


Optimalizace procesních parametrů pro výrobu strukturovaných dílů technologií Selective Laser Melting

Radek Vrána

 ústav
konstruování

Vedoucí práce: doc. David Paloušek, Ph.D.

Ústav konstruování – Konstrukční inženýrství
Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně

Projekt disertační práce
18.srpna 2015, FSI VUT v Brně, Česká republika

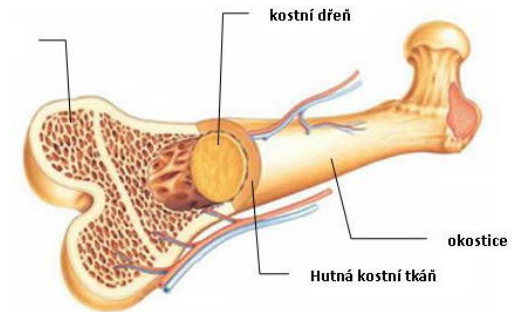
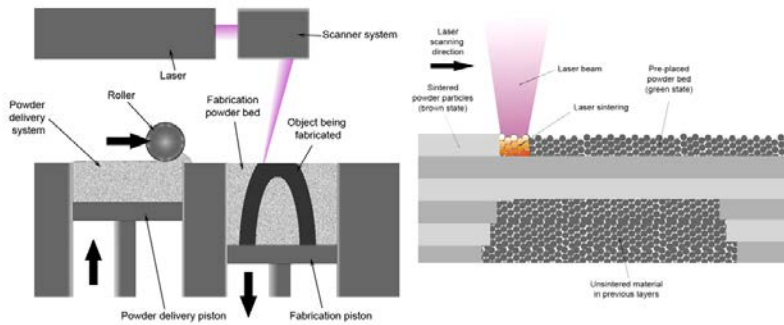
- 1) Název, Klíčová slova
- 2) Úvod
- 3) Odůvodnění nutnosti řešení dan problematiky
- 4) Přehled současného stavu poznání
- 5) Analýza poznatků na základě kritické rešerše
- 6) Podstata a cíle disertační práce
- 7) Vědecká otázka a pracovní hypotéza
- 8) Popis navrhovaných koncepčních a metodických postupů
- 9) Časový plán a etapy řešení
- 10) Spolupráce s jinými institucemi
- 11) Předpokládané náklady spojené s řešením
- 12) Charakteristika předpokládaného výsledku řešení disertační práce



- Původní název: Optimalizace prostorových struktur pro speciální díly vyráběné technologií Selective Laser Melting
- Současný název: **Optimalizace procesních parametrů pro výrobu strukturovaných dílů technologií Selective Laser Melting**
- Původní název anglicky: Optimization of lattice structures for special parts made by Selective Laser Melting technology
- Současný název anglicky: **Optimization of process parameters for lattice structures parts made by Selective Laser Melting technology**
- **Klíčová slova:** Odlehčené konstrukce, mřížková struktura, AlSi10Mg, mechanické vlastnosti, procesní parametry, aditivní technologie
- **Key words:** Light-weight construction, Lattice Structure, AlSi10Mg, Mechanical Properties, Process parameters, Additive Technology

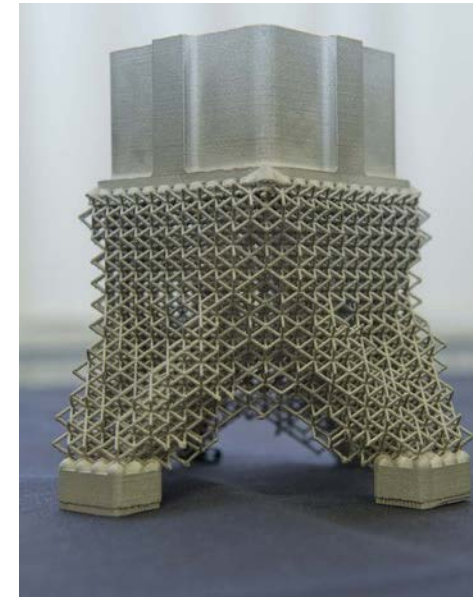
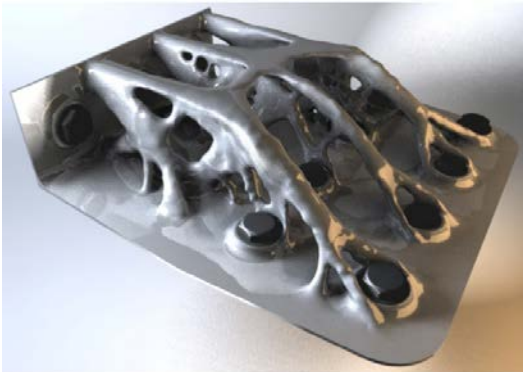
■ Technologie Selective Laser Melting (SLM)

- **Kovová** aditivní technologie
- Postupné tavení vrstev kovového prášku na sebe pomocí výkonného laseru
- Nové možnosti pro návrh dílů bez technologických omezení → **nový způsob uvažování**
- Návrat i tvarům inspirovaných přírodou → **porézní struktury**



