



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
ODBOR REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ A ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ

Hybridní návrh dílů pro aditivní způsob výroby

AUTOR

Ing. Ondřej Vaverka

ŠKOLITEL

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

ŠKOLITEL SPECIALISTA

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2018



OBSAH

	1
OBSAH	3
1 NÁZEV V ČEŠTINĚ A ANGLIČTINĚ	5
1.1 Název v češtině:	5
1.2 Název v angličtině:	5
2 KLÍČOVÁ SLOVA ČESKY A ANGLICKY	6
2.1 Klíčová slova česky	6
2.2 Klíčová slova anglicky	6
3 ANOTACE	7
4 ÚVOD	8
5 SHRNUÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ ODBORNÉ PROBLEMATIKY	9
5.1 Metody topologické optimalizace kontinua	9
5.1.1 Penalizační přístup (SIMP)	10
5.1.2 Princip topologických derivací	10
5.1.3 Princip hladinové funkce	10
5.1.4 Princip fází	11
5.1.5 Diskrétní evoluční přístup (ESO/BESO)	11
5.2 Optimalizace struktur	12
5.2.1 Hierarchický přístup	12
5.2.2 Konkurenční přístup	12
5.2.3 Metoda FE^2	13
5.2.4 Hladinový přístup	13
5.2.5 Metoda izostatických čar	14
5.3 Optimalizace výrobitelnosti aditivními technologiemi	14
5.3.1 Minimalizace podpurných struktur	14
5.3.2 Úprava dílu pro aditivní výrobu	15
5.3.3 Optimalizace pro aditivní výrobu	15
5.4 Optimalizační softwary	16
5.4.1 Komerční softwary	16
5.4.2 Skripty	16
5.5. Návrhový proces topologicky optimalizovaných dílů	17
5.5.1 Návrh dílů s využitím mikro-prutové struktury	17
5.5.2 Hybridní návrh dílů	17
6 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ	18
6.1 Obecná analýza stavu poznání v topologické optimalizaci	18
6.2 Problematika výrobitelnosti	19
6.3 Návrh držáku satelitní antény ve spolupráci ÚK a LKE	20
6.4 Možnosti vylepšení použitého návrhového algoritmu od LKE	21
7 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE	22
7.1 Podstata disertační práce	22
7.2 Cíle disertační práce	22
7.3 Přínos disertační práce	22
8 VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY	23
8.1 Vědecká otázka č. 1	23
8.2 Pracovní hypotéza č. 1	23

8.3 Vědecká otázka č. 2	23
8.4 Pracovní hypotéza č. 2	23
9 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOUMÁNÍ	24
9.1 Materiál, zařízení a software	25
9.2 Postup	25
9.2.1 Experimentální stanovení omezení výroby	25
9.2.2 Vývoj a studium nosných typů struktur	25
9.2.3 Inovativní manuální návrh dílu s využitím získaných výsledků	26
9.2.4 Zobecnění a automatizace návrhového procesu použitého na díl	26
9.2.5 Ověření algoritmu na nové součásti pro kosmický průmysl	27
10 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ	28
11 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY V DANÉM ČASE	29
12 SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI	30
13 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S ŘEŠENÍM A JEJICH ZDROJE	31
14 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	32
15 BIBLIOGRAFIE	33
16 VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS	39

1 NÁZEV V ČEŠTINĚ A ANGLIČTINĚ

1

1.1 Název v češtině:

1.1

Hybridní návrh dílů pro aditivní způsob výroby.

1.2 Název v angličtině:

1.2

Hybrid design of components for additive manufacturing.

2 KLÍČOVÁ SLOVA ČESKY A ANGLICKY

2.1 Klíčová slova česky

Topologická optimalizace, Aditivní výroba, Gradientní struktura, Hybridní tvar.

2.2 Klíčová slova anglicky

Topology optimization, Additive manufacturing, Gradient structure, Hybrid design.

3 ANOTACE

Tato disertační práce se zabývá topologickou optimalizací dílů pro letectví a kosmonautiku určených k výrobě aditivními technologiemi. Bude zde vyvinuta a naprogramována metoda pro tzv. hybridní návrh dílů, tzn. topologicky optimalizovaných dílů, které se skládají jednak z objemových částí, jednak z mikro-prutových struktur. Na základě výpočtů a rešerše budou definovány různé typy průřezů a struktur, které budou studovány při specifickém způsobu zatížení. Jejich chování bude mechanicky testováno na vzorových dílech, které budou v rámci práce navrženy a vyrobeny. Algoritmus bude vyvíjen na držáku satelitní antény, již dříve optimalizovaném na ÚK ve spolupráci s LKE a ověřen na jiném dílu pro kosmický průmysl.

4 ÚVOD

V mnoha průmyslových odvětvích existuje poptávka po lehkých a zároveň pevných a tuhých dílech. Jsou to hlavně oblasti, kde je váha u dílů rozhodujícím faktorem, jako jsou letectví a vesmírný průmysl, kde je každý gram materiálu vykopen velkým množstvím drahého paliva. V takovýchto oblastech se již několik desetiletí používají v různých obměnách principy topologické optimalizace, která v podstatě řeší nejzákladnější konstruktérskou otázku: jak nejvhodněji rozložit materiál v daném prostoru?

Po celou dobu má topologická optimalizace dva zásadní problémy, nebo lépe řečeno omezení. Prvním z nich je materiál. V nejrozšířenějších optimalizačních přístupech je vypočítána relativní hustota materiálu v jednotlivých místech optimalizovaného prostoru v intervalu 0-1. Hodnoty z tohoto intervalu jsou poté různě upravovány tak, aby bylo rozložení materiálu binární čili 0 nebo 1. Jinými slovy materiál buď je, nebo není, což je konvenčně jediná smysluplná podmínka, ale zároveň je to omezení ideálního rozložení. Druhým problémem je komplexnost tvaru vzešlého z optimalizace, který je ve většině případů konvenčními způsoby nevyrobitelný.

V posledních dvou dekádách jsou na vzestupu aditivní kovové technologie, které umožňují výrobu složitých tvarů s vnitřními dutinami nebo strukturou a zároveň velice dobrými mechanickými vlastnostmi. To umožňuje odebrat většinu tvarových omezení, kladených na topologickou optimalizaci. Ta je zpravidla prováděna na konečnoprvkové síti, čili části s relativní hustotou mezi 0 a 1 jsou, zjednodušeně řečeno, rychle určitého objemu. Pokud dokážeme tento objem nevyplnit celý ale pouze jeho část, dá se říct, že tento prvek bude mít vzhledem k ostatním, které budou plné, nižší relativní hustotu. Tímto způsobem se dá obejít materiálové omezení topologické optimalizace a lze vyrábět díly složité a s proměnnou hustotou.

Součásti, u kterých je zkombinována struktura a plný materiál, je zpravidla označována jako *hybrid design*. K vytvoření takovýchto součástí bylo do nedávna zapotřebí velké intervence konstruktéra, který musel sám vybírat místa pro plný materiál, pro strukturu, následně vše kombinovat a dotvořit. V nejnovější verzi programu solidThinking Inspire 2018 existuje možnost tvorby hybridních součástí, které jsou velice efektní, protože části komponent jsou nahrazeny strukturou. Při detailním pohledu si lze ale všimnout, že struktura je jednoduše vytvořena z konečnoprvkové sítě a není nijak dále upravována. Motivací pro tuto disertační práci tak nadále zůstává přiblížení se automatizované metodě, pomocí které by bylo možné navrhnout hybridní součást, kde by byla struktura plně funkční, tzn., byla by přizpůsobena působícím silám a nesloužila by pouze k odlehčení.

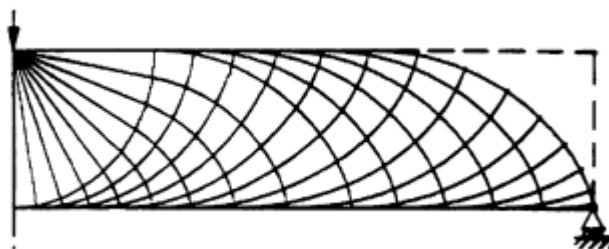
5 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ ODBORNÉ PROBLEMATIKY

5

5.1 Metody topologické optimalizace kontinua

5.1

První pokusy o vyřešení optimálního rozložení materiálu na základě výpočtu se datují do roku 1904, kdy vyšel článek *The limit of economy of material in frame structures* [1]. Jak je z názvu patrné, jednalo se o ideální rozložení nosníků tak, aby byla struktura co nejlevnější. V technickém smyslu jde o minimalizaci hmotnosti konstrukce při daném zatížení a kontinuální tloušťce materiálu (vyřezání z plechu) nebo při stejných nosnících. Kritériem pro minimalizaci bylo stejné přetvoření všech částí konstrukce, což lze zajistit, pouze pokud nosníky kopírují směry hlavních napětí. Vznikl tak systém ortogonálních nosníků, který je ve strukturální optimalizaci používán dodnes.



Obr. 5.1 Analytické řešení optimalizace tzv. Michellova nosníku [2].

Za zakladatele topologické optimalizace, jak ji známe dnes (i za prvního, kdo přišel s tímto termínem) lze považovat dánského vědce M. P. Bendsøa. Homogenizační přístup, který spolu s Noboru Kikuchim v roce 1988 publikoval [3], odstartoval prudký vývoj topologické optimalizace. Spojil tři do té doby používané metody. Tvarovou optimalizaci (1), která funguje na principu modifikace hranic již dané topologie, která je matematicky popsána; problém velikosti (2) který spočívá v hledání optima pro danou funkci (např. tloušťku) a homogenizační přístup (3), který říká, že materiál s jakoukoliv opakující se mikrostrukturou lze považovat za homogenní při správném zvolení jeho hustoty. Principem se stalo hledání optimálního rozložení hustoty, jakožto funkce, která může nabývat hodnot v intervalu 0-1 v hrubě zadaném prostoru.

