

Studium absorpce energie v mikro- prutové struktuře vyrobené technologií Selective Laser Melting

Radek Vrána

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

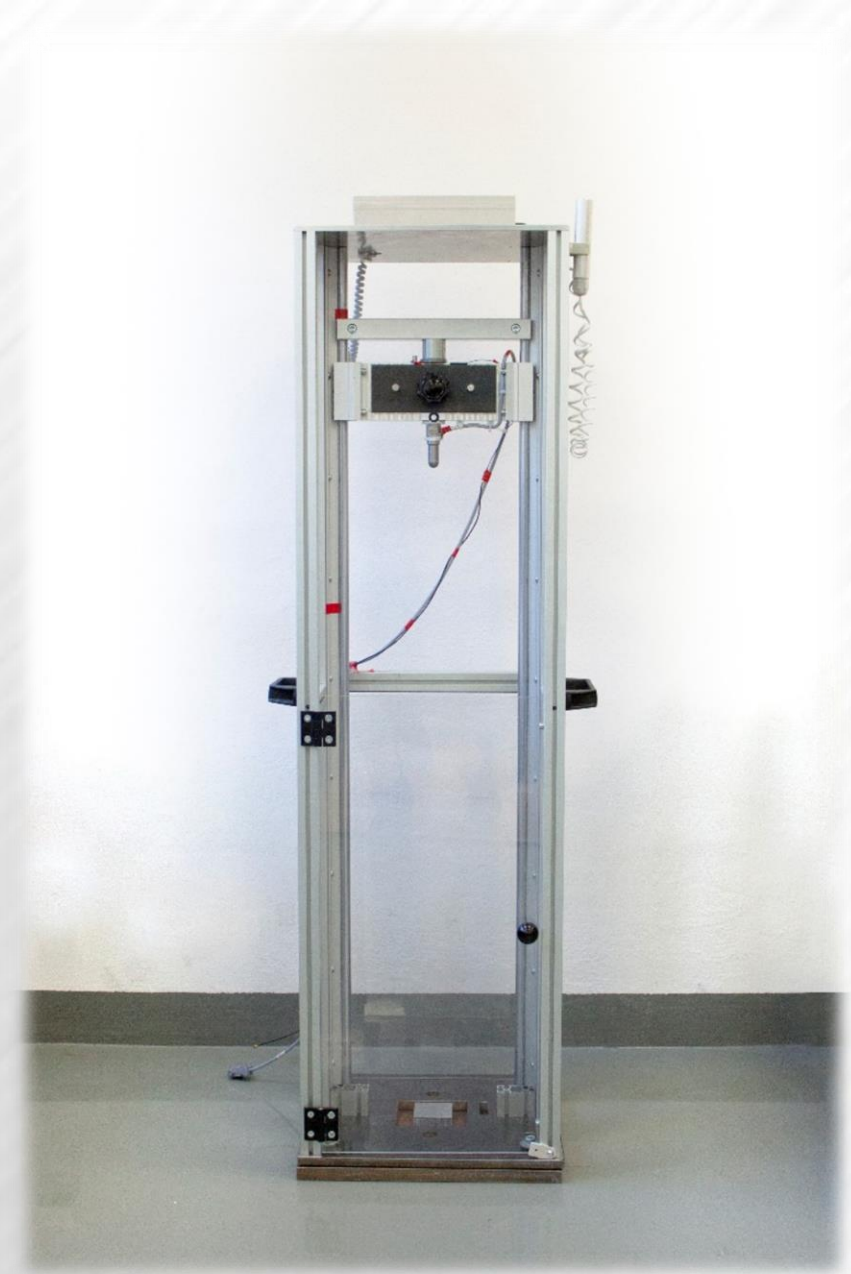
Školitel specialista: doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Ústav konstruování

Fakulta strojního inženýrství

VUT v Brně

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
1. března, 2017, FSI VUT v Brně



Institute of Machine
and Industrial Design

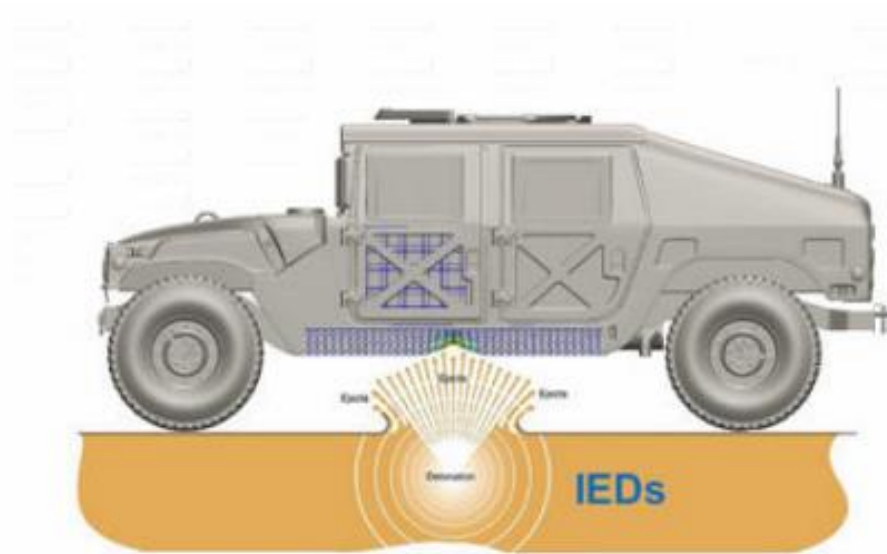
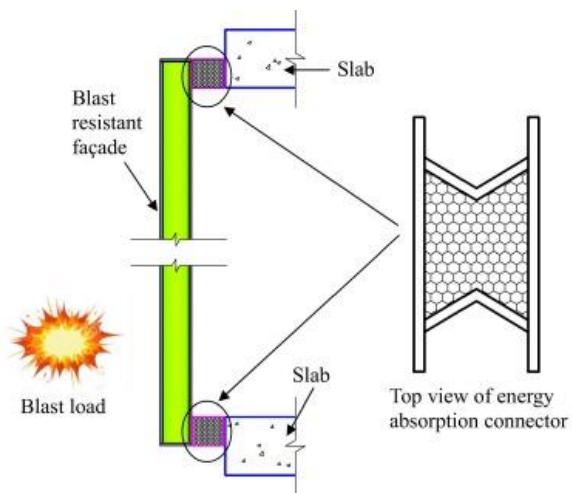
Obsah prezentace

1. Motivace
2. Shrnutí současného stavu pozvání
3. Zhodnocení poznatků
4. Cíle dizertační práce
5. Současný stav dizertační práce
6. Přehled dosáhnutých výsledků
7. Závěr
8. Publikační činnost



Motivace

- Ochrana osob a objektů při rázových dějích (výbuchy, nárazy, výstřely,...)
- Potenciál pro technologii SLM – současná výroba fixačních prvků



<http://www.ergaerospace.com/>



<http://www.ergaerospace.com/>

Motivace

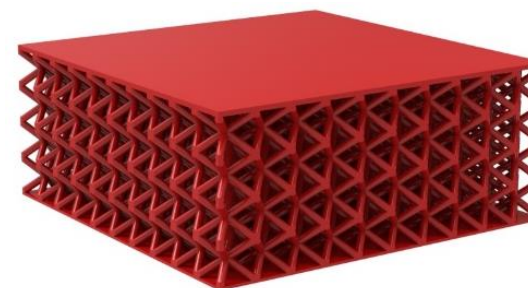
Benefity mikropřutových strukturovaných materiálů

- Porézní materiály umožňují absorpci velkého množství energie svojí deformací
- Vhodné pro bezpečnostní prvky proti rázu, výbuchu,...
- Malé rozměry v porovnání s jinými systémy
- Tvar struktury je možné řídit a navrhnou podle zatížení
- Umožňuje přímo vyrobit i fixační části dílu
- Indikátor přetížení – navrženo na definované zatížení

