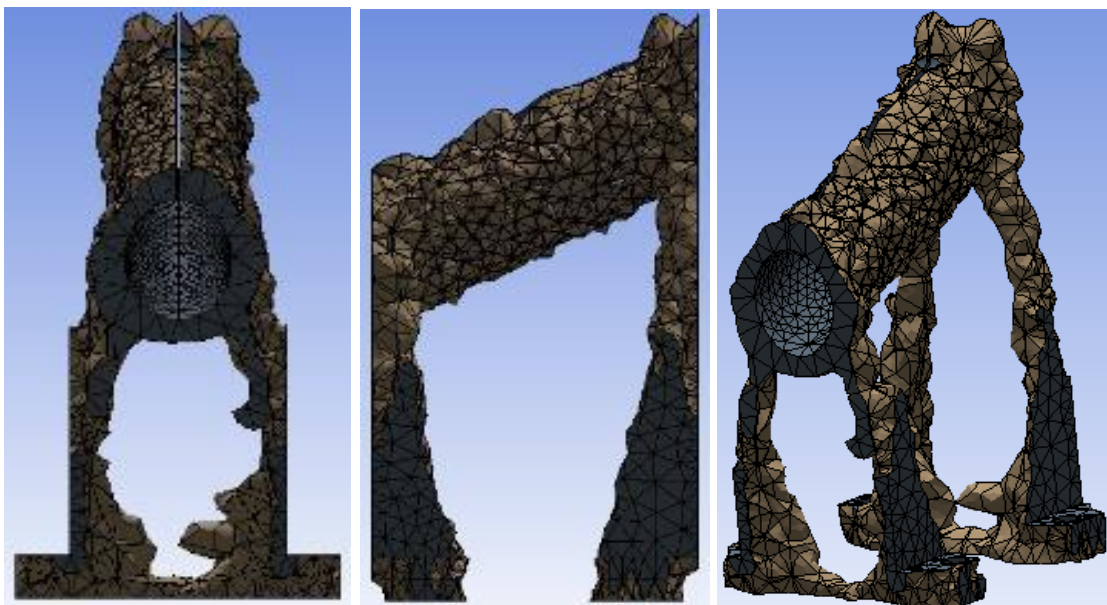


Obr. 4.14 Závislosti cílů na číslu iterace

Po celkovém vyhodnocení můžeme zobrazit výsledky topologické optimalizace (obr. 4.15 a 4.16). Software Ansys je ve studentské verzi limitován počtem uzlů/elementů na 32 000, což razantně ovlivňuje výsledný tvar. Na optimalizované součásti je materiál rozdělen až ke krajům (při pohledu z boku) a v dolní části se stáčí k otvorům pro uchycení. Dalším specifickým je spojení v dolní části (při pohledu zepředu).



Obr. 4.15 Pohled na součást po TO (AlSi10Mg)



Obr. 4.16 Pohled na součást po TO (ocel 316L)

Souhrnné výsledky pro oba materiály jsou zobrazeny v tabulce 5.

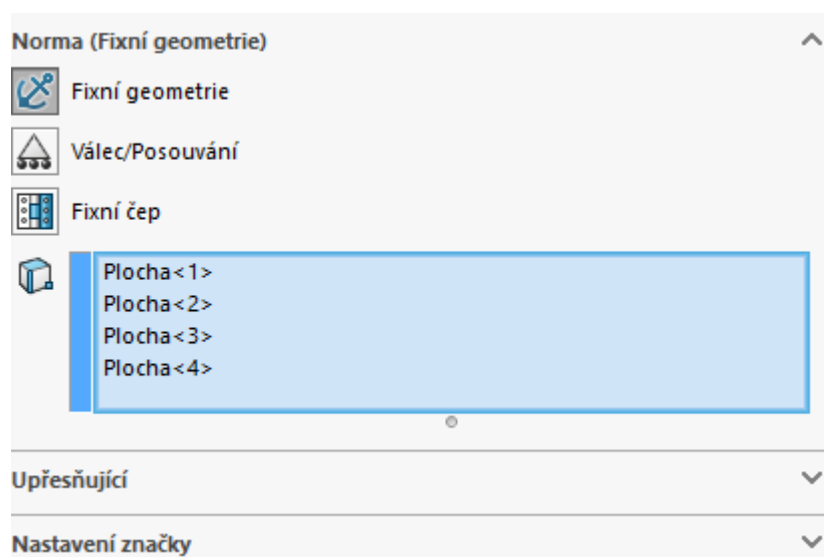
Tabulka 5 Výsledky TO v programu Ansys Workbench

Materiál	Hmotnost [kg]	Procento původní hmotnosti [%]
AlSi10Mg	<b>1,55</b>	<b>15,10</b>
Ocel 316L	<b>4,48</b>	<b>14,65</b>

#### 4.3.2 Solidworks

Musíme brát v úvahu, že je možné optimalizovat pouze jedinou součást, což je v určitých případech poměrně limitující. Není zde tedy možné např. definovat působící síly s pomocí jiných součástí v sestavě. Zde musíme vždy ručně zadávat působící zatížení. Je nutné tedy znát poměrně přesně působící síly. Celý průběh nastavení simulace se dá popsat v těchto několika krocích, jejichž detaily budou popsány níže:

- I. Definice materiálu
  - II. Nastavení uchycení
  - III. Definice vnějšího zatížení
  - IV. Nastavení cílů a omezení
  - V. Nastavení výrobních omezení
  - VI. Kontrola vlastností topologické optimalizace
  - VII. Tvorba sítě a spuštění
- **Definice materiálu:** Prvním krokem je zde přiřazování materiálu. V tomto nastavení můžeme vybrat materiál z poměrně velkého množství materiálů nahraných přímo v softwaru, případně můžeme využít definování vlastního. Tento postup využíváme i v této práci, kdy nastavujeme parametry zobrazené v tabulce 2.
  - **Nastavení uchycení:** Pro správnou funkci topologické optimalizace je nutné zafixovat součást alespoň v jednom místě. Bez této definice by byla úloha neurčitá, tudíž by nebylo možné zjistit, jak se má model při daném zatížení chovat. Na výběr jsou zde tři varianty (obr. 4.17). Nejobvykleji se používá pevné spojení, které neumožňuje žádný pohyb plochy, ve které působí. Toto spojení vybereme i v našem případě, a to v místech, kde jsou otvory pro šrouby na uchycení do základové desky. Dále můžeme využít válec/posouvání, což umožňuje konat pouze posuvný pohyb v rovině dané plochou, na kterou působí. Spojení „fixní čep“ oproti tomu umožňuje pouze rotační pohyb kolem definované části modelu.



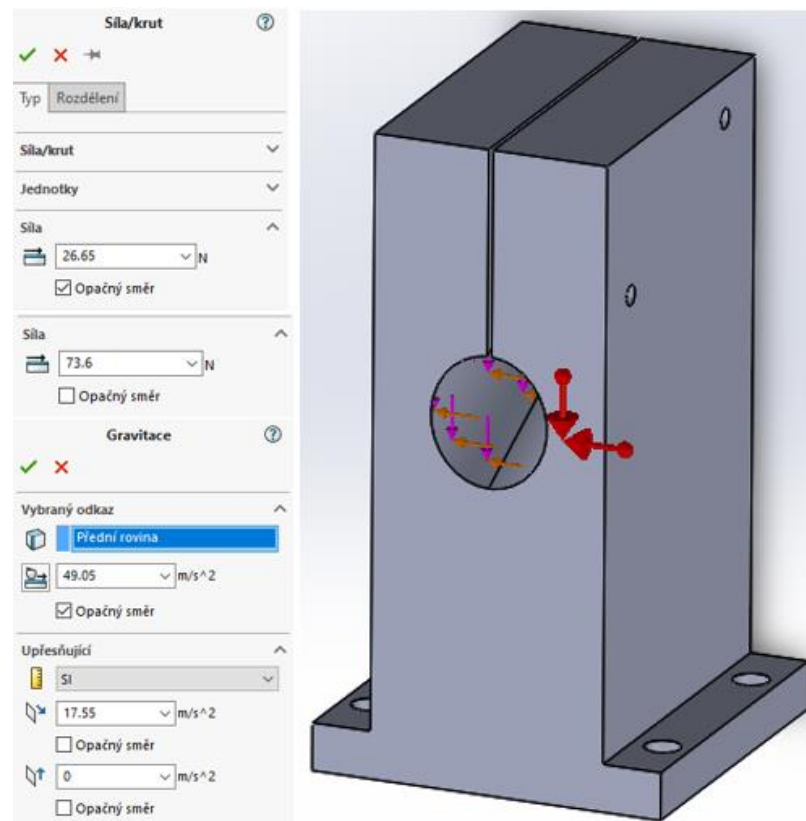
Obr. 4.17 Nastavení fixní geometrie

V upřesňujícím nastavení můžeme dále nastavit další užitečné parametry, které mohou usnadnit výpočet. Pro příklad můžeme vzít cyklickou symetrii, kde se využívá zjednodušení rotačního tělesa a tím velkého zkrácení výpočtů (např. disky kol).

- **Definice vnějšího zatížení:** Na výběr je zde v závislosti na reálném zatížení několik možností. Mezi základní řadíme působení:
  - síly,
  - kroutícího momentu,
  - tlaku,
  - zrychlení (gravitace).

V našem případě máme dvojí zatížení, v prvním případě se jedná o sílu od hořáku působící na plochu, v druhém případě jde o zrychlení. Způsob zadávaných veličin je uveden na obr. 4.18, jejich velikosti jsou uvedeny v tabulce 4.





Obr. 4.18 Nastavení působícího zatížení

- **Nastavení cílů a omezení:** V dalším kroku, nastavení cílů a omezení, máme na výběr ze tří možností:
  - nejlepší poměr hmotnosti a tuhosti: tuhost je zde definována jako součet deformačních energií všech konečných elementů v síti, přičemž cílem je co nejvíce tento součet snížit. [15] K dosažení tohoto cíle je možné využít několik druhů omezujících vedlejších podmínek.
  - minimalizace maximálního posunutí: V tomto případě je cílem takový design, kdy je minimální posun určitého zvoleného bodu, opět při zachování co nejlepšího poměru tuhosti k hmotnosti součásti. I zde máme na výběr z dalších dvou omezujících podmínek.
  - minimalizace hmotnosti: Zde jde o co největší snížení váhy optimalizované součásti tak, aby nedošlo k překročení podmínky maximálního posuvu. I zde máme na výběr snížení hmotnosti či definování posuvu určitého bodu. Je nutné zadat alespoň jednu takovouto podmínku, přičemž další jsou již volitelné.

Ve všech případech jsou k dispozici další dvě možné omezující podmínky. Podmínku frekvenčního omezení můžeme využít ve vhodných aplikacích. Poslední podmínkou je omezení napětí/koefficient bezpečnosti. Zde můžeme dodatečně definovat výsledné maximální přípustné napětí, a to buď procentuálně z meze kluzu materiálu, či přímo uvedením hodnoty, případně zadat bezpečnostní koeficient.

V této práci je využit nejlepší poměr tuhosti a hmotnosti, přičemž se snažíme o co největší omezení hmotnosti. Volíme tedy snížení o 85 %, viz obr. 4.19. Procento odebraného materiálu je po vyhodnocení ještě možné upravovat tak, aby to přesně vyhovovalo požadavkům.

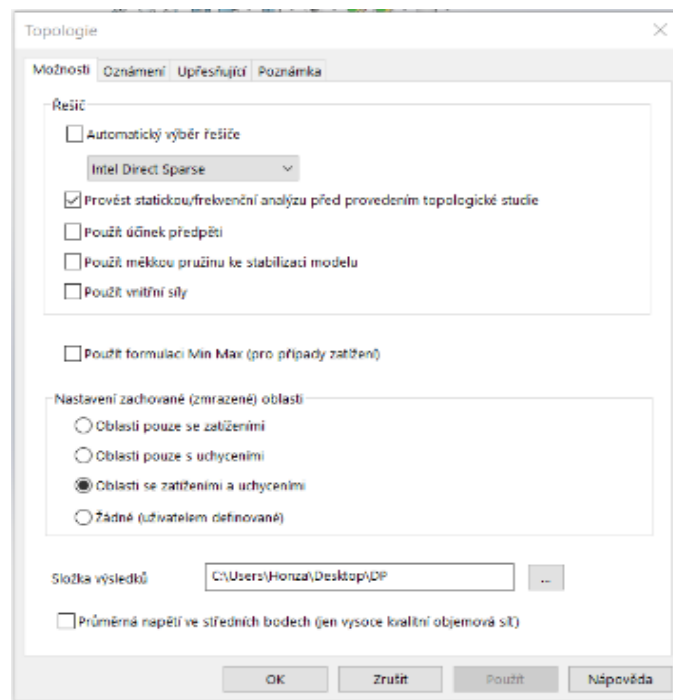
Vybrat cíl ^  
Nejlepší poměr tuhosti a hmotr v  
Omezení posunutí v  
Omezení hmotnosti (Výchozí) ^  
Omezení hmotnosti v  
Snížit hmotu o (procento) v  
85 % v  
Aktuální hmotnost dílu: 10.2515 kg  
Konečná hmota dílu: 1.537720 kg  
Frekvenční omezení v  
Omezení Napětí/koefficient bezpečnosti v

Obr. 4.19 Nastavení cílů a omezení

- **Nastavení výrobních omezení:** V tomto programu jsou nastavitelné čtyři typy:
  - o Nastavení dodatečných ploch, které je nutné zachovat z důvodu například dodatečné montáže
  - o Určení roviny symetrie
  - o Určení směru vytažení z formy
  - o Minimální tloušťka výsledných prvků.

