

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

Radek Vrána

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

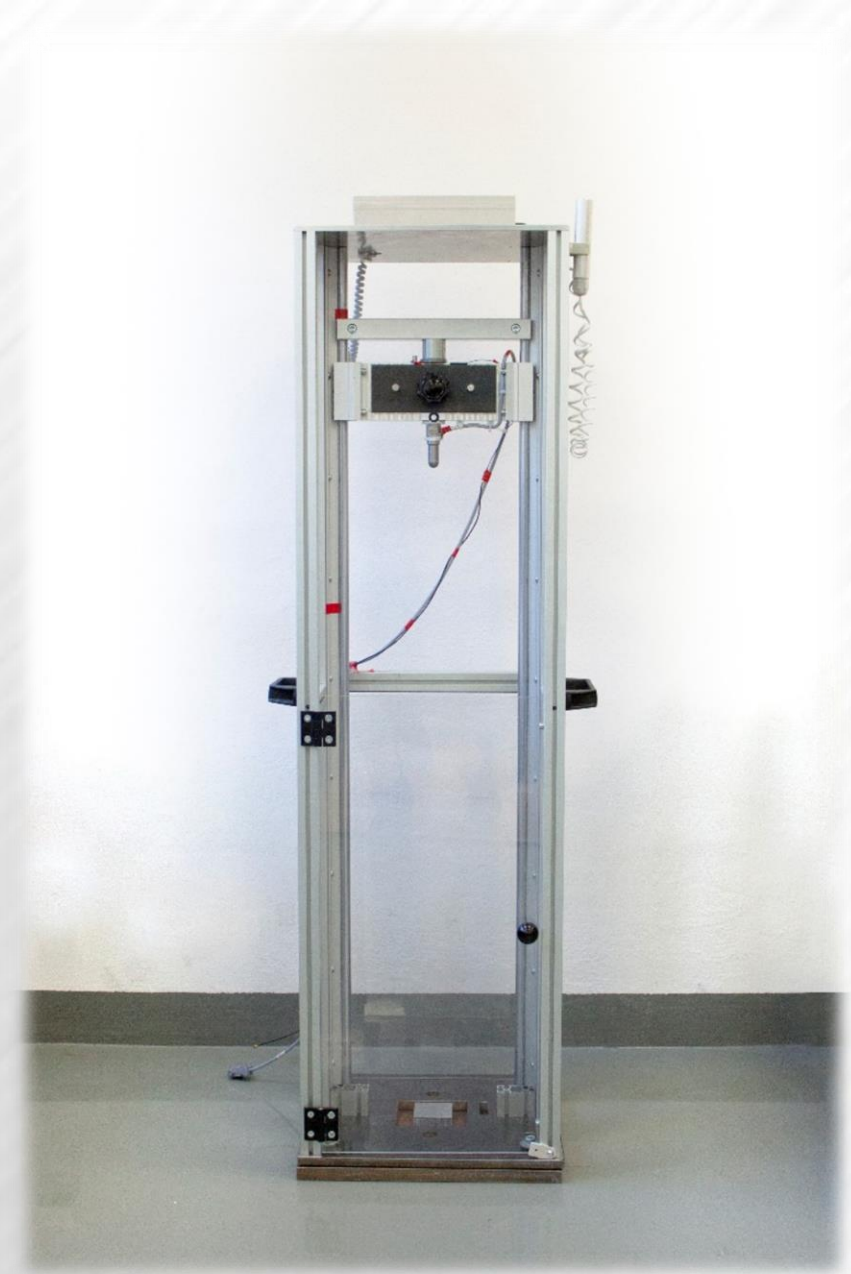
Školitel specialista: doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Ústav konstruování

Fakulta strojního inženýrství

VUT v Brně

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
5. června, 2017, FSI VUT v Brně



Institute of Machine
and Industrial Design

Obsah prezentace

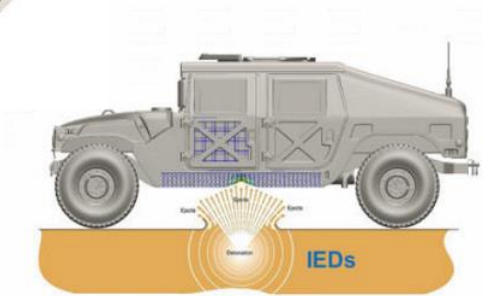
1. Motivace
2. Shrnutí současného stavu pozvání
3. Cíle dizertační práce
4. Současný stav dizertační práce
5. Přehled dosáhnutých výsledků
6. Publikační činnost



Zařízení SLM280HL

Motivace

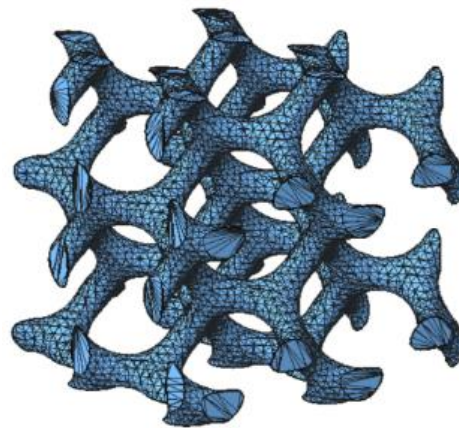
- Navrhnout díly s řízenou deformací
- SLM – navařování jednotlivých vrstev na sebe
- výroba komplexních dílů – mikro prutová struktura
- nízká hmotnost dílů
- široké portfolio materiálů
- schopnost dobře absorbovat energii