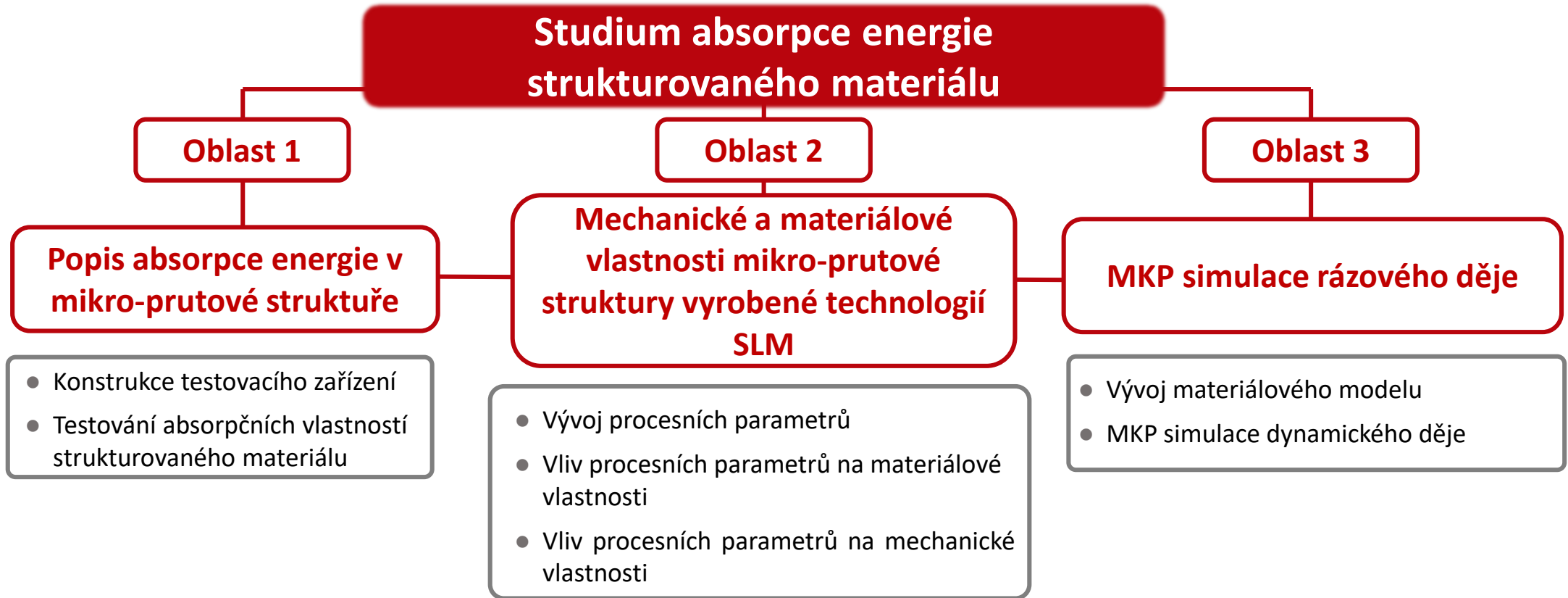


Ochranná stěna proti výbuchu

- Strukturovaný blok musí být tuhý při standardních okolních podmínkách (statické zatěžování)
- Při rázovém zatěžování (nárazu, výbuchu,...) musí umožnit deformaci struktury a absorpci energie
- Možnost výměny poškozeného absorbéru
- Malé rozměry absorbéru $h = 20 - 30 \text{ mm}$



Shrnutí současného stavu poznání



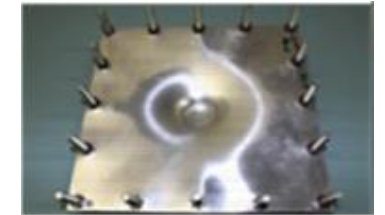
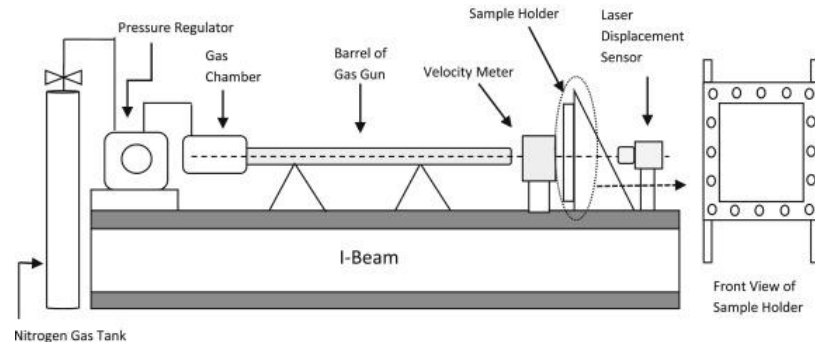
Shrnutí současného stavu poznání

Popis absorpce energie ve strukturovaném materiálu

Konstrukce testovacího zařízení

Yahaya et al., 2015

- Horizontální verze testeru
- Dopadová rychlost projektilu nad 50 m/s
- Projektil urychlován stlačeným dusíkem

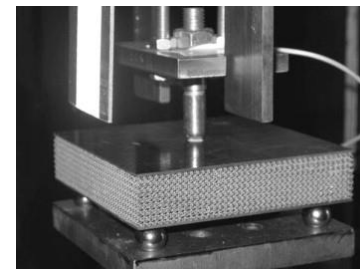
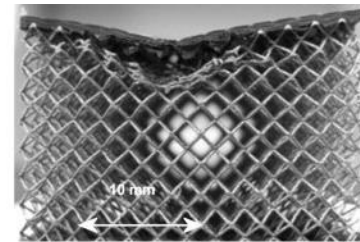


Mines et al., 2013

- Vertikální „věžová“ varianta testeru
- Nízká rychlost blízká statickému zatěžování
- Měření působící síly tenzometrem na indentoru
- Měření rychlosti pomocí laserového rychloměru

Shen et al., 2013

- Vertikální „věžová“ varianta testeru
- Rychlost dopadu do 10 mm/s
- Měření působící síly tenzometrem na indentoru
- Měření rychlosti pomocí vysokorychlostní kamery

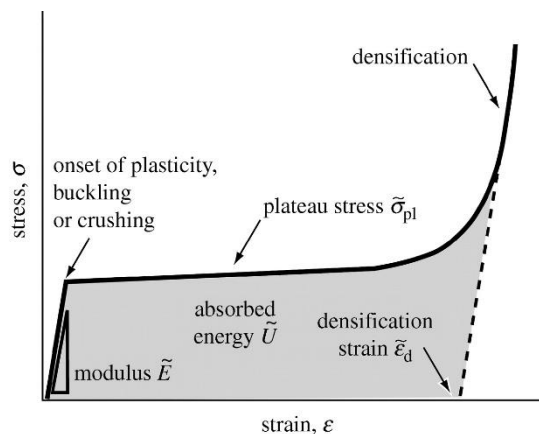


Shrnutí současného stavu poznání

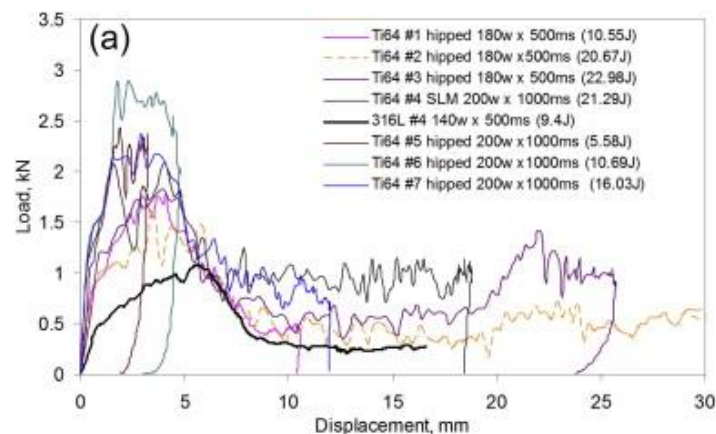
Popis absorpce energie v mikro-prutové struktuře