Plochy, které jsou součástí uchycení či vyvíjených vnějších podmínek, jsou zachovávány automaticky, toto nastavení lze změnit až při nastavování topologické optimalizace. Pro zjednodušení výpočtu pro náš případ byla zvolena symetrie.

- **Kontrola vlastností topologické optimalizace:** K bližšímu nastavení topologické optimalizace jako celku je možné využít okno „topologie“ (viz obr. 4.20), kam se dostaneme po pravém kliknutí na topologickou studii a výběrem „vlastnosti“. Zde můžeme nastavovat bližší vlastnosti řešiče, případně nastavení zachovaných oblastí apod.

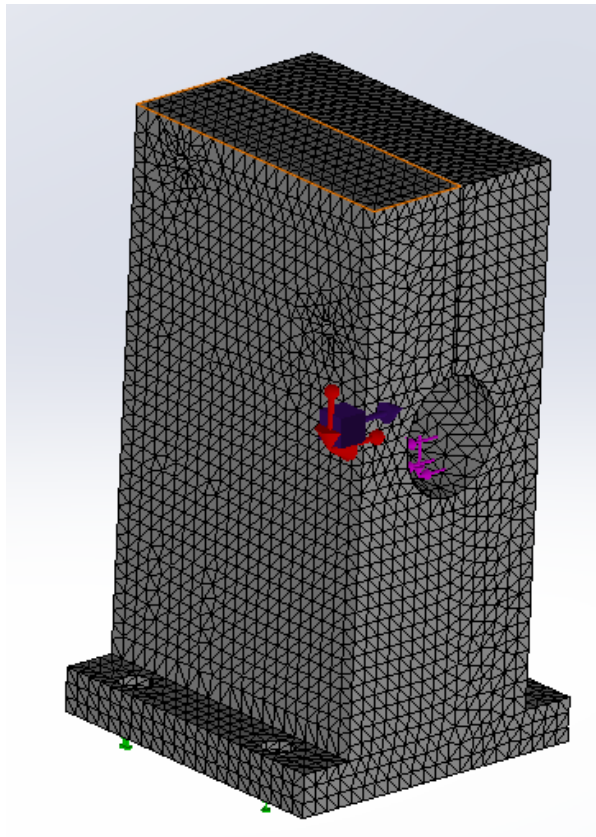


Obr. 4.20 Vlastnosti TO

Nastavení řešiče závisí na typu úlohy a složitosti úlohy. Řešič se volí podle toho, jak složitý problém řešíme. Na výběr jsou zde čtyři typy, které se volí v závislosti na složitosti úlohy:

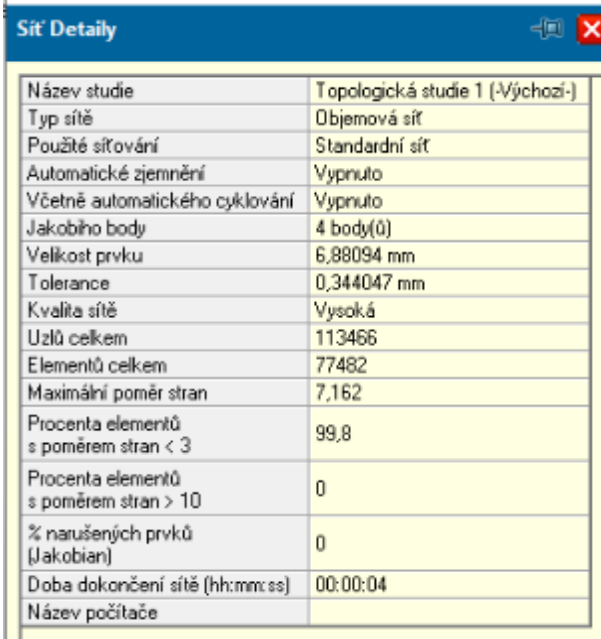
- *Direct Sparse Solver* použijeme v případě, že máme dostatečnou paměť RAM a rovněž výkonný vícejádrový procesor. Doporučuje se na každých 200 000 stupňů volnosti 1 GB RAM pro lineární statickou analýzu, avšak závislost mezi stupni volnosti a pamětí RAM není lineární, každopádně čím výkonnější počítač, tím rychlejší výpočty. [25]
  - *Large Problem Direct Sparse* je využíván v případě větších problémů, jelikož lépe přiděluje díky vylepšeným algoritmům dostupnou paměť. [25]
  - *Intel Direct Sparse* je řešič velmi podobný řešiči *Direct Sparse*, avšak jsou zde využívány dokonalejší algoritmy přidělující dostupnou paměť, čímž ji lépe využívají. Tento řešič je pro většinu případů neefektivnější. [25]
  - *FFEPlus* je jediný z řešičů iterativní. Všechny předešlé jsou řešiče přímé. [25]
- **Tvorba sítě a spuštění TO:** Na výběr máme ze tří druhů sítí:
- Standardní síť: Zde se zadávají dva parametry, a to velikost prvků a tolerance této velikosti. Zároveň můžeme zatrhnout parametr „Automatické zjemnění“, čímž dojde ke zjemnění sítě v oblastech, kde je potřeba (např. v okolí otvorů, ostrých zakřivení apod.). Tento druh sítě se hodí pro relativně jednoduché objekty. Sledovaným parametrem je zde poměr stran rovnoramenných trojúhelníků v síti, který je roven jedné. Čím větších hodnot tento poměr nabývá, tím se zhoršuje kvalita sítě a tím i výpočtu.

- Síť na základě zakřivení: Využití sítě na základě zakřivení se hodí zejména u složitějších objektů obsahujících složitější plochy, různá zakřivení. Tato síť dokáže lépe obsáhnout veškerá úskalí takovýchto objektů.
- Síť na základě splývaného zakřivení: Rozdíl této sítě a sítě na základě zakřivení je takový, že u této sítě dochází k použití prvků spojených se zakřivením i uvnitř objemu, zatímco u sítě na základě zakřivení pouze na plochách a uvnitř objemu je využívána standardní síť. [18] Pro naši součást byla zvolena síť na základě zakřivení. (obr. 4.21).



Obr. 4.21 Vygenerovaná síť

Detailní informace a správnost vytvoření sítě si poté můžeme ověřit po rozkliknutí pravým tlačítkem myši „síť“ a výběrem „detaily“ – viz obr. 4.22. Kontrolu bychom měli provést zejména u procenta elementů s poměrem stran  $< 3$ , kde by hodnota měla být co nejvyšší, pro jednoduché součásti ideálně nad 99 %, a procenta elementů s poměrem stran  $> 10$ , kdy by hodnota měla ideálně nabývat nule. [18] Po kontrole je již možné spustit samotnou topologickou optimalizaci.

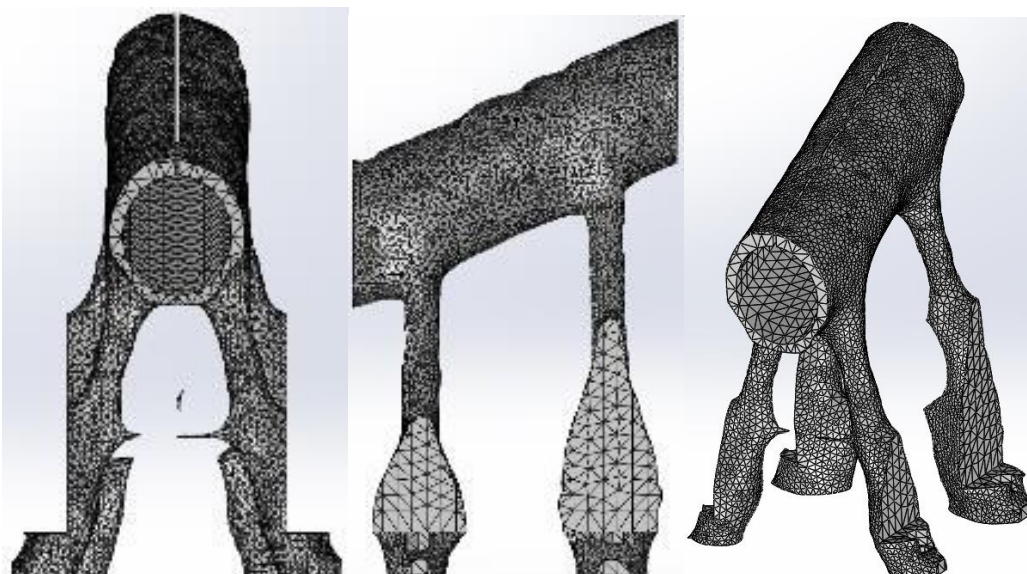


Síť Detaily	
Název studie	Topologická studie 1 (-Výchozí-)
Typ sítě	Objemová síť
Použité síťování	Standardní síť
Automatické zjemnění	Vypnuto
Včetně automatického cyklování	Vypnuto
Jakobiho body	4 body(ů)
Velikost prvku	6,88094 mm
Tolerance	0,344047 mm
Kvalita sítě	Vysoká
Uzlů celkem	113466
Elementů celkem	77482
Maximální poměr stran	7,162
Procenta elementů s poměrem stran < 3	99,8
Procenta elementů s poměrem stran > 10	0
% narušených prvků (Jakobian)	0
Doba dokončení sítě (hh:mm:ss)	00:00:04
Název počítače	

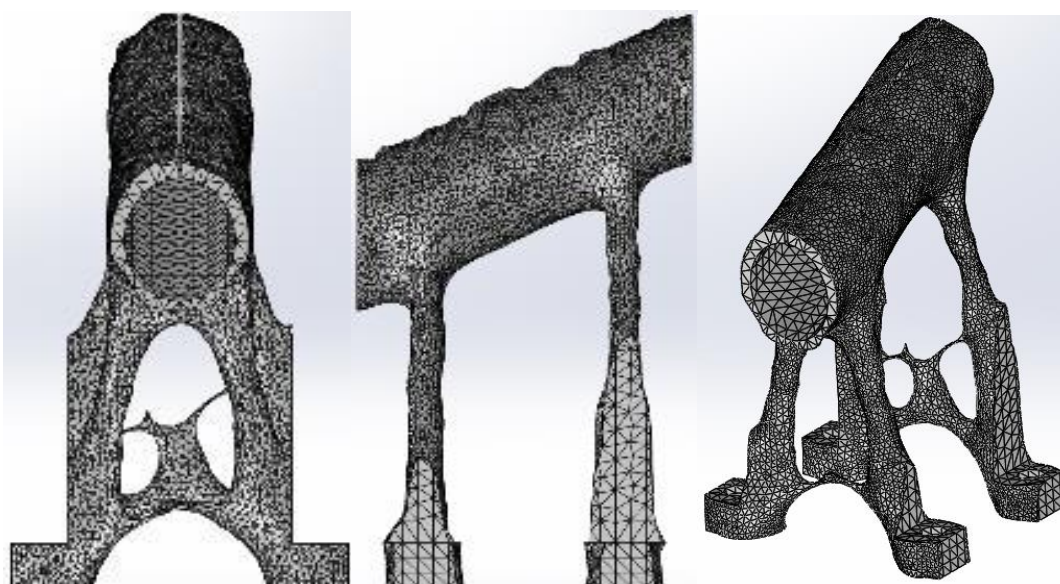
Obr. 4.22 Detaily sítě

Po provedení všech nutných iterací se nám zobrazí optimalizovaná součást (Obr. 4.23 a 4.24), na které ještě můžeme dodatečně upravit její hmotnost tak, aby vyhovovala našim požadavkům. Takto upravenou součást můžeme exportovat v požadovaném formátu a upravovat v libovolném softwaru. V tomto postupu byl volen materiál AlSi10Mg. Pro ocel 316L je nastavení totožné, pouze se změnil materiál (vlastnosti viz tabulka 2).

Výsledný tvar je oproti softwaru *Ansys Workbench* odlišný. Po optimalizaci se mezi místy určenými pro připojení držáku vyskytují pouze zbytky materiálu (při pohledu zepředu), avšak výše oproti výsledkům ze softwaru *Ansys*. Na bočním pohledu je zřetelně vidět, že materiál mezi dírami pro uchycení držáku a uchycení šrouby k základní rovině je veden kolmo. Povrch této součásti je rovněž více vyhlazený, což je dáno především kvalitnější vytvořenou sítí. Výpočet byl ale v tomto případě o poznání delší.