Wang et al., 2016



Topologicky optimalizovaná
těhlice

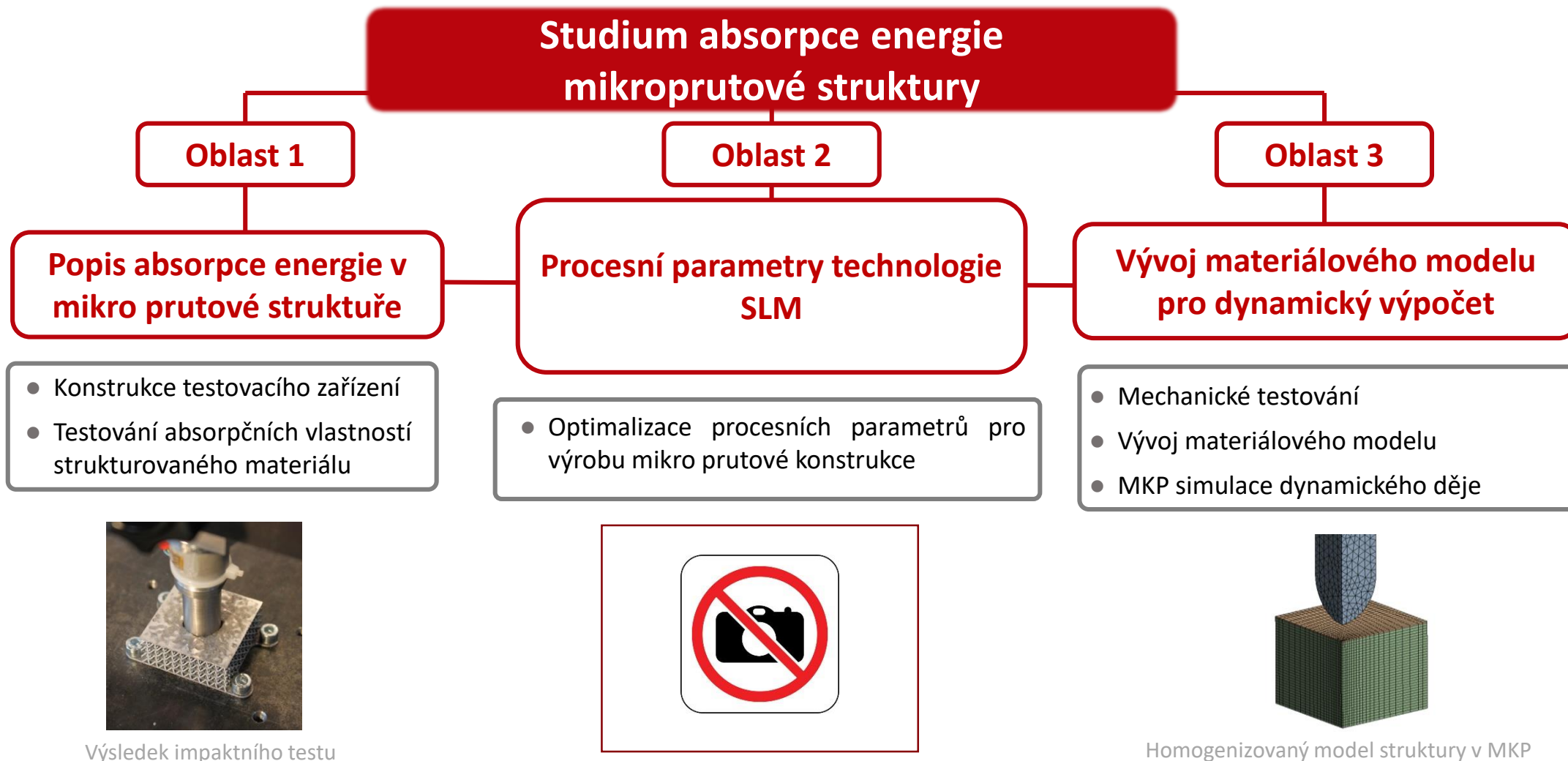


Gyroidní struktura



<https://www.infernoexoticcar.com>

Shrnutí současného stavu poznání



Shrnutí současného stavu poznání

Popis absorpce energie ve strukturovaném materiálu

Konstrukce testovacího zařízení

Yahaya et al., 2015

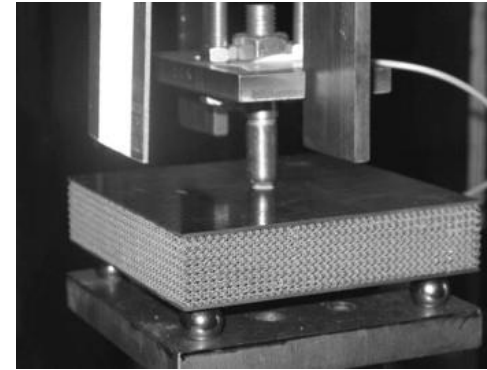
- Horizontální verze testeru
- Dopadová rychlost projektilu nad 50 m/s
- Projektil urychlován stlačeným dusíkem

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

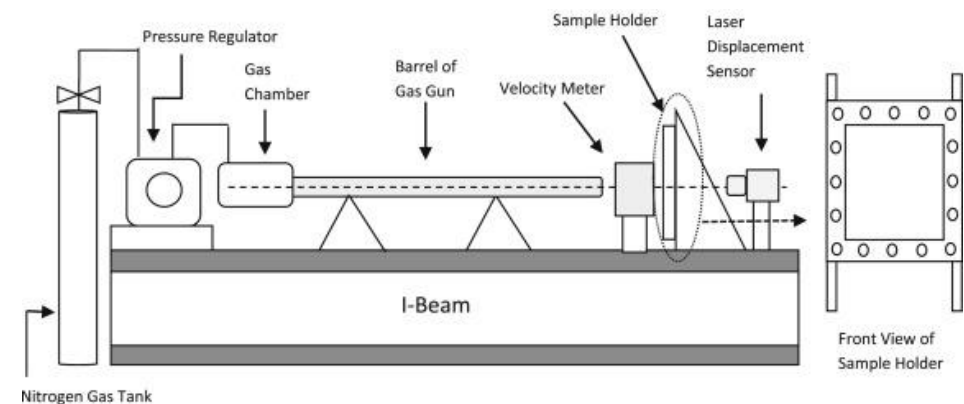
- Vertikální „věžová“ varianta testeru
- Rychlost dopadu do 10 mm/s
- Měření působící síly tenzometrem na indentoru
- Měření rychlosti pomocí vysokorychlostní kamery



Mines et al., 2013



Shen et al., 2013



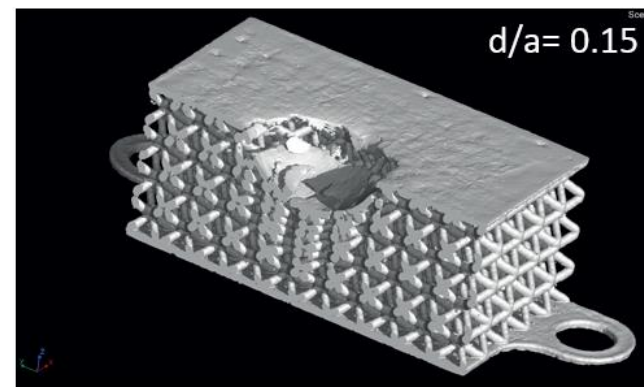
Yahaya et al., 2015

Shrnutí současného stavu poznání

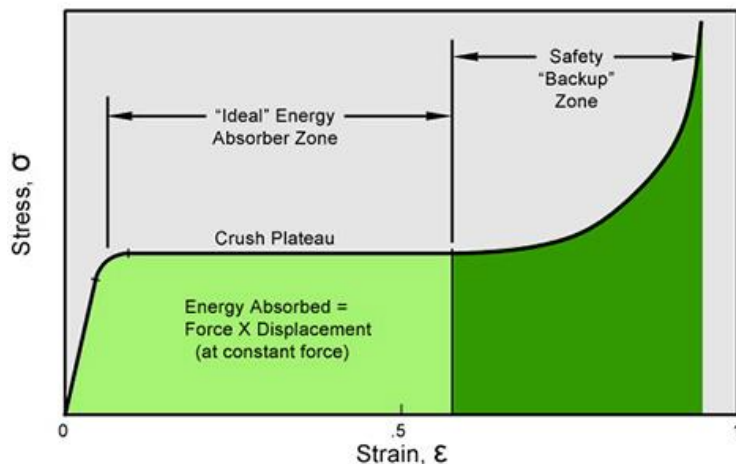
Popis absorpce energie v mikro-prutové struktuře