Yahaya et al., 2017; Mines et al., 2013; Shen et al., 2013

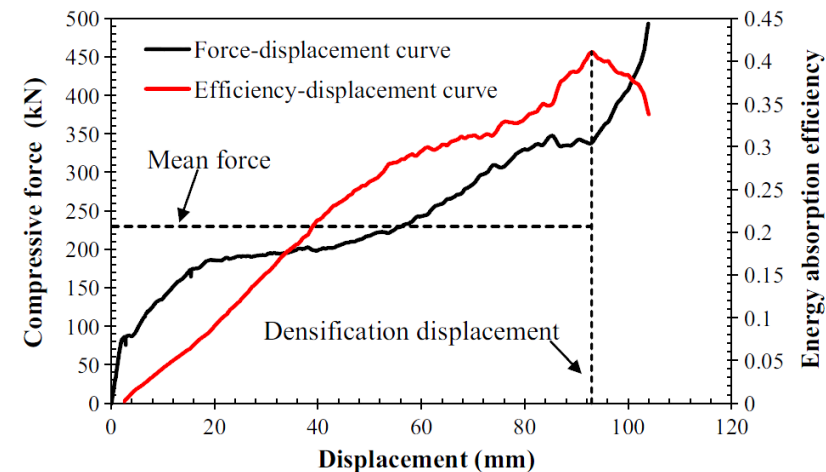
- Zjištění potřebných konstant pro popis absorpce energie ve strukturovaném materiálu
- Popis absorpce energie různé tvary základního tvaru struktury
- **síla - deformace**, střední síla, rychlost před dopadem, deformace po odlehčení, **rychlost deformace**, absorbovaná energie, **deformace kdy dochází ke zhuštění**



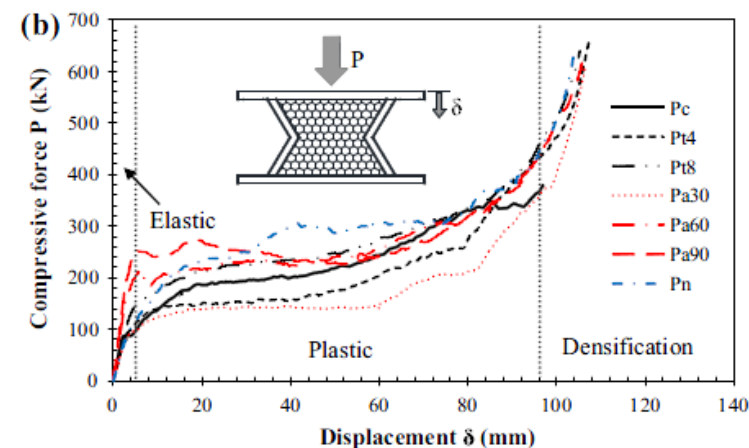
Ashby et al., 2016



Mines et al., 2013



Yahaya et al., 2017



Yahaya et al., 2017

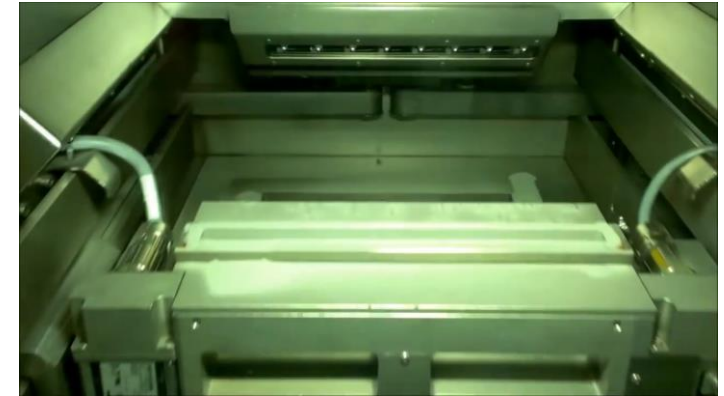
Shrnutí současného stavu poznání

Princip technologie Selective Laser Melting:

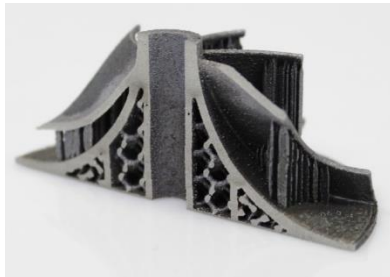
- Selektivní tavení jednotlivých vrstev dílu výkonným laser
- Technologie pracuje s kovovým práškem
- Umožňuje výrobu unikátních komplexních dílů

Problémy technologie:

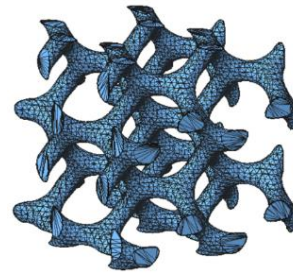
- Proces ovlivňuje velký počet parametrů, stabilita procesu
- Rozdílné nastavení parametrů pro objemové a tenkostěnné (strukturované) díly
- Mechanické vlastnosti tenkostěnných výrazně ovlivňují i malé materiálové vady



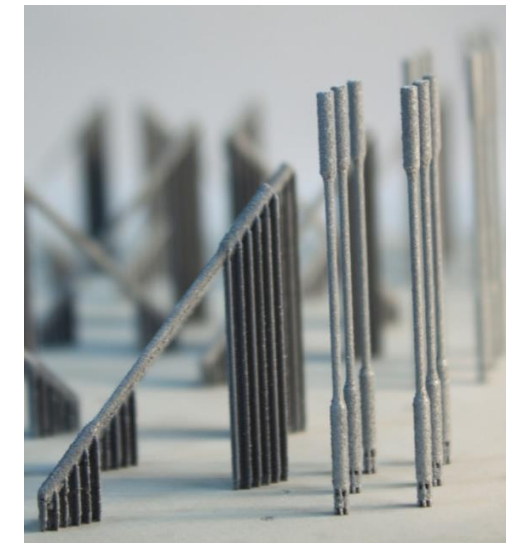
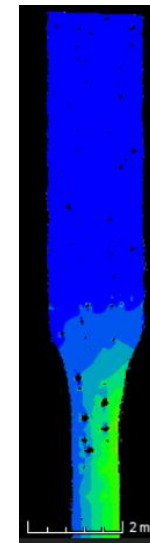
Technologie Selective Laser Melting



Kombinovaný díl



Gyroidní struktura



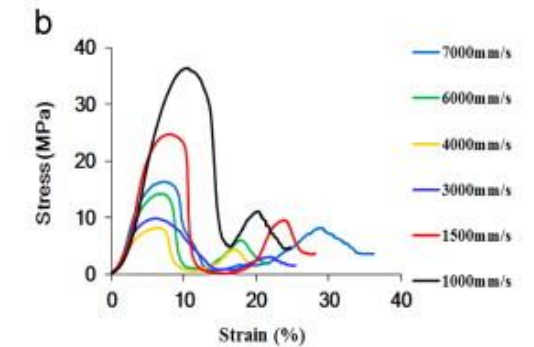
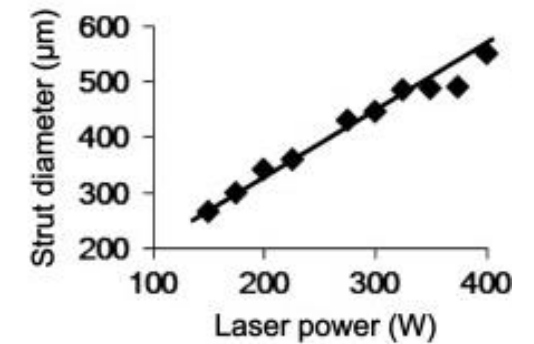
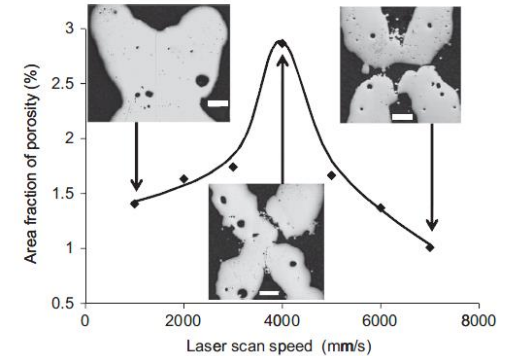
Pruty s průměrem 1mm

Shrnutí současného stavu poznání

Vliv procesních parametrů na mechanické a materiálové vlastnosti mikro-prutových struktur

Qui et al., 2015

- **Rozměrová přesnost struktury, porozita materiálu, mech. vlastnosti**
- Při používání vysokých výkonů laseru dochází ke zvětšení průměru prutu oproti požadovanému
- Velikost porosity je ovlivňována jak rychlostí stavby tak výkonem laseru
- Doporučená kombinace LS = 3000 mm/s; LP = 300W



