

Topologická optimalizace aditivně vyráběných dílů

Ing. Ondřej Vaverka

Školitel: doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Školitel specialista: doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

Státní doktorská zkouška, 5.11.2020



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

Obsah

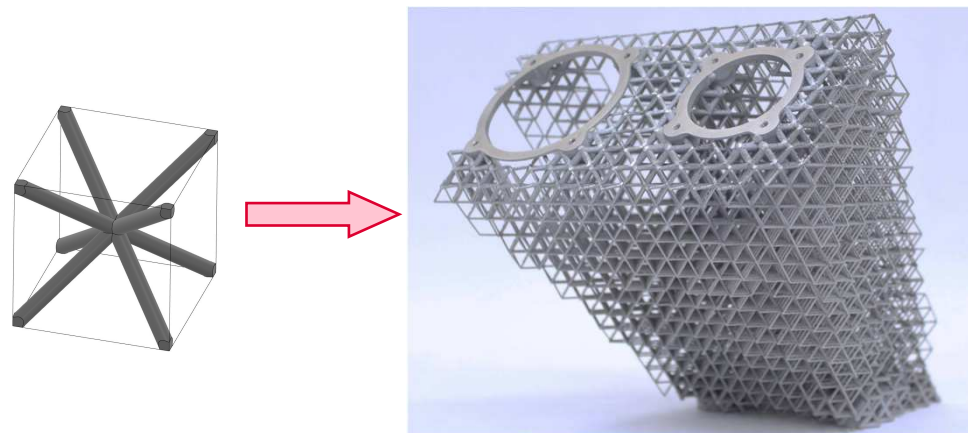
- Motivace řešení
- Současný stav poznání a jeho analýza
- Cíl disertační práce a vědecké otázky
- Postup řešení a jeho současný stav
- Závěr



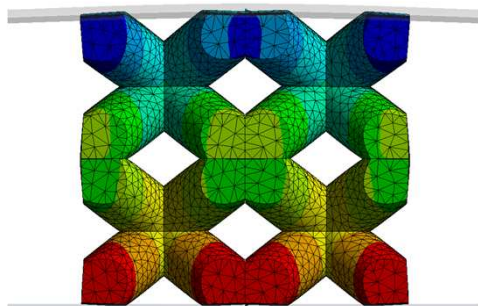
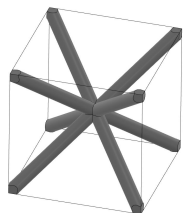
Motivace k řešení

Topologická optimalizace dnes

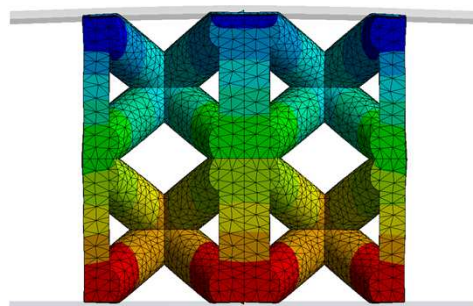
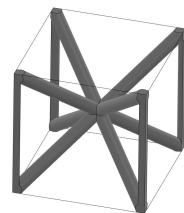
- Objemová topologická optimalizace + aditivní technologie – plný potenciál obojího
- Strukturovaný materiál → nižší hmotnost, bezpodporový tisk, snížení nákladů na post-procesing i výrobu
- Prostorově středěná krychle (BCC) – jednoduchá, samonosná, „izotropní“ vlastnosti



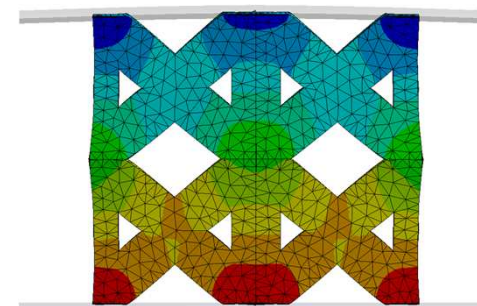
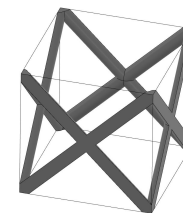
Motivace k řešení



Deformace: 0,041 mm
Hmotnost: 11,88 g



Deformace: 0,039 mm
Hmotnost: 9,2 g **(-23 %)**



Deformace: 0,04 mm
Hmotnost: 6,92 g **(-42 %)**

Potenciál pro díly lehčí o desítky procent při správné volbě struktur dle zatížení.

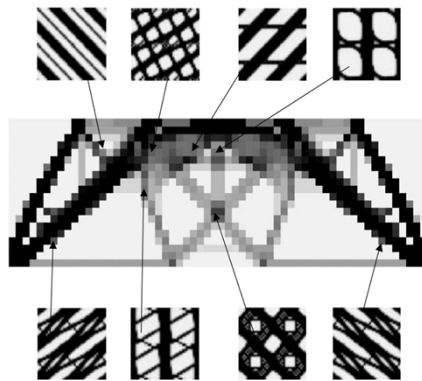
Současný stav poznání

Strukturovaný materiál v topologické optimalizaci

- **Rodriguez, et al., 2002** - unikátní buňky
- **Liu, et al., 2008** - uniformní struktura
- **Sivapuram, et al., 2016** – maximální počet buněk