Obr. 4.23 Pohled na součást po TO (materiál AlSi10Mg)



Obr. 4.24 Pohled na součást po TO (materiál ocel 316L)

Souhrnné výsledky pro oba materiály v softwaru Solidworks jsou zobrazeny v tabulce 6.

Tabulka 6 Výsledky TO v programu Solidworks

Materiál	Hmotnost [kg]	Procento původní hmotnosti [%]
AlSi10Mg	<b>1,41</b>	<b>13,75</b>
Ocel 316L	<b>4,14</b>	<b>13,71</b>

### 4.3.3 Autodesk Fusion 360

Stejně jako i v ostatních programech začínáme nahráním modelu, který budeme optimalizovat. Topologickou optimalizaci spustíme rozkliknutím pole vlevo nahoře a

vybráním položky simulace. Tímto krokem se otevřou všechny dostupné možnosti, ze kterých si vybereme tvarovou optimalizaci a v několika krocích definujeme všechny parametry:

I. Editace materiálu

II. Nastavení uchycení

III. Nastavení zatížení

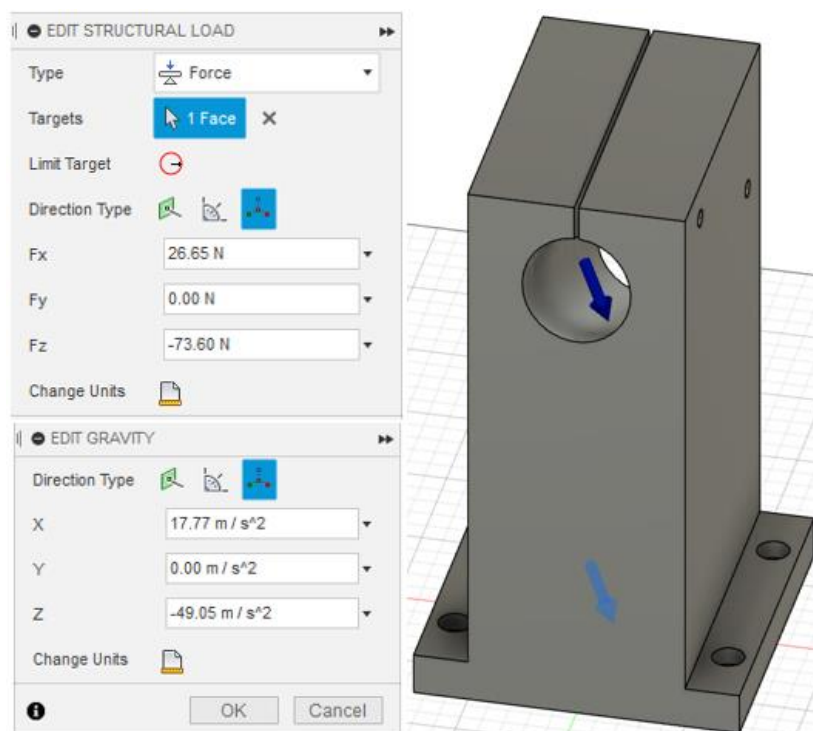
IV. Nastavení tvarové optimalizace

V. Nastavení a tvorba sítě

VI. Spuštění optimalizace a export výsledků

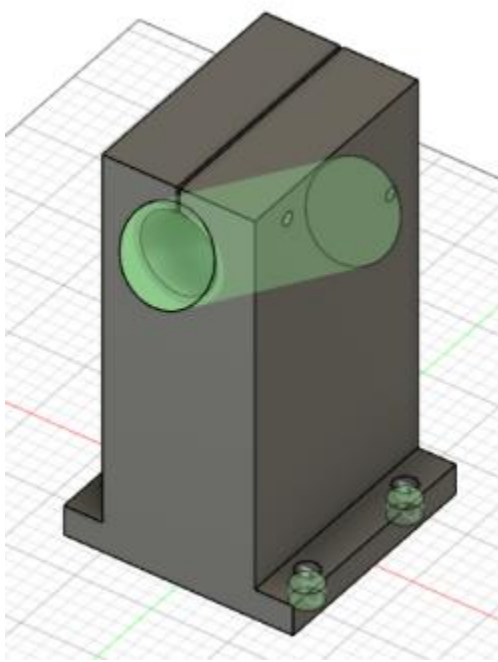
- **Editace materiálu:** Materiálů, ze kterých můžeme vybírat, je i v tomto programu celá řada. Pokud je materiál v knihovně, je jeho přiřazení k součásti jednoduché. Dělá se tak hned po nahrání modelu v sekci úpravy modelu. V levé části, ve stromě, můžeme pro každou jednotlivou součást (pokud máme sestavu) přiřadit různý materiál. Materiál si zde můžeme samozřejmě vytvořit i vlastní a přiřadit ho stejným způsobem.
- **Nastavení uchycení:** Do tohoto nastavení se dostaneme rozkliknutím položky omezení na vrchním hlavním panelu. Na výběr je ze čtyř druhů uchycení:
  - Fixní uchycení: dovoluje ukotvit určitou plochu či součást v jednom nebo více směrech v souřadném systému. Toto nastavení použijeme i pro uchycení naší součásti v místech, kde bude ukotvena šrouby.
  - Čep: toto uchycení dovoluje oproti tomu radiální, axiální anebo tangenciální pohyb zvolené válcové plochy.
  - Posuvná plocha
  - Dovolené posunutí
- **Nastavení zatížení:**
  - Strukturální zatížení: do této kategorie se řadí síla, tlak, moment, ložiskové zatížení, vnější síla a hydrostatický tlak.
  - Zrychlení: může být buď lineární, nebo rotační.
  - Gravitace
  - Implementace určitého zatížení v podobě vložení hmoty do určitého bodu.

Pro náš případ zadáme zatížení z tabulky 4 stejně jako i v ostatních programech, tedy zatížením plochy, kde působí hořák a zatížení pomocí zrychlení ve směrech x a z (obr. 4.25)



Obr. 4.25 Nastavení zatížení

- **Nastavení tvarové optimalizace:** Zde jsou k dispozici tři možnosti výběru:
  - „*Preserve Region*“: Touto možností volíme plochy, které chceme zachovat i po optimalizaci a do jaké tloušťky. V programu se plochy uchycení a působícího zatížení neuchovávají automaticky, pro držák hořáku je tedy musíme navolit (viz obr. 4.26).



Obr. 4.26 Zachované oblasti v programu Autodesk Fusion 360

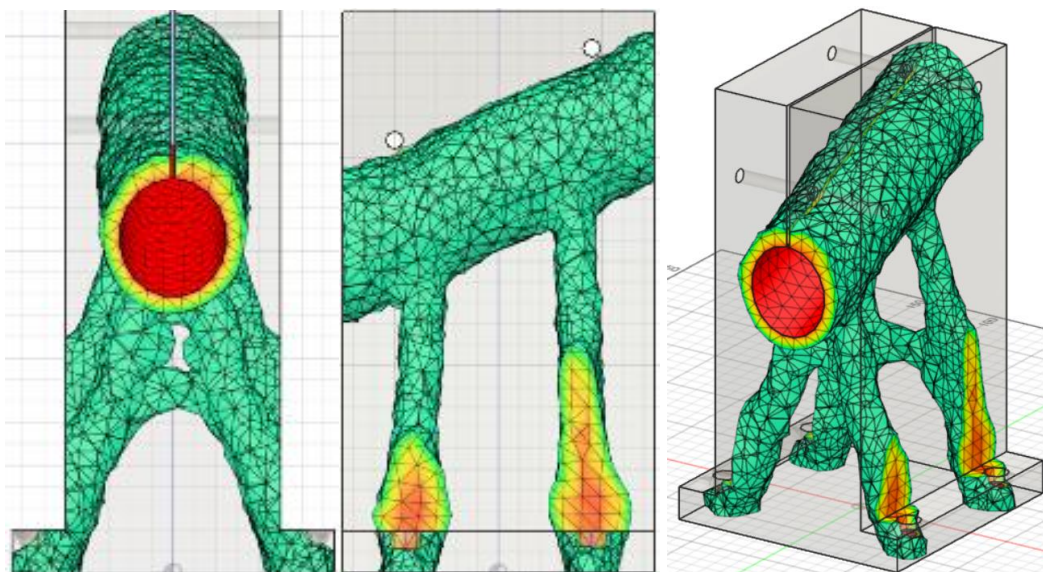


- „*Shape Optimisation Criteria*“: nastavením v tomto bodu jsou vlastnosti samotné TO. Volíme zde, jaká má být finální hmotnost optimalizovaného dílu (15 % z původní hmotnosti) a případně další cíle, jako je maximalizace tuhosti apod. Dále se zde zobrazuje přehled všech zadaných omezení (obr. 4.27).

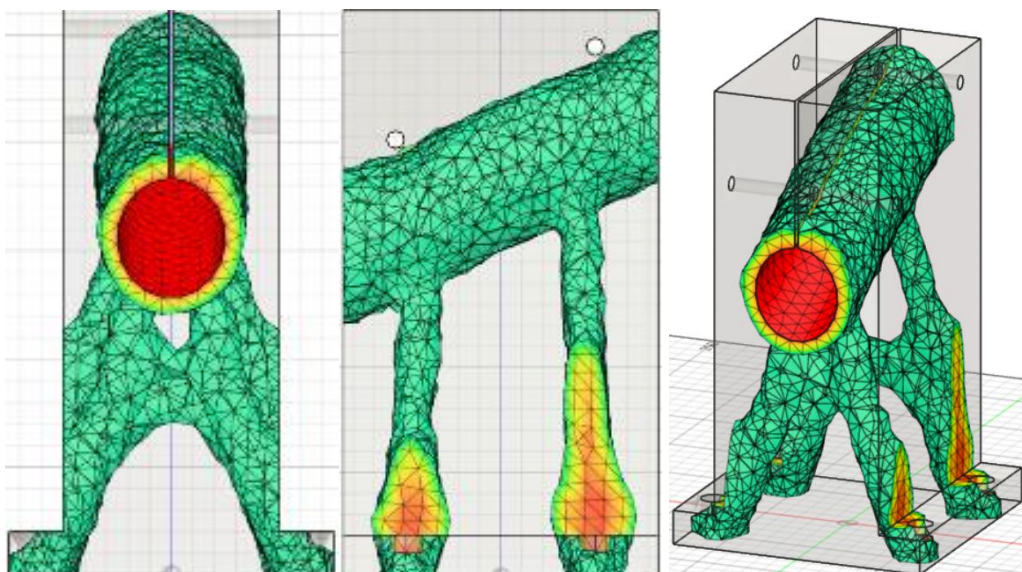
EDIT SHAPE OPTIMIZATION SETTINGS				
	Parameter	Expression	Value	Units
▼ Global Objectives +	Target Mass	< OR =	15	%
	Stiffness	Maximize		
▼ Global Constraints +	Preserve Boundary 1	N/A		
	Preserve Boundary 4	N/A		
	Preserve Boundary 5	N/A		
	Symmetry Plane 1	N/A		

Obr. 4.27 Nastavení vlastností TO

- „*Symmetry*“: další částí v tomto nastavení je volba symetrie. Tímto nastavením dojde ke značnému zjednodušení a zkrácení výpočtů.
- **Nastavení sítě:** Síť můžeme zvolit buď lineární, která je sice méně přesná pro výpočet, ale má jednodušší výpočty, nebo parabolickou. Navolit můžeme průměrnou velikost sítě buď jako absolutní hodnotu, nebo jako procentuální velikost v závislosti na modelu.
  - **Spuštění a vyhodnocení:** Po provedení výše uvedených kroků můžeme spustit TO. Na optimalizované součásti můžeme ještě pomocí táhla upravit požadovanou hmotnost. Výsledky pro materiály AlSi10Mg a ocel 316L můžeme vidět na obr. 4.28 a 4.29. U tohoto softwaru jsou výsledky velmi podobné s výsledky ze Solidworksu. Zde zůstává oproti ostatním programům v některých místech materiál i těsně pod válcovou plochou. Povrch u této součásti je poměrně hladký, což je dáno kvalitou sítě.



Obr. 4.28 Pohled na součást po TO (materiál AlSi10Mg)



Obr. 4.29 Pohled na součást po TO (materiál ocel 316L)

Souhrnné výsledky pro oba materiály jsou v tabulce 7.