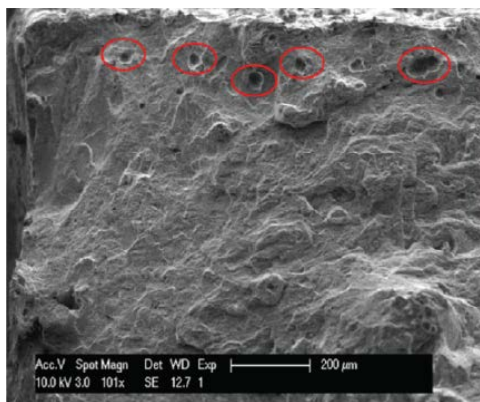
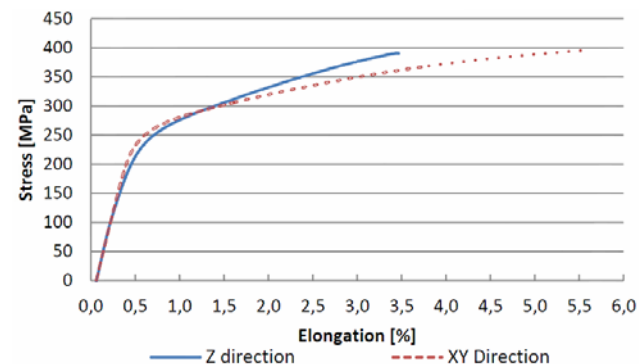
Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení dané problematiky v daném čase

- Velký potenciál pro aplikace, kde je podstatný parametr nízká hmotnost součásti
- Efektivní využití materiálu → na součásti není žádný přebytečný materiál
- Letectví, Kosmonautika = **vysoké** požadavky na stálost výrobního procesu a predikci vlastností dílu
- Ideální pro kombinaci s topologickou optimalizací
- **Nevýhody strukturovaného dílu:**
 - Komplikovaná výroba kvalitních prutů
 - Mechanické vlastnosti tenkých prutů
 - MKP výpočet složitého systému prutů

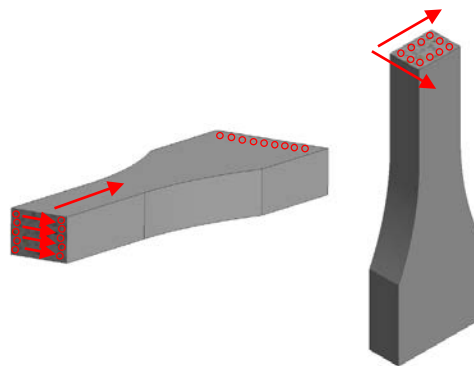


Mechanical properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting [11], (Kempen, 2012)

- Zkoumání mechanických vlastností SLM materiálu
- Vliv postavení a strategie výroby na vznik pórů
- Odlišné mechanické vlastnosti pro různé orientace vzorků



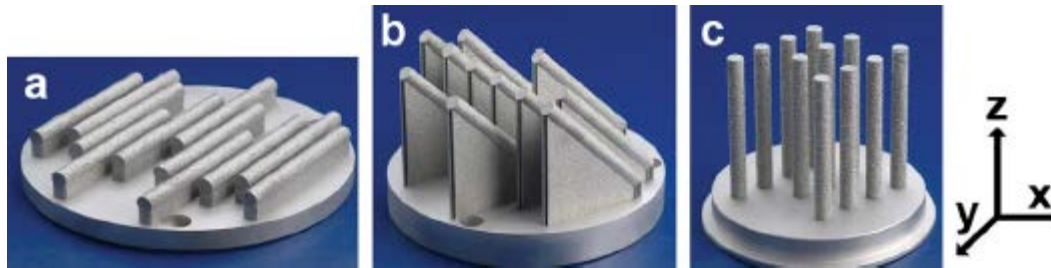
Vznik pórů v materiálu [Kempen, 2012]



Vliv orientace na vznik pórů v materiálu [Kempen, 2012]

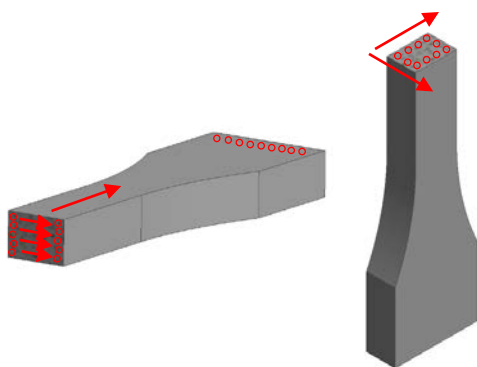
Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior [12], (Brandl, 2012)

- Zkoumání mechanických vlastností v závislosti na orientaci
- Izotropní mechanické vlastnosti materiálu
- Tělesa byla obrobena → odstranění pórovité vrstvy
- Nevyvrací článek od Kempen et al.