Matematicky je topologická optimalizace problém hledání minima cílové funkce $F(\mathbf{u}(\rho), \rho)$ (nejčastěji poddajnosti) na prostoru Ω při dodržení zpravidla několika objemových podmínek G_i . Proměnnou minimalizované funkce je hustota $\rho(\mathbf{x})$. Problém se dá zapsat jako:

$$\min_{\rho} F = F(\mathbf{u}(\rho), \rho) = \int_{\Omega} f(\mathbf{u}(\rho), \rho) dV \quad (5.1)$$

$$G_0(\rho) = \int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}) dV - V_0 \leq 0 \quad (5.2)$$

$$\rho(\mathbf{x}) = 0 \vee 1; \forall \mathbf{x} \in \Omega \quad (5.3)$$

kde f je lokální funkce, například hustota energie přetvoření, \mathbf{u} je stavová funkce, V_0 je původní objem a \mathbf{x} je vektor souřadnic v prostoru Ω [4].

5.1.1 Penalizační přístup (SIMP)

Od začátku jsou velký problém homogenizačního přístupu střední hustoty mezi 0 a 1. Jedna z prvních metod jak toto řešit byla navržena autory Bendsøem [5] a Zhou a Rozvanym [6]. Je to metoda tzv. penalizace, kdy je spojitá hustota s ($s \in \langle 0; 1 \rangle$) převedena pomocí penalizačního koeficientu na diskretní hustotu ρ .

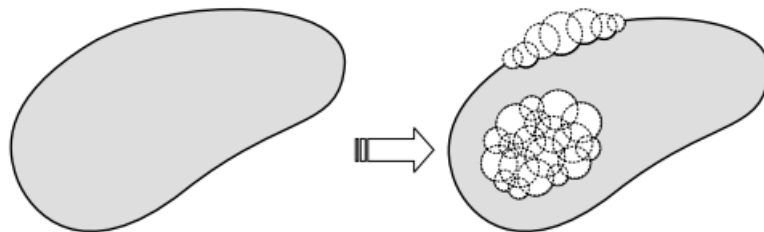
$$\rho = s^{1/p}; p > 1 \quad (5.4)$$

Obecně se tato metoda nazývá SIMP (z anglického *Solid Isotropic Material with Penalization*). V současné době je pro svou jednoduchost, numerickou stabilitu a efektivnost nejvíce používaná metoda pro topologickou optimalizaci v komerčních softwarech.

5.1.2 Princip topologických derivací (*Topological derivatives, Topological sensitivity*)

Tato metoda je založena na řešení vlivu vzniku infinitezimálně malé díry nebo trhliny v jakémkoliv místě. Protože jde o reakci na malou změnu, nazývá se někdy také jako metoda topologické citlivosti. Poprvé byla představena Eschenauerem [7] a rozpracována například Novotným [8] a Amstutzem [9]. Topologické derivace mohou být použity buď k přímé úpravě tvaru, nebo k návrhu umístění nových děr.

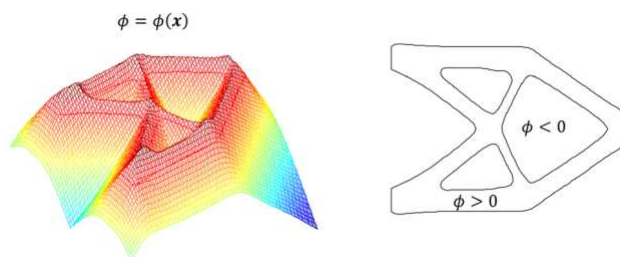
Velice zjednodušeně by se dalo říct, že metoda topologických derivací je speciální případ původní myšlenky homogenizace pro hustoty blízké 0.



Obr. 5.2 Vznik topologie pomocí umísťování děr [8].

5.1.3 Princip hladinové funkce (*Level set method*)

Tato metoda není založena na rozložení hustoty, ale hranice optimalizovaného tvaru je dána hodnotou 0 na hladinové funkci [10, 11]. Tam, kde má hladinová funkce hodnotu větší nebo rovnu 0, je oblast uvnitř optimalizovaného tvaru, kde je menší, je okolní prostor. Hladinová funkce se nejčastěji aktualizuje řešením Hamilton-Jacobiho funkce, což je v matematickém chápání nezbytná podmínka popisující hranici v obecném variačním principu. Citlivost pohybu hladinové funkce je dána tzv. rychlostní funkcí, která udává, jak rychle se mění hladiny. Pro lepší aktualizaci hladinové funkce jsou v některých variacích metody používány gradienty vycházející z topologických derivací [12].



Obr. 5.3 Princip hladinové funkce. Hranice topologie je tam, kde má funkce hodnotu 0 [13].

5.1.4 Princip fází (Phase field method)

5.1.4

Princip této metody byl původně vyvinut pro popis hranic mezi dvěma fázemi materiálu. Bourdin a Chambolle [14] tento matematický aparát využili k řešení topologické optimalizace, kdy je optimalizovaný prostor tvořen dvěma fázemi s hustotou 0 a 1. Funkcionál reprezentující Van der Waalsovou volnou energii je minimalizován pomocí Cahn-Hilliardovy rovnice, popisující hranice mezi dvěma fázemi [15].

5.1.5 Diskrétní evoluční přístup (ESO/BESO)

5.1.5

Rovnice (1) je klasicky řešena diskretizací prostoru Ω na konečnoprvkovou síť, ale funkce rozložení hustoty, se ve všech výše zmíněných metodách hledá jako spojitá. Diskrétní řešení rovnice (1) je matematicky velice náročné a zatím jen málo problémů bylo vyřešeno ke globálnímu optimu. Často se na řešení zkoušely používat, negradientní, přírodou inspirované nebo genetické algoritmy, ale jak je ukázáno v [16], tyto algoritmy nejsou efektivně použitelné ve srovnání s klasickými gradientními metodami.

Nicméně byla vyvinuta řada metod, která je založena na diskrétním řešení a na evolučním algoritmu. Metoda tzv. *Evolutionary structural optimization* neboli ESO je založena na pevnostní MKP analýze, kdy je optimalizovaný prostor zatížen, spočítány deformace a napětí a elementy s nejmenšími hodnotami napětí jsou odstraněny [17]. Optimalizací tohoto algoritmu je metoda BESO, což znamená *bi-directional* ESO. V této metodě jsou prvky nejen eliminovány, ale v případě potřeby mohou být zase přidány zpět [18].



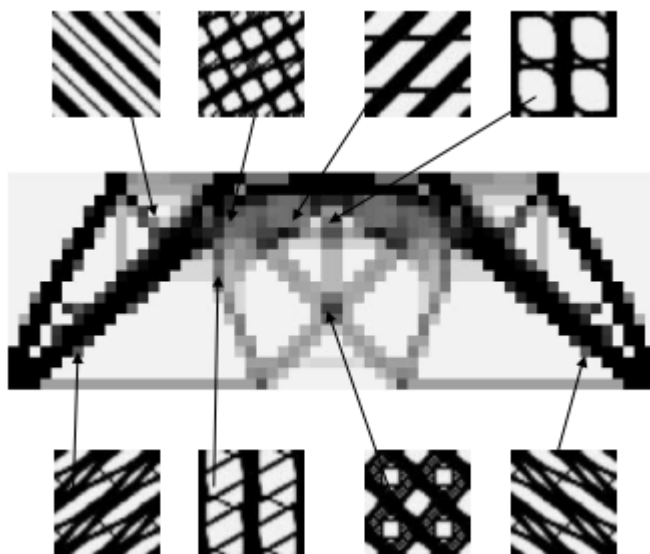
Obr. 5.4 Výsledek optimalizace použitím BESO. Čistě černo-bílé řešení [19].

5.2 Optimalizace struktur

Dlouhou dobu byl jediný smysluplný výsledek optimalizace tzv. „černo-bílé“ řešení. Nebylo možné realizovat střední hustoty, které výrazně vystupují jak v homogenizační teorii, tak v penalizační a okrajově i v ostatních výše zmíněných. Nástup kovových aditivních technologií ale zasáhl i tuto oblast a vyskytlo se hned několik způsobů, jak by bylo možné zpracovat i tzv. „šedá“ řešení. Ať už jde o kombinaci více materiálů, různé parametry výroby, které ovlivní porozitu a mechanické vlastnosti, nebo výrobu strukturovaných dílů [19]. V současné době je nejvíce zkoumána posledně zmíněná možnost, kdy jsou vyvíjeny metody pro optimalizaci nejen v makro měřítku, ale také na úrovni mikrostruktury a materiálových vlastností.

5.2.1 Hierarchický přístup

Historicky první komplexní optimalizace mikro i makro struktury je tzv. hierarchický přístup. Navazuje na klasickou homogenizační teorii, kterou používá k převedení efektivních parametrů mikrostruktury pro potřeby optimalizace v makro měřítku. Na rozdíl od klasické homogenizace [3] ale není proměnnou hustota celé optimalizované oblasti, ale je to rozložení materiálu v jednotlivých elementech. Metoda byla představena jak pro 2D úlohy [20], tak pro 3D [21].

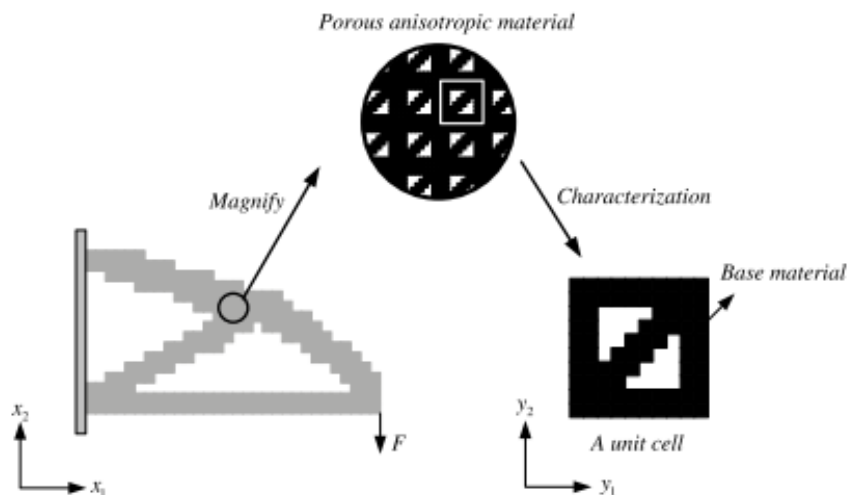


Obr. 5.5 Výsledek při použití hierarchické metody. Každý element může mít vlastní vnitřní strukturu [20].