Tabulka 7 Výsledky TO v programu Autodesk Fusion 360

Materiál	Hmotnost [kg]	Procento původní hmotnosti [%]
AlSi10Mg	<b>1,43</b>	<b>13,95</b>
Ocel 316L	<b>4,14</b>	<b>13,71</b>

## 5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A NÁVRH ŘEŠENÍ

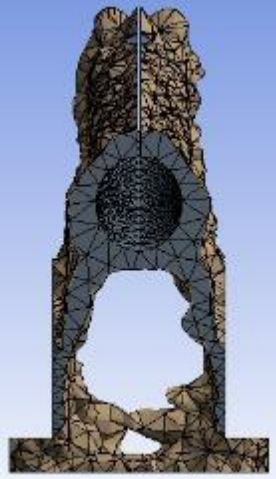
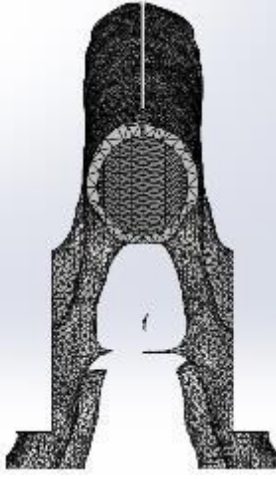
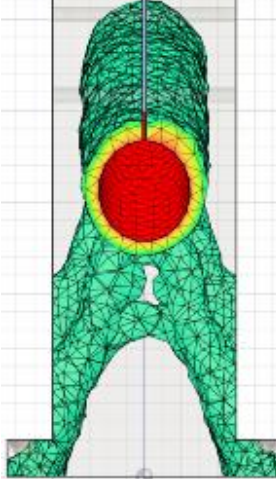
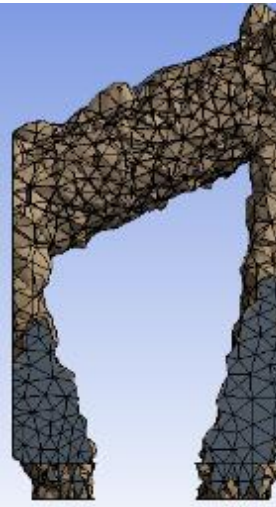
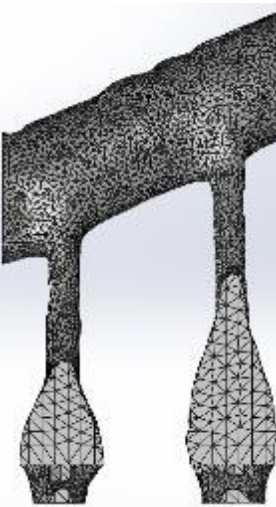
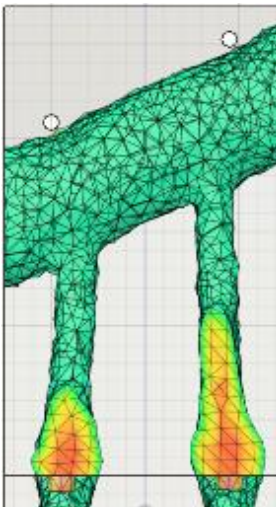
Byla provedena TO držáku hořáku svařovacího stroje ve třech různých programech. Výsledky z těchto softwarů jsou velmi podobné.

### 5.1 Shrnutí výsledků z programů


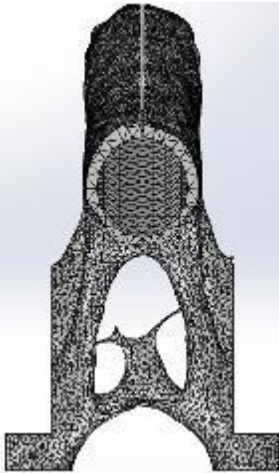
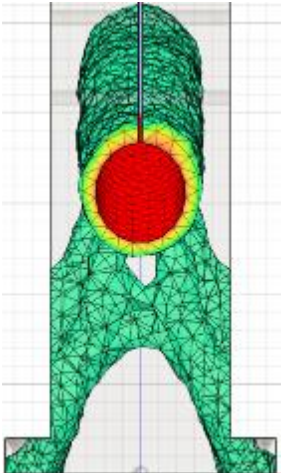
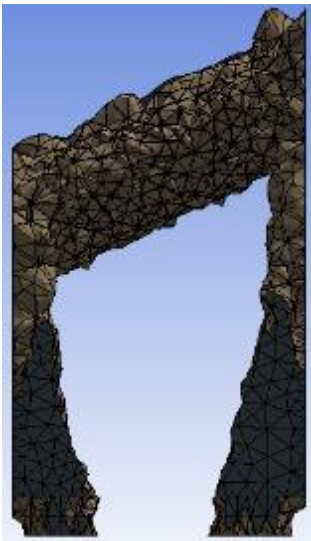
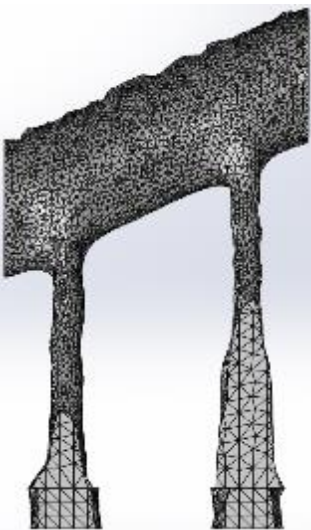
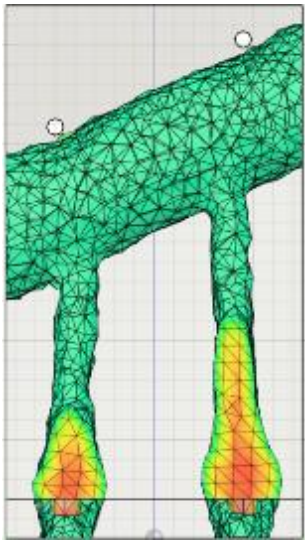
Software Ansys je ve studentské licenci limitován počtem uzlů/elementů sítě na 32 000, proto je zde model nejhrubší, bez zahlazených ploch. Nej kvalitnější síť v této práci odpovídá softwaru Solidworks. Autodesk Fusion 360 má oproti ostatním programům převrácený poměr počtu uzlů vůči počtu elementů, které se tím pádem navzájem překrývají, výsledek je však srovnatelný.

Srovnání dosažených výsledků z programů můžeme vidět v tabulce 8 (materiál AlSi10Mg) a tabulce 9 (ocel 316L). Nižších hodnot optimalizované hmotnosti bylo dosaženo v softwarech Solidworks a Autodesk Fusion, což je dáno právě výše zmíněnou kvalitou sítě, jelikož ve výsledku v Ansysu je model nevyhlazený. V čelním pohledu jsou vidět první rozdíly mezi zkoumanými softwary. V softwaru Ansys dochází ke spojení plným materiálem hned u spodní roviny. V Solidworksu k tomuto spojení dochází o něco výše, u materiálu AlSi10Mg dokonce k takovému spojení ani nedochází, je zde pouze náznak. Autodesk Fusion 360 má toto spojení nejvýše. Další rozdíly lze vidět v bočním pohledu. V softwaru Ansys je materiál spojující válcovou plochu pro hořák s dírami pro uchycení veden po čelních plochách, na rozdíl od zbývajících softwarů, kde je tento materiál veden téměř kolmo od roviny uchycení.

Tabulka 8 Srovnání softwarů pro materiál AlSi10Mg

Software	Ansys	Solidworks	Fusion 360
Čelní pohled			
Boční pohled			
Konečná hmotnost [kg]	<b>1,55</b>	<b>1,41</b>	<b>1,43</b>
Procento původní hmotnosti [%]	<b>15,10</b>	<b>13,75</b>	<b>13,95</b>
Počet uzlů sítě	30409	113 466	9852
Počet elementů sítě	17 469	77 482	47920

Tabulka 9 Srovnání softwarů pro materiál ocel 316L

Software	Ansys	Solidworks	Fusion 360
Čelní pohled			
Boční pohled			
Konečná hmotnost [kg]	<b>4,48</b>	<b>4,14</b>	<b>4,14</b>
Procento původní hmotnosti [%]	<b>14,65</b>	<b>13,71</b>	<b>13,71</b>
Počet uzlů sítě	30 409	113 466	9 852
Počet elementů sítě	17469	77 482	47 920

## 5.2 Návrh řešení

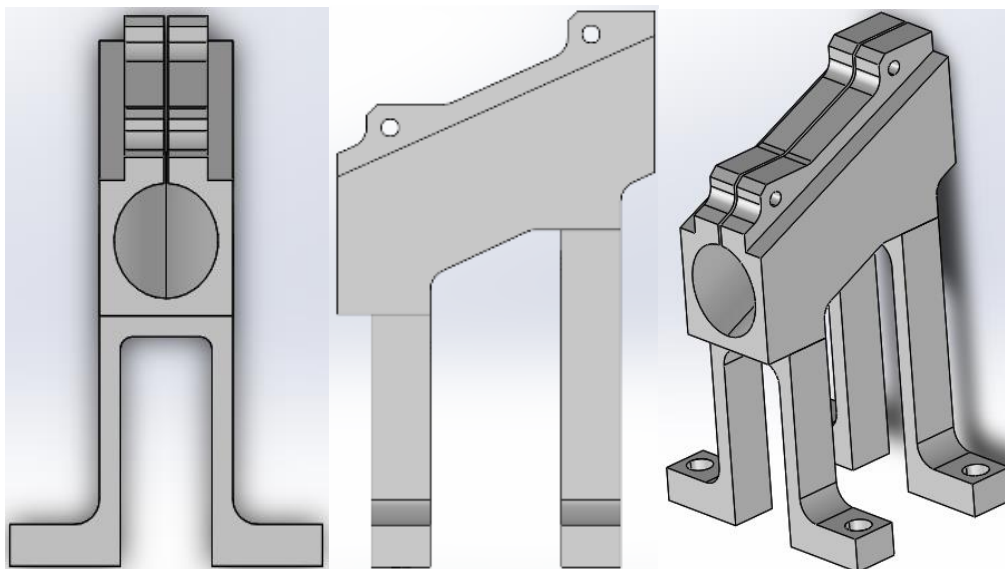
V dnešní době je nepřehledné množství možností. Vzhledem k tomu, že naše vyráběná součást je poměrně jednoduchého tvaru, můžeme využít kromě navrhovaných aditivních technologií i konvenční technologie jako například obrábění, případně i tvářeni.

Na základě výsledků TO z vybraných programů zobrazených výše byly vytvořeny v softwaru Solidworks díly vhodné jak pro aditivní technologie, tak i pro výrobu konvenčními technologiemi.

### 5.2.1 Výroba konvenčními technologiemi

Oproti aditivním technologiím jsou mnohem dostupnější a především levnější, proto se s nimi v různých výroбах setkáváme v mnohem větší míře. Výroba konvenčními technologiemi je velmi efektivní. Zde je možné vyrábět velké množství kusů za poměrně krátký časový úsek, což je jednou z hlavních výhod. Pokud tedy chceme vyrábět mnoho stejných dílů, je mnohem vhodnější zvolit jednu z konvenčních technologií, jako je slévání, obrábění či tvářeni. Nespornou a hlavní výhodou pro toto využití je cena, jelikož oproti aditivním technologiím se jedná pouze o její zlomek. Tvářením či obráběním můžeme díky pokroku dosahovat velmi složitých tvarů, avšak ve srovnání s aditivními technologiemi jde stále o tvary poměrně jednoduché.

Jelikož se v případě držáku hořáku jedná o poměrně velkou a složitou součást, obrábění na CNC frézce z jednoho kusu materiálu by bylo velmi náročné a ekonomicky nevýhodné. Zvolili jsme tedy výrobu držáku z 3 částí, které následně budou spojeny šrouby velikosti M6. Výsledný držák je zobrazen na obr. 5.1. Postup výroby je v několika krocích popsán v následující části:



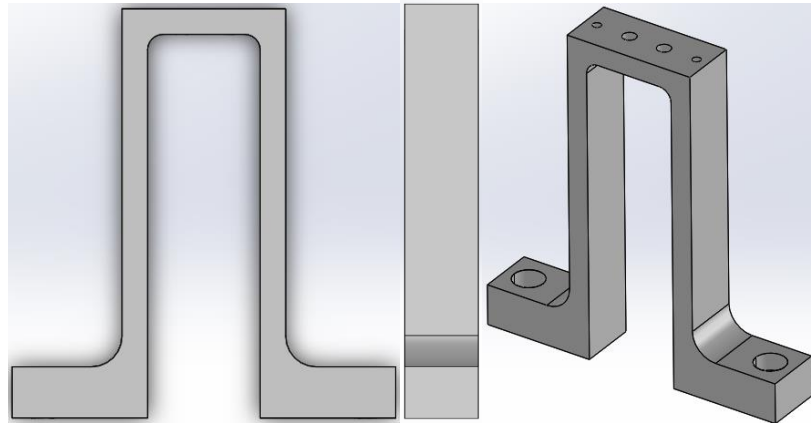
Obr. 5.1 Držák hořáku vyrobený konvenčními technologiemi

#### I. Výroba spodních dílů:

A. Vyříznutí spodních dílů z desek metodou EDM (*Electric Discharge Machining*), případně vodním či laserovým paprskem. Oba díly budou vyráběny stejným způsobem, liší se pouze jejich výškový rozměr.