Qui et al., 2015

Shrnutí současného stavu poznání

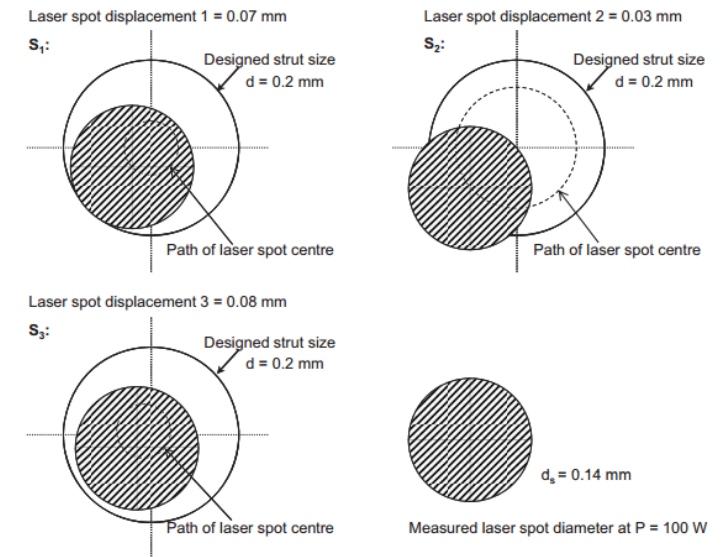
Vliv procesních parametrů na mechanické a materiálové vlastnosti mikro-prutových struktur

Qui et al., 2015

- **Rozměrová přesnost struktury, porozita materiálu, mech. vlastnosti**
- Při používání vysokých výkonů laseru dochází ke zvětšení průměru prutu oproti požadovanému
- Velikost porosity je ovlivňována jak rychlostí stavby tak výkonem laseru
- Doporučená kombinace LS = 3000 mm/s; LP = 300W

Abele et al., 2015

- Optimalizace rychlosti laseru a skenovací strategie pro výrobu rozměrově přesného prutu (základní prvek str. mat.)
- Přesnější výpočet energie podle strategie laseru



Abele et al., 2015

$$Energie = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}$$

$$l_{melt} = (d - 2 \cdot S) \cdot \pi$$

$$t_{exp} = \frac{(d - 2 \cdot S) \cdot \pi}{v_s}$$

Shrnutí současného stavu poznání

Materiálový model mikro-prutových struktur

Majzobi et al., 2011

- Zjištění potřebných konstant pro popis rychlé deformace materiálu
- Pro potřeby porovnání s budoucím MKP výpočtem

Johnson-Cook materiálový model

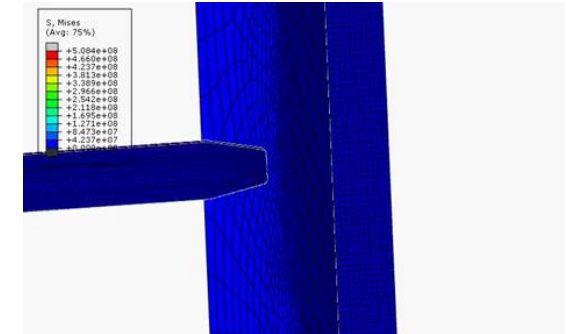
- Spojuje vztahy pro:
 - 1) Napětí a deformaci
 - 2) Rychlost deformace a napětí
 - 3) Měknutí materiálu při plastické deformaci

$$\sigma_y = [A + B \cdot (\bar{\epsilon}^p)^n] * \left[1 + c \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\bar{\epsilon}}^0} \right] * \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right]$$

(1) (2) (3)

A - σ_0 – yield stress [MPa],
B - hardening modulus [MPa]
c - strain rate sensitivity coefficient [-]
n - hardening coefficient [-]
m - thermal softening coefficient [-]

T_{room} – room temperature [K]
 T_{melt} – melting temperature [K]
 $\bar{\epsilon}^p$ – equivalent plastic strain
 $\dot{\bar{\epsilon}}^p$ – strain rate
 $\dot{\bar{\epsilon}}^0$ – reference value of strain rate



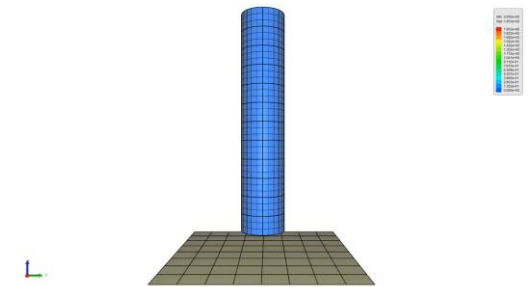
www.youtube.com

Johnson-Cook Failure model

- Kritérium porušení materiálu
- Predikuje iniciaci trhliny v materiálu
- Taylorův test materiálu

$$\epsilon_f = D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)$$

ϵ_f – fracture strain
 D_1, D_2, D_3 – material constants
 σ^* - stress triaxiality ratio



www.youtube.com

Shrnutí současného stavu poznání

Materiálový model mikro-prutových struktur

Majzooobi et al., 2011

- Zjištění potřebných konstant pro popis rychlé deformace materiálu
- Pro potřeby porovnání s budoucím MKP výpočtem

Johnson-Cook materiálový model

- Spojuje vztahy pro:
 - 1) Napětí a deformaci
 - 2) Rychlost deformace a napětí
 - 3) Měknutí materiálu při plastické deformaci

$$\sigma_y = [A + B \cdot (\bar{\epsilon}^p)^n] * \left[1 + c \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\bar{\epsilon}}^0} \right] * \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right]$$

(1) (2) (3)

~~A - σ_0 – yield stress [MPa],~~
~~B - hardening modulus [MPa]~~
~~c - strain rate sensitivity coefficient [-]~~
~~n - hardening coefficient [-]~~
~~m - thermal softening coefficient [-]~~

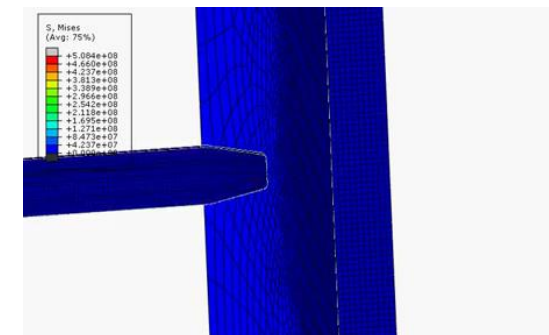
~~T_{room} – room temperature [K]~~
 ~~T_{melt} – melting temperature [K]~~
 ~~$\bar{\epsilon}^p$ – equivalent plastic strain~~
 ~~$\dot{\bar{\epsilon}}^p$ – strain rate~~
 ~~$\dot{\bar{\epsilon}}^0$ – reference value of strain rate~~

Johnson-Cook Failure model

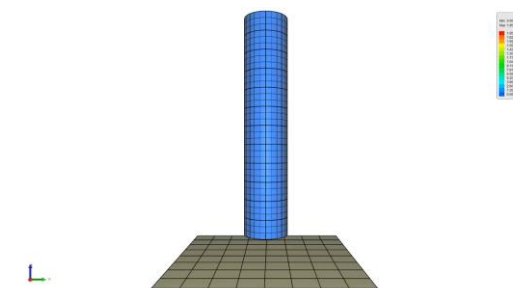
- Kritérium porušení materiálu
- Predikuje iniciaci trhliny v materiálu
- Taylorův test materiálu

$$\epsilon_f = D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)$$

ϵ_f – fracture strain
 D_1, D_2, D_3 – material constants
 σ^* - stress triaxiality ratio