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

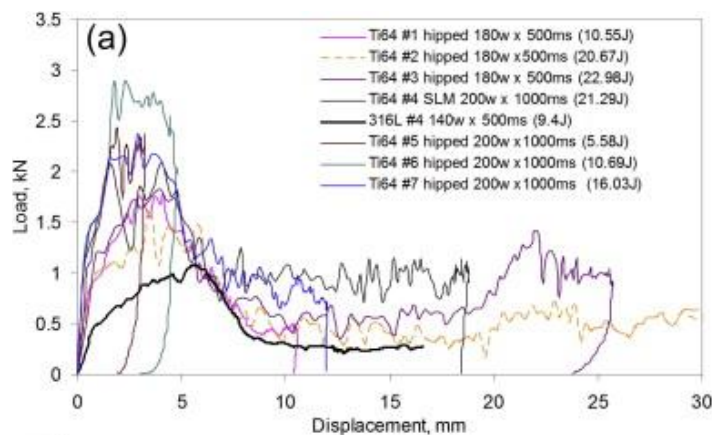
- Zjištění potřebných konstant pro popis absorpce energie ve strukturovaném materiálu
- **síla - deformace**, rychlost před dopadem, **rychlost deformace**, absorbovaná energie, **deformace kdy dochází ke zhuštění**, střední síla



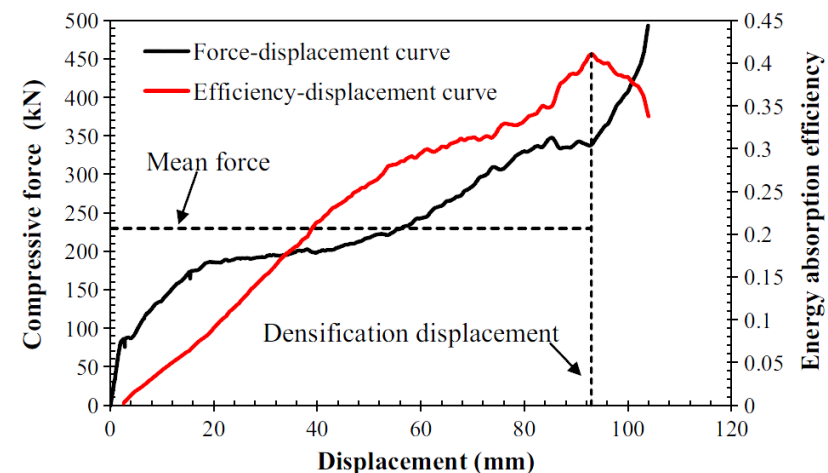
CT scan strukturovaného vzorku



<http://www.ergaerospace.com>



Mines et al., 2013



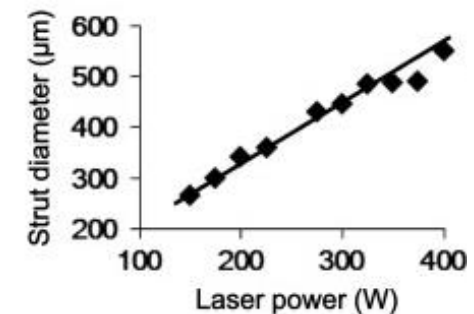
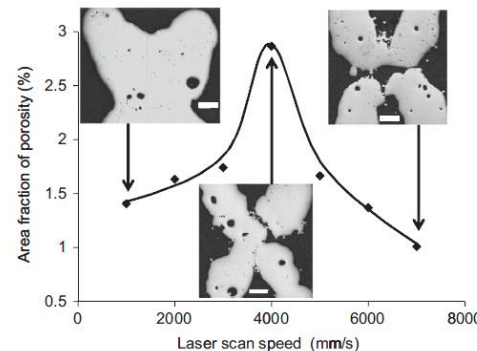
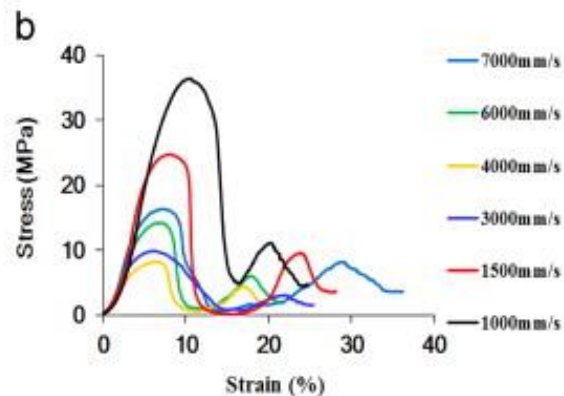
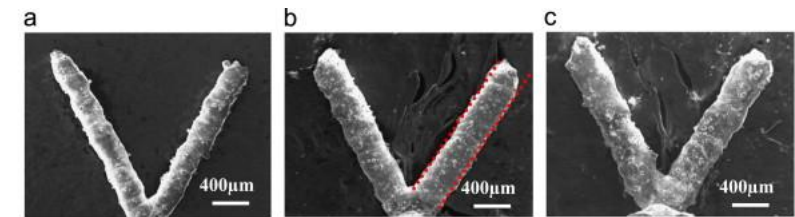
Yahaya et al., 2017

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
- Změna výkonu a rychlosti laseru
- Zvětšování průměru prutu vlivem vysokého výkonu laseru
- Porositu ovlivňuje především rychlost laseru a výkon - > energie
- Doporučená kombinace LS = 3000 mm/s; LP = 300W
- Strategie (dráhy) laseru není popsána
- materiál AlSi10Mg

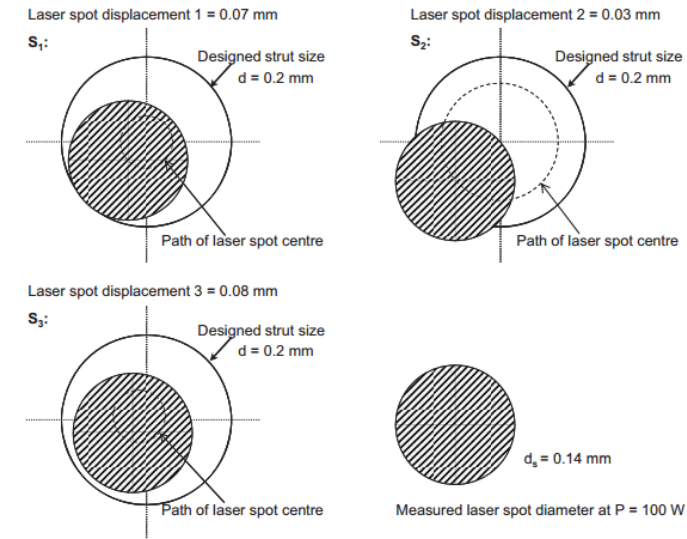
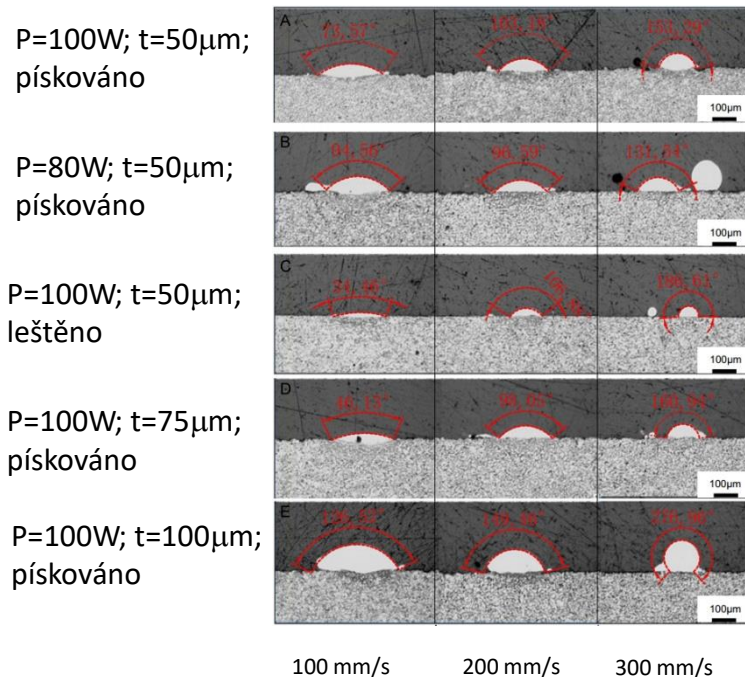