B. Vyvrtání děr pro šrouby a kolíky.

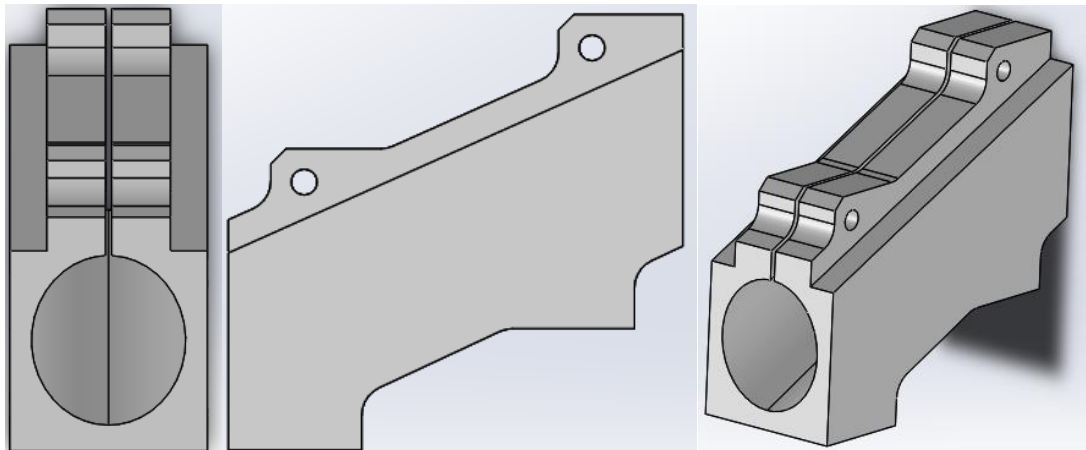
Výsledný tvar spodního dílu můžeme vidět na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Výsledný tvar spodního dílu včetně vyvrtaných děr

## II. Výroba těla držáku:

Tělo držáku bude vyráběno na 5-osé CNC frézce, na více upnutích. Výsledný tvar je vidět na obr. 5.3



Obr. 5.3 Tělo držáku hořáku

## III. Přišroubování spodních dílů k tělu.

Výsledná hmotnost držáku vyrobeného tímto způsobem je 18,78 % hmotnosti výchozího návrhu. Výsledek je o několik procent vyšší, než měly součásti po TO, což je dáno výrobními omezeními daných technologií. Tento návrh výroby je pouze informační. Výroba takového dílu je stále poměrně náročná, proto bychom mohli uvažovat o dalším zjednodušení.

### 5.2.2 Výroba aditivními technologiemi

Využití výroby dílů aditivními technologiemi je v současné době čím dál víc populárnější. Její hlavní předností je velká úspora materiálu oproti konvenčním technologiím. Průmysl, jako je letectví apod., využívá těchto technologií ve velké míře, jelikož právě zde je kladen důraz na co nejvyšší snižování hmotnosti. Pokud získáme lehčí díly, ušetříme tím nejen přímé náklady na materiál ve výrobě, ale mnohdy i náklady na provoz strojů, které za celou dobu jejich životnosti rozhodně nejsou zanedbatelné, naopak tvoří nejvýznamnější část za životní cyklus součásti. Oproti konvenčním technologiím je

však cena za využití moderních aditivních technologií násobně vyšší, proto se zatím nevyužívají k sériově vyráběným dílcům, ale spíše pro kusovou výrobu či prototypování.

Tyto technologie nám jako jediné dostupné rovněž umožňují využití prutových struktur (*Lattice structure*). Takto získané struktury jsou ještě mnohem lehčí, než když se použije plný materiál, což je téměř nutnost při výrobě konvenčními technologiemi. Musíme ovšem brát v úvahu, že může dojít ke zhoršení některých vlastností takovýchto dílů. Je proto vždy nutné pečlivě analyzovat a zvážit, zda je toto použití vhodné. K tomu nám slouží nástroje v podobě programů právě jako např. Ansys Workbench či Solidworks.

Aditivní technologie můžeme rozdělit podle různých kritérií, nejběžněji je však dělíme podle stavebního materiálu. Metod 3D tisku je celá řada, v této práci je uvedeno pouze několik nejběžněji se vyskytujících případů: [42]

- I. Na bázi pevných materiálů
  - A. FDM (*Fused Deposition Modeling*)
  - B. LOM (*Laminated Object Manufacturing*)
- II. Na bázi tekutých materiálů
  - A. SLA (*Stereolithography*)
  - B. DLP (*Digital Light Processing*)
- III. Na bázi práškových materiálů
  - A. SLS (*Selective Laser Sintering*)
  - B. DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*)
  - C. SLM (*Selective Laser Melting*)
  - D. SHS (*Selective Heat Sintering*)
  - E. BJ (*Binder Jetting*)
  - F. MJP (*Multijetprinting*) a další.

Vzhledem k povaze této práce si blíže popíšeme nejpoužívanější metody pro výrobu kovových dílů, a to SLS a DMLS.

### **SLS + DMLS**

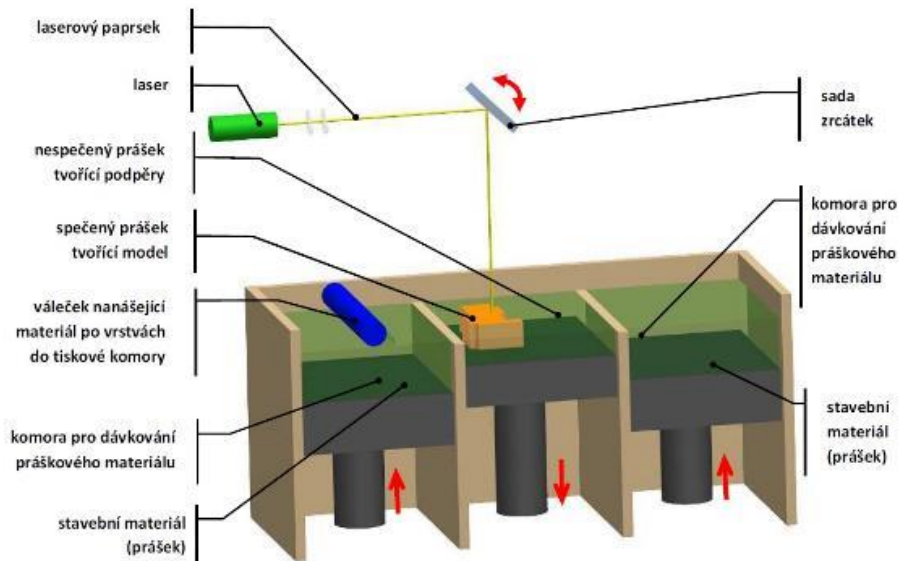
Tyto technologie k výrobě využívají materiál ve formě prášku, který je pomocí tepelné energie z laserového paprsku spékán. Obě technologie byly patentovány roku 1987. Princip metody spočívá v nanesení tenké vrstvy prášku a následném soustředění laserového paprsku na předem definované místo, čímž dojde k tavení prášku a následnému vzniku jedné vrstvy. Tento postup se opakuje a po vrstvách tedy vzniká celý model součásti. [42]

- výhody technologie: [42]
  - využitelnost zbytkového prášku
  - relativně odolné výtisky
  - bohaté možnosti povrchových úprav
  - kvalitní povrch s vysokým rozlišením
- nevýhody: [42]



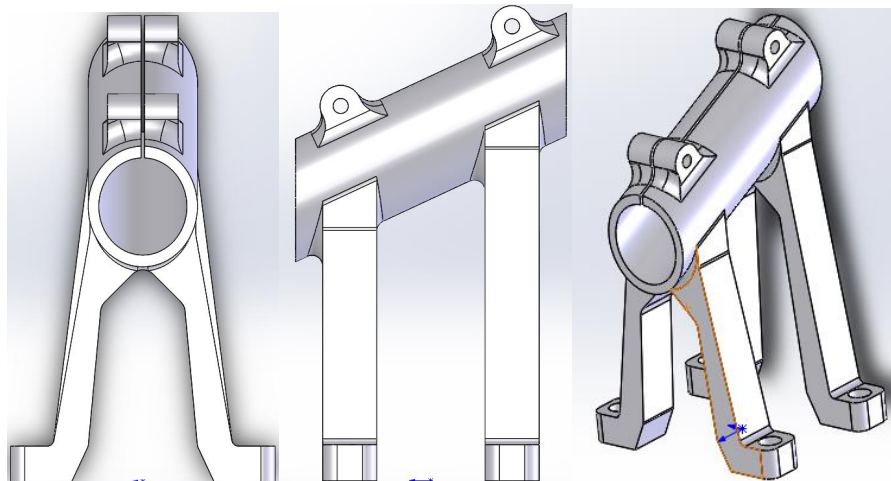
- drahý materiál a provoz stroje
- nákladné čištění stroje a výtisku od jemného prášku
- vysoká cena 3D tiskáren
- smrštění materiálu

Princip technologie SLS a DMLS je popsán na obr. 5.4.



Obr. 5.4 Princip SLS a DMLS [42]

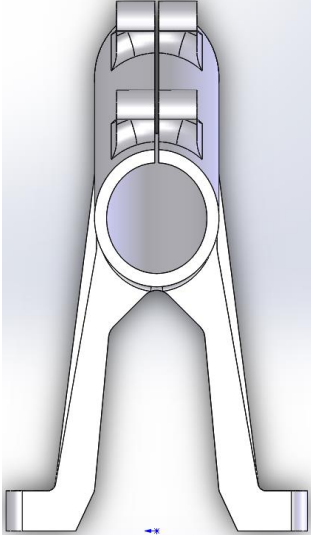
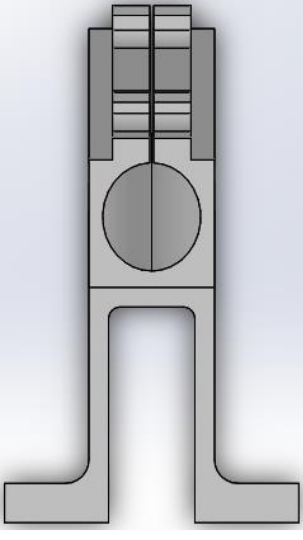
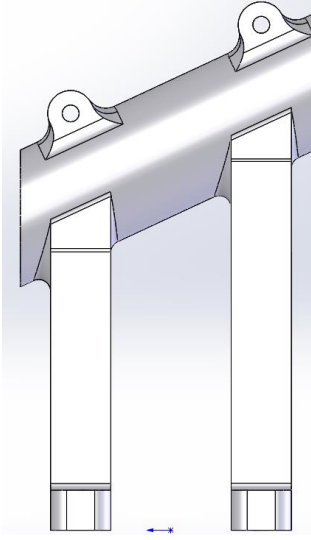
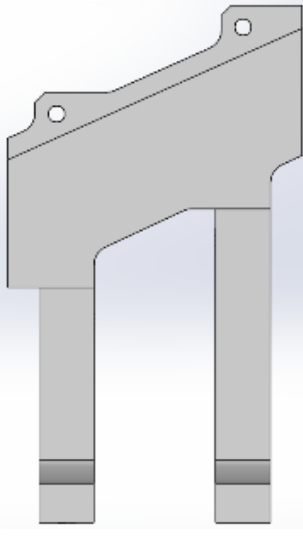
Pro výrobu aditivními technologiemi bylo vycházeno z výsledků TO. Součást držáku byla upravena tak, aby muselo být použito co nejméně podpor. Proto byly zvoleny v místech, kde je to možné, úkosity. V místech, kde by mohly vznikat případné trhliny bylo zvoleno zaoblení. Výsledný tvar po přemodelování v softwaru Solidworks můžeme vidět na obr. 5.5. Hmotnost tohoto držáku je 1,66 kg v případě materiálu AlSi10Mg a 4,99 v případě oceli 316L, tedy 16,15 % hmotnosti původního návrhu.



Obr. 5.5 Výsledný tvar držáku po přemodelování v softwaru Solidworks (pohled zepředu a z boku)

Přehled základních vlastností navržených dílů můžeme vidět v tabulce 10.