www.youtube.com



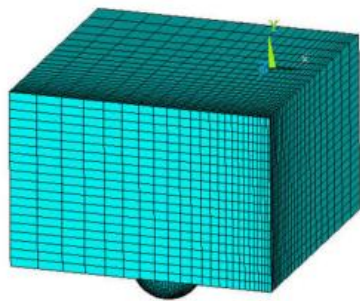
www.youtube.com

Shrnutí současného stavu poznání

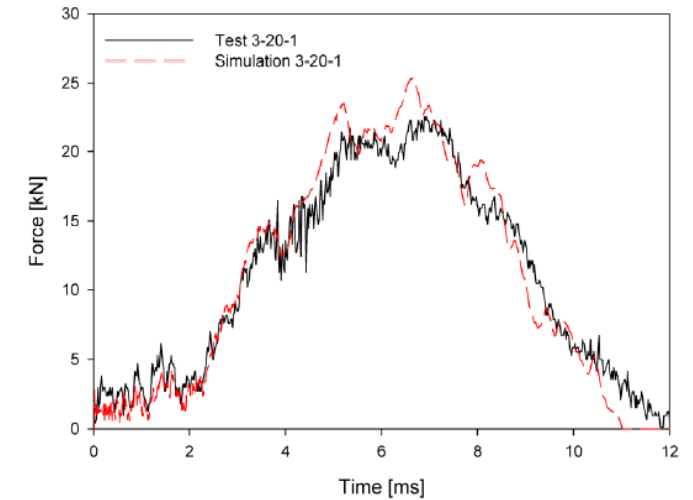
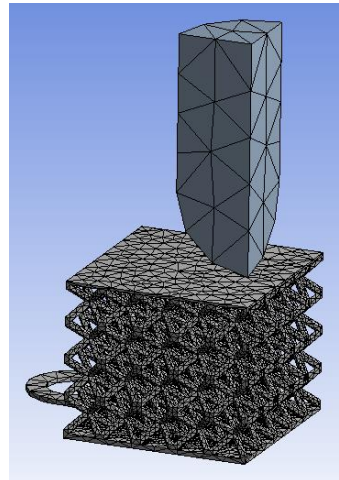
MKP výpočet mikro-prutových struktur

Mohammed et al., 2012; Labeas et al. 2013

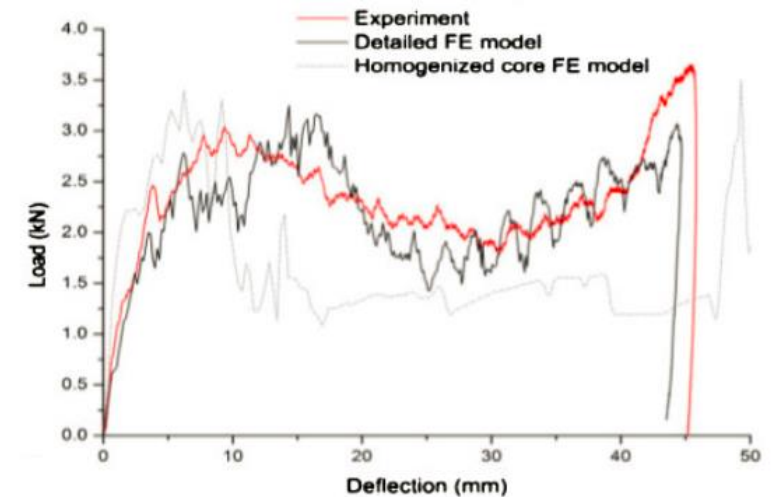
- Reálný model se správným materiálovým modelem ukazuje dobrou shodu s realitou
- Výpočet není možné provádět na reálné 3D geometrii z důvodů extrémní časové náročnosti výpočtu
- Nutné zjednodušení geometrie mikro-prutové struktury
- Porovnávání výsledků s experimentem
- Vhodné řešiče Ansys, LS-Dyna



Labeas et al. 2013



Stress-strain curve for a compression test



Curves of experiment and numerical load-deflection (BCC structure)

Vědecká otázka a pracovní hypotézy

Vědecká otázka

- Lze dosáhnout korelace mezi MKP výpočtem dynamického děje mikro-prutové struktury a jejími reálnými mechanickými vlastnostmi?

Pracovní hypotézy

- *„Vhodnou kombinací procesních parametrů a strategie laseru je možné vyrábět strukturovaný materiál bez vnitřních materiálových vad.“*
- *„Při znalosti reálných mechanických vlastností strukturovaného materiálu je možné predikovat jeho absorpci energie v některém z dynamickým nelineárních řešičů.“ (Ansys, LS-Dyna)*
- *„Vhodnou volbu geometrie základní buňky strukturovaného absorbátoru je možné řídit množství a průběh absorpce energie.“*

Vymezení cílů disertační práce

Cíl disertační práce

- Studium mechanických vlastností nutných pro popsání rychlé deformace mikro-strukturového materiálu vyrobeného technologií Selective Laser Melting.

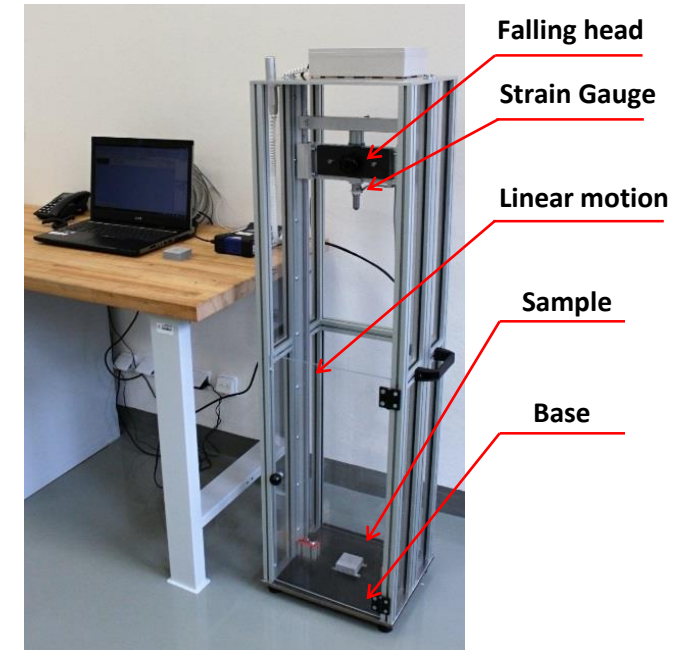
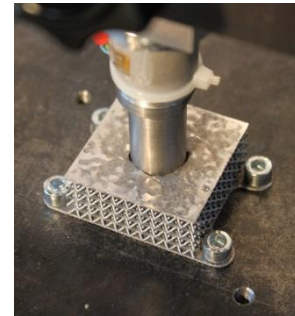
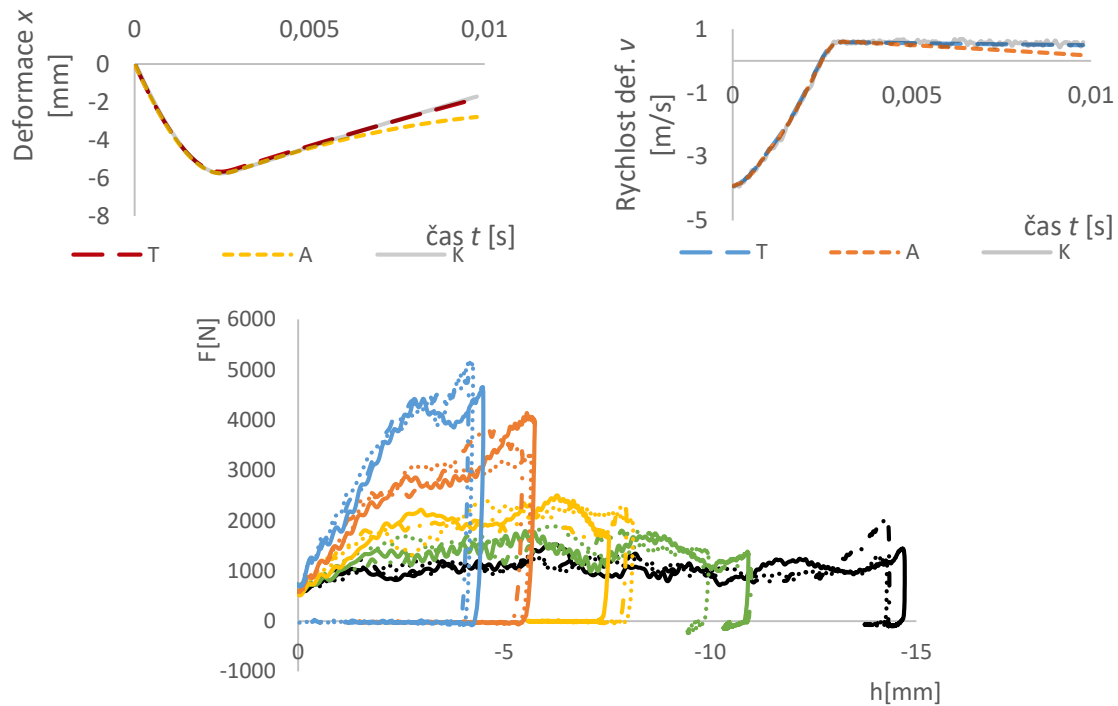
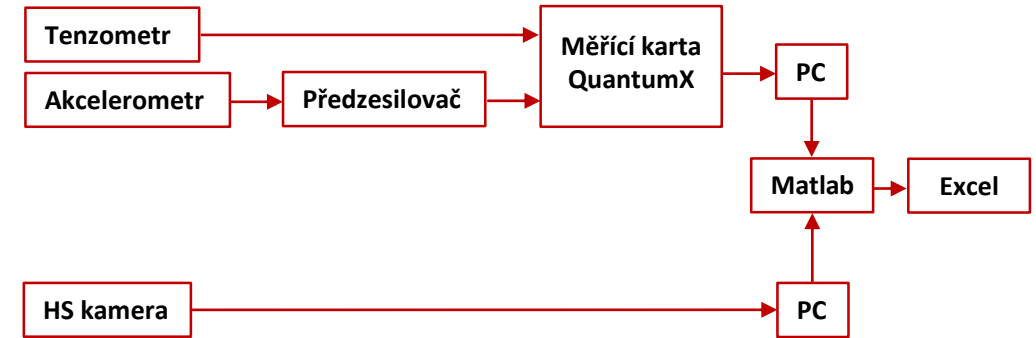
Dílčí úkoly pro splnění cíle