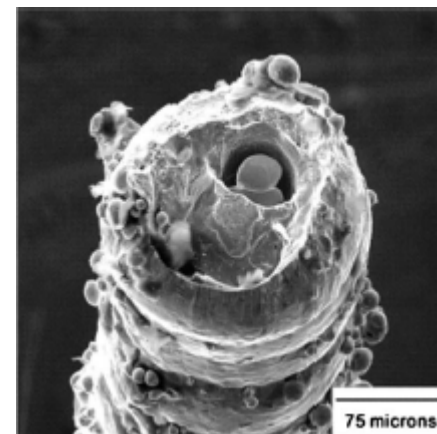
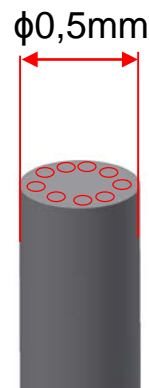


The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice Structures [13], (Tsopanos, 2010)

- Mechanické testy jednotlivých prutů
- Mechanické vlastnosti o 50% nižší než očekávané → **nelze použít mech. vl. objemového materiálu**
- **Velké množství pórů v celém objemu** → odstranění pórovité vrstvy
- „Povrchová vrstva v celém objemu“

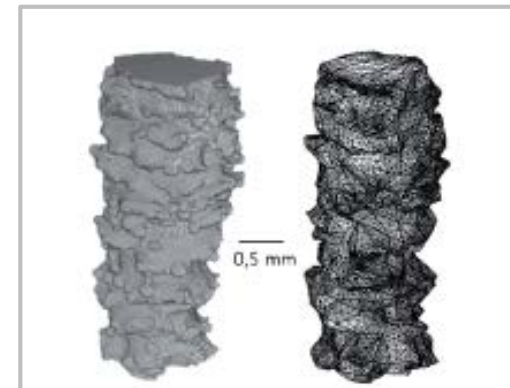
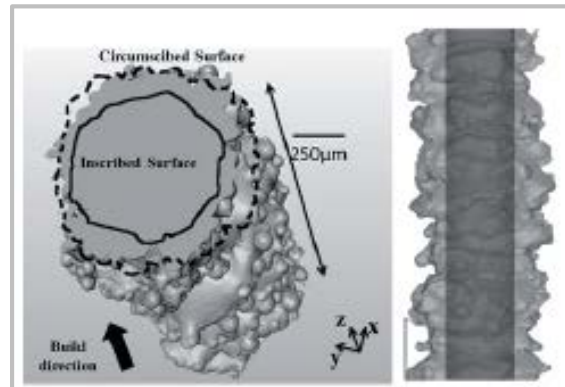


Vliv orientace na vznik pórů v materiálu [Kempen, 2012]



Impact of EBM Fabrication Strategies on Geometry and Mechanical Properties of Titanium Cellular Structures [15], (Suard, 2014)

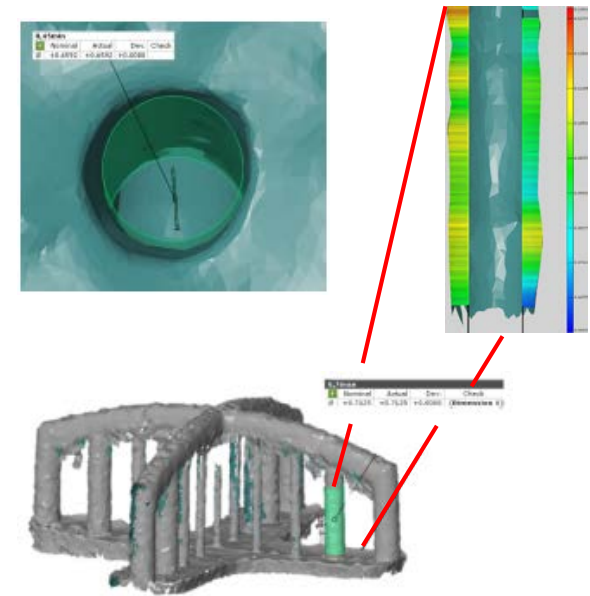
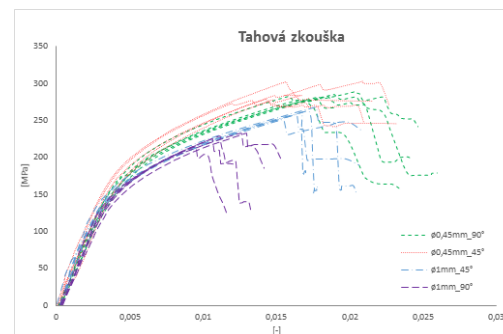
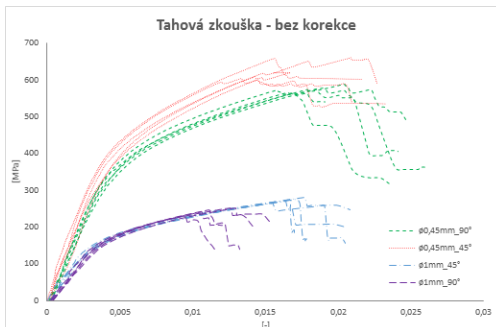
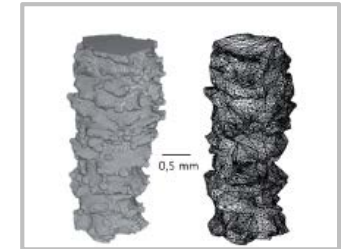
- Významná rozměrová nepřesnost prutů → **odhad** „nosného objemu“
- Pro potřeby MKP výpočtu
- Definice pojmu „efektivní objem“
- Rozdíl mezi skutečnou a očekávanou tuhostí