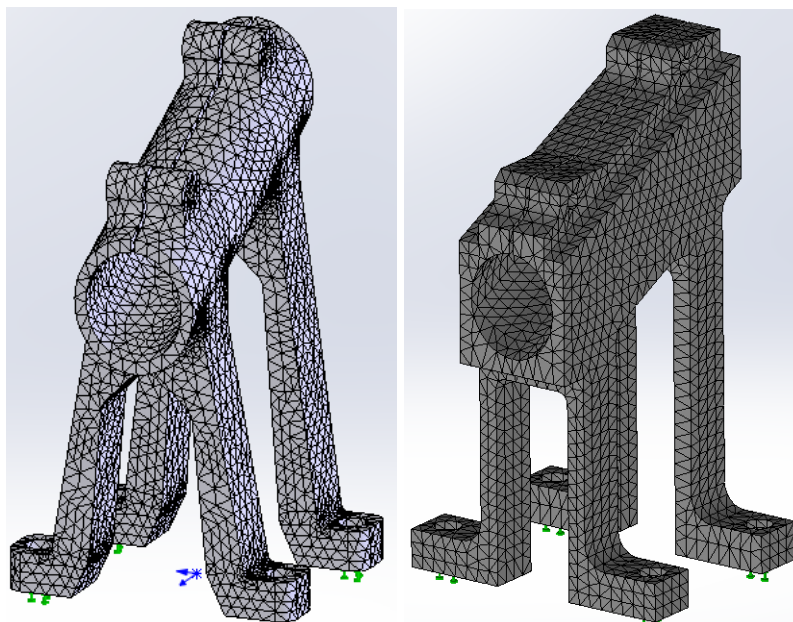
Tabulka 10 Základní vlastnosti navržených dílů

	Aditivní technologie	Konvenční technologie
Čelní pohled		
Boční pohled		
Hmotnost (AlSi10Mg) [kg]	<b>1,66</b>	<b>1,93</b>
Hmotnost (ocel 316L) [kg]	<b>4,99</b>	<b>5,77</b>
% původní hmotnosti	<b>16,15</b>	<b>18,78</b>

### 5.3 Analýza navrženého řešení

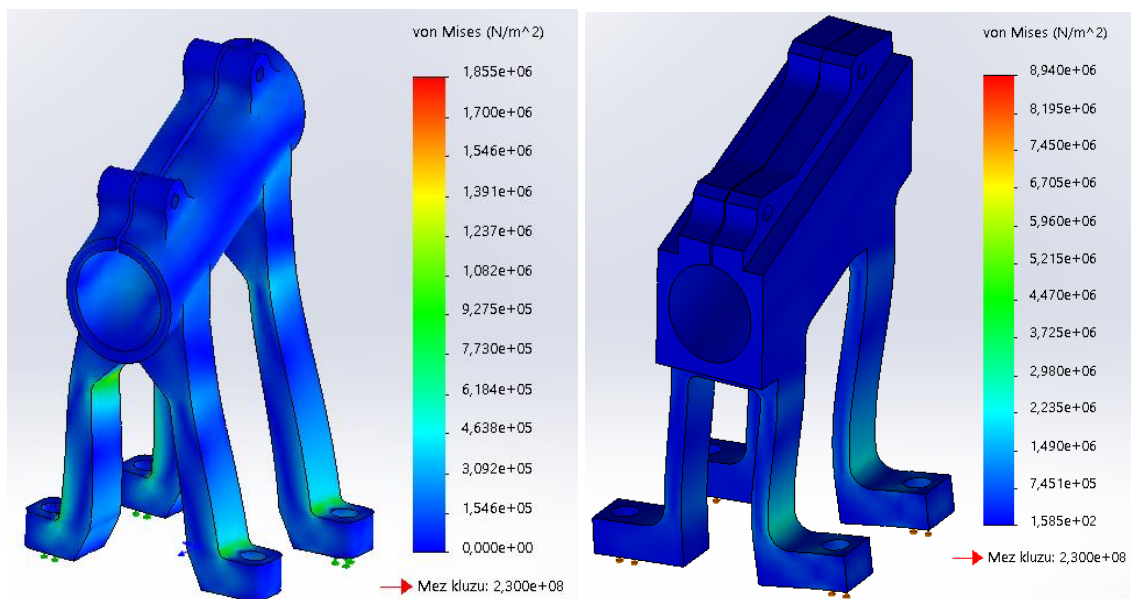
Obě navržené součásti byly posléze podrobeny strukturální analýze v softwaru Solidworks pro zjištění maximálního působícího napětí. Tato analýza má pouze informativní charakter, výsledky neodpovídají plnohodnotné analýze pomocí MKP. Postup přípravy této analýzy je popsán v následujících bodech:

- I. Definice materiálu
- II. Nastavení uchycení
- III. Definice vnějšího zatížení
- IV. Tvorba sítě a spuštění
  - Kroky I. (Definice materiálu) až III. (Definice vnějšího zatížení) se provádí stejným způsobem, jako je uveden v kapitole 4.3.2.
  - Tvorba sítě a spuštění: V části tvorby sítě je stejná nabídka, jako je popsána výše (kap. 4.3.2, část tvorba sítě a spuštění). V tomto nastavení volíme pro model pro aditivní technologie vlivem mnoha zaoblení sít' na základě zakřivení, pro model pro konvenční výrobu postačí standardní sít'. Výsledné sítě můžeme vidět na obr. 5.5. Jakmile máme vytvořenou a zkontrolovanou sít', můžeme spustit analýzu.

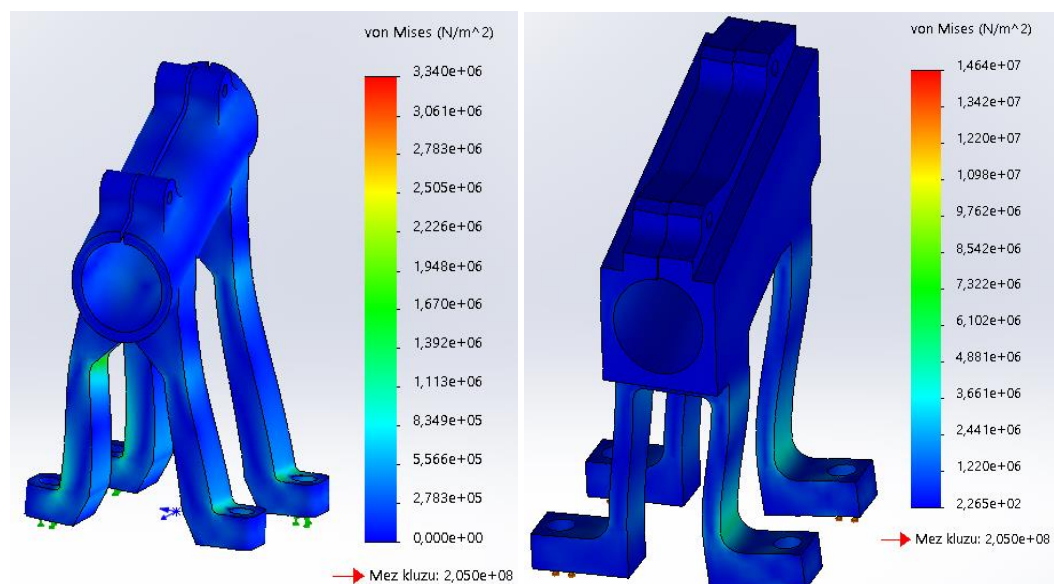


Obr. 5.6 Vytvořené sítě

Výsledky z této analýzy jsou zobrazeny na obr. 5.7 (pro materiál AlSi10Mg) a 5.8 (pro ocel 316L). Maximální napětí u modelu pro konvenční technologie (AlSi10Mg – 8,94 MPa, ocel 316L – 14,64 MPa) je více než čtyřikrát větší než napětí na modelu zhotoveném pro výrobu aditivními technologiemi (AlSi10Mg – 1,86 Mpa, ocel 316L – 3,34 MPa). Maximální hodnoty napětí jsou ve všech případech mnohonásobně menší, než je únavová pevnost materiálu, proto je teoreticky možné tyto součásti odlehčit dalším odebráním materiálu.



Obr. 5.7 Napětí na zhotovených modelech (AISi10Mg)



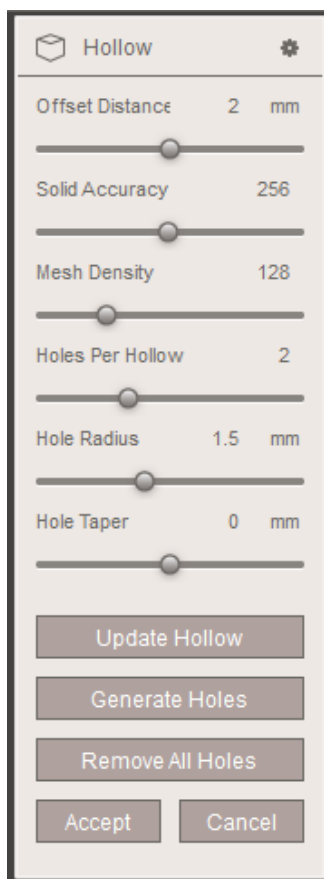
Obr. 5.8 Napětí na zhotovených modelech (ocel 316L)

#### 5.4 Odlehčená mikroprutová struktura

Na základě informativních napěťových analýz popsaných v kapitole 5.3 byla pro model určený k výrobě aditivními technologiemi vytvořena odlehčená struktura uvnitř materiálu. Mřížková struktura byla vytvořena v softwaru *Meshmixer*, což je volně stažitelný program od firmy *Autodesk* umožňující rozsáhlé úpravy modelů vhodných pro 3D tisk. Program pracuje na základě sítě (*Mesh*) a umožňuje ji i analyzovat a opravovat, aby byl zajištěn hladký průběh výroby a bezproblémové generování kódu, pomocí kterého je model vytisknut. [43] Postup tvorby mřížkové struktury v tomto programu můžeme popsat v následujících krocích:

**I. Import modelu ve formátu STL:** Soubor můžeme přetáhnout přímo do otevřeného okna programu, případně jej vyvolat z programu.

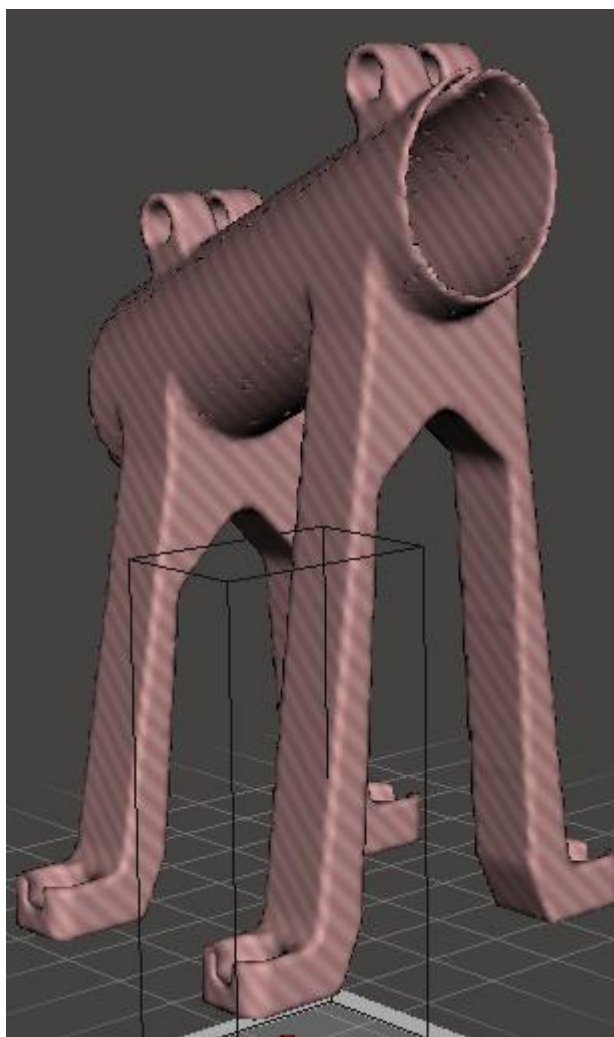
**II. Tvorba skořepiny:** Abychom mohli vytvářet uvnitř materiálu mřížkovou strukturu, musíme nejprve vytvořit obálku. To lze provést různými způsoby. V této práci je popsán pouze jeden z nich. V části úprav (*Edit*) vybereme příkaz *Hollow*, čímž se dostaneme do nastavení parametrů, podle kterých se vytvoří obálka. Postupně se zde nastavuje tloušťka, přesnost, hustota sítě a další parametry (viz obr. 5.8). Nastavení můžeme pomocí táhel měnit a podle toho se vytvoří nová síť.



Obr. 5.9 Nastavení obálky

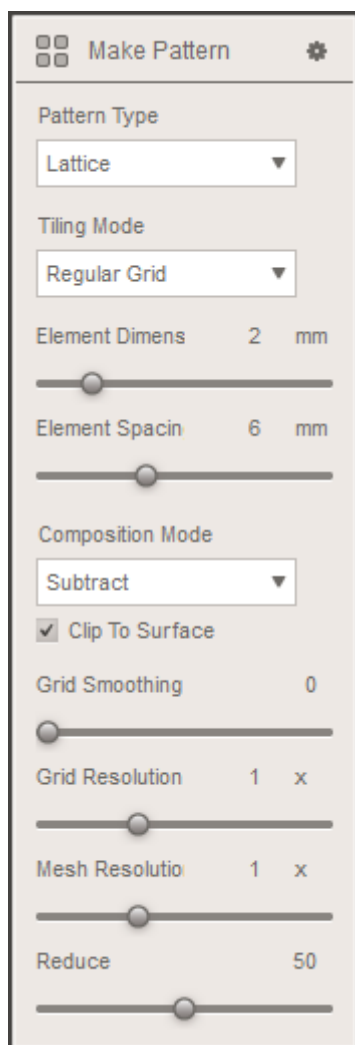
**III. Oddělení skořepin:** Abychom mohli vytvořit uvnitř modelu mřížkovou strukturu, musíme nejprve rozdělit vytvořené díly. V části úprav klikneme na rozdělení (*Separate Shells*), čímž dostaneme dvě oddělené části, které se nám zobrazí v okně objektů.