5.2.2 Konkurenční přístup (*Concurrent approach*)

Stejně jako hierarchická metoda navazuje na homogenizaci, tato metoda využívá penalizační metody. Je zde ale zase rozdělena na mikro a makro strukturu. Pro optimalizaci mikrostruktury používá klasickou SIMP a pro optimalizaci v makro měřítku vyu-

žívá tzv. PAMP (*Porous Anisotropic Material with Penalization*) [22]. Tyto dva pohledy na optimalizovaný prostor jsou řešeny odděleně a poté spojeny do jednoho problému, kde jsou konkurenčně optimalizovány. Oproti ostatním optimalizačním metodám zabývajících se mikrostrukturou je zde navržen pouze jeden typ mikrostruktury, který je použit na celý díl. Řešení tedy není „černo-šedé“ ale čistě „šedé“ bez plných částí. Touto metodou se intenzivně zabývá univerzita v Delianu v Číně a krom klasické minimalizace poddajnosti, existují řešení zabývající se vlastními frekvencemi [23], vedením tepla [24] nebo nejistotami v zatížení [25].



Obr. 5.6 Uniformní struktura při použití konkurenční metody [22].

5.2.3 Metoda FE^2

5.2.3

Jako zástupce diskrétního přístupu k řešení je zde uvedena metoda nazývaná jako FE^2 [26]. Je založena na evolučním algoritmu BESO aplikovaném na dvě úrovně optimalizace. V prvním kroku je vypočítáno přetvoření v makro měřítku. Na úrovni mikrostruktury je poté maximalizována hustota energie přetvoření jednotlivých elementů a na jejím základě je aktualizována zpět makrostruktura. Výhoda této metody je její robustnost a zvládání nelinearit v materiálovém měřítku [27].

5.2.4 Hladinový přístup

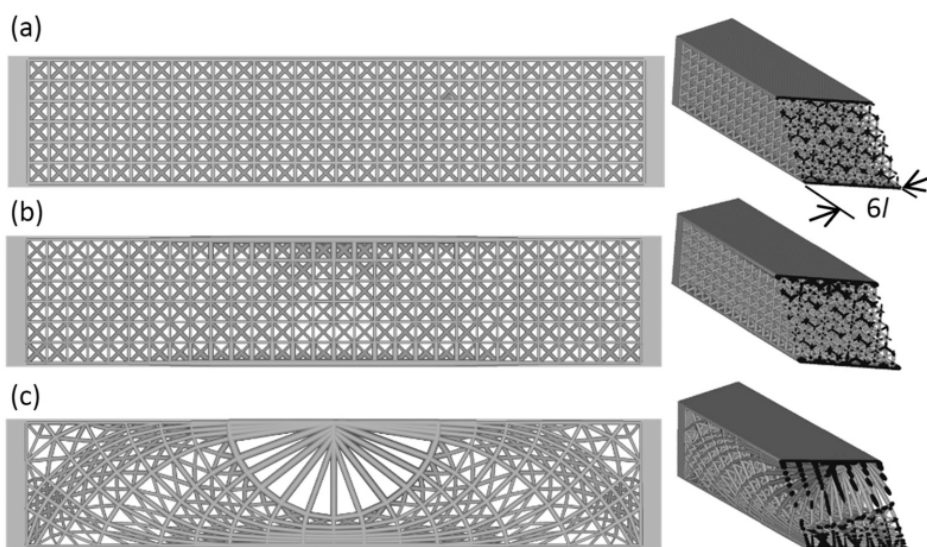
5.2.4

(*Level set based approach*)

Spíše pro pořádek je zde uváděna i více úroňová hladinová metoda představena nedávno R. Sivapuramem [28]. Optimalizace je rozdělena na dvě úrovně, které lze počítat paralelně a spojené homogenizací, popisující vztah mezi mikrostrukturou a jejími makro vlivy. Lze ji nastavit jak pro jednotnou mikrostrukturu, tak pro jedinečnou strukturu každého elementu.

5.2.5 Metoda izostatických čar

Velice nedávno byla představena úplně nová metoda, která posouvá strukturální optimalizaci o další krok dál [29]. Je založena na využití softwaru Optistruct a jeho možnostech optimalizace. V posledních verzích software umožňuje optimalizovat topologii nejen klasickým plným materiálem, ale i mikro-prutovou strukturou. Tu lze navíc progresivně gradovat podle zatížení (měnit průměry prutů). Stále je ale struktura, stejně jako ve všech výše zmíněných metodách, závislá na výpočetní konečnoprvkové síti. Mezikrok, přidaný S. Daynesem, dokáže natvarovat strukturu podle napětí v dílu pomocí tzv. izostatických čar. Tím pádem je struktura daleko efektivněji využita a dochází k velkému zlepšení tuhosti. Tato metoda existuje zatím pouze ve 2D.



Obr. 5.7 Srovnání nosníků s a) uniformní strukturou, b) gradientní strukturou, c) tvarově optimalizovanou strukturou [29].

5.3 Optimalizace výrobitelnosti aditivními technologiemi

Obecně se říká, že aditivně lze vyrobit cokoliv, což ale není zcela pravda. Vyrobit to lze, ale největší problém jsou převyslé části dílů, které nejsou stavěny na již existující objem. Takové části potřebují dodatečnou podpůrnou strukturu. V rámci optimalizace dílů pro výrobu aditivními technologiemi se řeší hlavně minimalizace potřebných podpor. Lze vysledovat 3 základní přístupy: optimalizace samotných struktur (1), úprava dílu po jeho návrhu (2) nebo zakomponování pravidel pro aditivní výrobu přímo do algoritmu návrhu (3), zde topologické optimalizace.

5.3.1 Minimalizace podpůrných struktur

Minimalizovat objem podpůrných struktur lze dvěma způsoby. Buď se upraví tvar struktur tak, aby stále plnily svou funkci, ale zároveň aby měly co nejmenší objem [30] nebo se hledá nejvhodnější natočení dílu vzhledem k podložce. Při ideálním natočení je objem podpor znova minimální [31]. Všechny tyto metody nijak neupravují geometrii dílu.

5.3.2 Úprava dílu pro aditivní výrobu

Metody pro optimalizaci dílů pro aditivní výrobu, které jsou aplikovány až jako post-processing na vzniklou geometrii, se zabývají hlavně dodatečným domodelováním podpůrných částí, které jsou posléze součástí dílu. Výsledný tvar by měl být z většiny samonosný [32, 33].

Unikátní metodou je postup navržený Wangem [34], který díl nijak neoptimalizuje, ale vytvoří z něj skořepinu, kterou vyplní příhradovou nosnou konstrukcí.



Obr. 5.8 Vyztužení dílů pro 3D tisk [34].

5.3.3 Optimalizace pro aditivní výrobu

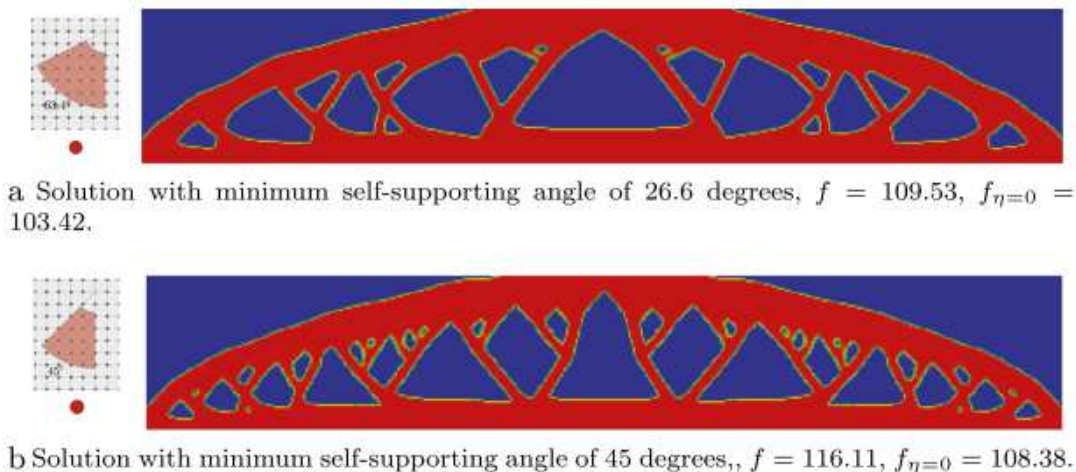
Nejsofistikovanějším přístupem je zahrnutí pravidel pro aditivní výrobu jako podmínky přímo do návrhového algoritmu. Zpravidla je řešen úhel mezi plochou na dílu a podložkou, respektive eliminují se úhly menší než 45° .

Jedním z přístupů je eliminace založená na filtraci vložené do hustotové metody. Gaynor [35] navrhuje filtr hustot na základě hodnot elementů pod ním, které by měly zajišťovat podporu. Velice podobný přístup používá také Langelaar [36, 37].

Qian [38] využívá metodu hladinové funkce a minimalizuje jednak úhel ploch, jednak velikost převisu. Obojí je zde zahrnuto jako dodatečná geometrická okrajová podmínka čili je to přímo součástí minimalizačního algoritmu, nikoliv filtrace.

Allaire [39] zavádí pro zohlednění převislých ploch vlastní geometrický tvarový funkcionál, který je samostatně minimalizován.

Mezi další zajímavé metody pro minimalizaci podpor v rámci algoritmu lze zařadit práci Mirzendehdela [40], který v jednom algoritmu optimalizuje jak díl, tak současně i podpory.



Obr. 5.9 Filtrování geometrie pro různé úhly [35].

5.4 Optimalizační softwarý

5.4.1 Komerční softwarý

Pro topologickou optimalizaci v průmyslu existuje řada více či méně specializovaných softwarů. Jedním z nejpropracovanějších je produkt společnosti Altair Hyperworks - Optistruct a jeho derivát Inspire. Optistruct je na trhu již více jak 20 let a v současné době pokrývá většinu optimalizačních problémů od klasického tuhostního nebo hmotnostního problému, přes vlastní frekvence, vedení tepla až po optimalizaci gradientních struktur a optimalizaci k různým výrobním technologiím i aditivním.