- Vývoj experimentálního zařízení popis absorpčního chování mikro-prutové struktury vyrobené technologií SLM
- Výzkum procesních parametrů SLM technologie pro strukturované materiály z hliníkové slitiny AlSi10Mg
- Nalezení a testování potřebných parametrů strukturovaného materiálu pro výpočet nelineární dynamické úlohy.
- Vytvoření numerického modelu absorpce energie ve strukturovaném materiálu s využitím dynamického nelineárního řešiče (Ansys, LS-Dyna)

Stav dizertační práce

Konstrukce testovacího zařízení – IMPAKTOR 1.2

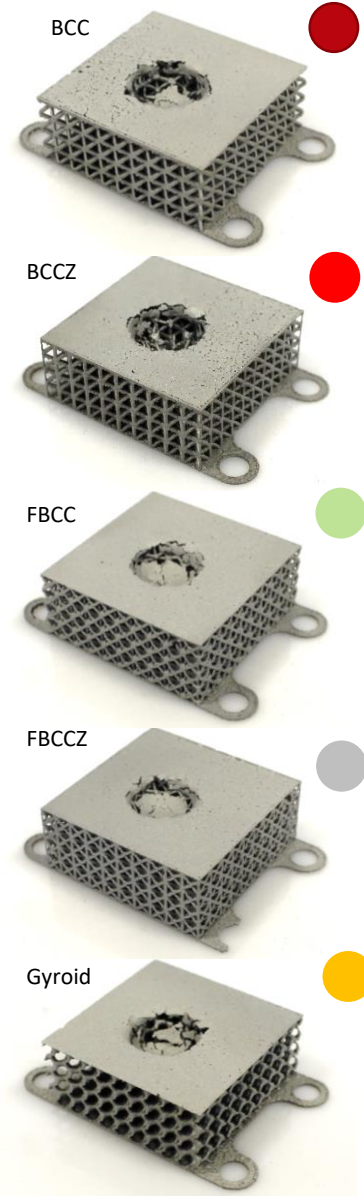
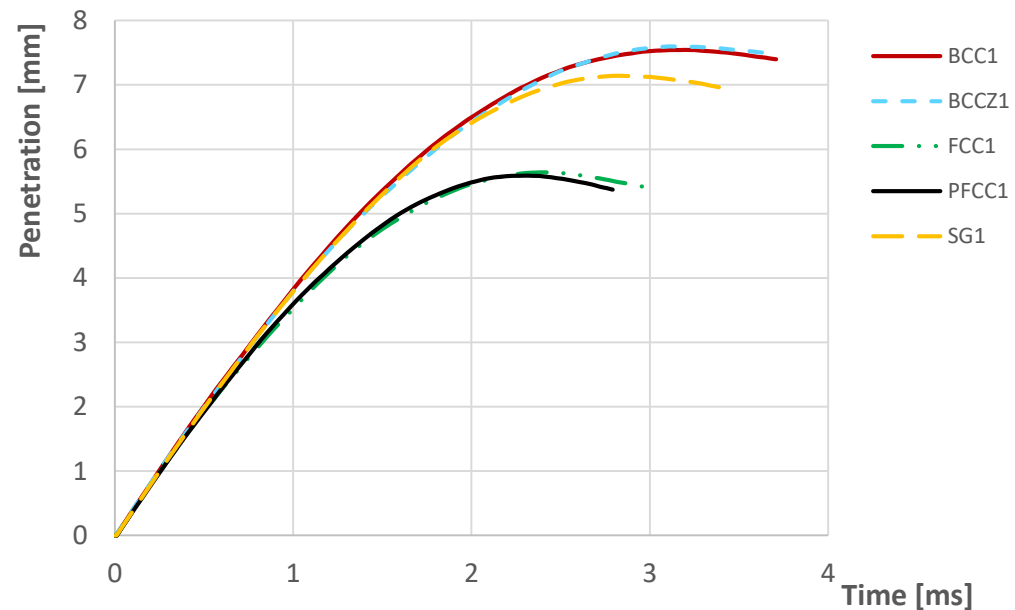
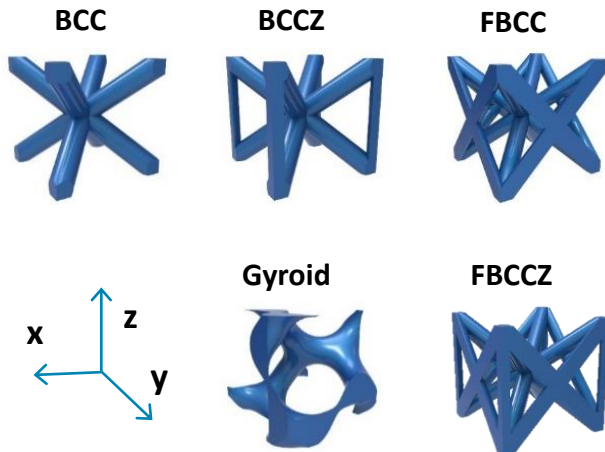
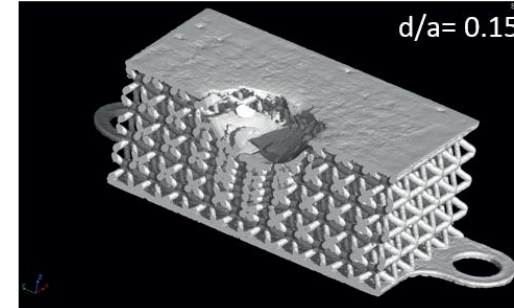
- Pádové zařízení – změna potenciální energie na kinetickou
- Max. energie dopadu 55J
- Poloautomatické vyhodnocení v softwaru Matlab
- Měření **Síla (tenzometr)**, **Deformace (HS kamera)**, **zrychlení (akcelerometr)**