**IV. Přehození normál u vnitřního povrchu:** V okně si vybereme vnitřní objekt. V aktuálním zobrazení se na něm zobrazují pruhy (obr. 5.9), což indikuje, že máme nastavené normály směrem ven. Označíme celý objekt a jednoduchým příkazem ve stromě přehodíme normály, aby nám správně fungovalo vytvoření mřížkové struktury.



Obr. 5.10 Vnitřní část s normálami vně objektu

**V. Vytvoření struktury:** Nyní už máme připraven model pro vytvoření struktury. V části úprav (*Edit*) použijeme příkaz pro její tvorbu (*Make Pattern*), kde hned prvním výběrem zvolíme typ struktury jako mřížkovou (*Lattice*). Následující položky volíme tak, aby to vyhovovalo našim požadavkům. Pro tuto součást jsme zvolili nastavení viz obr. 5.10. Tuto strukturu můžeme podle potřeby natáčet v modelu tak, abychom ji mohli např. snadno vytisknout.

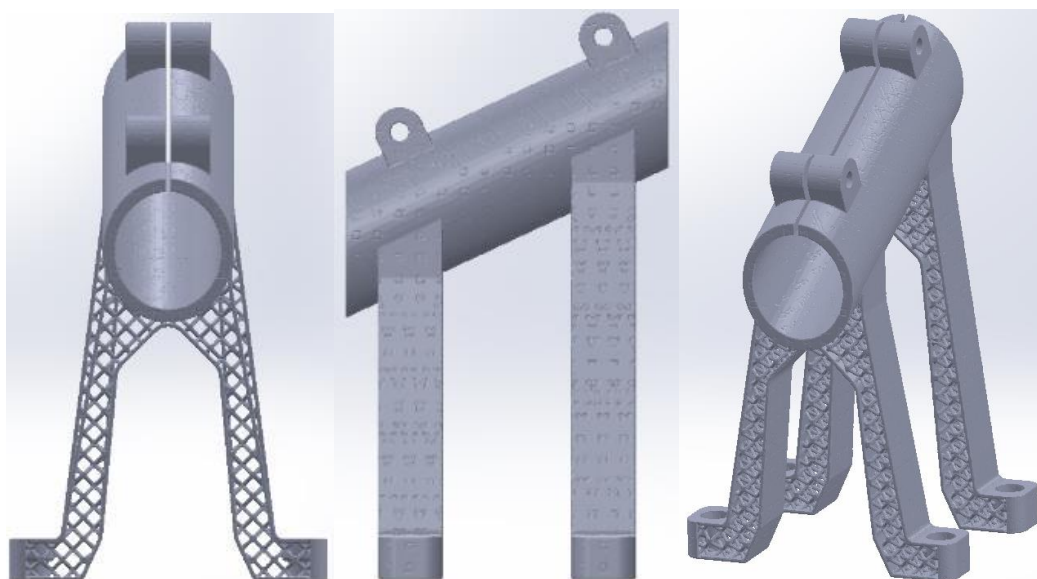


Obr. 5.11 Nastavení struktury

**VI. Přehození normál:** U nově vytvořeného povrchu opět prohodíme normály stejným postupem jako v bodu IV.

**VII. Spojení těl:** Posledním krokem je propojení těl. Označíme nově vytvořenou strukturu s původní obálkou a spojíme (*Combine*). Tím máme vytvořenou strukturu uvnitř povrchu a můžeme přejít k případným dalším úpravám nebo rovnou k tisku.

Vzniklý díl byl upraven tak, aby vyhovoval výrobě aditivními technologiemi na bázi práškového polotovaru, kdy je nutné, aby kovový prášek, který není nataven, mohl být posléze odstraněn a případně znovu použit k dalšímu tisku. Takto upravený držák můžeme vidět na obr. 5.12. Pro kompletní návrh musí být tento upravený držák podroben pevnostním výpočtům pro zjištění maximálních vzniklých napětí. Až na základě této pevnostní analýzy můžeme toto řešení považovat za správné.



Obr. 5.12 Upravený díl optimalizovaný pro 3D tisk

### 5.5 Shrnutí dosažených výsledků

Pokud optimalizujeme díl přímo pro aditivní technologie, ušetření materiálu je opravdu značné. Přehled hmotností všech optimalizovaných dílů můžeme vidět v tabulce 11. Na posledním řádku je optimalizace za využití mřížkové struktury, kde jsme ušetřili dodatečně ještě zhruba polovinu materiálu oproti pouhé topologické optimalizaci. Toto řešení však pro korektnost musí být podrobeno pevnostní analýze.

Tabulka 11 Souhrnná tabulka všech hmotností (v závorkách je uvedeno procento z původní hmotnosti)

	AlSi10Mg	Ocel 316L
Ansys	<b>1,55</b> (15,12 %)	<b>4,48</b> (14,65 %)
Solidworks	<b>1,41</b> (13,75 %)	<b>4,14</b> (13,71 %)
Fusion 360	<b>1,43</b> (13,95 %)	<b>4,14</b> (13,71 %)
Upravený díl pro aditivní technologie	<b>1,66</b> (16,15 %)	<b>4,99</b> (16,15 %)
Upravený díl pro výrobu pomocí CNC	<b>1,93</b> (18,78 %)	<b>5,77</b> (18,78 %)
Upravený díl pro aditivní technologie pomocí Meshmixeru	<b>0,77</b> (7,51 %)	<b>2,30</b> (7,51 %)




## 6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Držák hořáku byl naceněn jak pro aditivní technologie, tak i pro výrobu konvenčními technologiemi. Konvenčními technologiemi budou vyrobeny tři díly, které budou následně spojeny šrouby velikosti M6.

### 6.1 Aditivní technologie

Pro nacenění výroby aditivními technologiemi byl použit online kalkulátor na webu *materialise.com*. [47] Byli požádáni i jiní výrobci zabývající se 3D tiskem z kovu, avšak do termínu odevzdání této práce žádný z nich cenovou nabídku na dané součásti bohužel nezaslal. Na obr. 6.1 můžeme vidět příkladné nacenění součásti, zde pro materiál AlSi10Mg a mřížkovou strukturu uvnitř materiálu. Pro ocel 316L probíhá nacenění stejným způsobem.



Dim: 150.00 x 150.00 x 264.15 mm  
Vol: 287.69 cm<sup>3</sup>

Select technology  
Metal 3D Printing

Select material  
Standard AlSi10Mg

Select finishing  
Corundum-Blasted (Matte)

Quantity  
1

**Unit Price:**  
3071.96 EUR

Obr. 6.1 Příkladné nacenění součásti pomocí kalkulátoru na webu *materialise.com* [47]

Součást držáku hořáku je poměrně vysoká (264,15 mm po odlehčení). Tomu proto odpovídá i vysoká cena za výrobu. V tabulce 9 můžeme vidět přehled základních jednotkových cen držáku pro materiály AlSi10Mg a nerezovou ocel 316L.

Tabulka 12 Cena držáku zhotoveného aditivními technologiemi podle *materialise.com*

	AlSi10Mg	Ocel 316L
Bez mřížkové struktury	4179,41 € (cca 111 000 Kč)	5819,43 € (cca 155 000 Kč)
S mřížkovou strukturou	3071,96 € (cca 82 000 Kč)	4277,40 € (cca 114 000 Kč)

## 6.2 Konvenční technologie

Na ceně pro konvenční technologie se podílí mnoho faktorů. Musíme brát v potaz celý postup výroby a náročnost každé operace. Zde je proveden pouze hrubý odhad.

Nedílnou součástí při kalkulaci ceny je výpočet ceny materiálu. Polotovary pro výrobu držáku budou:

- deska 165 mm x 155 mm, tl. 30 mm
- deska 155 mm x 125 mm, tl. 30 mm
- deska 200 mm x 130 mm, tl. 70 mm

Z rozměrů polotovarů byla pomocí softwaru Solidworks vypočítaná jejich celková hmotnost, která je pro ocel 316L rovna 25,35 kg, pro hliníkovou slitinu 8,46 kg. Cena oceli 316L je přibližně 220 Kč za kilogram.[45] Cena hliníkových slitin se pohybuje v rozmezí 120 až 160 Kč za kilogram. [46] Slitina AlSi10Mg je určena primárně pro odlévání a aditivní technologie. Pro tuto práci bychom mohli vybrat slitinu s podobnými mechanickými vlastnostmi. Cenu si stanovíme na 160 Kč za kilogram. V rámci přípravy polotovaru bude cena za kilogram pro účely výpočtu navýšena ještě o 10 %:

- Ocel 316L: 242 Kč za kg
- Al slitina: 176 Kč za kg

Cena polotovarů tedy bude:

- Ocel 316L:  $25,35 \cdot 242 = 6135$  Kč
- Al slitina:  $8,46 \cdot 176 = 1489$  Kč

V dalším kroku bude popsán postup výroby včetně přibližných cen jednotlivých operací.

### I. Výroba spodních dílů

- výroba metodou EDM – cca 1 h – 1000 Kč
- vrtání děr – cca 1 h – 1000 Kč

Spodní díly jsou dva, nesmíme proto zapomenout započítat tuto cenu dvakrát.

### II. Výroba těla držáku

- programování – cca 2 h – 1600 Kč
- výroba na CNC – cca 4 h – 6000 Kč
- Nástroje: v závislosti na materiálu
  - o Ocel 316L – cca 4000 Kč
  - o Al slitina – cca 2000 Kč

### III. Přišroubování spodních dílů k tělu

- cca 0,5 h – 300 Kč

Přibližná celková cena výroby je stanovena součtem všech položek:

Ocel 316 L: 22 035 Kč

Al slitina: 15 389 Kč

## 7 ZÁVĚR

Práce se zabývá návrhem a výrobou držáku hořáku pomocí pokročilých metod. V úvodu práce jsou popsány různé struktury, pomocí kterých můžeme vyráběnou součást odlehčovat. Další část práce je věnována pokročilým metodám navrhování součástí, nejprve generativnímu designu a posléze i TO. Kapitola o TO je věnována nejvyužívanějším metodám řešení a přehledu několika programů včetně uvedení jejich základních parametrů.

V kapitole 4 jsou popsána a analyzována vstupní data pro držák hořáku, pomocí kterých se úloha dále řeší. Je zde řešena optimalizace ve třech vybraných softwarech: *Ansys Workbench*, *Solidworks* a *Autodesk Fusion 360*. Program *Ansys Workbench* je ve studentské verzi limitován počtem uzlů, proto je výsledek z něho nejhrubší. Nastavení analýzy zde bylo nejsložitější, což je však dáno komplexností tohoto programu, jelikož kromě TO umožňuje i celou škálu dalších analýz. V programu *Solidworks* byla vytvořena nejjemnější síť, čemuž odpovídal i nejdetailejší výsledek, ke kterému bylo ale zapotřebí nejvíce času. Software *Autodesk Fusion 360* je uživatelsky nejvíce přívětivý, avšak nenabízí tolik možností nastavení jako zbylé dva programy.

Na základě výsledků z těchto tří softwarů byly následně zhotoveny dva držáky vhodné pro výrobu aditivními technologiemi a výrobu pomocí konvenčních technologií. Z napěťových analýz, které mají pouze informační charakter, vyplývá, že i takto optimalizované součásti nejsou příliš zatěžovány, proto je možné je i nadále odlehčovat. Za pomoci programu *Meshmixer* byla v navržené součásti pro aditivní technologie vytvořena mřížková struktura, čímž jsme se dostali na hmotnost o 92,49 % lehčí oproti původnímu zadání. Takto vytvořenou strukturu je však nutné podrobit pevnostní analýze pro zjištění vhodnosti použití.