Mezi další softwarý lze určitě počítat všechna velká výpočetní jádra pro MKP analýzy, kdy Abaqus, Ansys, Nastran, nebo Tosca mají své moduly pro topologickou optimalizaci.

V posledních letech, kdy se stává topologická optimalizace velice populární, dostávají se moduly pro topologickou optimalizaci i do obyčejných CAD modelářů jako Autodesk Inventor nebo SolidWorks.

5.4.2 Skripty

Většina článků týkajících se topologické optimalizace obsahuje matematický popis daného algoritmu, citlivostní analýzu, příklad použití a dosažené výsledky. V některých případech ale je čtenáři dán k dispozici i optimalizační kód v některém z programovacích jazyků. Ve většině je to MATLAB, lze ale najít i Python a jiné.

Jedním z nejcitovanějších je článek popisující 99 řádkový kód od Ole Sigmunda [41]. Svou popularitu si získal hlavně jednoduchostí a přehledností s kterou vysvětluje jednoduchou penalizační metodu. Andreassen [42] kód dále upravil a publikoval 88 řádkovou variantu s vylepšeným filtrováním a hlavně efektivitou. Challis [43] dále publikovala skript pro metodu hladinové funkce, Suresh [44] pro metodu topologické citlivosti a Huang [45] pro BESO. Všechny výše zmíněné skripty řeší optimalizaci pouze ve 2D. Existuje ale i rozšíření do 3D, které publikoval Liu [46].

5.5. Návrhový proces topologicky optimalizovaných dílů

5.5

Klasický postup při topologické optimalizaci zahrnuje několik nezbytných kroků. Nejprve je to určení návrhového prostoru neboli obálkového dílu, anglicky design space. To je prostor, kde může algoritmus rozvrhnout materiál. Dále je třeba vymezit části, které se nesmějí optimalizovat, jako například místa, kde působí vazby, síly, nebo kde je materiál nutný z funkčního hlediska, například závitový spoj. Když proběhne optimalizační výpočet, je navržená geometrie z výpočetního softwaru exportována ve formátu STL. Jiný formát není možný, protože výpočet probíhá na konečnoprvkové síti [47].

Nejzdlouhavější částí je poté převod hrubých dat z výpočtu na objemový CAD model dílu. Buď se použije speciální program, který dokáže mesh pokrýt odpovídajícími parametrickými plochami, z kterých následně udělá objem, nebo jsou STL data použita pouze jako vzor a vzniká úplně nový model v klasickém CAD modeláři [48].

Posledním krokem je ověřovací pevnostní analýza pomocí MKP. Pokud model nesplňuje požadavky kladené na daný díl, je použit znova jako obávkový díl a celý proces se iterativně opakuje, dokud nejsou splněna všechna kritéria.

5.5.1 Návrh dílů s využitím mikro-prutové struktury

5.5.1

Pokud je díl optimalizován tak, že celý návrhový prostor může být vyplněn pouze strukturou, což je v literatuře častý případ, pak je návrhový proces zjednodušen. Struktura vzniká na základě konečnoprvkové sítě a většinou je to BCC struktura (Body centered cubic – objemově středěná krychle) nebo její 2D varianta. V takovém případě je modelování jednoduché, neboť struktura lze snadno vytvořit parametricky. Struktury jsou v posledních letech již i gradientní, takže nejsou pouze odlehčovací výplň, ale mají už i potenciál, alespoň částečně přenášet jisté namáhání [49, 50].

Zajímavým článkem je studie Sigmunda [51], který v ní ukazuje, že pokud jde pouze o tuhostní problém, tak nejlepší řešení je pouze objemový materiál rozložený ve tvaru skořepiny nebo plechu s proměnnou tloušťkou.

Při prvním návrhu držáku satelitní antény pro projekt ESA, který realizovalo zdejší pracoviště ve spolupráci s firmou LKE byl použit tento přístup.

5.5.2 Hybridní návrh dílů

5.5.2

Hybridní návrh kombinuje obě předchozí varianty. Má základní nosnou kostru z objemové optimalizace doplněnou mikro-prutovou strukturou.

V takovém případě je zjednodušena část modelování, kde je struktura navržena parametricky ale je zde komplikovanější začátek návrhu, kdy musí konstruktér navrhnout poměr mezi objemovou a strukturální částí. Jedna z metod pro hybridní návrh je například práce Tanga [52], která využívá jak objemové části, tak gradientní strukturu.

Další vývoj držáku satelitní antény také vedl na hybridní koncepci dílu. Vyztužení nosných částí objemovými pruty umožnilo další rapidní redukci zastavěného prostoru. Návrhový proces se skládal z objemové a paralelně s tím ze stejné mikro-prutové optimalizace. Tyto dva tvary byly následně spojeny v jeden a optimalizovány dále dohromady.

6 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

Úkolem řešerše bylo zjistit stav poznání v oblasti topologické optimalizace a návrhu optimalizovaných součástí ve spojení s aditivními technologiemi. A díky tomu zjistit možnosti vylepšení algoritmu použitého pro návrh držáku satelitní antény pro společnost ESA.

6.1 Obecná analýza stavu poznání v topologické optimalizaci

Rešerše pokrývá vývoj strukturální a topologické optimalizace od průkopníka na začátku 20. století [1] přes rozvoj v 90. letech až po prudký nárůst zájmu v 21. století. Jak se postupně spojovala s MKP, počítači a pokročilými způsoby výroby, tak se stále rychleji rozvíjela.

Rešerše se omezila pouze na relevantní témata a byla úplně vypuštěna topologická optimalizace pro elektrotechniku, optiku, fluidní aplikace nebo topologickou optimalizaci mikročipů.

Z historicky první práce [1] lze určitě použít myšlenku efektivního využití prostoru nosnou strukturou, která je vedena ve směru hlavních napětí a ortogonální napojování nosníků.

Pokud se hledá spojitě řešení a nebude se uvažovat struktura, tak bylo vyvinuto značné množství optimalizačních metod. Rešerše se zmiňuje pouze o nejznámějších, ale samozřejmě nejsou v ní obsaženy všechny. Společným znakem pro zmíněné metody je princip založený na diskretizaci optimalizovaného objemu a využívání základních principů metody konečných prvků.

Nejpoužívanější metodou je penalizační metoda SIMP [4]. Důvodem je její jednoduchost, numerická stabilita a zaručená konvergence. Ostatní zmíněné metody se potýkají s problémy jako je nemožnost vytvořit nové díry v metodě hladinové funkce, náhodnost rozmístění děr v metodě topologické citlivosti, výpočtová náročnost u principu fází nebo problematická konvergence u evolučních algoritmů. Tyto zmíněné problémy se týkají pouze metod v jejich originálním tvaru. Většina problémů je v různých variantách řešena kombinací dvou a více metod dohromady. Často je například s výhodou kombinována metoda hladinové funkce a metoda topologické citlivosti, čímž se fakticky řeší problémy obou metod [12]. Často je ale výsledkem řešení takovýchto problémů kód, který ve svém důsledku napodobuje metodu SIMP [9].

Jedním z hlavních problémů metody SIMP je její vlastní princip, kterým je penalizace středních hustot tzv. šedých elementů. Různou volbou penalizačního koeficientu lze dostat v extrémním případě různé tvary. Aby se nemusely buňky penalizovat, začali se vědci zabývat rozložením materiálu uvnitř jednotlivých elementů. Z této úvahy vznikly přístupy, které řeší optimalizaci daného prostoru na 2 úrovních. Prakticky každá „klasická“ metoda má svůj protějšek v mikro/makro optimalizaci, respektive pracuje na stejném principu.

Tab. 6.1 Analogie v makro a mikro optimalizaci.

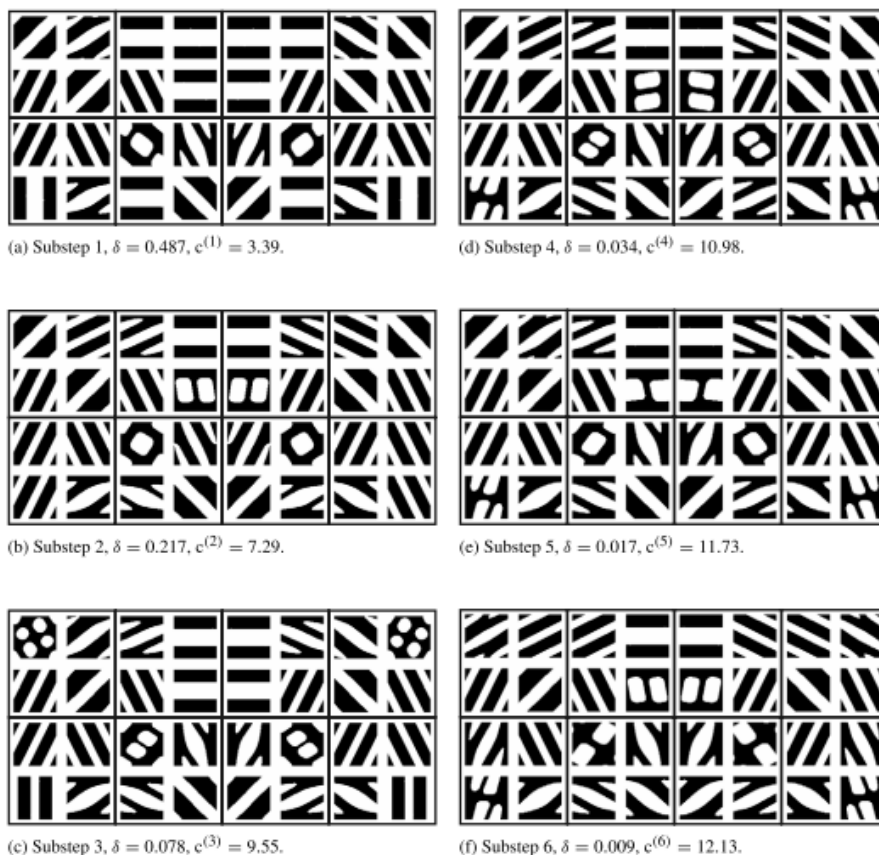
Objemová metoda	Strukturální přístup
SIMP	Konkurenční přístup (SIMP+PAMP)
BESO	FE ²
Homogenizační metoda	Hierarchický přístup
Metoda hladinové funkce	Hladinový přístup

Různé je propojení mikro a makro optimalizace. Hierarchický přístup optimalizuje nejdříve materiál na úrovni mikrostruktury a pak na úrovni makrostruktury, metoda FE² jde opačným směrem a konkurenční přístup optimalizuje obojí zároveň.