Shrnutí současného stavu poznání

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

Abele et al., 2015

- Optimalizace rychlosti laseru a skenovací strategie pro výrobu rozměrově přesného prutu (základní prvek str. mat.)
- **Výpočet energie v závislosti na dráze laseru (J/mm)**

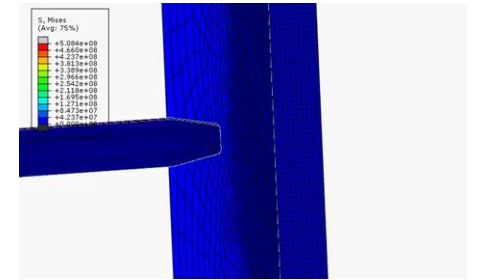


Abele et al., 2015

Zhang et al., 2013

- Pro materiál SS316L
- Metodika vyhodnocení vhodných parametrů
- Vliv procesních parametrů na single tracks
- **Tvar single tracku a jeho vyhodnocení**

Shrnutí současného stavu poznání



<http://www.youtube.com>

Materiálový model mikro prutových struktur

Gryten et al., 2007

- Impaktní zatěžování titanových plátů
- Materiálové konstanty získané Taylorovým testem

Johnson-Cook materiálový model

- Zpevnění materiálu je závislé:
 - 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

Banerjee et al., 2015

- Nalezení konstant pro popis porušení materiálu
- Získané konstanty ověřeny na MKP simulaci Charpyho impact testu

Johnson-Cook Failure model

- Kritérium porušení materiálu
- Predikuje iniciaci trhliny v materiálu
- 4 jednoosé tahové zkoušky; různé tvary těles

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}) (1 + D_4 \ln |\dot{\bar{\epsilon}}^*|) (1 + D_5 T^*)$$

ϵ_f – fracture strain

D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 – material constants

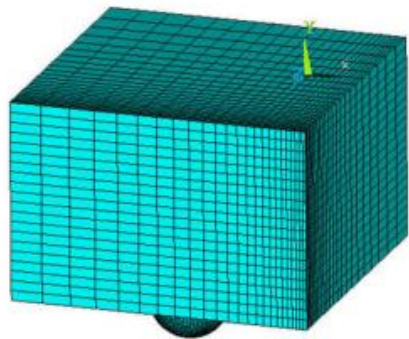
σ^* - σ_m / σ_{eq} - stress triaxiality ratio

Shrnutí současného stavu poznání

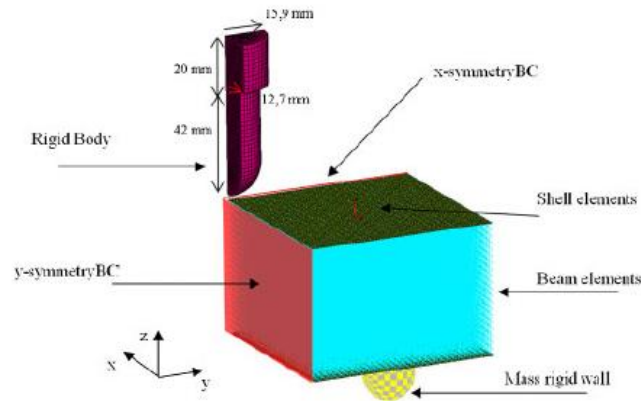
MKP výpočet mikro-prutových struktur

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

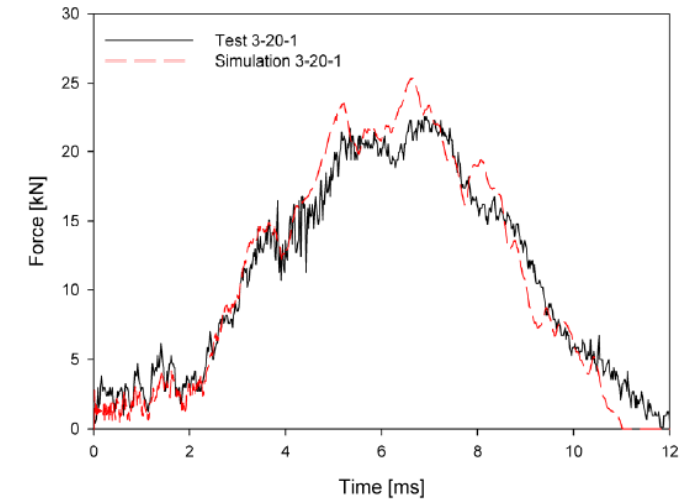
- Reálný model se správným materiálovým modelem ukazuje dobrou shodu s realitou
- Výpočet není možné provádět na reálné 3D geometrii (solid) z důvodů extrémní časové náročnosti výpočtu
- Nutné zjednodušení geometrie mikro prutové struktury
- **Porovnávání výsledků s experimentem**
- Vhodné řešiče Ansys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



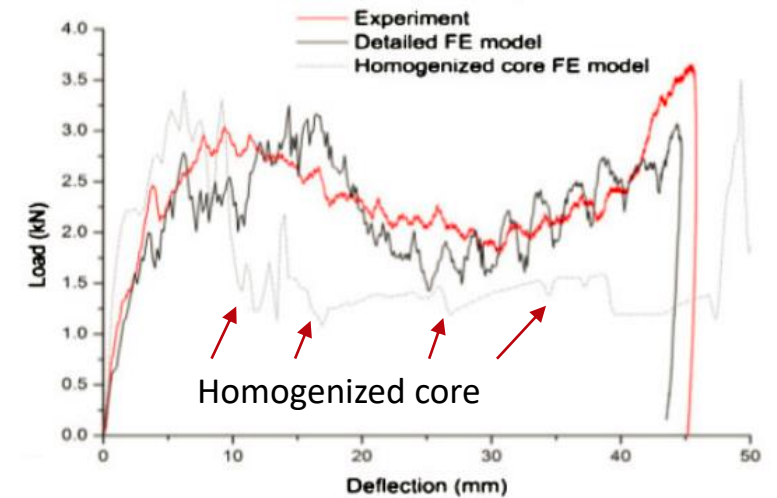
Labeas et al. 2013



Labeas et al. 2013



Stress-strain curve for a compression test



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

Vědecká otázka a cíl disertační práce

Vědecká otázka

- Lze dosáhnout shody výsledků MKP výpočtu dynamického děje mikro prutové struktury s jejími reálnými mechanickými vlastnostmi?

Cíl disertační práce

Primárním cílem disertační práce je vývoj materiálového modelu, který definuje mechanické vlastnosti mikro prutové struktury vyrobené technologií Selective Laser Melting pro MKP simulaci nelineární dynamické úlohy.

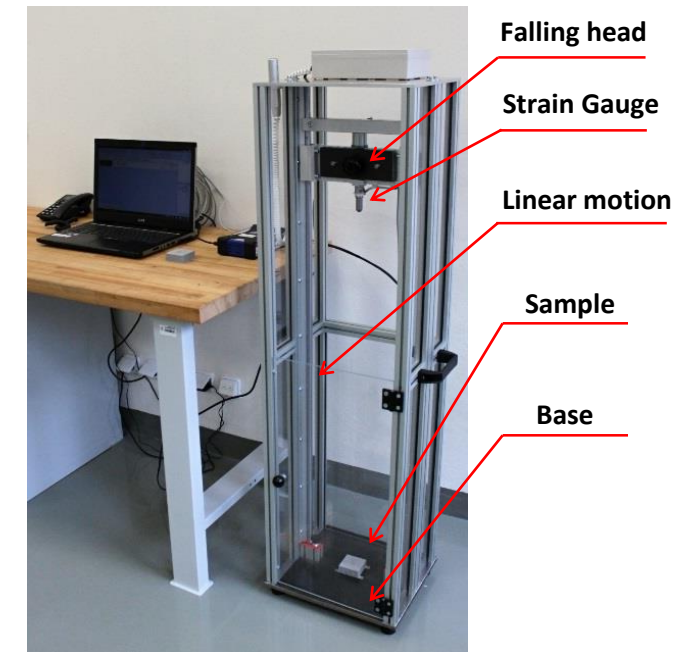
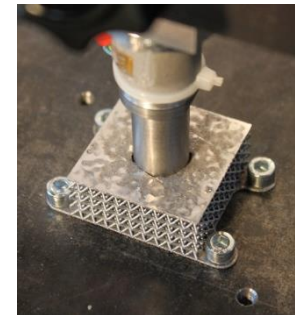
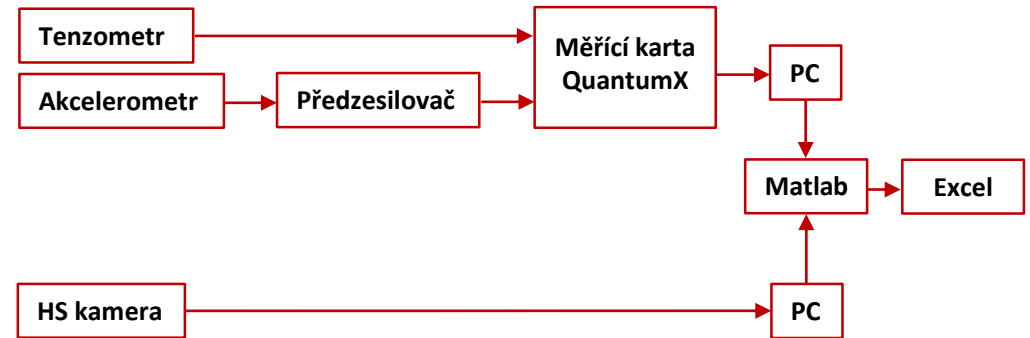
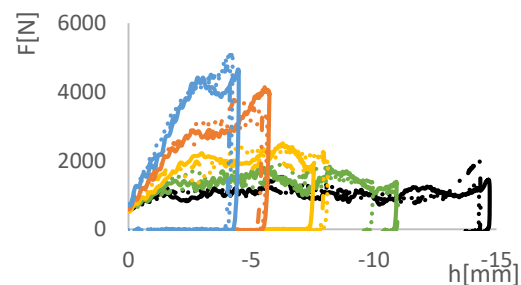
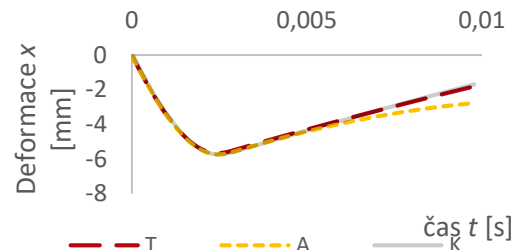
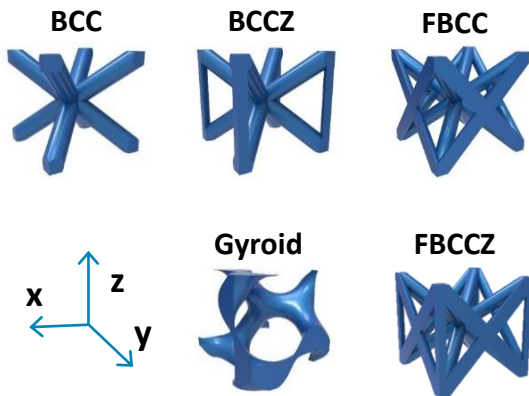
Dílčí úkoly pro splnění cíle

- Vývoj experimentálního zařízení popis absorpčního chování mikro prutové struktury
- Výzkum procesních parametrů SLM technologie pro strukturované materiály z hliníkové slitiny AlSi10Mg
- Zjištění parametrů materiálového modelu Johnson – Cook pro popis strukturovaného materiálu
- Vytvoření numerického modelu absorpce energie ve strukturovaném materiálu s využitím dynamického nelineárního řešiče (Ansys, LS-Dyna)

Stav dizertační práce

Konstrukce testovacího zařízení

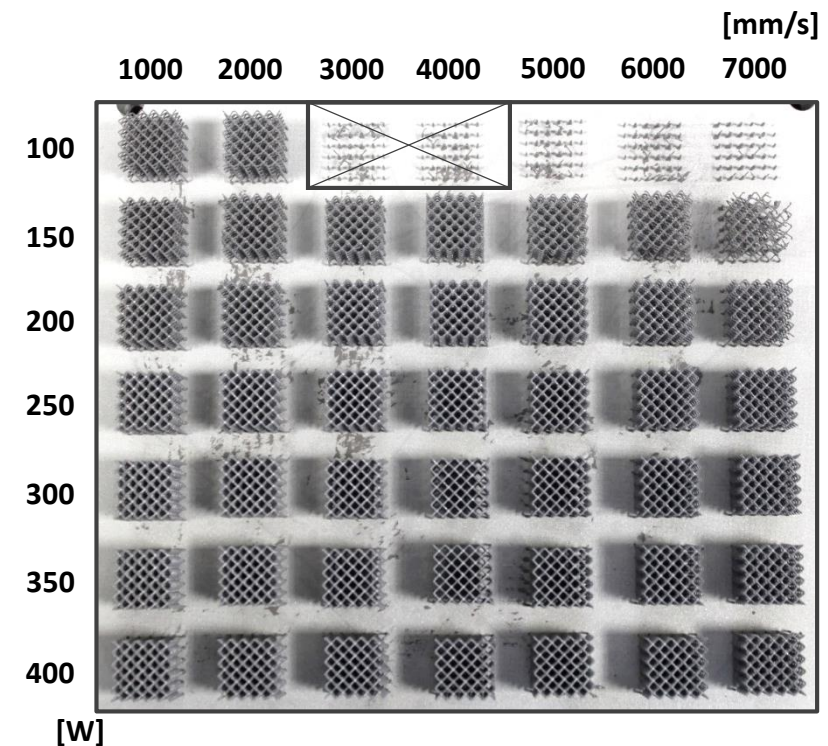
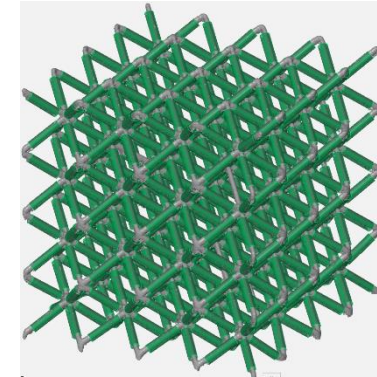
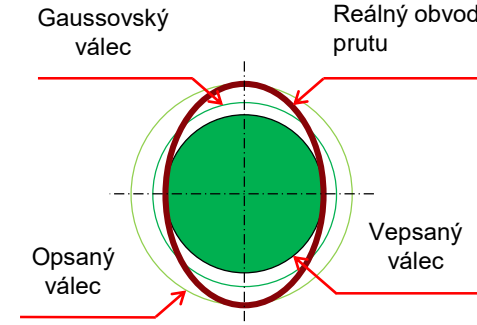
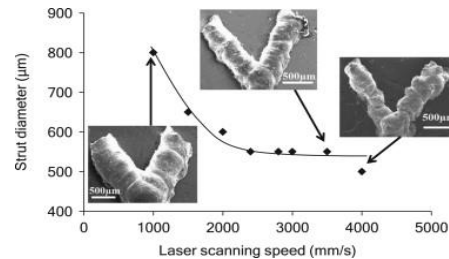
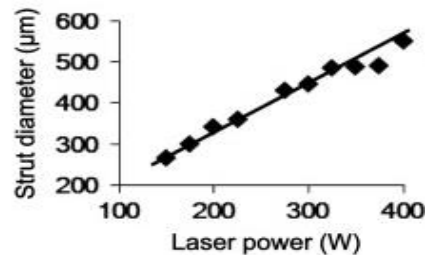
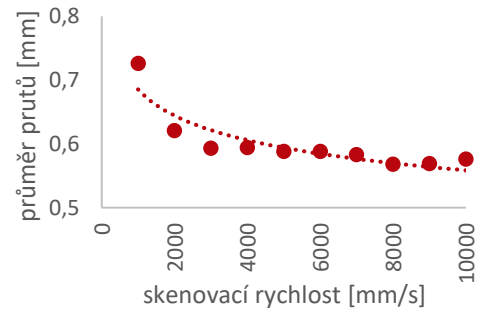
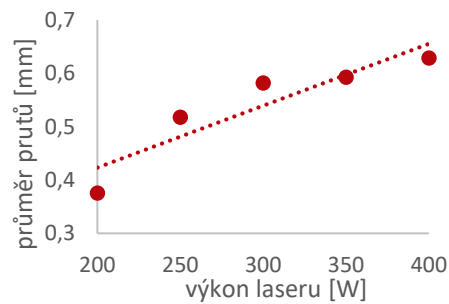
- Pádové zařízení – změna potenciální energie na kinetickou
- Max. energie dopadu 55J
- Poloautomatické vyhodnocení v softwaru Matlab
- Měření **Síla (tenzometr), Deformace (HS kamera), zrychlení (akcelerometr)**
- **Výsledky byly publikovány v J_{rec} v databázi Scopus**



Stav dizertační práce

Vývoj procesních parametrů

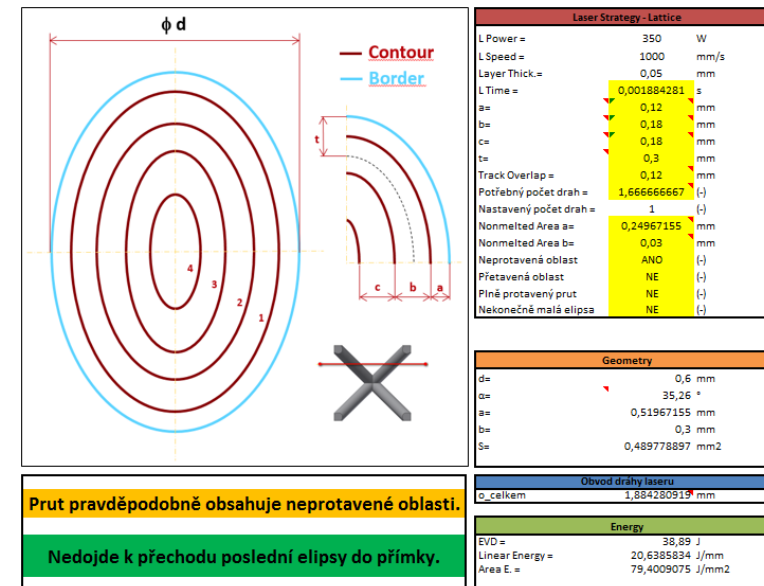
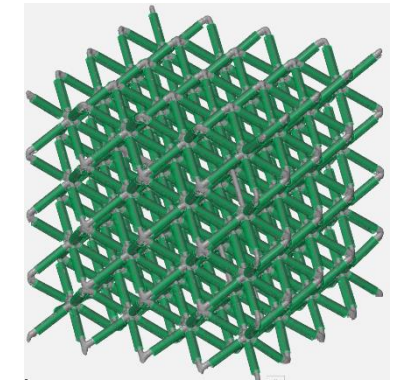
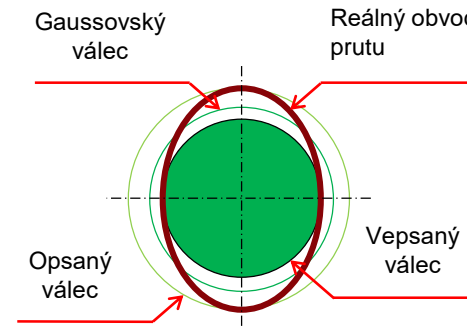
- Procesní mapa pro tloušťku = 50 μ m a 30 μ m
- Trend odpovídá výsledků ze článku **Qui et al., 2015**
- Částečně rozdílné výsledky
- **Výsledky prezentovány na konferenci a ve sborníku v databázi Scopus**



Stav dizertační práce

Vývoj procesních parametrů

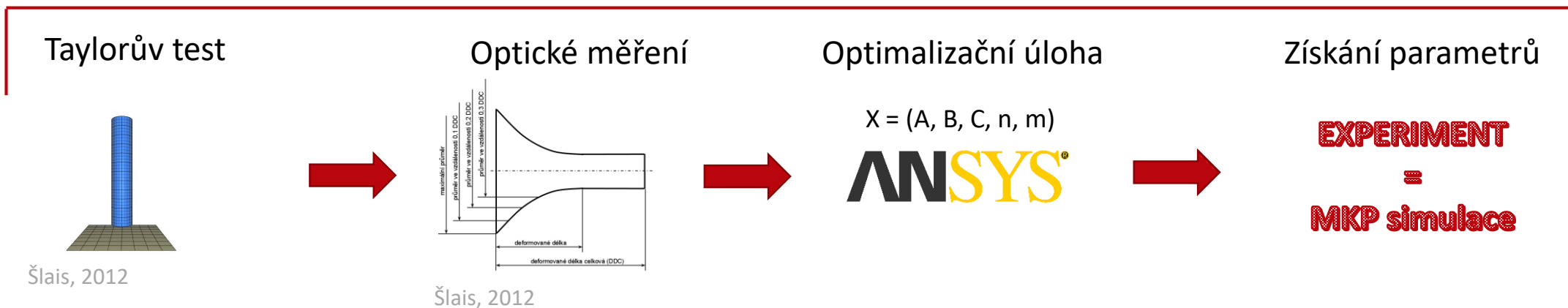
- Procesní mapa pro tloušťku = 50 μm a 30 μm
- Vzorek: BCC struktura; $d = 0,6 \text{ mm}$
- **Nepředpokládané defekty prutu**
- **Vývoj nové strategie drah laseru**
- **Výbrusy vzorků, μCT**
- **Mechanické zatěžování – tahové vzorky, tlakové vzorky**
- **Plánovaná publikace v IF**



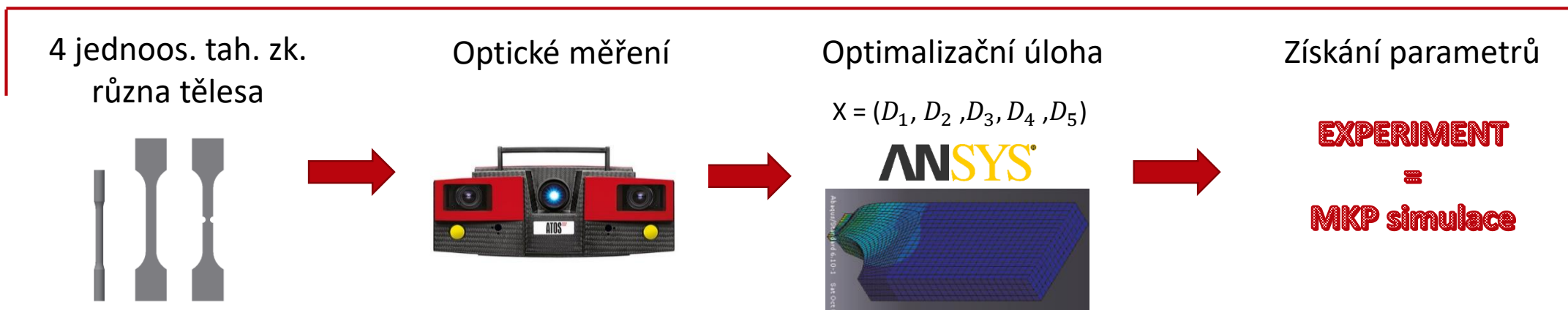
Stav dizertační práce

Vývoj materiálového modelu

J – C material model



J – C failure model



Shrnutí výsledků

1. Experimentální zařízení

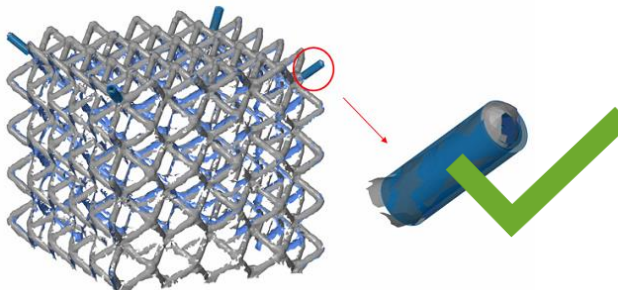


1.2 Mechanické testování



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

2. Testování procesních parametrů

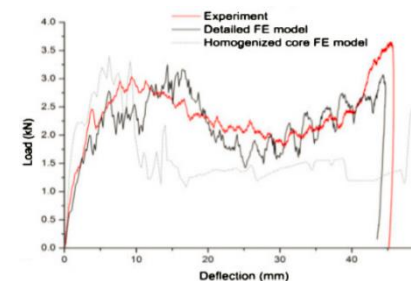


- ✓ Vliv *LS*, *LP* a tloušťky vrstvy
- ✓ Rozměrová přesnost, porozita
- ✓ $LS = 1000 - 7000$ mm/s; $LP = 100 - 400$ W;
 $t = 50$ μ m; 30 μ m
- ✓ BCC strukturovaný materiál; 2x 49 vzorků

2.1 Testování procesních parametrů s novou strategií výroby

- ✗ Změna strategie výroby
- ✗ Výbrusy, CT, mechanické testování (porovnávání)
- ✗ Rozměrová přesnost, porozita, válcovitost prutu

3. MKP výpočet dyn. děje



- ✓ Výpočet s reálnou geometrií
- ✓ Výpočet se zjednodušenou geometrií
- ✗ Taylorův test
- ✗ Tahová zkouška (4 tělesa)
- ✗ Vytvoření materiálového modelu
- ✗ Validace materiálového modelu

léto 2017

září 2017 – únor 2018

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.
- MANAS, P.; **VRÁNA, R.;** HEJMAL, Z.; DUBEC, B. Determination of the material properties of recycled rubber for explicit FEM simulation. In ICSMESP 2017 Proceedings. Prague, Czech Republic: 2017. s. 1-7. ISSN: 2367-2544.

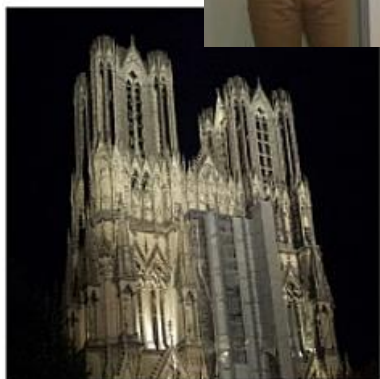
Články v konferenčních sbornících

- **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.

Prezentace výsledků dizertační práce

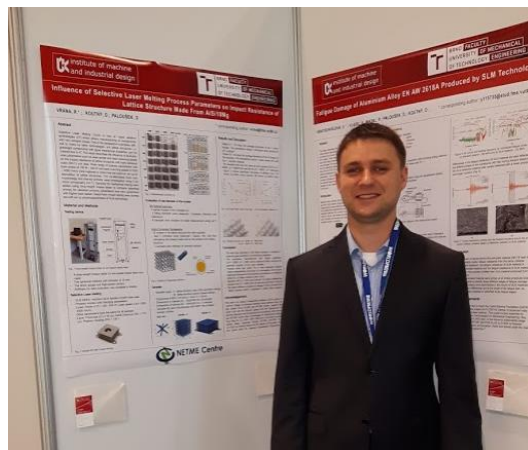
EuroPM 2015 – Reims

EURO
PM2015
congress & exhibition



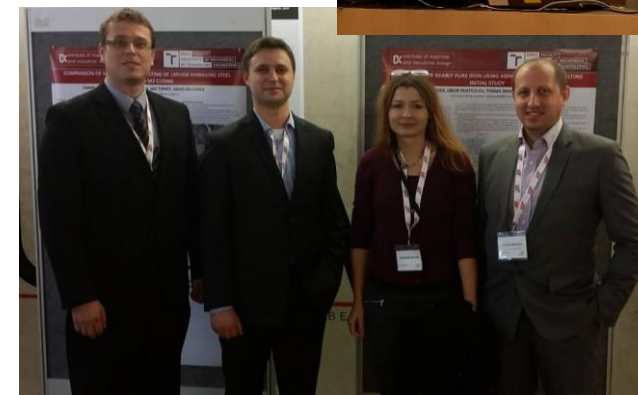
WorldPM 2016 – Hamburk

WORLD
PM2016
Hamburg



3Dtrends 2016 – Liberec

3D^t
2016



Děkuji vám za pozornost

Radek Vrána

vrana@fme.vutbr.cz

<http://3Dlaboratory.cz/>



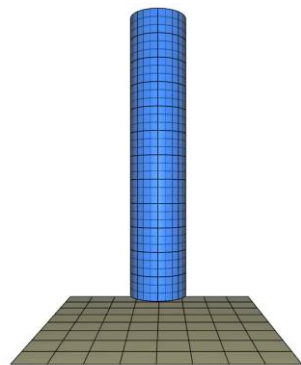
Institute of Machine
and Industrial Design

Otázky oponenta

1) Jaký materiálový model chce autor použít pro dynamickou MKP analýzu?

Varianta 1

- Johnson-Cook materiálový model + kritérium porušení
 - + Nejvíce využívaný materiálový model pro dynamické zatěžování
 - + Parametry je možné získat z **Taylorova test**
 - + Parametry pro kritérium porušení je možné získat z **4 tahových zkoušek** za různých podmínek zatěžování (rychlost zatěžování, vrub, teploty)
 - + Všechny studované práce využívají tento materiálový model
 - - ???



<http://www.youtube.com>



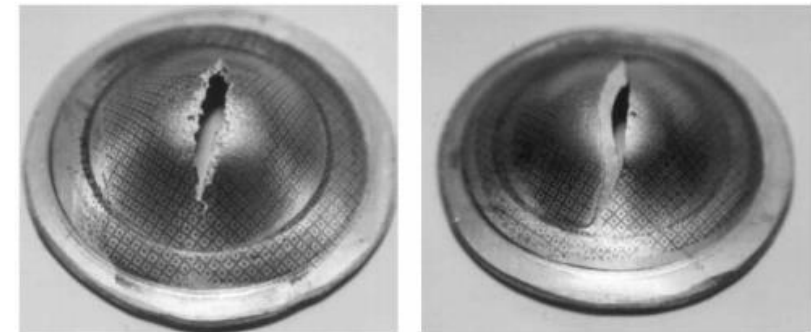
Tělesa pro tahovou zkoušku

Otázky oponenta

1) Jaký materiálový model chce autor použít pro dynamickou MKP analýzu?

Další varianty

- **Gurson-Tvergaard-Needleman**
 - Materiál je tvořen z matrice (*matrix*) a dutinami (*void*)
 - Složitý model; 8 komplikovaně zjistitelných konstant
- **CrachFEM**
 - pro tenké plechy a výlisky
 - dva typy porušení – Tvárné (růst a porušování dutin)
– Smykové (skluzové pásy)
- **EWK** (ESI-Wilkins-Kamoulakos)
- **Xue-Wirzbicky**

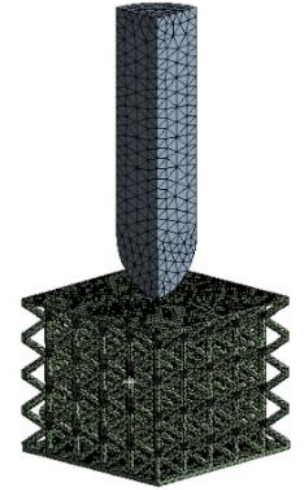


CrachFEM -Dva typy porušení a) Tvárné; Smykové

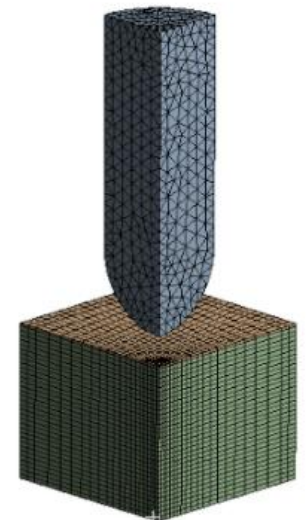
Otázky oponenta

2) Jak bude vypadat numerický model absorberu?

- Model vzorku pro testování na navrženém testovacím zařízení
 - Čtvrtinový model vzorku (2x symetrický)
 - 3 varianty geometrie – 3D geometrie popsána solid elementy
 - 3D geometrie popsána beam elementy; horní desky vzorku popsán solid elementy
 - homogenizace struktury
 - Zatěžování čtvrtinovým modelem indentoru, na který **působí síla** odpovídající čtvrtině testované hmotnosti + je zadána dopadová rychlost indentoru
- Pro porovnání získaného materiálového modelu s reálným testem



Popis 3D struktury solid elementy



Homogenizovaný tvar struktury

Otázky oponenta

3a) Může absorbér vytvořený pomocí SLM technologie konkurovat standardně vyráběným absorbérům z kovových pěn?

Různé pohledy

● Z pohledu produktivity výroby a rozšíření - NE

- Z kovové pěny lze vyrobit velké profily, desky,...
- Univerzálnější použití – výplň profilů jako náhrada plného materiálu
- Lze ji využít jako polotovar (rozřezaná tyč s výplní z kovové pěny)
- Finančně výhodnější výroba kovové pěny

● Z pohledu absorpce energie - ANO

- SLM absorbéry je možné vyrobit z širokého portfolia materiálů např. z titanové slitiny
- SLM absorbéry umožňují pokročilé řízení tuhosti tvarem prutové nebo prostorové struktury
- SLM absorbér lze např. lokálně zahustit nebo vytvořit gradientně hustou strukturu

Otázky oponenta

3b) V čem spatřujete hlavní výhody tvorby materiálů pro tyto účely pomocí SLM technologie?

- **Z pohledu absorpce energie**
 - SLM absorbéry je možné vyrobit z širokého portfolia materiálů např. z titanové slitiny
 - SLM absorbéry umožňují pokročilé řízení tuhosti tvarem prutové nebo prostorové struktury
 - SLM absorbér lze např. lokálně zahustit nebo vytvořit gradientně hustou strukturu
- **Pro výpočet mechanických vlastností lze využít přesný tvar geometrie**
- **V absorbéru přímo vyrobené fixační prvky např. pro šrouby nebo přímo jako součást topologicky optimalizovaného dílu**