V poslední části práce je kalkulace nákladů na výrobu pomocí aditivních a konvenčních technologií. Výroba aditivními technologiemi vyšla při využití mřížkové struktury pro materiál AlSi10Mg přibližně na 82 000 Kč, pro ocel 316L přibližně na 114 000 Kč. Výroba konvenčními technologiemi byla spočítána na 22 035 Kč pro ocel 316L a na 15 389 Kč pro Al slitinu. Při srovnání těchto výsledků vyplývá cena pomocí aditivních technologií přibližně pětkrát dražší než výroba konvenčními technologiemi. Je nutné však dodat, že při cenové kalkulaci byly provedeny pouze hrubé odhady. Výroba z oceli 316L frézováním by byla velmi náročná, finální ceny se tedy mohou značně lišit od těch uvedených v této práci.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MACONACHIE, Tobias, Martin LEARY, Bill LOZANOVSKI, Xuezhe ZHANG, Ma QIAN, Omar FARUQUE a Milan BRANDT. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design* [online]. 2019, **183** [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108137. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127519305751>
- [2] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN, Simon Lawrence BUBB, Philippe YOUNG a David RAYMONT. Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2014, 214(4), 856-864 [cit. 2020-05-25]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.004. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013613003804>
- [3] DONG, Guoying, Yunlong TANG a Yaoyao Fiona ZHAO. A Survey of Modeling of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing. *Journal of Mechanical Design* [online]. 2017, **139**(10) [cit. 2020-05-25]. DOI: 10.1115/1.4037305. ISSN 1050-0472. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article/doi/10.1115/1.4037305/367020/A-Survey-of-Modeling-of-Lattice-Structures>
- [4] HUSSEIN, Ahmed, Liang HAO, Chunze YAN, Richard EVERSON a Philippe YOUNG. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2013, 213(7), 1019-1026 [cit. 2020-05-25]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.020. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401361300037X>
- [5] XU, Shanqing, Jianhu SHEN, Shiwei ZHOU, Xiaodong HUANG a Yi Min XIE. Design of lattice structures with controlled anisotropy. *Materials & Design* [online]. 2016, **93**, 443-447 [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.01.007. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127516300120>
- [6] XIAO, Zefeng, Yongqiang YANG, Ran XIAO, Yuchao BAI, Changhui SONG a Di WANG. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting. *Materials & Design* [online]. 2018, **143**, 27-37 [cit. 2020-05-25]. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.01.023. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127518300303>
- [7] Weisstein, Eric W. Catenoid. *MathWorld* [online] [cit. 2020-05-22] Dostupné z <https://mathworld.wolfram.com/Catenoid.html>
- [8] MASKERY, I., L. STURM, A.O. AREMU, et al. Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing. *Polymer* [online]. 2018, **152**, 62-71 [cit. 2020-05-25]. DOI: 10.1016/j.polymer.2017.11.049. ISSN 00323861. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386117311175>
- [9] Topology Optimization Explained. *Auto Beat* [online]. 2015 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.autobeatonline.com/articles/topology-optimization-explained>

- [10] Metoda SIMP pro optimalizaci topologie. SOLIDWORKS Help: version 2019 [online]. [cit. 2020-05-22] Dostupné z: [http://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/cworks/c\\_simp\\_method\\_topology.htm](http://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm)
- [11] MAREŠ, Tomáš. *Základy konstrukční optimalizace* [online]. Praha: [Tomáš Mareš], 2006 [cit. 2020-05-25]. Knižnice konstrukční optimalizace. ISBN 80-239-6508-5. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/z/z/ZakladyKonstrukcniOptimalizace/zko.pdf>
- [12] GONÇALVES, Filipe Assis. Introduction to Structural Optimization using the ESO and BESO Evolutionary Methods [online]. B.m., 2018. [vid. 2020-04-08]. Dostupné z: [https://sigarra.up.pt/reitoria/pt/pub\\_geral.show\\_file?pi\\_doc\\_id=172488](https://sigarra.up.pt/reitoria/pt/pub_geral.show_file?pi_doc_id=172488)
- [13] QUERIN, Osvaldo M., Mariano VICTORIA, Cristina ALONSO, Rubén ANSOLA a Pascual MARTÍ. *Topology design methods for structural optimization* [online]. London: Elsevier, 2017 [cit. 2020-05-25]. ISBN 9780081009161. Dostupné z: <https://www.elsevier.com/books/topology-design-methods-for-structural-optimization/querin/978-0-08-100916-1>
- [14] BAUMGARTNER, A., L. HARZHEIM a C. MATTHECK. SKO (soft kill option): the biological way to find an optimum structure topology. *International Journal of Fatigue* [online]. 1992, **14**(6), 387-393 [cit. 2020-05-25]. DOI: 10.1016/0142-1123(92)90226-3. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0142112392902263>
- [15] Topology Study. SOLIDWORKS Help: version 2019 [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: [https://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c\\_generative\\_design\\_study.htm?verRedirect=1](https://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c_generative_design_study.htm?verRedirect=1)
- [16] *Solidvision* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/>
- [17] Ansys. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>
- [18] Mesh PropertyManager. SOLIDWORKS Help: version 2019 [online]. b.r. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [http://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/idc\\_help\\_meshsolid.htm?verRedirect=1](http://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/idc_help_meshsolid.htm?verRedirect=1)
- [19] *Material Data Sheet: EOS Aluminium AlSi10Mg* [online]. 2014, 5 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: [https://cdn0.scrvt.com/eos/public/8837de942d78d3b3/4e099c3a857fdddca4be9d59fb1cd74/EOS\\_Aluminium\\_AlSi10Mg\\_en.pdf](https://cdn0.scrvt.com/eos/public/8837de942d78d3b3/4e099c3a857fdddca4be9d59fb1cd74/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf)
- [20] Nový trend budování samoučících se dodavatelských řetězců – vynikající produkty – generativní design. [online]. (c) Luckytech Technology [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: [https://luckytek.eu/generativni\\_design/](https://luckytek.eu/generativni_design/)
- [21] AKELLA R. What Generative Design Is and Why It's the Future of Manufacturing. [online]. 2018. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z:

- <https://www.newequipment.com/research-and-development/article/22059780/what-generative-design-is-and-why-its-the-future-of-manufacturing>
- [22] BRANDL, Erhard, Ulrike HECKENBERGER, Vitus HOLZINGER a Damien BUCHBINDER. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials & Design* [online]. 2012, **34**, 159-169 [cit. 2020-06-03]. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.067. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306911005590>
- [23] DOMFANG NGNEKOU, Julius N., Yves NADOT, Gilbert HENAFF, Julien NICOLAI, Wen Hao KAN, Julie M. CAIRNEY a Lionel RIDOSZ. Fatigue properties of AlSi10Mg produced by Additive Layer Manufacturing. *International Journal of Fatigue* [online]. 2019, **119**, 160-172 [cit. 2020-06-03]. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.09.029. ISSN 01421123. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112318306091>
- [24] VAVERKA, Ondřej. *Optimalizace těhlice Formule Student pro výrobu SLM technologii* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=149746](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149746)  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce: Doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [25] Analysis Solvers. SOLIDWORKS Help: version 2019 [online]. c1995-2020 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: [https://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c\\_Analysis\\_Solvers.htm?verRedirect=1](https://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c_Analysis_Solvers.htm?verRedirect=1)
- [26] ANSYS Help [online]. ANSYS, Inc. 2020, [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://ansyshelp.ansys.com/>
- [27] MUNDO, Dirk. A Contemplation on Topology Optimization. [online]. 2016. [cit. 2020-06-13] <https://www.digitalengineering247.com/article/a-contemplation-on-topology-optimization/generative-design>
- [28] Autodesk Fusion 360. [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>
- [29] Topology and Shape Optimization with Abaqus. [online]. c2011. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://www.simulia.com/download/rum11/GL/Sandeep-Urankar-ATOM-SGL-RUM-2011.pdf>
- [30] Introduction to Topology Optimization by the SIMP Method [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: [https://www.ltm.tf.fau.de/files/2017/09/Wein\\_250110.pdf](https://www.ltm.tf.fau.de/files/2017/09/Wein_250110.pdf)
- [31] SolidThinking Inspire 2018 [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://solidthinking.com/inspire2018.html>
- [32] WEINBERG, D. a M. SMELL. Generative Design with Autodesk Nastran Topology Optimization [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Generative-Design-Autodesk-Nastran-Topology-Optimization-2016>
- [33] Which algorithm is used by commercial FEA solvers for Topology Optimization [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/post/Which\\_algorithm\\_is\\_used\\_by\\_commercial\\_FEA\\_solvers\\_for\\_Topology\\_Optimization](https://www.researchgate.net/post/Which_algorithm_is_used_by_commercial_FEA_solvers_for_Topology_Optimization)

- [34] MSC Nastran™ Topology Optimization [online]. c2005 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: [https://www.mscsoftware.com/assets/3154\\_NA2004NOVZTOPZLTDAT.pdf](https://www.mscsoftware.com/assets/3154_NA2004NOVZTOPZLTDAT.pdf)
- [35] DENK, M. ToOptiX [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://github.com/DMST1990/ToOptiX>
- [36] RIEG, F. Z88Arion [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://en.z88.de/z88arion/>
- [37] Fatigue (material) In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue\\_\(material\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(material))
- [38] RŮŽIČKA, M., Únavové křivky a faktory, které je ovlivňují [online]. [cit. 2020-06-12] Dostupné z: [http://www.kmp.tul.cz/system/files/duz\\_2017\\_2\\_ru.pdf](http://www.kmp.tul.cz/system/files/duz_2017_2_ru.pdf)
- [39] 3D tisk kovů: V čem spočívají výhody odlehčených kovových konstrukcí? [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/3d-tisk-kovu-k-cemu-slouzi-odlehcene-kovove-konstrukce/>
- [40] Italinox. Italinox [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/>
- [41] MOHAMMAD, K A, Aidy ALI, B B SAHARI a S ABDULLAH. Fatigue behavior of Austenitic Type 316L Stainless Steel. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2012, 36 [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.1088/1757-899X/36/1/012012. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/36/1/012012>
- [42] Přehled technologií 3D tisku. [online]. 2018. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [43] Meshmixer. [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://www.meshmixer.com/>
- [44] VRBKA, M., VAVERKA, M., Metoda konečných prvků. [online]. Ústav konstruování VUT v Brně. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1\\_mkp.pdf](http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf)
- [45] Nerezmaterial [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.nerezmaterial.cz/index.php?str=produkty&k=plechy&jakost=xWst-t-Nr-t--m-1-t-4404>
- [46] ehlinik. [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/>
- [47] i.materialise. [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://i.materialise.com/en/3dprint>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
<b>TO</b>	Topologická optimalizace
<b>FEA</b>	Analýza na základě metody konečných prvků
<b>SIMP</b>	Metoda pevné izotropní mikrostruktury s penalizací ( <i>Solid Isotropic Material with Penalization</i> )
<b>OMP</b>	Metoda na základě optimální mikrostruktury s penalizováním mezilehlých hodnot ( <i>Optimal Microstructures with Penalization</i> )
<b>NOM</b>	Metoda na základě neoptimální mikrostruktury ( <i>NonOptimal Microstructures</i> )
<b>ESO</b>	Optimalizace vyvíjející se struktury ( <i>Evolutionary Structural Optimisation</i> )
<b>BESO</b>	Bilineární ESO ( <i>Bilinear ESO</i> )
<b>SKO</b>	Metoda pozvolného odstraňování materiálu ( <i>Soft Kill Option</i> )
<b>ATOM</b>	<i>Abaqus Topology Optimisation Module</i>
<b>CAD</b>	Počítačem podporované designování ( <i>Computer Aided Design</i> )
<b>MKP</b>	Metoda konečných prvků
<b>RAM</b>	Paměť s náhodným přístupem ( <i>Random Access Memory</i> )
<b>FDM</b>	<i>Fused Deposition Modeling</i>
<b>LOM</b>	Výroba objektu laminováním ( <i>Laminated Object Manufacturing</i> )
<b>SLA</b>	Stereolitografie ( <i>Stereolithography</i> )
<b>DLP</b>	Tisk pomocí digitálního projektování ( <i>Digital Light Processing</i> )
<b>SLS</b>	Selektivní laserové sintrování ( <i>Selective Laser Sintering</i> )
<b>DMLS</b>	Přímé laserové sintrování kovu ( <i>Direct Metal Laser Sintering</i> )
<b>SLM</b>	Selektivní laserové tavení ( <i>Selective Laser Melting</i> )
<b>SHS</b>	Selektivní tepelné sintrování ( <i>Selective Heat Sintering</i> )
<b>BJ</b>	Tryskání pojiva ( <i>Binder Jetting</i> )
<b>MJP</b>	Tisk za pomoci více trysek ( <i>MultiJetPrinting</i> )



Symbol	Jednotka	Popis
<b>R<sub>m</sub></b>	[MPa]	Mez pevnosti
<b>R<sub>p0,2</sub></b>	[MPa]	Mez kluzu
<b>E</b>	[GPa]	Youngův modul
<b>ρ</b>	[kg.m <sup>-3</sup> ]	Hustota
<b>σ<sub>c</sub></b>	[MPa]	Únavová pevnost
<b>μ</b>	[-]	Poissonovo číslo
<b>σ</b>	[MPa]	Napětí
<b>N</b>	[-]	Počet cyklů
<b>f</b>	[Hz]	Frekvence
<b>m</b>	[kg]	Hmotnost
<b>T</b>	[s]	Perioda
<b>x</b>	[m]	Výchylka
<b>ω</b>	[s <sup>-1</sup> ]	Úhlová frekvence
<b>t</b>	[s]	Čas
<b>φ</b>	[-]	Fázový posun
<b>v</b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost
<b>a</b>	[m.s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení
<b>F</b>	[N]	Síla
<b>G</b>	[N]	Tíhová síla
<b>g</b>	[m.s <sup>-2</sup> ]	Gravitační zrychlení