6.2 Problematika vyrobiteľnosti

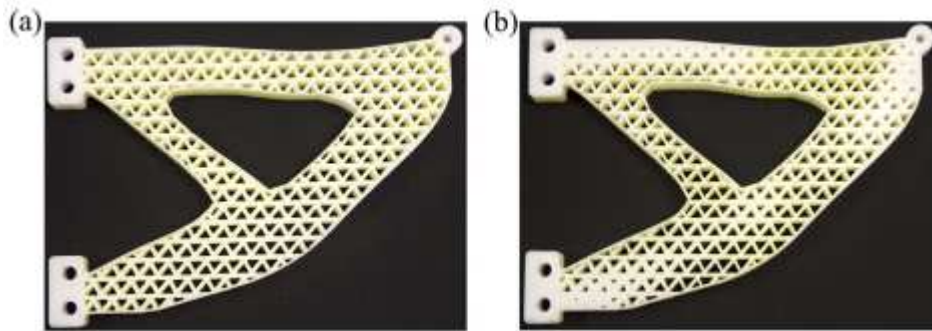
6.2

Jak ukazuje kapitola 5.2 je optimalizace jednotlivých buněk struktury na velmi pokročilé úrovni. Na obrázku 5.5 je ukázka rozmanitých struktur v rámci jednoho dílu. A to je vlastně největší problém těchto struktur. Valná většina optimalizačních algoritmů je řešena matematikou. Úlohy jsou velice dobře zvládnuty matematicky, ale jsou úplně mimo realitu, co se týče převedení do praxe, i kdybychom upustili od toho, že je většina ve 2D. Buňky jsou příliš složité i na možnosti aditivních technologií, nenavazují na sebe a nemají žádnou minimální tloušťku materiálu [20]. Tyto algoritmy tedy nejsou použitelné pro výzkum, kde se předpokládá aplikační využití.



Obr. 6.1 Evoluce rozložení mikrostruktury pro dosažení rovnováhy v makro měřítku [26].

Pokud se řešerše zaměří na díly fyzicky vyrobené, jsou to zpravidla všechno jednotné struktury sestávající z prutů kruhového průřezu v BCC mřížce. Existují metody založené například na BESO metodě [52], která dokáže vytvořit i gradientní strukturu, takže její vlastnosti jsou anizotropické, popřípadě založené na SIMP. Tato se dostala i do praxe a je využívána programem Optistruct.



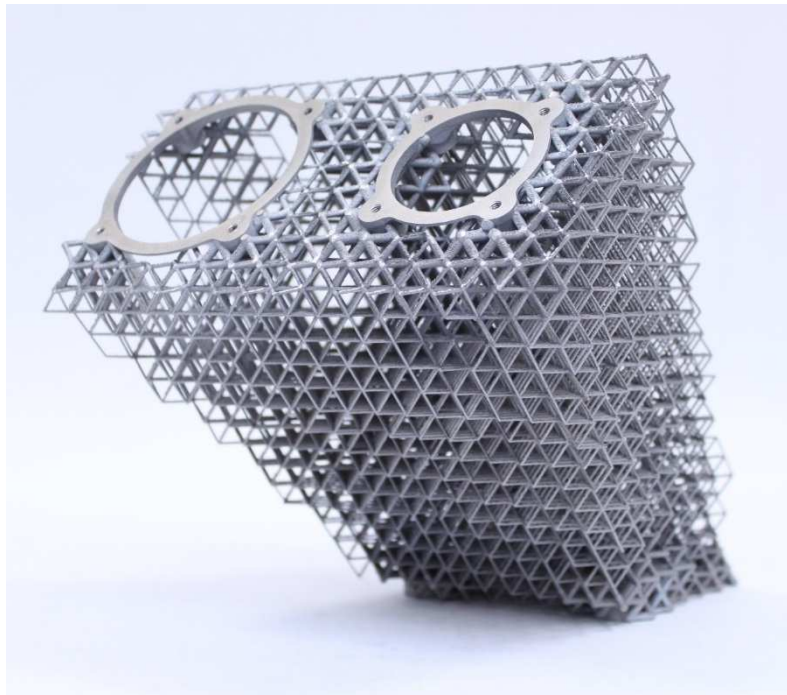
Obr. 6.2 a) díl vyrobený s uniformní strukturou b) díl s gradientní strukturou [50].

6.3 Návrh držáku satelitní antény ve spolupráci ÚK a LKE

Původní algoritmus pracoval na bázi SIMP řešiče v programu ANSYS...

Ve druhé fázi byla optimalizace řešena jako hybridní tvar...

Myšlenka obsažená v algoritmu byla dobrá, ale vzhledem k tomu, že to byl počátek vývoje, tak měla spoustu funkčních nedostatků. Hlavními bylo složité nastavení a komplikovaná práce s ním.



Obr. 6.3 První demonstrátor držáku satelitní antény.

6.4 Možnosti vylepšení použitého návrhového algoritmu od LKE

Z rešerše lze vidět, že ve spojení s topologickou optimalizací je velmi málo, nebo vůbec řešena vyrobiteľnosť struktur a pokud už se návrh realizuje, tak je to většinou jednoduchá BCC mřížka. Volný prostor se zde tedy otevírá pro topologickou optimalizaci se strukturami, které jsou vhodné pro výrobu a zároveň nejsou tak jednoduché.

Dalším nedostatkem je nevyužívání plného potenciálu aditivně vyráběných mikroprutových struktur. Všechny mají stejný kruhový průřez, přičemž už průřez křížový může být pro některé typy namáhání a směry působení zatížení daleko vhodnější.

Jako velká výzva se jeví stanovení ideálního poměru mezi objemovou částí dílu a částí tvořenou mikroprutovou strukturou tak, aby měl díl maximální možnou tuhost a minimální možnou hmotnost. V současné době je na zvážení uživatele, kolik procent materiálu chce v návrhovém prostoru použít a kolik procent z něj by měla být struktura. Je to systém pokus omyl, vedený hlavně cílovou hmotností, která nemusí být ani zdaleka optimální. Toto bude prozkoumáno, ale nejspíše bude nad rámec této disertační práce přijít s univerzálním pravidlem pro stanovení ideálního poměru. Bude tak stanoven alespoň ideální poměr pro konkrétní díly.

V neposlední řadě bude znova navržen držák pro satelitní anténu. Nové možnosti by měl přinést hlavně použitý materiál, který se změní z AlSi10Mg na Ti6Al4V. Také zde budou použity složitější struktury pro přenos zatížení.

Ve výsledku by všechny nové poznatky měly zaplnit místo pro automatizovaný hybridní návrh dílů, který zde úplně chybí.

7 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

7.1 Podstata disertační práce

Disertační práce se bude zabývat vývojem optimalizačního kódu, který umožní nahrazení objemové topologické optimalizace optimalizací pro hybridní návrh s využitím mikro-prutové struktury. Smyslem je, aby struktura i pruty samotné byly tvarovány podle působícího zatížení a zároveň byly samonosné, tedy vhodné pro aditivní výrobu. Jednotlivé typy struktur budou ověřovány experimentálně stanovením jejich mechanických vlastností. Na základě experimentů budou definovány vhodné typy struktur pro typizované namáhání v tahu/tlaku, ohybu a krutu. Ty budou v poslední fázi vývoje implementovány do optimalizačního kódu. V rámci práce budou navrženy dva speciální díly pro kosmický průmysl.

7.2 Cíle disertační práce

Cílem je vyvinout univerzální algoritmus, který za použití metod topologické optimalizace dokáže navrhnout ideální díl kombinující objemové a mikro-prutové části. Tím se usnadní zdlouhavé navrhování hybridních dílů vyráběných aditivními technologiemi zejména pro letectví a kosmonautiku.

Mezi dílčí cíle patří:

- Experimentální stanovení omezení výroby.
- Vývoj a studium nosných typů struktur.
- Inovativní manuální návrh dílu s využitím získaných výsledků.
- Zobecnění a automatizace návrhového procesu použitého na díl.
- Ověření algoritmu na nové součásti pro kosmický průmysl.

7.3 Přínos disertační práce

V současné době se hybridní návrh dílů moc nepoužívá, protože je složitější než klasická, pouze objemová, optimalizace. Jak ale dokazují články Gebisy a Tanga [48, 52], tak díl vytvořený hybridním návrhem je při zachování tuhosti lehčí.

Technologickým přínosem této disertační práce bude vytvoření automatického návrhového algoritmu, který zjednoduší tvorbu hybridních dílů a tím umožní jejich větší použití v praxi.

Vědeckým přínosem bude zjištění vlivu tvaru průřezu prutů na celkovou tuhost dílu, který není v dnešní době brán na zřetel, jak upozorňuje např. Kessler [56].

8 VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

8

8.1 Vědecká otázka č. 1

8.1

Jaké průřezy prutů a jaké typy struktur jsou nejvhodnější pro jednotlivé typy namáhání?

8.2 Pracovní hypotéza č. 1

8.2

V současné době se mikro-prutové struktury využívají hlavně jako odlehčení popřípadě řízeně deformovatelný materiál [53]. Z tohoto důvodu se zkoumají hlavně mechanické vlastnosti při tlakovém popřípadě tahovém zatížení. Doposud se zkoumal vliv rozložení prutů v objemu [54, 55]. Jak ale stejná autorka zdůrazňuje v [56], tak jen velice málo autorů bere v úvahu vliv průřezu prutů na výslednou tuhost. Jak ale ukazují výsledky s jinými typy struktur, např. tzv. gyroidními [57], tak konstantní kruhový průřez prutu nemusí být ideální. Navíc úplně chybí zkoumání mechanických vlastností struktur při jiném než tlakovém/tahovém namáhání.

8.3 Vědecká otázka č. 2

8.3

Jaký je optimální poměr objemové a mikro-prutové části dílu z hlediska jeho tuhosti a zároveň hmotnosti?