Výpočtový problém

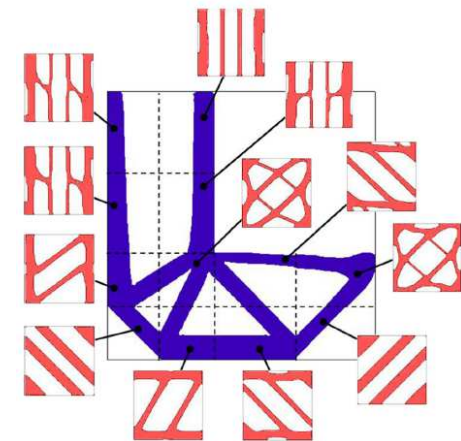
- dát do každého místa jinou buňku dle zatížení je obecně neřešitelný problém
- když už to je řešitelné, tak jsou nevyrobitelné



Rodriguez, et al., 2002



Liu, et al., 2008



Sivapuram, et al., 2016

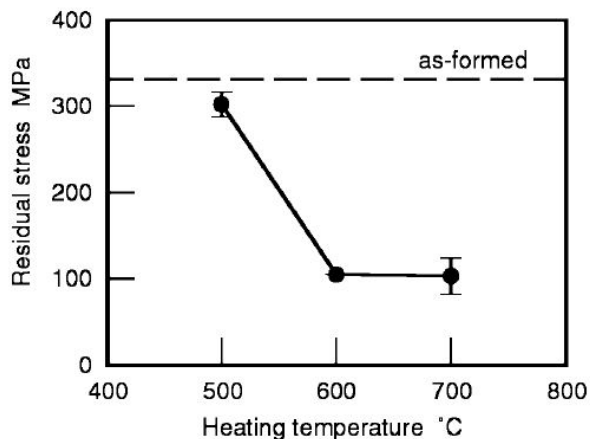
Současný stav poznání

Aditivní výroba součástí

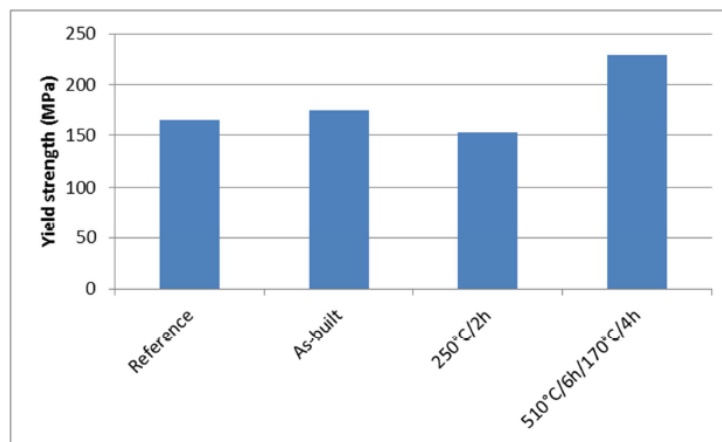
- **Shiomi et al., 2004** – vhodnost tepelného zpracování (HT)
- **Mertens et al., 2015** – T6 zpracování zvýší $R_{p0,2}$ a sníží R_m
- **Aboulkhair et al. 2016** – T6 zlepšil pouze tažnost, ostatní zhoršil

Technologický problém

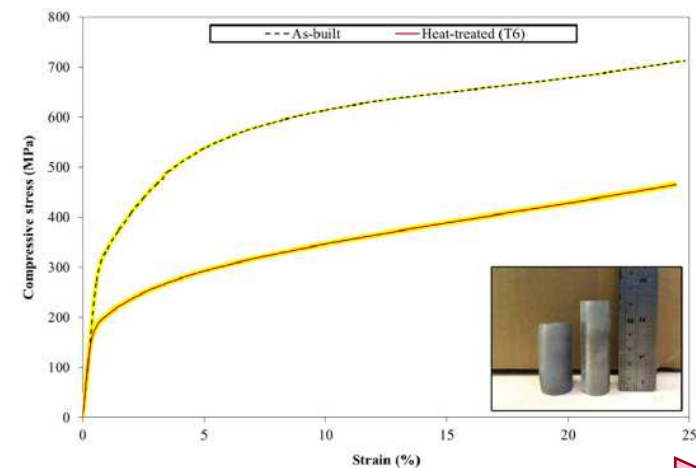
- při aditivní výrobě vzniká vždy zbytkové napětí s kterým nedokážu počítat při optimalizaci
- špatný vliv tepelného zpracování na pevnostní charakteristiky