Stav dizertační práce

Mechanické testování – Impaktní odolnost BCC

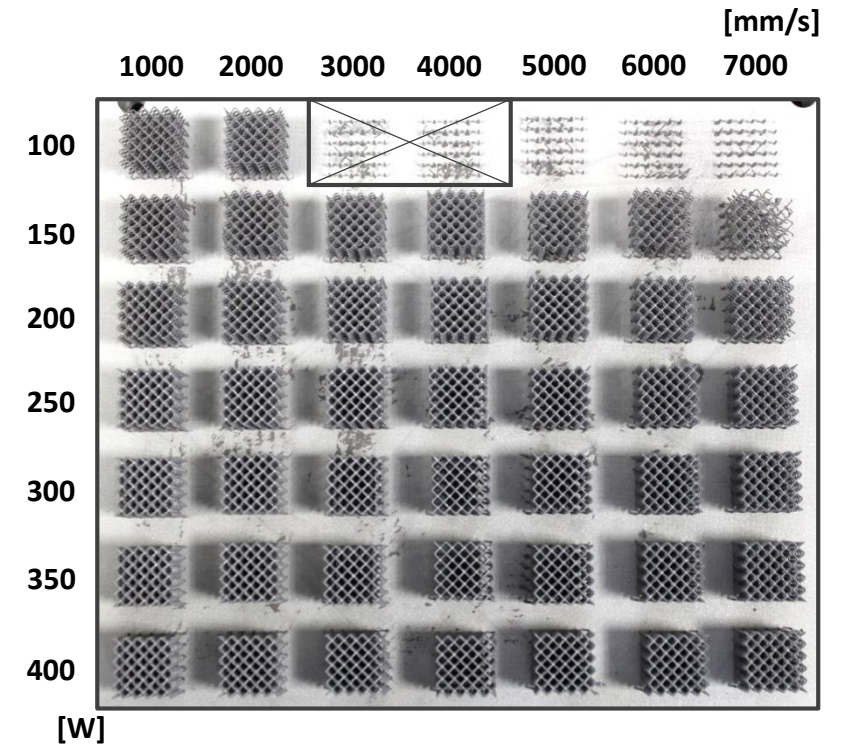
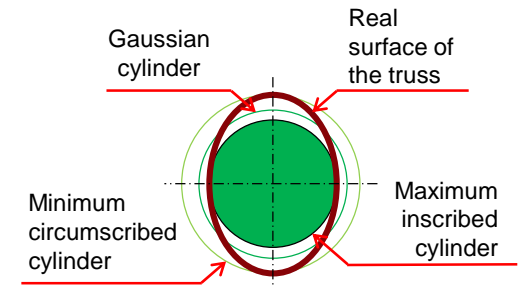
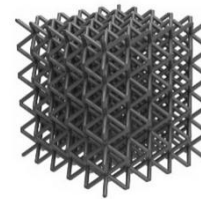
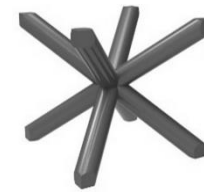
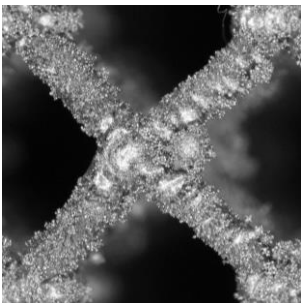
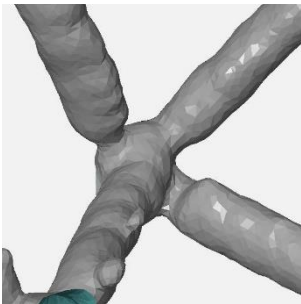
- 5 různých typů geometrie
- Všechny vzorky mají **stejný objem materiálu**
- Volbou vhodné geometrie lze ovlivňovat mechanické vlastnosti
- Mechanické vlastnosti nejlépe popisuje veličina rychlost deformace



Stav dizertační práce

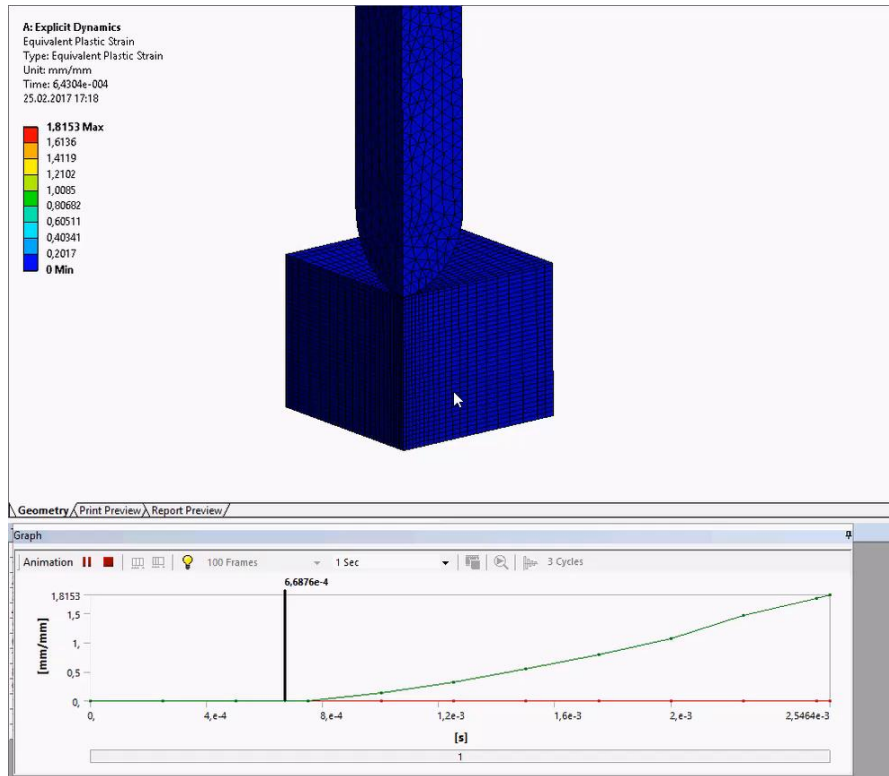
Vývoj procesních parametrů

- Procesní mapa pro tloušťku = 50 μ m a 30 μ m
- Vzorek: BCC struktura; d = 0,6 mm
- Trend odpovídá výsledkům ze článku **Qui et al., 2015**
- Nepředpokládané defekty prutu
- Vývoj nové strategie drah laseru

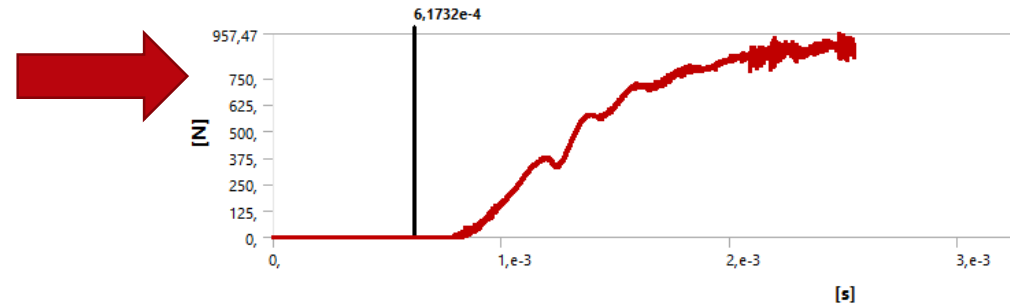


Stav dizertační práce

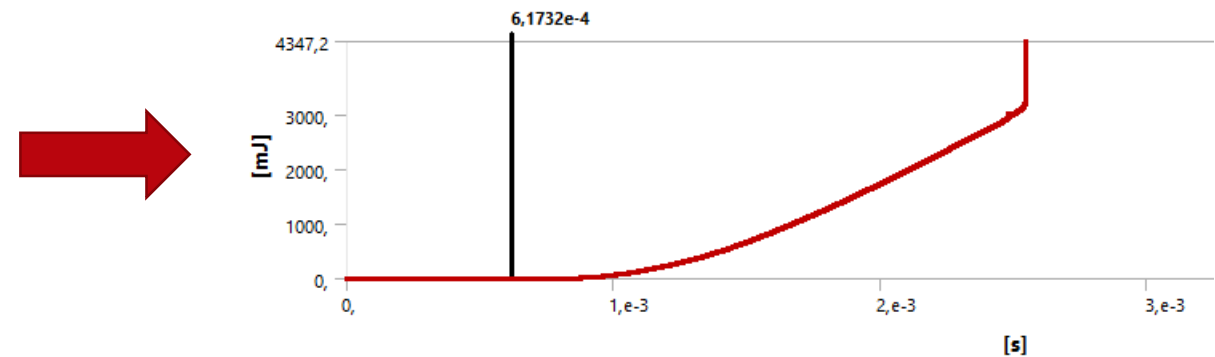
MKP výpočet dynamického děje



FEM sample penetration (quarter symmetry) – plastic strain simulation



Total energy in time



- Plates - Johnson-Cook material model with failure criterion
- Core – Multilinear kinematic hardening with failure criterion