8.4 Pracovní hypotéza č. 2

8.4

Jak ukazuje Sigmund [51] tak neoptimálnější rozložení hmotnosti u dílů z hlediska minimalizace poddajnosti je plech s různou šířkou nebo rozložení materiálu do skořepiny. Vylučuje také použití struktur jako optimálního rozložení materiálu pro tento případ. Jak ale ukazují dva na sobě nezávislé články [48, 52], které se zabývají optimalizací stejného dílu, lze při použití hybridního designu dosáhnout nižších hmotností, než u pouze objemové optimalizace za současného zachování funkčnosti.

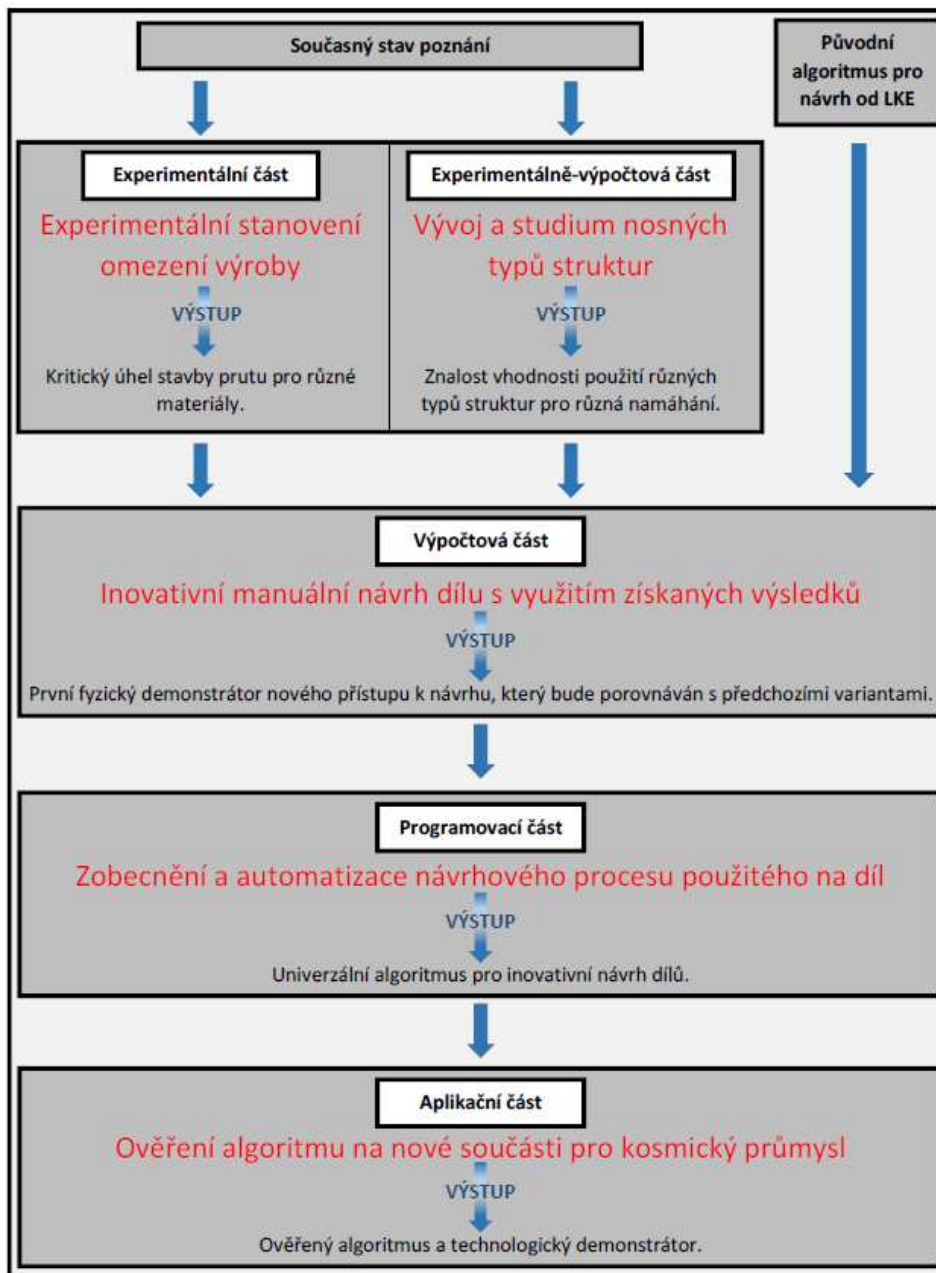
Pokud se tedy zkombinují tyto dva protichůdné požadavky – maximální tuhost a minimální hmotnost - tak by měl mezi nimi existovat poměr, který by byl optimální. V současné době je u tuhostních výpočtů hmotnost ponechána na uvážení konstruktéra, který zadá procento použitého materiálu a tím nepřímo hmotnost výsledného dílu.

9 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOU- MÁNÍ

Disertační práce je koncipována jako aplikovaný výzkum a má 4 hlavní části.

- 1) Analýza současného stavu poznání.
- 2) Experimentální a výpočtová část.
- 3) Programovací část (syntéza poznatků z experimentů a výpočtů).
- 4) Aplikační část.

Postup je popsán v blokovém schématu na obrázku 9.1.



Obr. 9.1 Blokové schéma projektu disertační práce.

9.1 Materiál, zařízení a software

9.1

Materiály použité v první a druhé fázi vývoje budou hliníkové slitiny AlSi10Mg a AlSi7Mg, titanová slitina Ti6Al4V a nerezová ocel 316L. Všechny prášky by měly být v jemnější frakci, protože bude testována menší výška nanášené vrstvy, než je obvyklých 50 μm . Ve třetí fázi, ve které proběhne třetí evoluce návrhu držáku satelitní antény pro ESU, bude použita titanová slitina Ti6Al4V.

Výroba bude probíhat na zařízení pro aditivní technologii Selective Laser Melting SLM 280 HL. Případné tepelné zpracování vzorků nebo dílů bude provedeno v laboratorní žíhací peci LH 30/13, digitalizace optickým skenerem ATOS Triplescan. Pro materiálové testy bude využito metalografické vybavení dostupné na ÚMVI a počítačová tomografie na CEITECu.

Software pro optimalizaci bude Optistruct od firmy Altair Hyperworks. Vlastní kód bude psán v prostředí MATLAB. Pro MKP analýzy a prvotní návrhové výpočty bude využit ANSYS Workbench.

9.2 Postup

9.2

9.2.1 Experimentální stanovení omezení výroby

9.2.1

Smyslem této fáze je nejprve zjistit kritický úhel naklonění prutu ve struktuře, při kterém se již prut nevyrobí, nebo vyrobí ale s vážnými defekty. Studovat se bude vliv výšky nanášené vrstvy pro více materiálů.

V rámci této počáteční fáze vývoje bude provedena série testů pro 4 různé materiály a pro různé výšky nanášené vrstvy (50 μm , 40 μm , 30 μm). Dohromady minimálně 12 testovacích staveb. Všechny vzorky budou mít standardní kruhový průřez.

Vyrobené vzorky budou skenovány a porovnány s CAD daty. Pomocí srovnání a snímků z mikroskopu bude určena kvalita prutů.

Výsledkem bude kritický úhel stavby prutu pro jednotlivé materiály, pod který nebude mít smysl v optimalizaci navrhnout pruty ve strukturách.

9.2.2 Vývoj a studium nosných typů struktur

9.2.2

Smyslem druhé fáze je nalezení nejvhodnějších průřezů prutů a struktur, pro jednotlivé základní druhy namáhání.

V první etapě bude definováno několik druhů průřezů a bude testována jejich vyrobiteľnost. Ověří se poznatky z první fáze a rozšíří se o minimální velikost prutu pro jednotlivé průřezy. Může se ukázat, že některé druhy průřezů nepůjdou vyrobit, nebo půjdou vyrobit až od určité velikosti.

Ve druhé etapě budou vyráběny speciální strukturované díly, které budou namáhány pouze jedním způsobem – tah/tlak, ohyb, krut. Vzorky budou v klasické BCC struktuře. Nedílnou součástí této etapy bude návrh a výroba multifunkčního zatěžovacího zařízení, které bude schopno jednoduchou změnou konfigurace provádět všechny uvažované typy zatížení. To bude pravděpodobně vyrobeno v rámci podpůrné bakalářské práce či studentského projektu.

Ve třetí etapě budou perspektivní průřezy použity pro výrobu jiných typů struktur než BCC a bude se zkoumat vliv a vhodnost jiných typů struktur.

Výsledkem této fáze bude znalost vhodnosti použití různých typů struktur pro různé druhy namáhání. Topologicky optimalizované díly tak budou schopny přenášet zatížení i strukturovanou, ne jen objemovou částí.

Tato fáze by měla poskytnout odpověď na vědeckou otázku číslo 1.

9.2.3 Inovativní manuální návrh dílu s využitím získaných výsledků

Smyslem třetí fáze je vývoj nového přístupu k řešení topologické optimalizace dílů za použití speciálních nosných struktur.

V první etapě bude studován vliv poměru mezi objemovou částí a mikro-prutovou strukturou na tuhost a hmotnost dílu. Stejná obálka bude použita pro optimalizaci objemovou a paralelně s tím i optimalizaci za použití struktur. Tyto dva výsledky budou složeny dohromady a bude provedena pevnostní analýza. Bude měněn poměr mezi strukturou a objemem (od plně objemové optimalizace po plně strukturovanou geometrii) a bude hledán optimální poměr. Struktura bude v této fázi pouze klasická BCC s kruhovým průřezem.

Ve druhé etapě bude díl rozdělen na oblasti s převládajícím druhem namáhání a budou vybrány oblasti pro možnou aplikaci speciálních struktur z druhé fáze řešení.

V poslední etapě bude proveden kompletní návrh dílu držáku satelitní antény z titanové slitiny. Výsledný model a realizovaný díl bude porovnán s předchozími variantami řešení.

Výsledkem bude první demonstrátor nového přístupu k hybridnímu návrhu dílů, který bude využívat speciální typ nosné struktury.

V první etapě by měla být zodpovězena vědecká otázka číslo 2.