Shiomi et al., 2004



Mertens et al., 2015



Aboulkhair et al., 2016

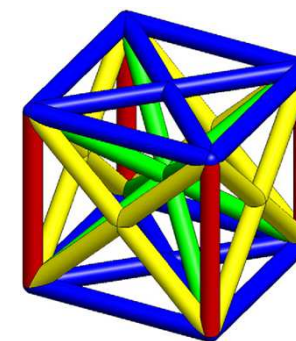
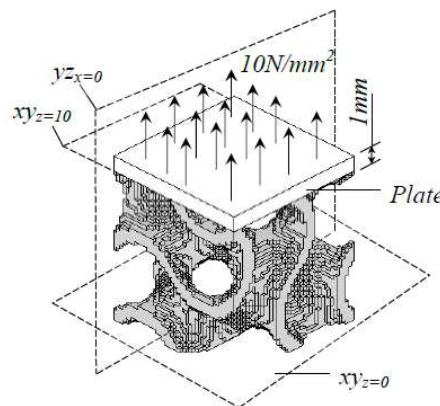
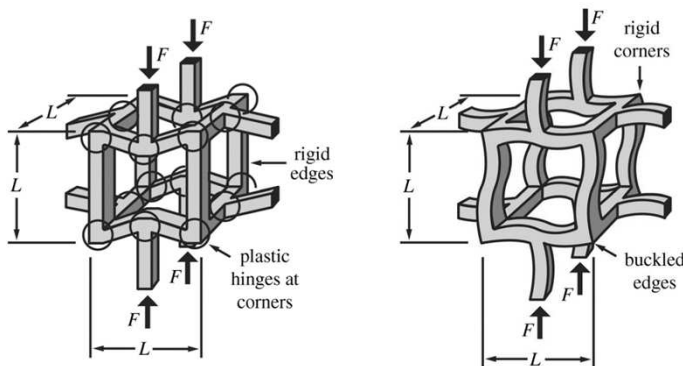
Současný stav poznání

Mechanické vlastnosti strukturovaného materiálu

- **Gibson, Ashby** – materiál, relativní hustota, geometrie buňky
- **Aremu, et al., 2014** – MKP, zatížení v tlaku
- **Leary, et al., 2016** – výrobitelnost struktur pomocí SLM

Materiálový problém

- strukturovaný materiál mění své vlastnosti v závislosti na relativní hustotě
- zkoumáno pouze tlakové zatížení - pro obecný popis materiálu potřebují dva nezávislé parametry E a G



Gibson a Ashby

Aremu, et al., 2014

Leary, et al., 2016

Analýza současného stavu poznání

Problémy současného stavu

Výpočtový problém

- dát do každého místa jinou buňku dle zatížení je obecně neřešitelný problém
- když už to je řešitelné, tak jsou nevyrobitelné

Technologický problém

- při aditivní výrobě vzniká vždy zbytkové napětí s kterým nedokážu počítat při optimalizaci
- špatný vliv tepelného zpracování na pevnostní charakteristiky

Materiálový problém

- strukturovaný materiál mění své vlastnosti v závislosti na relativní hustotě
- zkoumáno pouze tlakové zatížení - pro obecný popis materiálu potřebuji dva nezávislé parametry E a G

Možné, zatím nezkoušené řešení

Relaxace problému na knihovnu aditivně vyrobených a na sebe navazujících struktur – **zatím nezkoušeno**

Najít kompromisní tepelné zpracování, které bude redukovat zbytková napětí a zachová pevnostní charakteristiky materiálu – **zatím zkoumáno odděleně**

U knihovny aditivně vyrobených struktur zkoumat E i G pro porovnání jejich vhodnosti pro základní typy namáhání (tah/tlak, ohyb) – **zatím nezkoušeno**

Cíl disertační práce

Cílem disertační práce je prozkoumat efektivitu kombinace několika druhů mikro-prutových elementárních buněk při návrhu součásti.

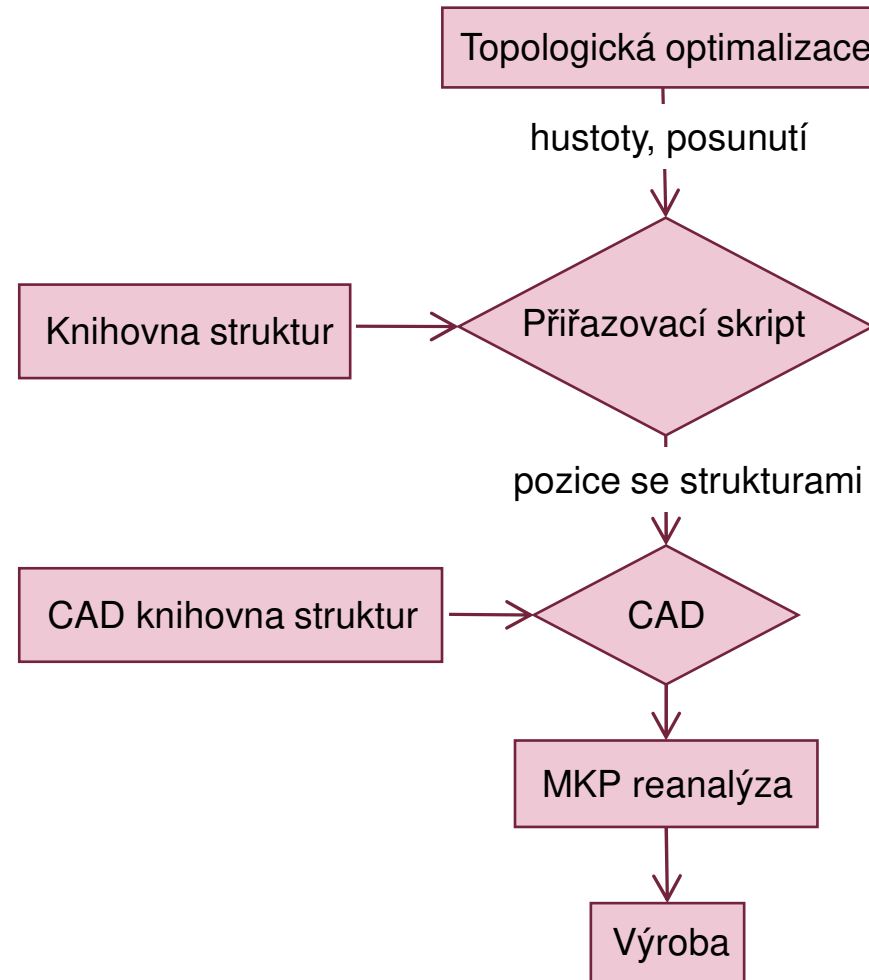
Oblasti dílčích cílů:

1. Studium chování mikro-prutových struktur → VO 1
2. Studium mechanických vlastností aditivně vyrobeného materiálu → VO 2
3. Topologická optimalizace a algoritmus návrhu → VO 3

Aplikační potenciál

- kombinací struktur lze snížit hmotnost
- díly pro letecký a kosmický průmysl nové generace
- úspora hmotnosti = úspora paliva = menší ekologické zatížení / úspora peněz

Vize výsledku disertační práce

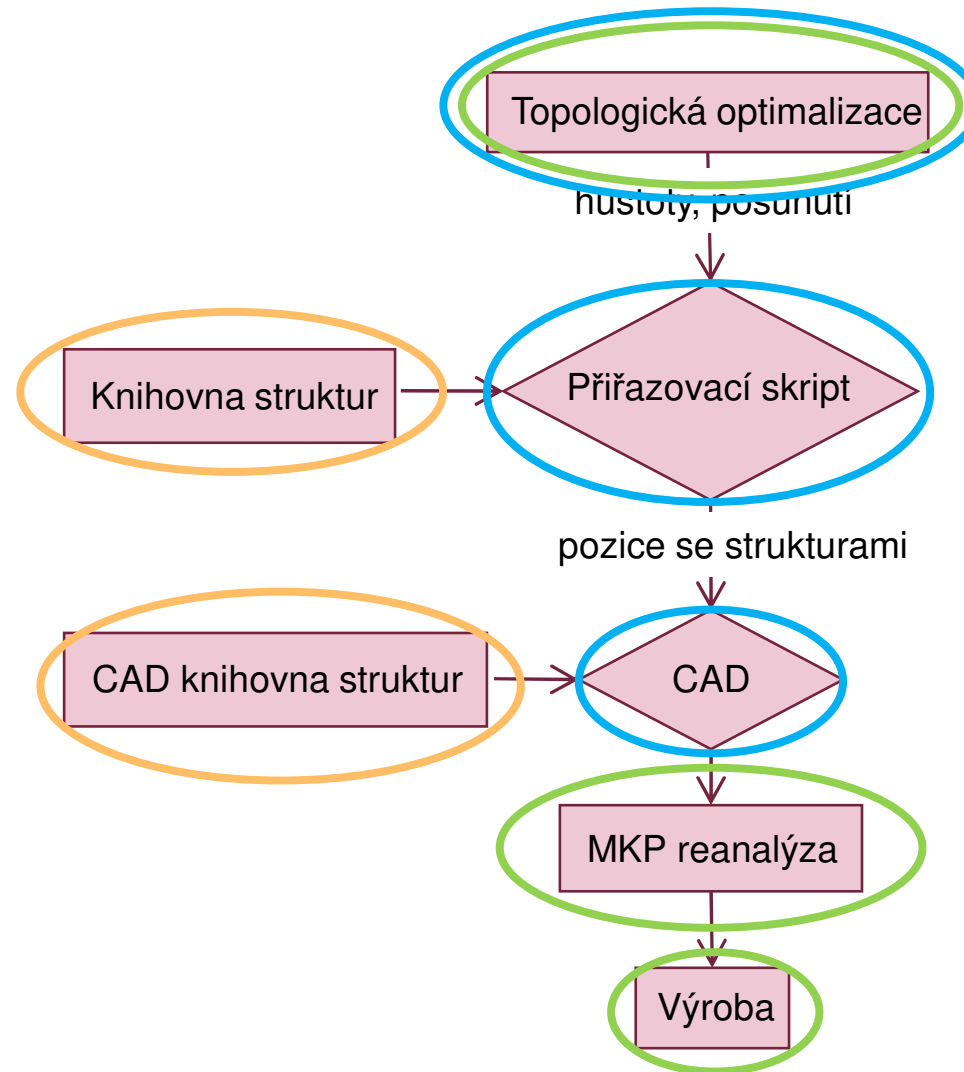


Příspěvek dílčích cílů k výstupu disertační práce

Studium chování mikro-prutových struktur
(VO 1)

Studium mechanických vlastností aditivně
vyrobeného materiálu (VO 2)

Topologická optimalizace a algoritmus
návrhu (VO 3)