Shrnutí současného stavu poznání – Rozměrová stálost

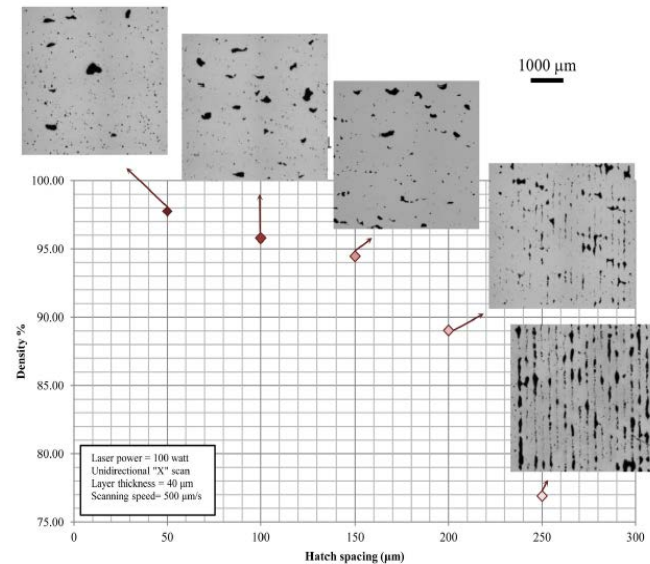
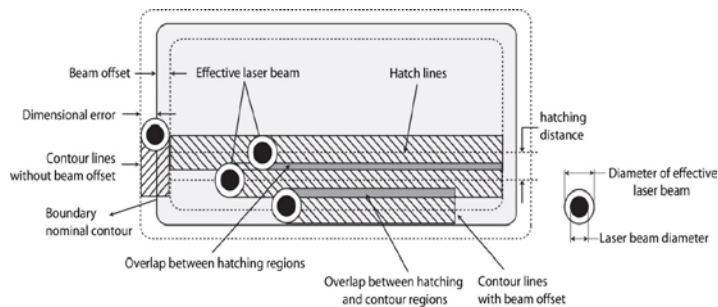
Dimensional accuracy of single beams of AlSi10Mg alloy and 316L stainless steel manufactured by SLM [16], (Koutný; Vrána, 2014)

- Významná rozměrová nepřesnost prutů → **odhad** „nosného objemu“
- Vliv orientace prutů na rozměrovou nepřesnost
- Určení efektivního průměru → **přepočít** mechanických vlastností
- Nalepování okolního prášku na prut
- Při nízkých úhlech prakticky **zaniknutí** tvaru prutu (teor. válce)



Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. Additive [17], (Aboulkhair, 2014)

- Velké množství procesních parametrů → **mezení na základní parametry**
- **Pozorování výkonu laseru, rychlosti laseru, hatch distance a tloušťky nanášené vrstvy**
- Velikost zkušebních vzorků 5x5x5 mm
- **Výsledná hustota materiálu 99,8 %**



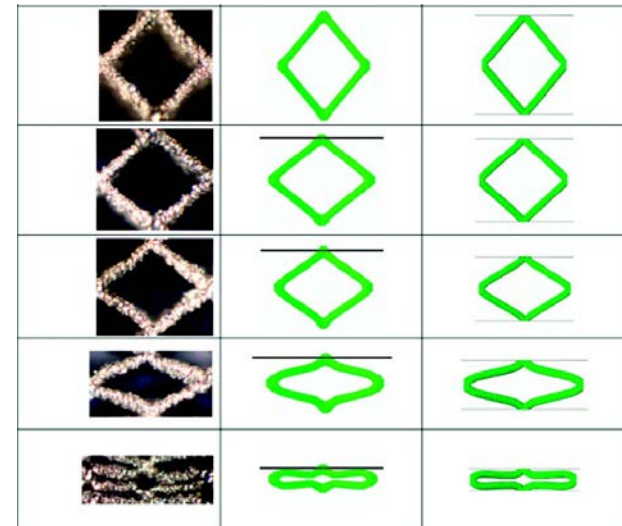
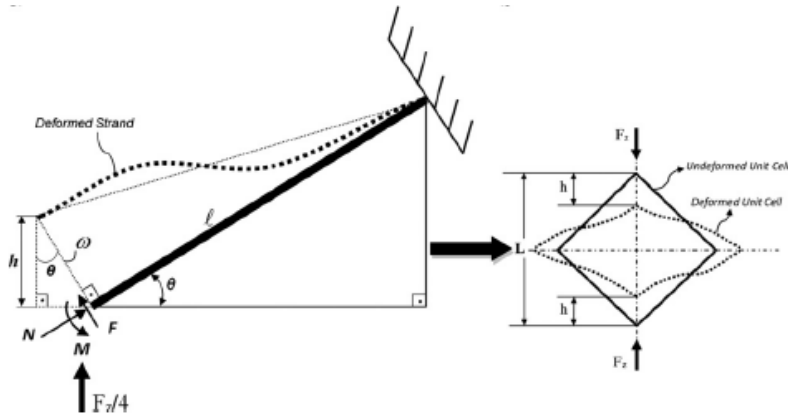
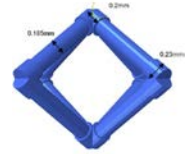
Další články zabývající se podobnou problematikou:

- MANFREDI, Diego, Flaviana CALIGNANO, Manickavasagam KRISHNAN, Riccardo CANALI, Elisa PAOLA, Sara BIAMINO, Daniele UGUES, Matteo PAVESE a Paolo FINO. Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs). Light Metal Alloys Applications. InTech, 2014.
- QIU, Chunlei, Sheng YUE, Nicholas J.E. ADKINS, Mark WARD, Hany HASSANIN, Peter D. LEE, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. Materials Science and Engineering: A [online]. 2015, vol. 628, s. 188-197 [cit. 2015-03-24]. Výsledná hustota materiálu 99,8 %
- ZHANG, Baicheng, Lucas DEMBINSKI a Christian CODDET. The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder. Materials Science and Engineering: A. 2013, vol. 584, s. 21-31.

Shrnutí současného stavu poznání – Predikce mechanických vl.

Smith et al. – 2012; Ushijima et al. – 2011; Grümrick et al. – 2013

- MKP výpočet prutových struktur pro nerezovou ocel 316L
- Detailní výpočet jedné základní buňky pomocí beam a 3D elementů
- Analytický odhad mechanických vlastností → **zkrácení výpočetního času**
- **Nevhodné** pro složitější uspořádání buňek



Deformace základní BCC buňky [Smith, 2012]

■ Mechanické vlastnosti

- Objemové vzorky mají na povrchu pórovitou vrstvu
- Tenké pruty jsou tvořeny pouze pórovitou vrstvou
- Degradace mechanických vlastností
- → **nutný výzkum speciálních parametrů pro malo-objemové díly**
- → nutný výzkum mechanických vlastností tenkých prutů z AlSi10Mg

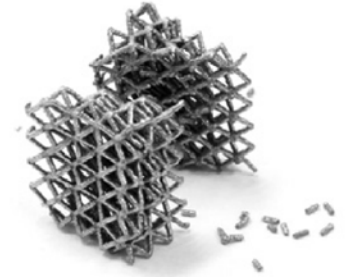


■ Rozměrová stálost

- Zjednodušení problému - **definice efektivního průměru**
- Vliv orientace prutu na rozměry prutu
- Vliv orientace prutu na nalepování okolního prášku
- Degradace tvaru prutů
- → **nutný výzkum speciálních parametrů pro malo-objemové díly**
- → významné zpřesnění MKP analýzy

■ Materiálové vlastnosti

- Proces ovlivňuje velké množství parametrů → **základní parametry**
- Výzkum parametrů probíhá většinou na větším objemu materiálu
- Snaha o homogenní materiál bez vad
- Výrazné rozdíly mezi parametry pro malo-objemové a objemové díly → **souvislost s odvodem tepla** vyráběným dílem
- → **nutný výzkum speciálních parametrů pro malo-objemové díly**
- → **nutný výzkum základních procesních parametrů a jejich konkrétní vliv na materiálové vlastnosti**



■ Predikce mechanických vlastností

- Omezení pouze na část strukturovaného materiálu → náročné na výpočetní výkon
- Simulace podrobné deformace jedné základní buňky
- Analytický přístup → snaha o zkrácení výpočetního času
- Nevhodné pro výpočet tvarově složitých součástí

- výzkum procesních parametrů technologie SLM pro výrobu strukturovaných dílů bez materiálových a rozměrových vad
- výzkum vlivu hlavních procesních parametrů technologie SLM na výrobu strukturovaných dílů bez materiálových a rozměrových vad
- využití výsledků pro predikci speciálního strukturovaného dílu

Doplněno

■ Dílčí úkoly:

- Výzkum procesních parametrů
- Rozměrová analýza v závislosti na orientaci pro nové parametry
- Mechanické testování vzorků
- MKP simulace přestupu tepla malo-objemovým dílem
- Aplikace korekčních parametrů a poznatků do predikce strukturovaného dílu
- Mechanické testování strukturovaného dílu; porovnání s predikcí



Doplněno

■ Vědecká otázka

- Je možné vyrábět strukturované díly z materiálu AlSi10Mg bez materiálových a rozměrových vad, tak, aby bylo možné přesně predikovat jejich mechanické vlastnosti?
- Je možné určit vliv hlavních procesních parametrů na výrobu strukturovaných dílů s téměř 100% hustotou materiálu a požadovanými rozměry?
- Je možné predikovat přesné mechanické vlastnosti strukturovaných dílů, které mají požadované rozměry a materiálové vlastnosti?