9.2.4 Zobecnění a automatizace návrhového procesu použitého na díl

Smyslem čtvrté fáze řešení je naprogramování algoritmu, který by dokázal poloautomaticky navrhnout díl na základě zkušeností z fází 1, 2 a 3. Prostředí pro programování bude MATLAB ve spojení s Optistructem.

V první etapě bude naprogramována metoda skládání objemové a mikro-prutové části s kruhovým průřezem struktury. Pokud se ve fázi dva ukáže univerzální vztah pro určení ideálního poměru mezi objemem a strukturou, tak zde bude použit. Pokud ne, tak bude návrh iterativní.

Ve druhé etapě bude na základě MKP algoritmu naprogramován kód pro rozpoznávání oblastí s jedním převládajícím namáháním.

Na základě toho bude ve třetí etapě doprogramována schopnost algoritmu definovat nejlepší typ průřezu na základě znalostí z fáze 2.

Výsledkem této fáze bude univerzální algoritmus se zcela novým přístupem k využití struktur jako nosných částí, který díky tomu dokáže navrhnout extrémně lehké a zároveň tuhé díly.

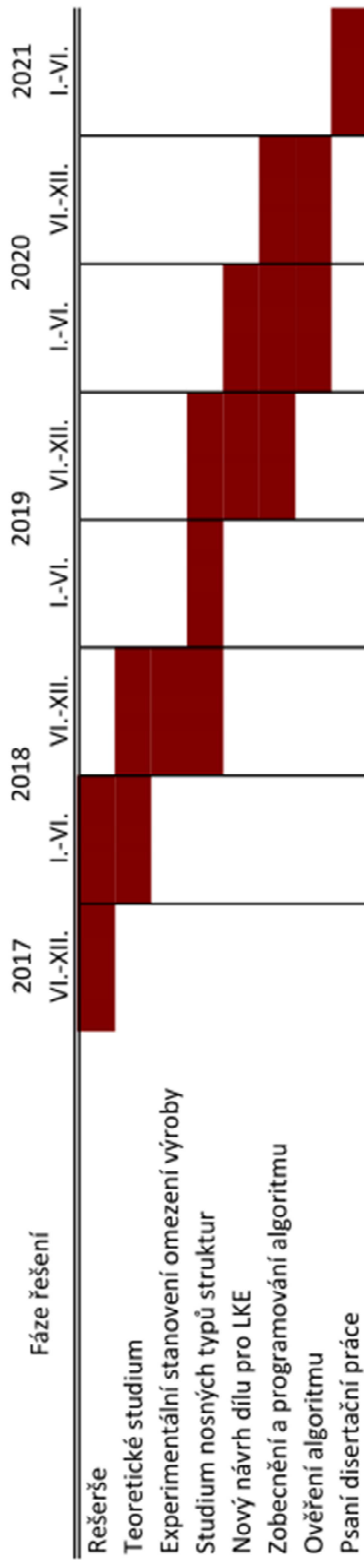
9.2.5 Ověření algoritmu na nové součásti pro kosmický průmysl9.2.5

Smyslem poslední fáze bude ověření navrženého kódu.

V této fázi bude optimalizován zatím blíže nespecifikovaný držák pro kosmický průmysl poskytnutý společností Thales Alenia Space. Protože v rámci řešení projektu ESA ADAAC vznikne také topologicky optimalizovaná varianta tohoto dílu, bude existovat možnost srovnání nového algoritmu a klasického postupu topologické optimalizace.

Výsledkem této fáze bude ověřený algoritmus a druhý demonstrátor pro kosmický průmysl.

10 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ



11 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY V DANÉM ČASE

11

Spojení topologické optimalizace a aditivních technologií se v posledních pár letech stále více uplatňuje napříč celým průmyslem, ať už to jsou díly pro letectví a kosmonautiku, automobilový průmysl, formy na vstřikování plastu, nebo kloubní náhrady. Tam, kde se z počátku používala pouze strukturální optimalizace, následně propracovanější topologická optimalizace, následně spojená s aditivními technologiemi, tam se v posledních letech dostávají i strukturované díly. V současné době jsou výhodou strukturních částí hlavně jejich malá hmotnost a slouží hlavně k odlehčení.

V rešerši bylo zmíněno, že již existují způsoby, které se snaží řešit strukturované díly i z hlediska nosné funkce, ale tento přístup je stále na začátku. Nejslibnější metoda tzv. izostatických čar je řešena zatím pouze ve 2D, není nijak upravena pro aditivní technologie a vzhledem k zaměření autora a celého výzkumného týmu bude s velkou pravděpodobností rozpracována do podoby vhodné k použití v kompozitních materiálech.

Naskýtá se zde tedy příležitost vyvinout speciální typy struktur pro přenos zatížení, které by byly vhodné pro návrh dílů složených z mikro-prutové struktury a objemových částí (hybrid design), které by splňovaly požadavky kladené leteckým a kosmickým průmyslem: maximální tuhost a minimální hmotnost.

12 SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI

Disertační práce bude navázána na projekt TAČR „Vývoj technologie 3D tisku pro vybrané materiály a topologická optimalizace komponent pro letecký průmysl“ a na komerční projekt ESA ADAAC (*Additive Design for Aerospace Applications Capabilities in CZ*). V rámci těchto projektů se předpokládá spolupráce:

FSI VUT:

- Letecký ústav
- Ústav materiálových věd a inženýrství
- Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
- CEITEC

Mimo VUT:

- Honeywell International s.r.o.
- GE Aviation Czech, s.r.o.
- L.K. Engineering s.r.o.
- Thales Alenia Space

13 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S ŘEŠENÍM A JEJICH ZDROJE

13

Nákup materiálu
Licence softwarů
Provoz a údržba SLM 280 HL
Mechanické testy a testy mikrostruktury
Publikace výsledků
Plat studenta

Veškeré náklady na studium půjdou z výše uvedených projektů ESA, TAČR, a z projektů specifického výzkumu.

14 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Výsledkem disertační práce bude software pro automatický návrh hybridních dílů pro aditivní výrobu.

Dílní výsledky disertační práce budou publikovány v minimálně třech člancích podaných do impaktovaných časopisů, popřípadě dalších, které budou prezentovány odborné veřejnosti na konferencích.

Dle platné Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje jsou výstupy:

- R software
- J_{imp} , J_{sc} článek v odborném periodiku
- D článek ve sborníku

Možná periodika k publikaci:

- Rapid Prototyping Journal (IF 2,40)
- Structural and Multidisciplinary Optimization (IF 2,38)
- Computational Methods in Engineering (IF 3,95)
- Computer Aided Design (IF 2,44)

15 BIBLIOGRAFIE

- [1] MICHELL, A. G. M. The limits of economy of material in frame-structures. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* [online]. 1904, **8**(47), 589–597. ISSN 1941-5982. Dostupné z: doi:10.1080/14786440409463229
- [2] LEWIŃSKI, T., M. ZHOU a G. I N ROZVANY. Extended exact least-weight truss layouts-Part II: Unsymmetric cantilevers. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 1994, **36**(5), 399–419. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/0020-7403(94)90044-2
- [3] BENDSØE, M. P. a N. KIKUCHI. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 1988, **71**(2), 197–224. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/0045-7825(88)90086-2
- [4] SIGMUND, O. a K. MAUTE. Topology optimization approaches: A comparative review. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2013, **48**(6), 1031–1055. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-013-0978-6
- [5] BENDSØE, M. P. Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization* [online]. 1989, **1**(4), 193–202. ISSN 09344373. Dostupné z: doi:10.1007/BF01650949
- [6] ZHOU, M. a G. I N ROZVANY. The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 1991, **89**(1–3), 309–336. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/0045-7825(91)90046-9
- [7] ESCHENAUER, H. A., V. V. KOBELEV a A. SCHUMACHER. Bubble method for topology and shape optimization of structures. *Structural Optimization* [online]. 1994, **8**(1), 42–51. ISSN 09344373. Dostupné z: doi:10.1007/BF01742933
- [8] NOVOTNY, A. A, R. A. FEIJÓO, E. TAROCO a C. PADRA. Topological sensitivity analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2003, **192**(7), 803–829. ISSN 0045-7825. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00599-6
- [9] AMSTUTZ, S. Connections between topological sensitivity analysis and material interpolation schemes in topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2011, **43**(6), 755–765. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-010-0607-6
- [10] OSHER, S. J. Fronts Propagating with Curvature Dependent Speed. *Computational Physics* [online]. 1988, **79**(1), 1–5. ISSN 0717-6163. Dostupné z: doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2

- [11] ALLAIRE, G., F. JOUVE a A.-M. TOADER. A level-set method for shape optimization. *Comptes Rendus Mathematique* [online]. 2002, **334**(12), 1125–1130. ISSN 1631073X. Dostupné z: doi:10.1016/S1631-073X(02)02412-3
- [12] ALLAIRE, G., F. JOUVE a A.-M. TOADER. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of Computational Physics* [online]. 2004, **194**(1), 363–393. ISSN 00219991. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcp.2003.09.032
- [13] GUO, X., W. S. ZHANG a W. L. ZHONG. Doing Topology Optimization Explicitly and Geometrically-A New Moving Morphable Components Based Framework. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme* [online]. 2014, **81**(8), 12. ISSN 0021-8936. Dostupné z: doi:10.1115/1.4027609
- [14] BOURDIN, B. a A. CHAMBOLLE. Design-dependent loads in topology optimization. *Esaim-Control Optimisation and Calculus of Variations* [online]. 2003, **9**(2), 19–48. ISSN 1262-3377. Dostupné z: doi:10.1051/cocv:2002070
- [15] TAKEZAWA, A., S. NISHIWAKI a M. KITAMURA. Shape and topology optimization based on the phase field method and sensitivity analysis. *Journal of Computational Physics* [online]. 2010, **229**(7), 2697–2718. ISSN 0021-9991. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jcp.2009.12.017
- [16] SIGMUND, O. On the usefulness of non-gradient approaches in topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2011, **43**(5), 589–596. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-011-0638-7
- [17] XIE, Y M a G P STEVEN. A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & Structures* [online]. 1993, **49**(5), 885–896. ISSN 0045-7949. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/0045-7949(93)90035-C
- [18] YOUNG, V., O. M. QUERIN, G. P. STEVEN a Y. M. XIE. 3D and multiple load case bi-directional evolutionary structural optimization (BESO). *Structural optimization* [online]. 1999, **18**(2), 183–192. ISSN 1615-1488. Dostupné z: doi:10.1007/BF01195993
- [19] BRACKETT, D., I. ASHCROFT a R. HAGUE. Topology optimization for additive manufacturing. In: *22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. B.m.: University of Texas at Austin, 2011, s. 348–362.
- [20] RODRIGUES, H., J. M. GUEDES a M. P. BENDSOE. Hierarchical optimization of material and structure. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2002, **24**(1), 1–10. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-002-0209-z
- [21] COELHO, P. G., P. R. FERNANDES, J. M. GUEDES a H. C. RODRIGUES. A hierarchical model for concurrent material and topology optimisation of