Vědecká otázka a hypotéza č. 1

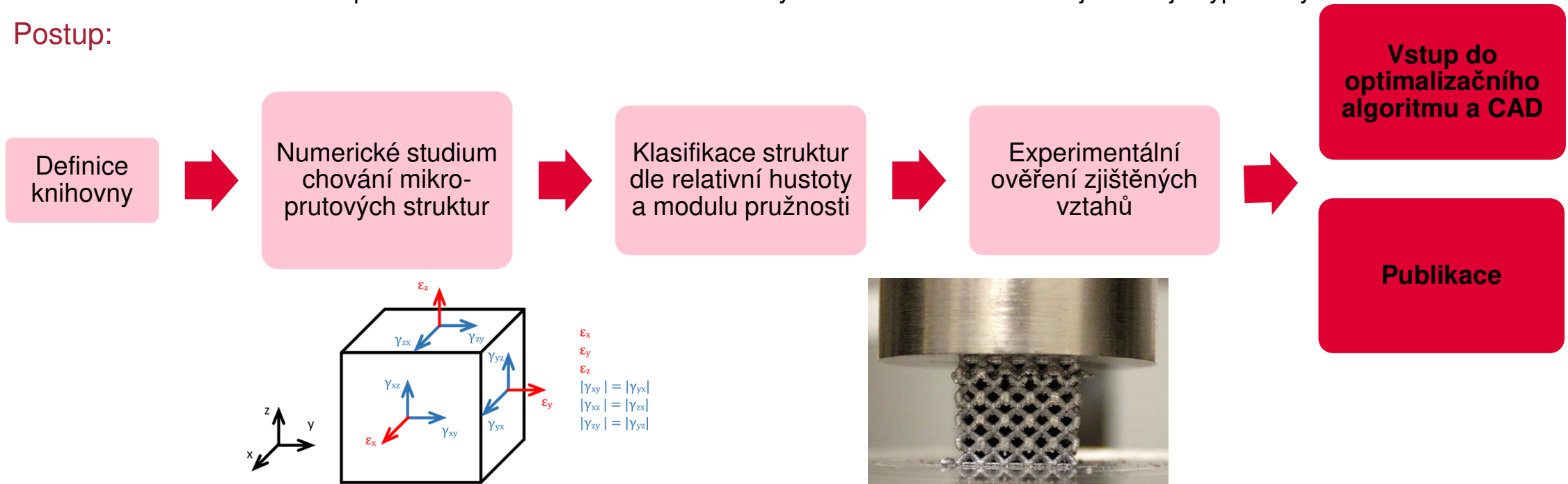
Otázka:

Jak se projevuje anizotropie mikro-prutových buněk při elementárním tlakovém a smykovém zatížení ve všech třech směrech pro celý rozsah relativních hustot?

Hypotéza:

Struktury, které budou mít lépe rozložený materiál ve vztahu k elementárnímu zatížení, budou mít při stejné relativní hustotě větší tuhost. Na základě toho bude možné pro každou kombinaci relativní hustoty a směru zatížení určit nejvhodnější typ buňky.

Postup:



Vědecká otázka a hypotéza č. 2

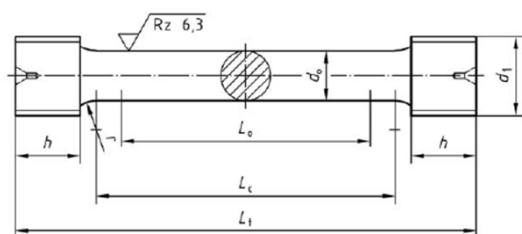
Otázka:

Jakým způsobem je vhodné zpracovat aditivně vyrobené hliníkové slitiny Al-Si, aby dosahovaly vysokých pevnostních charakteristik a zároveň minimálních hodnot zbytkového napětí?

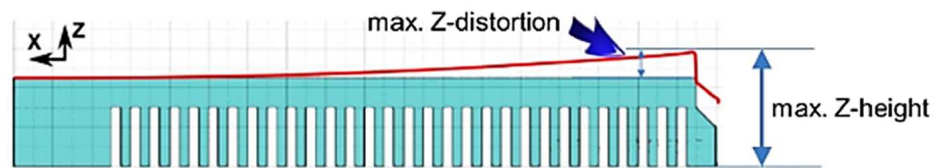
Hypotéza:

Při použití zpracování T6 budou zachovány pevnostní charakteristiky a zároveň dojde k dostatečnému snížení vnitřního napětí.

Postup:



DIN 50125



MSC: Tutorial k Simufactu

Vědecká otázka a hypotéza č.3

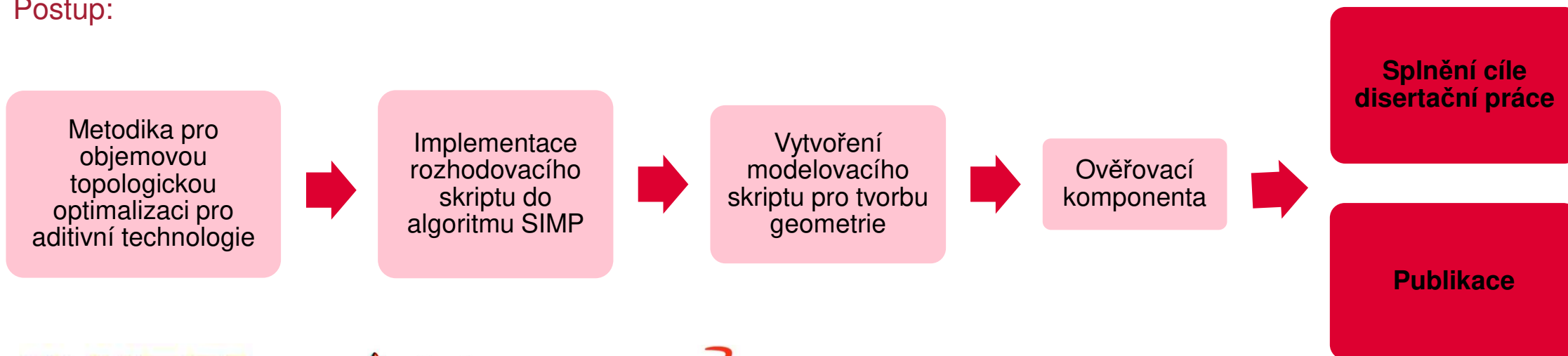
Otázka:

Jak se změní hmotnost součásti, bude-li při optimalizaci použito několik druhů mikro-prutových struktur a ne pouze BCC struktura?

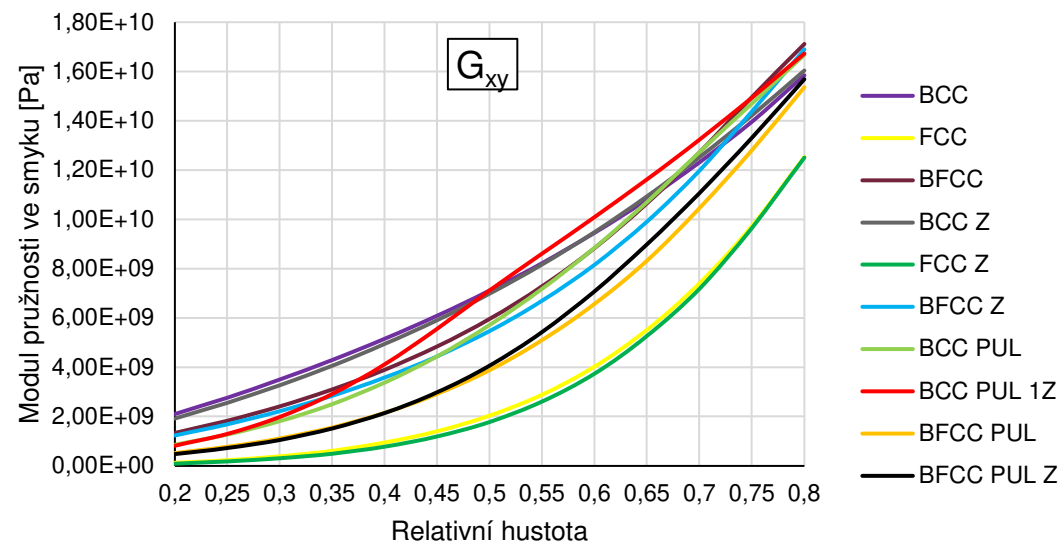
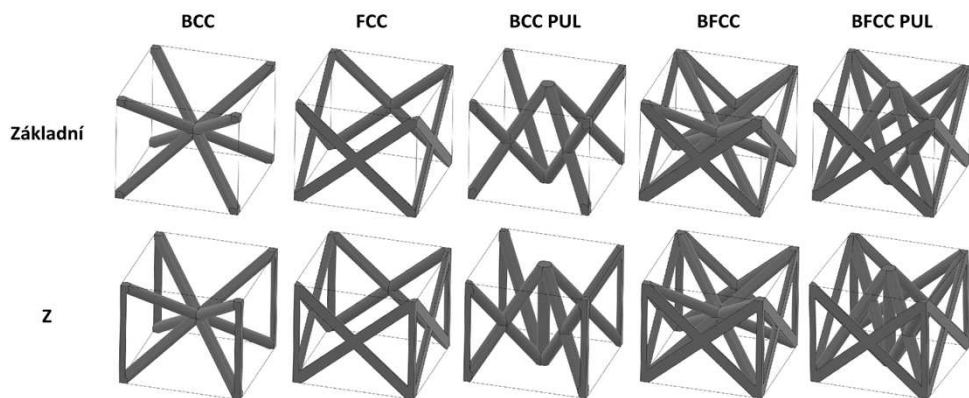
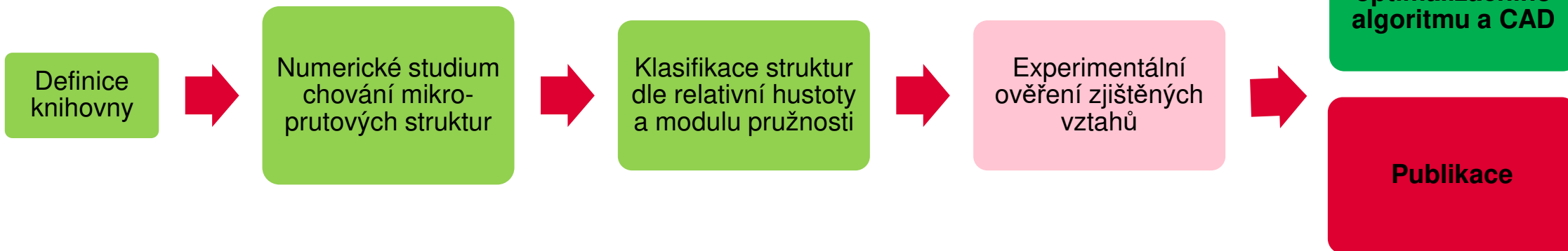
Hypotéza:

Hmotnost součásti může oproti klasickému přístupu s jedním typem buňky klesnout v řádu desítek procent díky správné volbě mikro-prutové struktury.