Přehled dosažených výsledků

1. Experimentální zařízení

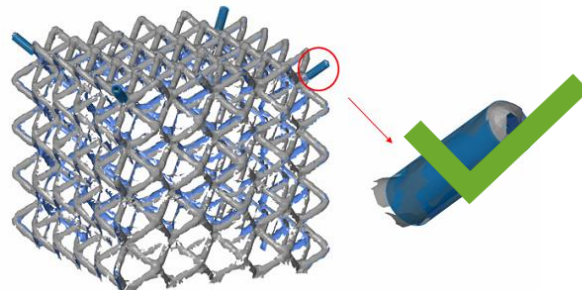


1.2 Mechanické testování



- ✓ Impaktní odolnost; BCC materiál
- ✓ Rychlá tlaková zkouška; Vybrané typy základních buněk
- ✗ Testování str. mat. (BCC) vyrobeného s nalezenými parametry

2. Testování procesních parametrů

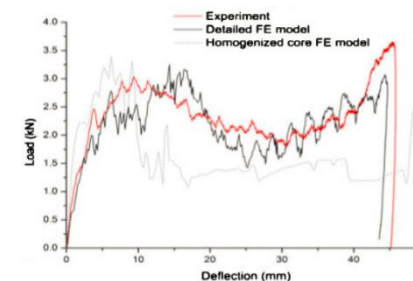


- Vliv *LS*, *LP* a tloušťky vrstvy
- Rozměrová přesnost, porozita
- $LS = 1000 - 7000 \text{ mm/s}$; $LP = 100 - 400W$;
 $t = 50 \mu\text{m}$; $30 \mu\text{m}$
- BCC strukturovaný materiál; 2x 49 vzorků

2.1 Testování procesních parametrů

- Pouze na vybrané oblasti procesní mapy
- Změna strategie výroby ✗
- Rozměrová přesnost, porozita, válcovitost prutu

3. MKP výpočet dyn. děje



- ✓ Výpočet s reálnou geometrií
- ✓ Výpočet se zjednodušenou geometrií
- ✗ Vytvoření materiálového modelu
- ✗ Návrh absorbéru pro kont. aplikaci

Prezentace výsledků dizertační práce

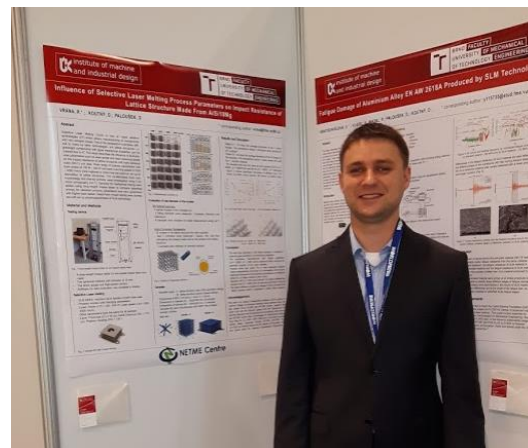
EuroPM 2015 – Reims

EURO
PM2015
congress & exhibition



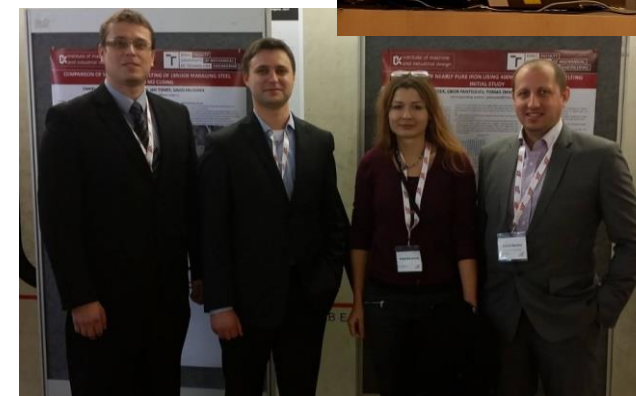
WorldPM 2016 – Hamburk

WORLD
PM2016
Hamburg



3Dtrends 2016 – Liberec

3D^t
2016



Přehled publikací

Články v časopisech - Scopus

- **VRÁNA, R.;** KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D.; ZIKMUND, T. Impact Resistance of Lattice Structure Made By Selective Laser Melting From AlSi12 Alloy. MM Science Journal, 2015, roč. 2015, č. 4, s. 852-855. ISSN: 1805- 0476.
- **VRÁNA, R.;** KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D. Impact Resistance of Different Types of Lattice Structures manufactured by SLM. MM Science Journal, 2016, roč. 2016, č. 6, s. 1579-1585. ISSN: 1803-1269.

Články v konferenčních sbornících - Scopus

- **VRÁNA, R.;** PALOUŠEK, D.; KOUTNÝ, D.; KOUKAL, O.; ZIKMUND, T.; KREJČÍ, P. Impact resistance of lattice structure made by Selective Laser Melting technology. In Euro PM2015 Proceedings. Reims, France: 2015. s. 1-6. ISBN: 978-1-899072-47- 7.
- **VRÁNA, R.;** KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D.; ZIKMUND, T. Influence of Selective Laser Melting Process Parameters on Impact Resistance of Lattice Structure made from AlSi10Mg. In World PM2016 Proceedings. Hamburk, Germany.
- KOUKAL, O.; KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D.; **VRÁNA, R.;** ZIKMUND, T.; PANTĚLEJEV, L. Research about the Influence of Process Parameters of Selective Laser Melting on Material EN AW 2618. In Euro PM2015 Proceedings. Reims, France: 2015. s. 1-6. ISBN: 978-1-899072-47- 7.

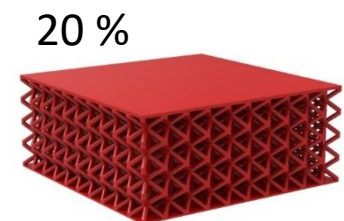
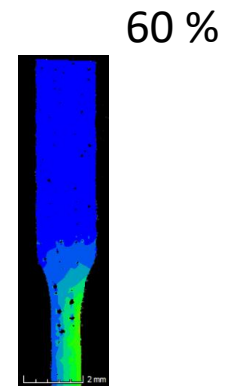
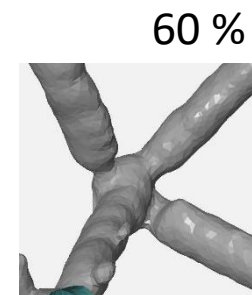
Články v konferenčních sbornících

- **VRÁNA, R.;** KOUKAL, O.; KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D.; KREJČÍ, P. Device for Testing Impact Resistance of Lattice Structures Panels Produced by the Selective Laser Melting. In Book of Proceedings of 56th International Conference of Machine Design Department. První. 2015. s. 144-149. ISBN: 978-80-552-1377- 4.
- KOUTNÝ, D.; **VRÁNA, R.;** PALOUŠEK, D. Dimensional accuracy of single beams of AlSi10Mg alloy and 316L stainless steel manufactured by SLM. In 5th International Conference on Additive Technologies iCAT2014. Ljubljana: Interesansa, 2014. s. 142-147. ISBN: 978-961-281-579- 0.

Přehled publikací

Plán publikací dizertační práce

Publikace – očekávané poznatky		Pokrok						Scop	IF
		Experiment zařízení	Mech. testování	Procesní parametry	Prostorové struktury	MKP			
1	ICMD2015 – konstrukce experimentálního zařízení	✓							
	Euro PM2015 – naměřená data (AlSi10Mg, BCC), validace zařízení, tvorba měřicího skriptu, návrh konstrukčních změn	✓					✓		
	MM Science Journal 2015 – naměřená data (AlSi12, BCC), rozšíření skriptu, návrh konstrukčních změn	✓					✓		
2	World PM2016 – výzkum procesních parametrů, vliv na impaktovou odolnost		✓	✓			✓		
	MM Science Journal 2016 – design. úprava exp. zařiz., rychlá tlaková zkouška, testování dalších typů struktur (BCC-Z, Gyroid,...)	✓	✓		✓		✓		
3	IF časopis – procesní parametry – energetický popis, povrch prutu			✗				✗	
	IF časopis – (spoluaut.) MKP simulace prutu na CT datech			✗		✗		✗	
4	Additive Manufaurin Journal – MKP simulace rychlého děje, porovnání s výsledky testování		✗	✗	✗	✗		✗	
Sepsání disertační práce									



Děkuji vám za pozornost

Radek Vrána

vrana@fme.vutbr.cz

<http://3Dlaboratory.cz/>



Institute of Machine
and Industrial Design