- three-dimensional structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2008, **35**(2), 107–115. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-007-0141-3
- [22] LIU, L., J. YAN a G. CHENG. Optimum structure with homogeneous optimum truss-like material. *Computers & Structures* [online]. 2008, **86**(13), 1417–1425. ISSN 0045-7949. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.04.030
- [23] NIU, B., J. YAN a G. D. CHENG. Optimum structure with homogeneous optimum cellular material for maximum fundamental frequency. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2009, **39**(2), 115–132. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-008-0334-4
- [24] DENG, J. D., J. YAN a G. D. CHENG. Multi-objective concurrent topology optimization of thermoelastic structures composed of homogeneous porous material. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2013, **47**(4), 583–597. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-012-0849-6
- [25] GUO, X., X. ZHAO, W. ZHANG, J. YAN a G. SUN. Multi-scale robust design and optimization considering load uncertainties. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2015, **283**, 994–1009. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/j.cma.2014.10.014
- [26] XIA, L. a P. BREITKOPF. Concurrent topology optimization design of material and structure within FE2 nonlinear multiscale analysis framework. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2014, **278**, 524–542. ISSN 0045-7825. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.05.022
- [27] XIA, L. a P. BREITKOPF. Recent Advances on Topology Optimization of Multiscale Nonlinear Structures. *Archives of Computational Methods in Engineering* [online]. 2017, **24**(2), 227–249. ISSN 1134-3060. Dostupné z: doi:10.1007/s11831-016-9170-7
- [28] SIVAPURAM, R., P. D. DUNNING a H. A. KIM. Simultaneous material and structural optimization by multiscale topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2016, **54**(5), 1267–1281. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-016-1519-x
- [29] DAYNES, S., S. FEIH, W. F. LU a J. WEI. Optimisation of functionally graded lattice structures using isostatic lines. *Materials & Design* [online]. 2017, **127**, 215–223. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2017.04.082
- [30] DUMAS, J., J. HERGEL a S. LEFEBVRE. Bridging the Gap: Automated Steady Scaffoldings for 3D Printing. *Acm Transactions on Graphics* [online]. 2014, **33**(4), 10. ISSN 0730-0301. Dostupné z: doi:10.1145/2601097.2601153
- [31] DAS, P., R. CHANDRAN, R. SAMANT a S. ANAND. Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support

- Structures. *43rd North American Manufacturing Research Conference, Namrc 43* [online]. 2015, **1**, 343–354. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2015.09.041
- [32] HU, K., S. JIN a C. C. L. WANG. Support slimming for single material based additive manufacturing. *Computer-Aided Design* [online]. 2015, **65**, 1–10. ISSN 0010-4485. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.03.001
- [33] CACACE, S., E. CRISTIANI a L. ROCCHI. A level set based method for fixing overhangs in 3D printing. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2017, **44**, 446–455. ISSN 0307-904X. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.02.004
- [34] WANG, W M, T F Y WANG, Z W YANG, L G LIU, X TONG, W H TONG, J S DENG, F L CHEN a X P LIU. Cost-effective Printing of 3D Objects with Skin-Frame Structures. *Acm Transactions on Graphics* [online]. 2013, **32**(6), 10. ISSN 0730-0301. Dostupné z: doi:10.1145/2508363.2508382
- [35] GAYNOR, A. T. a J. K. GUEST. Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2016, **54**(5), 1157–1172. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-016-1551-x
- [36] LANGELAAR, M. Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing. *Additive Manufacturing* [online]. 2016, **12**, 60–70. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.010
- [37] LANGELAAR, M. An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2017, **55**(3), 871–883. ISSN 1615-1488. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-016-1522-2
- [38] QIAN, X. P. Undercut and overhang angle control in topology optimization: A density gradient based integral approach. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* [online]. 2017, **111**(3), 247–272. ISSN 0029-5981. Dostupné z: doi:10.1002/nme.5461
- [39] ALLAIRE, G., C. DAPOGNY, R. ESTEVEZ, A. FAURE a G. MICHAILIDIS. Structural optimization under overhang constraints imposed by additive manufacturing technologies. *Journal of Computational Physics* [online]. 2017, **351**, 295–328. ISSN 0021-9991. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcp.2017.09.041
- [40] MIRZENDEHDEL, A. M. a K. SURESH. Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design* [online]. 2016, **81**, 1–13. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2016.08.006

- [41] SIGMUND, O. A 99 line topology optimization code written in matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2001, **21**(2), 120–127. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s001580050176
- [42] ANDREASSEN, E., A. CLAUSEN, M. SCHEVENELS, B. S. LAZAROV a O. SIGMUND. Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2011, **43**(1), 1–16. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-010-0594-7
- [43] CHALLIS, V. J. A discrete level-set topology optimization code written in Matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2010, **41**(3), 453–464. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-009-0430-0
- [44] SURESH, K. A 199-line Matlab code for Pareto-optimal tracing in topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2010, **42**(5), 665–679. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-010-0534-6
- [45] HUANG, X. a Y.M. XIE. A further review of ESO type methods for topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2010, **41**(5), 671–683. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-010-0487-9
- [46] LIU, K. a A. TOVAR. An efficient 3D topology optimization code written in Matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2014, **50**(6), 1175–1196. ISSN 16151488. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-014-1107-x
- [47] WALTON, D. a H. MOZTARZADEH. Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimisation. *Procedia CIRP* [online]. 2017, **60**, 205–210. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2017.03.027
- [48] GEBISA, A. W. a H. G. LEMU. A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **276**(1). ISSN 1757899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/276/1/012026
- [49] LIU, C, Z L DU, W S ZHANG, Y C ZHU a X GUO. Additive Manufacturing-Oriented Design of Graded Lattice Structures Through Explicit Topology Optimization. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme* [online]. 2017, **84**(8), 12. ISSN 0021-8936. Dostupné z: doi:10.1115/1.4036941
- [50] WANG, Y., L. ZHANG, S. DAYNES, H. ZHANG, S. FEIH a M. Y. WANG. Design of graded lattice structure with optimized mesostructures for additive manufacturing. *Materials & Design* [online]. 2018, **142**, 114–123. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.011
- [51] SIGMUND, O., N. AAGE a E. ANDREASSEN. On the (non-)optimality of Michell structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online].

- 2016, **54**(2), 361–373. ISSN 1615-1488. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-016-1420-7
- [52] TANG, Y., A. KURTZ a Y. F. ZHAO. Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) based design method for lattice structure to be fabricated by additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design* [online]. 2015, **69**, 91–101. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2015.06.001
- [53] VRANA, R., D. KOUTNY a D. PALOUSEK. Impact resistance of different types of lattice structures manufactured by SLM. *MM Science Journal* [online]. 2016, **2016**(DECEMBER), 1579–1585. ISSN 18031269 (ISSN). Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2016_12_2016186
- [54] KESSLER, Julia, Nicolae BALC, Andreas GEBHARDT a Karim ABBAS. *Basic research on lattice structures focused on the reliance of the cross sectional area and additional coatings* [online]. 2017. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/20179403008
- [55] CONTUZZI, N, S L CAMPANELLI, C CASAVOLA a L LAMBERTI. Manufacturing and Characterization of 18Ni Marage 300 Lattice Components by Selective Laser Melting. *Materials* [online]. 2013, **6**(8), 3451–3468. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma6083451
- [56] KESSLER, J., N. BALE, A. GEBHARDT a K. ABBAS. Basic Research on Lattice Structures Focused on the strut shape and welding beads. In: *Laser Assisted Net Shape Engineering 9 International Conference on Photonic Technologies Proceedings of the Lane 2016* [online]. B.m.: Elsevier Science Bv, 2016, Physics Procedia, s. 833–838. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2016.08.086
- [57] YAN, C Z, L HAO, A HUSSEIN, P YOUNG a D RAYMONT. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials & Design* [online]. 2014, **55**, 533–541. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2013.10.027

16 VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS

Ing. Ondřej Vaverka
PhD student
Vědecký pracovník (FSI VUT, ÚK ORIAT)

Vzdělání

2017 - dosud Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, doktorský studijní program – Konstrukční a procesní inženýrství
2015 - 2017 Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, magisterský studijní program – Konstrukční inženýrství
2012 - 2015 Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, bakalářský studijní program – Základy strojního inženýrství

Odborná praxe

2014-2016 Huisman Konstrukce, Welding Department and Quality Control

Vyučované předměty

1K Základy konstruování
2K Konstruování
3CD CAD
4KC Konstruování a CAD
ZAT Aditivní technologie

Závěrečné práce

VAVERKA, O. *Optimalizace těhlice formule student pro výrobu SLM technologií*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 94 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D..

VAVERKA, O. *Návrh skladovacích kontejnerů pro práškové kovy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D..

Publikační činnost

VAVERKA, O., Koutný, D. Paloušek, D. Topologically optimized axle carrier for Formula Student produced by Selective Laser Melting, *Rapid Prototyping Journal*, submitted: October 2017 (v **recenzním řízení**)

VAVERKA, O., Koutný, D., Vrána, R., Pantělejev, L., Paloušek, D. Effect of heat treatment on mechanical properties and residual stresses in additively manufactured parts, In *Proceedings of Engineering Mechanics 2018*. Engineering Mechanics 2018, Svratka, Czech Republic, 14.-17.5.2018 (**přijat k publikaci**)