Postup:



Současný stav řešení (1)



Současný stav řešení (2)

Definice vhodných druhů zpracování na základě literatury



Experimentální studium vlivu na mechanické vlastnosti



Experimentální studium vlivu na zbytkové napětí

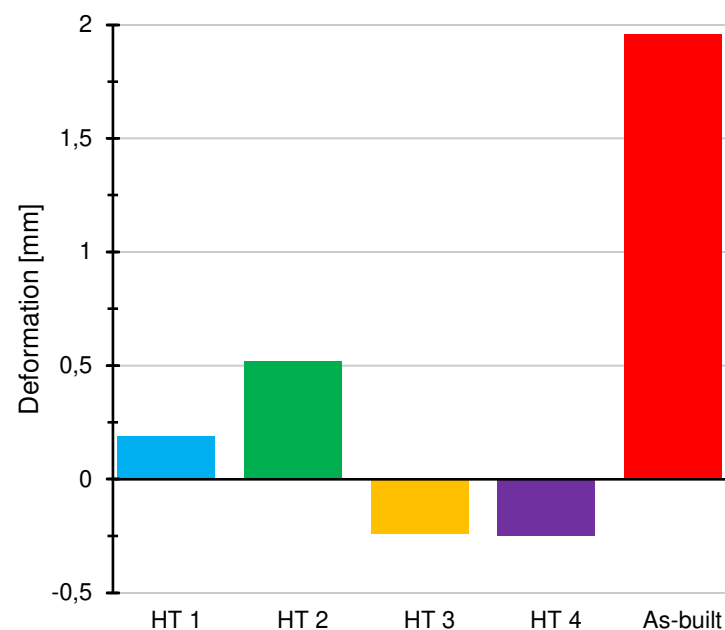
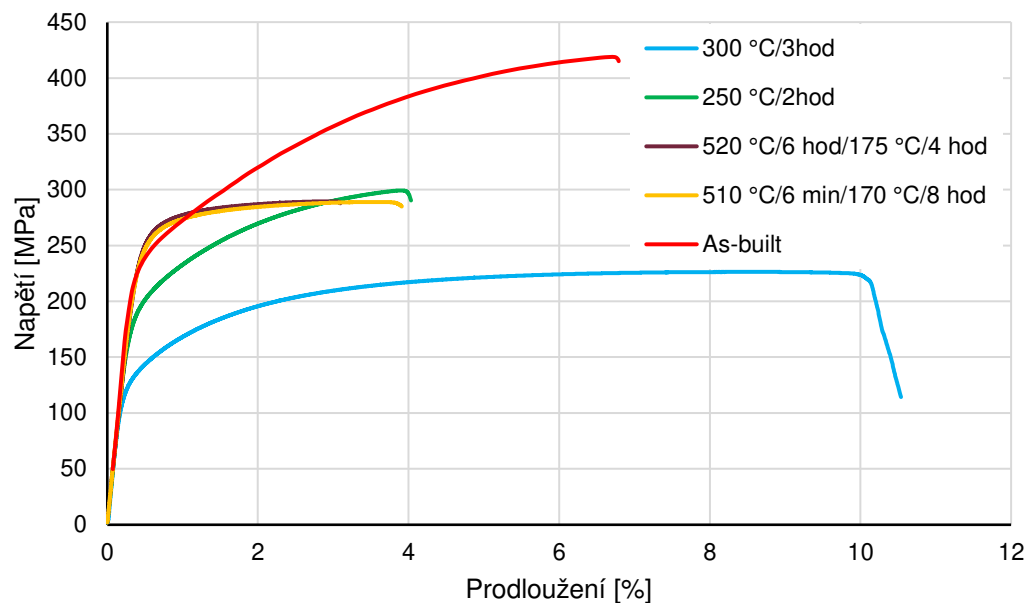