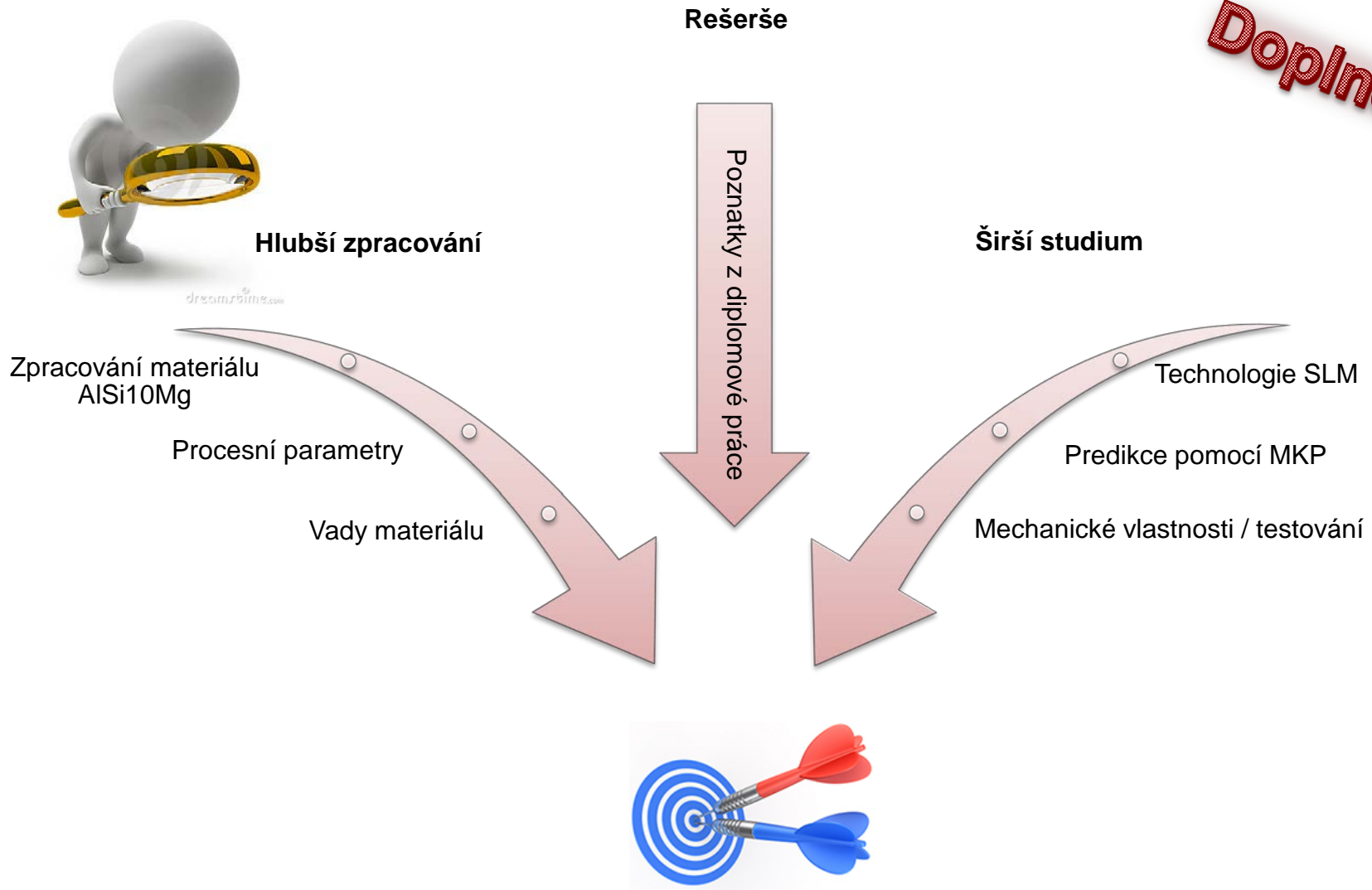
■ Pracovní hypotéza

- Zpracování slitiny bez materiálových a rozměrových vad z materiálu AlSi10Mg je možné po vyrobení několika sad zkušebních vzorků pro objasnění vlivu jednotlivých parametrů. Pokud je struktura tvořena z prutů očekávaných rozměrů a vlastností bude možné predikovat reálné mechanické vlastnosti.

Předpokládá se, že hlavní vliv na nepřesné výpočty strukturovaného materiálu má špatný předpoklad vlastností materiálu (mechanické vlastnosti, tvar, objem,...). Pokud budeme vyrábět materiál s požadovanými vlastnosti, budeme schopni přesně predikovat mechanické vlastnosti.

Zjištění vlivu základních procesních parametrů a eliminovat vznik materiálových vad při zpracování slitiny AlSi10Mg je možné při vyrobení matice vzorků s různým nastavením těchto parametrů. V každé sérii bude vždy měněn pouze jeden parametr. Tím bude zjištěn jeho konkrétní vliv.

Popis koncepčních a metodických postupů

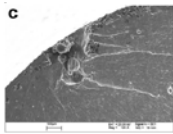


Doplněno

Výzkum procesních parametrů

(výkon laseru, scanning speed, laser focus, hatch distance, výhřev komory)

Objemové vzory - typ krátký prut, typ struktura



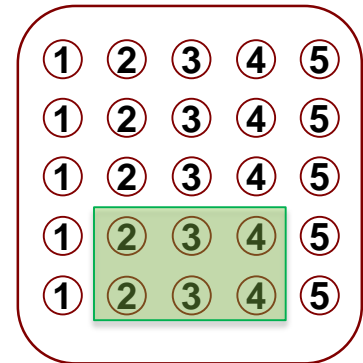
Posouzení vlivu jednotlivých parametrů na vady materiálu – póry, trhliny, struktura (metalografické výbrusy, CT)

Mechanické / rozměrové testování získaných parametrů

(CT, Scanner, Zwick)

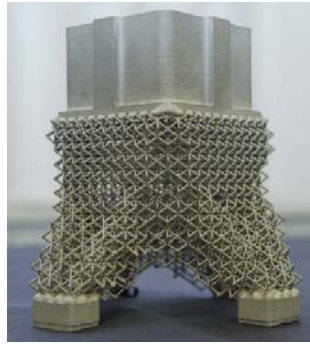


Matice procesních parametrů s velkým rozsahem → hledání optimální oblasti



Finální parametry

Popis koncepčních a metodických postupů



Predikce

Implementace poznatků z řešení

MKP analýza – 1) prut

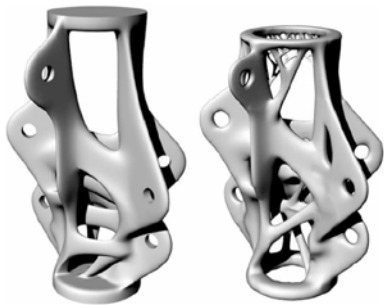
2) struktura

3) speciální díl

LS – DYNA

(MKP analýza rychlých dějů)

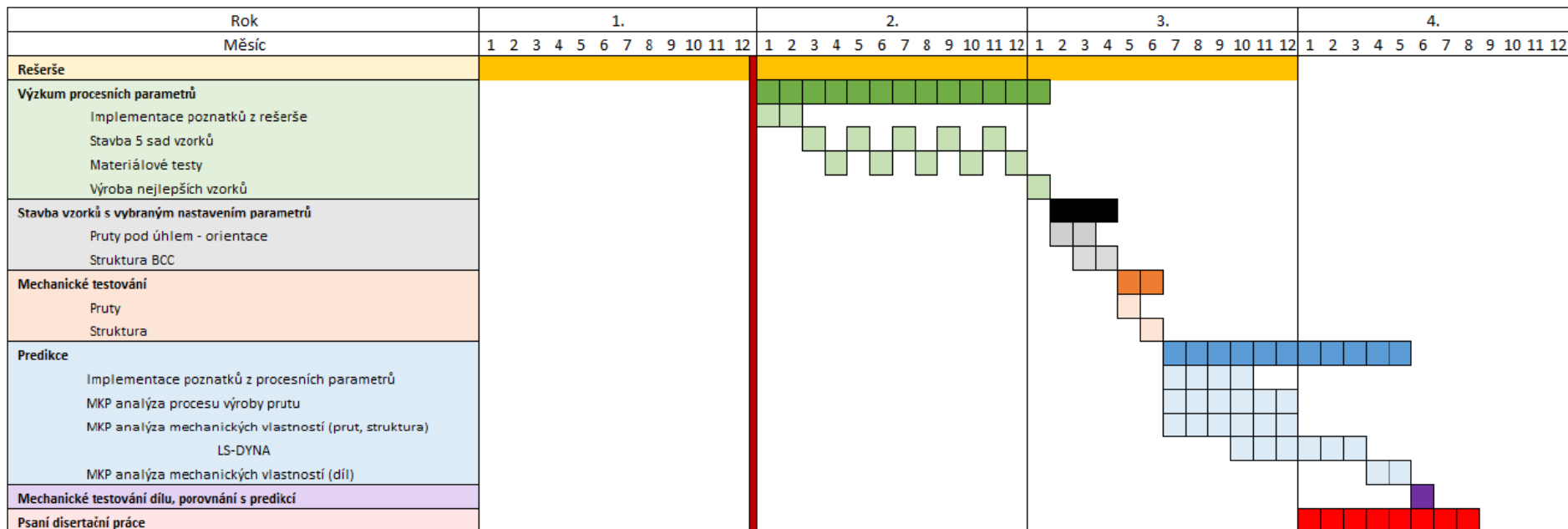
Mechanické testování speciálního dílu



Doplněno



Časový rozvrh a etapy řešení



- **Konzultace v rámci fakulty strojího inženýrství**
 - **ústavem mechaniky těles** – predikce mechanických vlastností pomocí MKP
 - **ústavem materiálu** – materiálové testy
 - **energetického ústavu** – modelování vedení tepla při stavbě prutu pomocí MKP
- **Konzultace s firmou L.K. Engineering, s.r.o.**
 - Konzultace v oblasti MKP analýzy – **Ing. Martin Komárek, Ph.D.**
- Navázání spolupráce se zahraniční univerzitou / institucí – **Fraunhofer IPK**
- Stáž na zahraniční univerzitě

Předpokládané náklady

Výroba na zřízené SLM 280HL (materiálové náklady)	50 000 Kč
Mechanické testování	20 000 Kč
Konferenční poplatky a cestovné	90 000 Kč
Stáž na zahraniční univerzitě	150 000 Kč
Osobní náklady	350 000 Kč
<hr/>	
Celkem	660 000 Kč

- Průběžné publikování dosažených výsledků
- Preferované články v impaktovaných časopisech a databázi Scopus
- Snaha o přílohovou formu disertační práce

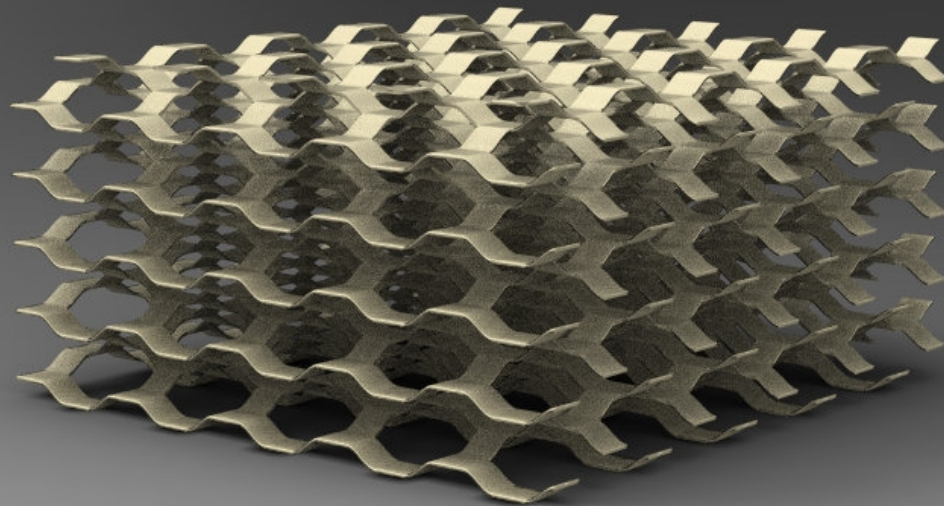
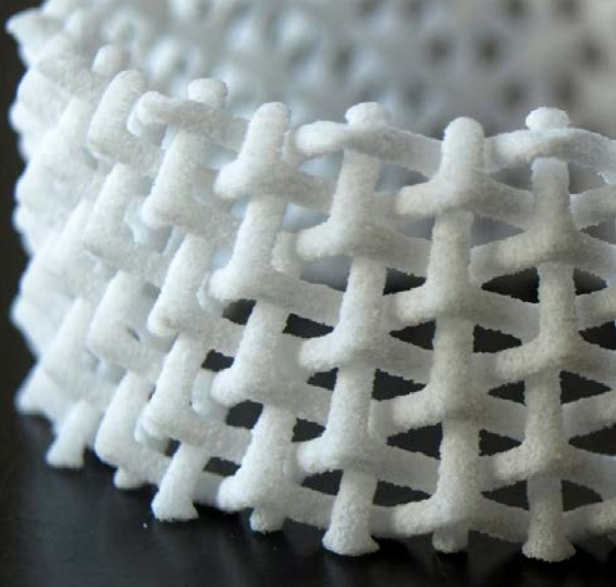
- **Možné impaktované časopisy pro publikování výsledků:**
 - Rapid Prototyping Journal – **IF = 2,031**
 - Journal of Laser Applications – **IF = 1,798**
 - Journal Of Sandwich Structures & Materials – **IF = 0,836**
 - Modelling And Simulation In Materials Science And Engineering – **IF = 1,492**
 - Journal Of Materials Processing Technology – **IF = 2,041**
 - Materials & Design – **IF = 3,171**
 - Journal Of Composite Materials – **IF = 1,257**

- Dosud prezentované výsledky:
- 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.
- **ICMD 2015**
- Vrána, R.; Koukal, O.; Koutný, D.; Krejčí, P.; Paloušek, D. Device for Testing Impact Resistance of Lattice Structures Panels Produced by the Selective Laser Melting. In 56th International Conference of Machine Design Departments ICMD 2015

Přijato

- **Euro PM2015 Congress & Exhibition** (článek v databázi Scopus; recenzovaný článek)
- Vrána, R.; Paloušek, D.; Koutný, D.; Koukal, O.; Zikmund, T.; Krejčí, P. Impact resistance of lattice structure made by Selective Laser Melting technology

Přijato



Děkuji za pozornost

Radek Vrána

UK ústav
konstruování

Ústav konstruování – Konstrukční inženýrství
Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně

Obhajoba diplomové práce
25.června 2014, FSI VUT v Brně, Česká republika