Ověření na strukturách

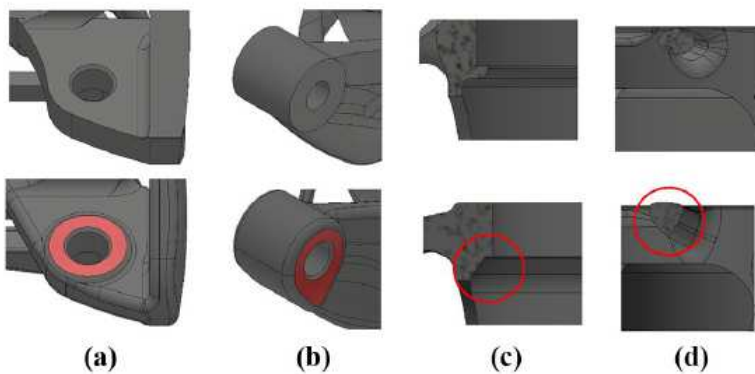
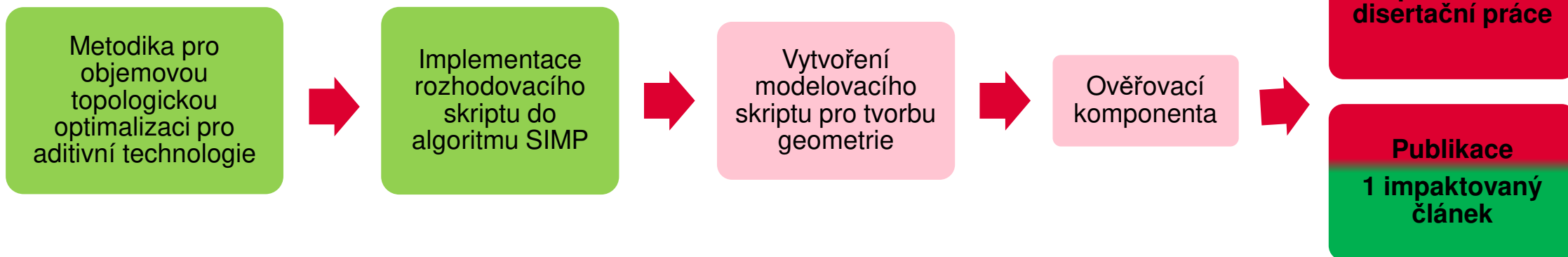


Vstup do optimalizačního algoritmu a MKP

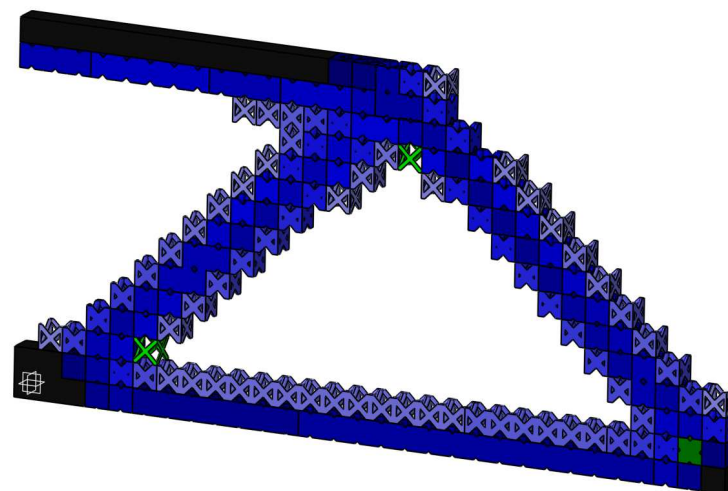
Publikace:
3 konferenční příspěvky



Současný stav řešení (3)



Notes: (a) Elevating faces for machining; (b) angled cylindrical parts; (c) chamfers instead of radii; (d) shape optimization



Závěr

Splněno

- VO 1 – definice struktur a jejich numerická klasifikace (75 %)
- VO 2 – potvrzení hypotézy a její publikace (100 %)
- VO 3 – metodika objemové optimalizace, sestavení optimalizačního algoritmu pro přiřazování struktur (50%)

Nutno dokončit

- VO 1 – experimentální ověření chování struktur, publikace
- VO 3 – CAD algoritmus, publikace
- Vytvoření finálního dílu a jeho porovnání s jinými přístupy



Projekty a aplikační výstupy

Projekty aplikovaného výzkumu:

- 2019-2020: NCK MESTEC – Národní centrum kompetence Mechatroniky a chytrých technologií pro strojírenství
- 2019-2020: NCK NACCAS – Národní centrum kompetence pro letectví a kosmonautiku
- 2017-2020: ESA Contract, Additive Design for Aerospace Capabilities (ADAAC)
- 2017-2019: TAČR: Vývoj technologie 3D tisku pro vybrané materiály a topologická optimalizace komponent pro letecký průmysl

Edukační projekty:

- 2019: Inovace předmětu ZAT – *Aditivní technologie* rozšířením o simulaci aditivní výroby; hlavní řešitel

Aplikační výstupy:

- Připojovací potrubí chladiče – funkční vzorek
- Odlehčené těleso solenoidu vyrobené technologií SLM – funkční vzorek
- Těleso solenoidu optimalizované pro aditivní výrobu - funkční vzorek
- Design čistící laserové hlavy – funkční vzorek

Publikace

Publikované články:

- Vaverka et al., 2019 - Topologically optimized axle carrier for Formula Student produced by selective laser melting. ***Rapid Prototyping Journal (IF 3,099)***
- Vaverka et al., 2018 - Effect of heat treatment on additively manufactured parts. ***Engineering Mechanics 2018 (WoS)***
- Vaverka et al., 2019 - Effect Of Heat Treatment On Mechanical Properties Of AlSi7Mg0,6 Aluminium Alloy Processed By SLM. ***Euro PM2019***
- Vrána et al., 2019 - Heat Treatment of the SLM Processed Lattice Structure Made of AlSi10Mg and Its Effect on the Impact Energy Absorption. ***Euro PM2019***
- Vrána et al., 2020 - Shape and dimensional analysis of lattice structures produced by selective laser melting. ***MM Science (Scopus)***

Připravované články:

- Vaverka et al. - Topology optimization using various lattice structures in one design. (VO 3)
- Vaverka et al. - Complex FEM and experiment comparison of basic lattice cells manufactured by SLM (VO 1)

Děkuji Vám za pozornost



**ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ**