

# Výzkum a vývoj aditivně vyráběných mikro-prutových struktur

**Jan Jaroš, Ing.**

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

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ  
Fakulta strojního inženýrství  
VUT v Brně



ÚSTAV  
KONSTRUOVÁNÍ

# Motivace pro řešení problému

## Kostní implantáty

---

- Šrouby, zátky, vnitřní fixace
- Nerezová ocel, titan
- Nutnost reoperace pro jejich vytažení

## Osteoporotické zlomeniny u pacientů nad 50 let (2019)

---

- Celkový počet: 4,28 mil.
- Celkové výdaje: 56,9 milionu €
- Odhad pro rok 2034: 5,34 milionu



*Použití vnitřní fixace a šroubů pro fixaci chodidla  
(regenexx.com)*

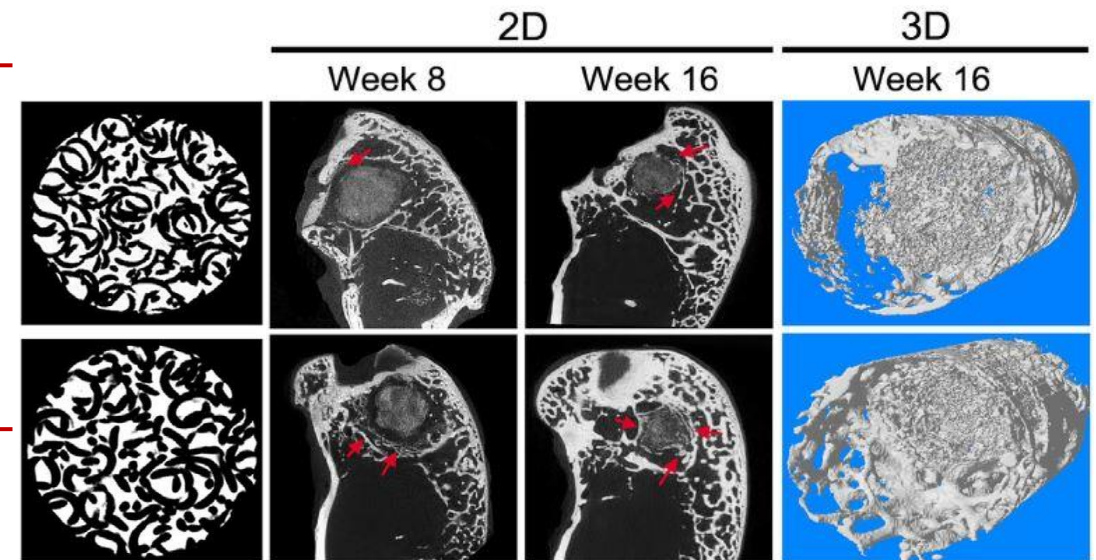
# Motivace pro řešení problému

## Kostní implantáty

- Biokompatibilita hořčíkových slitin + vhodná struktura
- Prorůstání kostní tkáně strukturou
- Mechanické vlastnosti blízké kostní tkáni

## Předpoklady

- Výroba mikro-prutových struktur z hořčíkové slitiny pomocí aditivní technologie

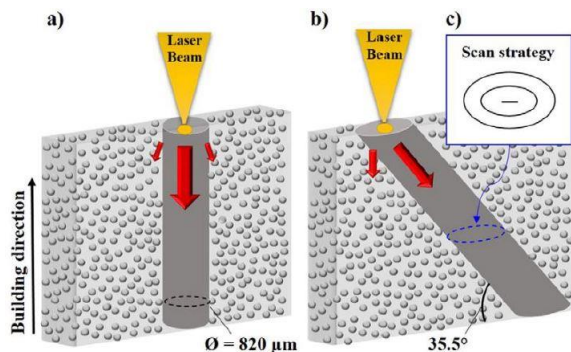


Prorůstání kostní tkáně strukturovaným hořčíkovým implantátem  
(Cheng, M. a kol., 2016)

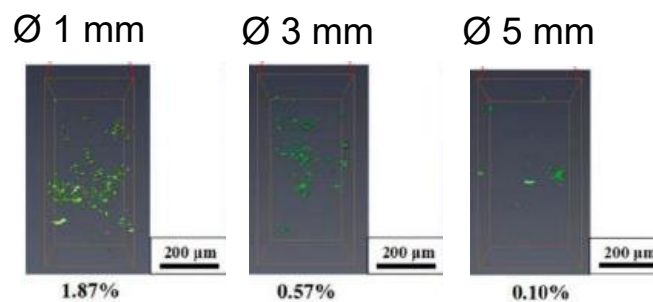
# Shrnutí současného stavu poznání – mikro-prutové struktury

## Mikro-prutové struktury

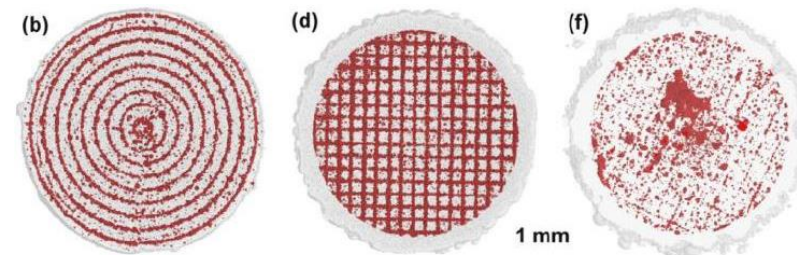
Delroisse, P. a kol., 2017



Dong, Z. a kol., 2018



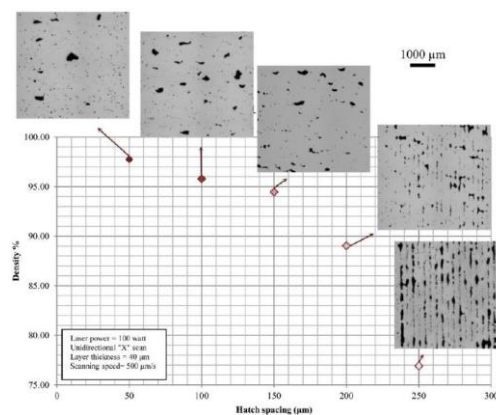
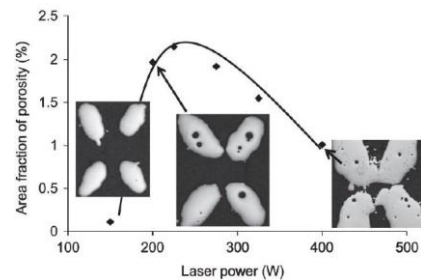
Pauly, S. a kol., 2017



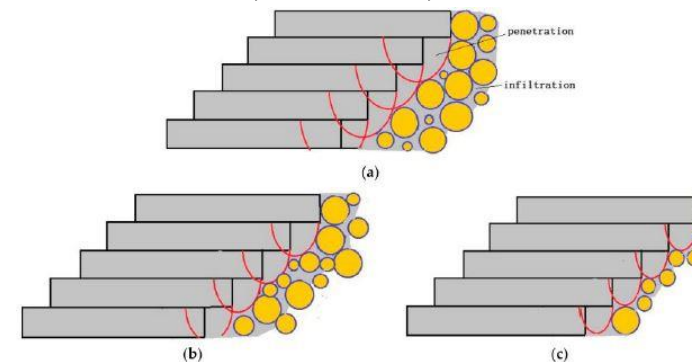
## Procesní parametry

Qiu, C. a kol., 2015

Aboulkhair, N.T. a kol., 2014



Han, X. a kol., 2018



# Shrnutí současného stavu poznání – zpracování hořčkových slitin

## Zpracování hořčkových slitin

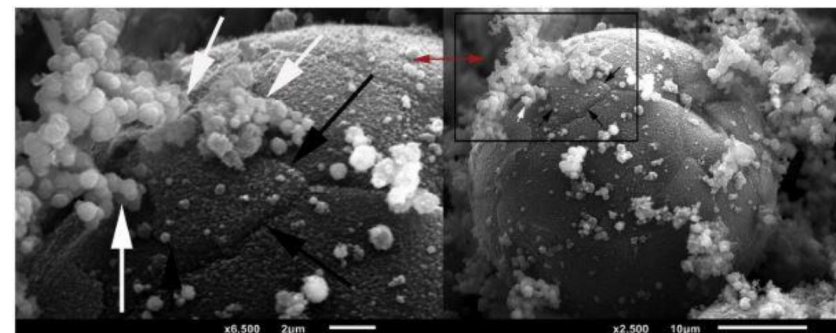
Pawlak, A. a kol., 2017

- Úzký teplotní rozsah mezi bodem varu a vypaření hořčíku (450°C)

Collur, M. M. a kol., 1987

- Ztráta legujících prvků při zpracování hořčkových slitin

Salehi, M. a kol., 2018



## Procesní parametry

Zhang, B. a kol., 2012

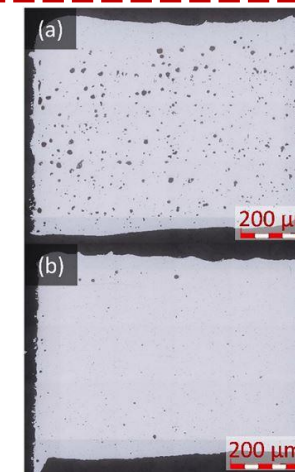
Wei, K. a kol., 2014

- Okno procesních parametrů

	10W	15W	20W	30W	60W	90W	110W
0.01 m/s	A	VII. Coarse					
0.02 m/s	VI. Brittle	B		II. Much smoke appear and a little of metal remnant			
0.04 m/s		D	C				
0.08 m/s		V. Loose					I. Much powder was evaporated
0.16 m/s		IV. Not mechanical strength					
0.3 m/s							
0.5 m/s		III. A little of metal remnant					
1 m/s							

Suchy, J. a kol., 2021

- Procesní parametry pro objemový materiál

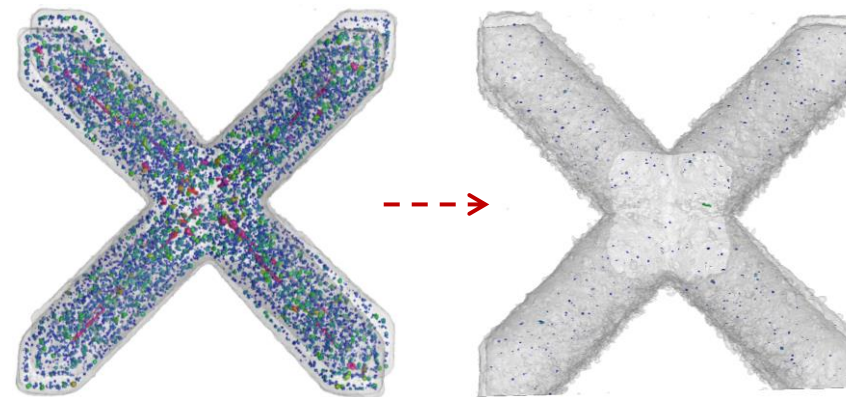


# Bílá místa

## Zpracování mikro-prutových struktur

- Výroba mikro-prutových struktur bez imperfkcí
  - Porozita
  - Drsnost povrchu
  - Rozměrová přesnost

---> **Hliníková slitina**



## Výroba mikro-prutových struktur z hořčíkových slitin

- Procesní parametry pro výrobu
- Mechanické vlastnosti

---> **Hořčíková slitina**



# Vymezení cílů disertační práce

## Hlavní cíl disertační práce

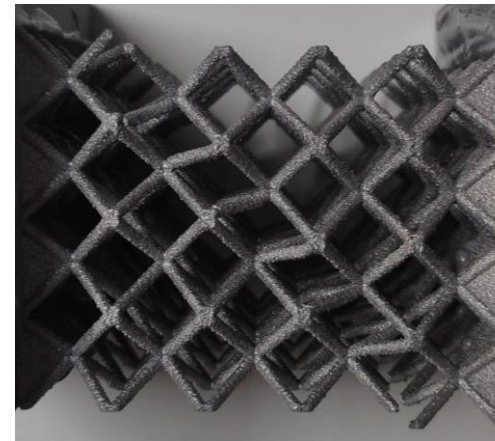
- Stanovení vlivu procesních parametrů na vznik imperfekcí v mikro-prutových strukturách vyráběných technologií SLM z hliníkové slitiny AlSi10Mg a hořčíkové slitiny WE43

## Přínos disertační práce

- Výroba mikro-prutových struktur s minimálním množstvím imperfekcí
- Mechanické vlastnosti mikro-prutových struktur z hořčíkové slitiny WE43



*Tlakové zatěžování  
mikro-prutové struktury*



*Smykové zatěžování  
mikro-prutové struktury*

# Vědecké otázky

## Otázka č.1

- Vývoj procesních parametrů pro výrobu mikro-prutových struktur
- Redukce imperfekcí
  - Porozita
  - Drsnost povrchu
  - Rozměrová přesnost
- Hliníková slitina AlSi10Mg
- Contour skenovací strategie
- Meander objemová strategie

## Otázka č.2

- Vývoj procesních parametrů pro výrobu mikro-prutových struktur
- Redukce imperfekcí
  - Porozita
  - Drsnost povrchu
  - Rozměrová přesnost
- Aplikace poznatků z řešení otázky č.1
- Hořčíková slitina WE43
- Contour skenovací strategie

## Otázka č.3

- Mechanické vlastnosti mikro-prutových struktur
- Aplikace procesních parametrů z řešení otázky č.2
- Hořčíková slitina WE43

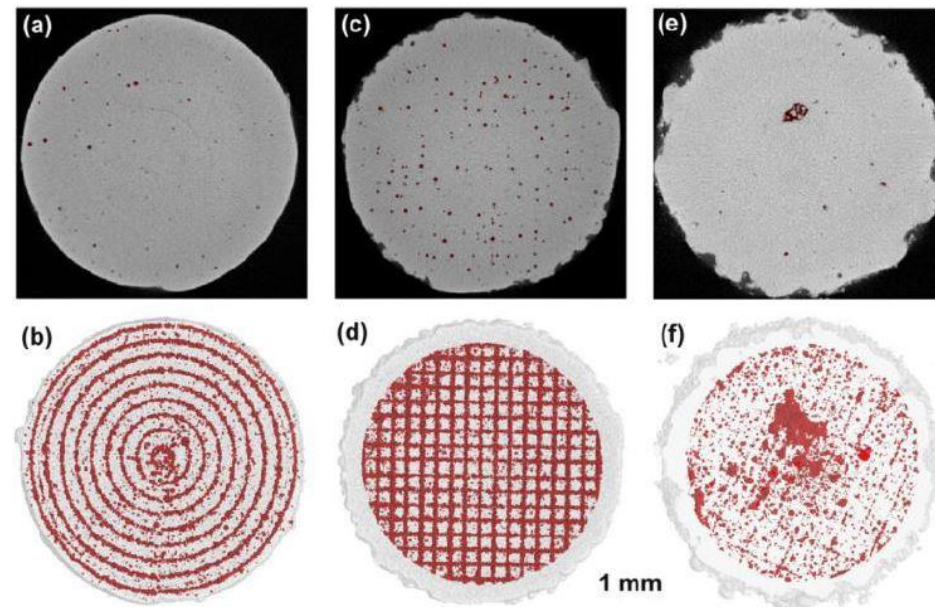
# Vědecké otázky a pracovní hypotézy

## Vědecká otázka č.1

- Je možné pomocí contour skenovací strategie redukovat imperfekce (porozita, drsnost povrchu, rozměrová nepřesnost), které vznikají při výrobě mikro-prutových struktur?

## Pracovní hypotéza č.1

- Contour skenovací strategie redukuje počet nastavovaných procesních parametrů a umožňuje redukovat imperfekce spojené s výrobou nízko-objemových dílů jako jsou mikro-prutové struktury.

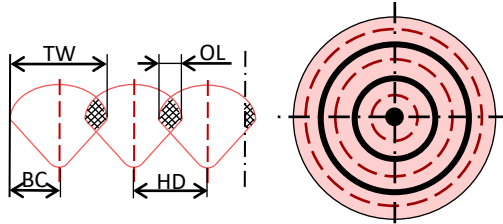


Porovnání tří skenovacích strategií: (a,b) contour; (c,d) chessboard; (e,f) meander (Pauly, S. a kol., 2017)

# Metodika

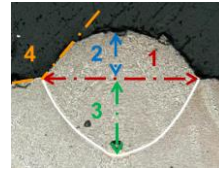
## Vstupy

- Hliníková slitina AlSi10Mg
- Meander objemová strategie
- Contour skenovací strategie
- Orientace prutů 90° a 35,26°
- Průměry do 3 mm

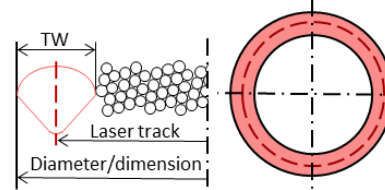


## Experimenty

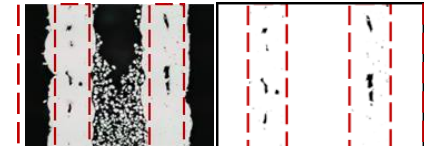
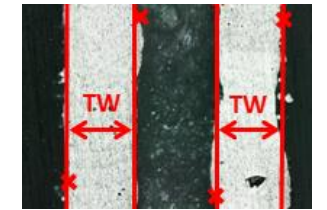
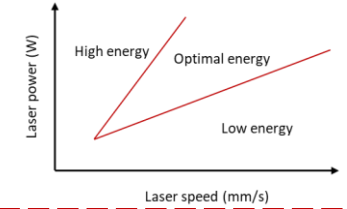
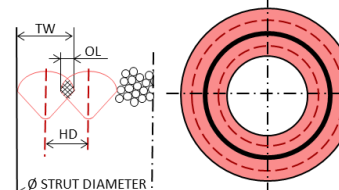
- Návarový experiment
- Procesní parametry
- Kombinace výkonu laseru a skenovací rychlosti



- Šířka dráhy
- Geometrie prutu
- Různé průměry prutu

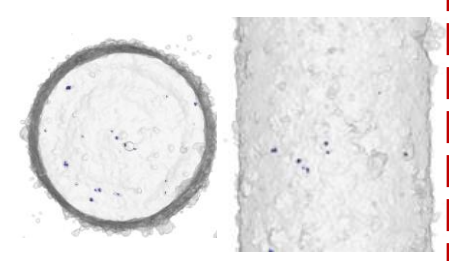
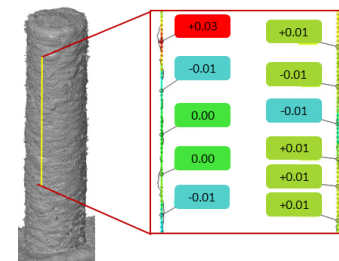
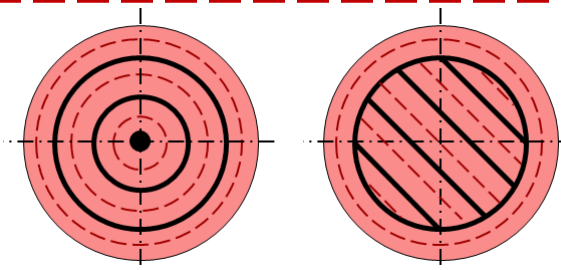


- Překryv drah
- Geometrie prutu
- Různé průměry prutu



## Výstupy

- Vhodné nastavení contour skenovací strategie
- Použití meander skenovací strategie pro porovnání



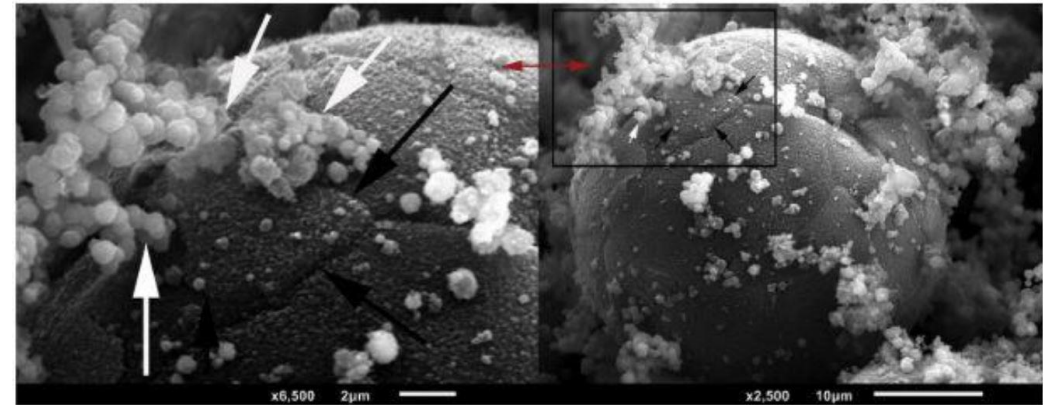
# Vědecké otázky a pracovní hypotézy

## Vědecká otázka č.2

- Povede použití contour skenovací strategie pro obtížně zpracovatelnou hořčíkovou slitinu WE43 k výrobě mikroprutových struktur s úrovní porozity do 0,5 %?

## Pracovní hypotéza č.2

- Hořčíkové slitiny jsou obtížně zpracovatelné vzhledem k nízkému rozsahu teploty mezi bodem varu a bodem vypaření, vzniku kouře při jejich zpracování a oxidaci. Avšak contour skenovací strategie umožňuje nastavení procesních parametrů tak, aby došlo k eliminaci těchto jevů.



Vznik oxidů a oxidické vrstvy na povrchu zrn hořčíkového prášku

(Salehi, M. a kol., 2018)

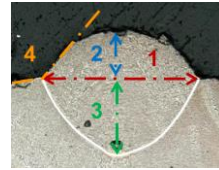
# Metodika

## Vstupy

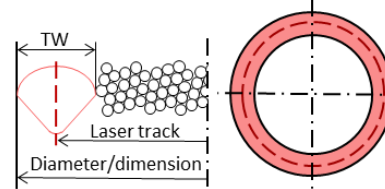
- Hořčíková slitina WE43
- Contour skenovací strategie
- Orientace prutů 90° a 35,26°
- Průměry do 3 mm
- Aplikace získaných poznatků z předchozí části

## Experimenty

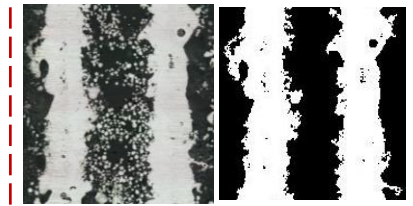
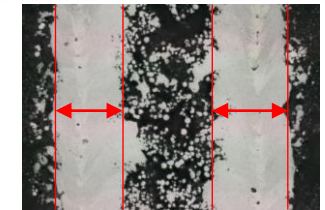
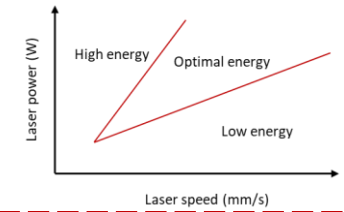
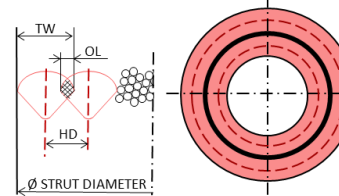
- Návarový experiment
- Procesní parametry
- Kombinace výkonu laseru a skenovací rychlosti



- Šířka dráhy
- Geometrie prutu
- Různé průměry prutu

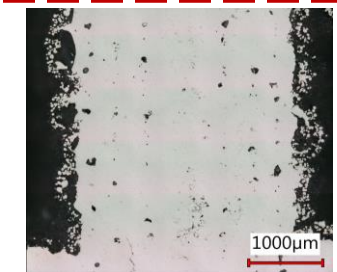
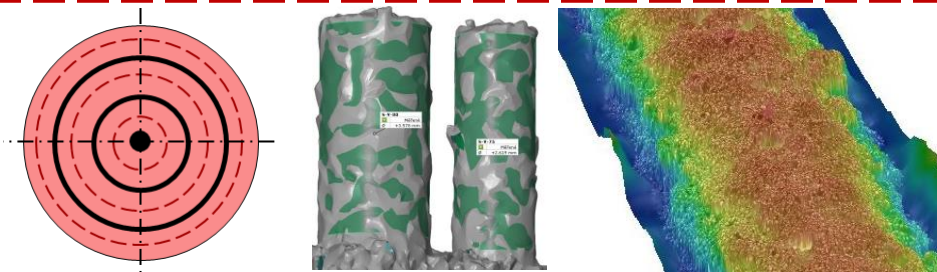


- Překryv drah
- Geometrie prutu
- Různé průměry prutu



## Výstupy

- Vhodné nastavení contour skenovací strategie
- Použití meander skenovací strategie pro porovnání



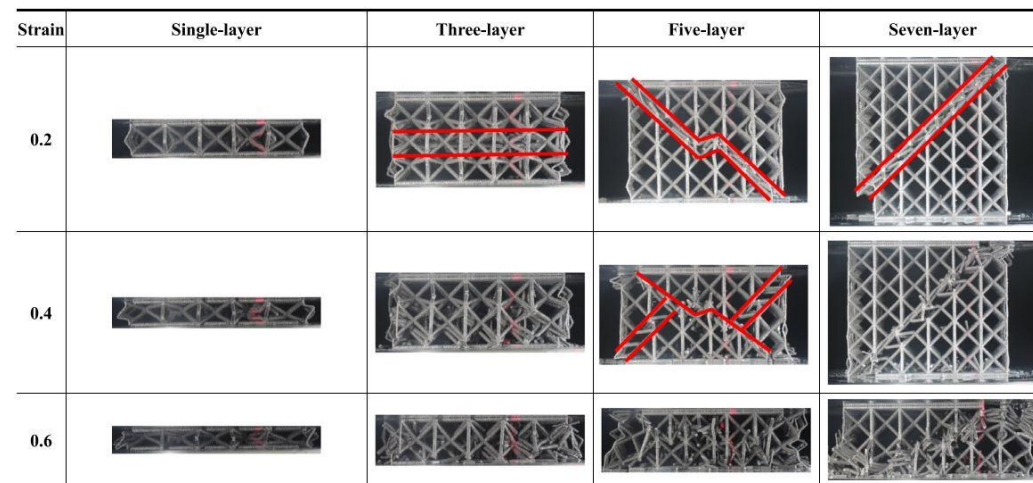
# Vědecké otázky a pracovní hypotézy

## Vědecká otázka č.3

- Povede použití contour skenovací strategie pro výrobu mikro-prutových struktur ke zvýšení mechanických vlastností oproti použití procesních parametrů pro objemový materiál pro hořčíkovou slitinu WE43?

## Pracovní hypotéza č.3

- Contour skenovací strategie může vést k výrobě mikro-prutových struktur s malým množstvím imperfekcí, avšak mechanické vlastnosti také ovlivňuje mikrostruktura materiálu. Proto contour skenovací strategie nemusí vést k lepším mechanickým vlastnostem.



Tlakové zatěžování mikro-prutových struktur  
(Li, C. a kol., 2018)

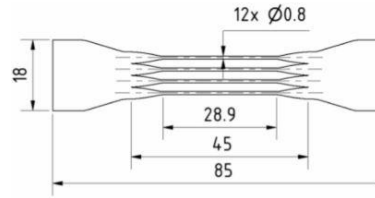
# Metodika

## Vstupy

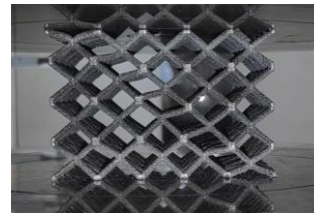
- Hořčíková slitina WE43
- BCC struktury
- Contour skenovací strategie
- Meander skenovací strategie
- Průměry do 3 mm

## Experimenty

- Tahová zkouška
- Multi-prutová tělíska
- Modul pružnosti do analytického výpočtu



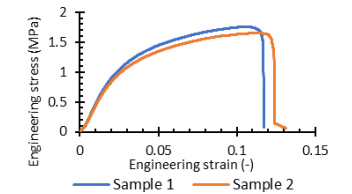
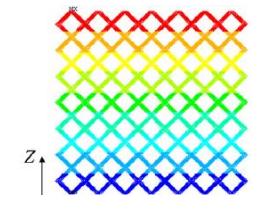
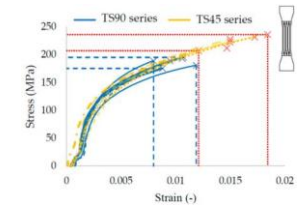
- Analytická predikce mechanických vlastností struktur – efektivní elastický modul struktury
- Yunhuy, Y. a kol., 2019
- Tlaková zkouška



Plánovaná publikace  
12/23

## Výstupy

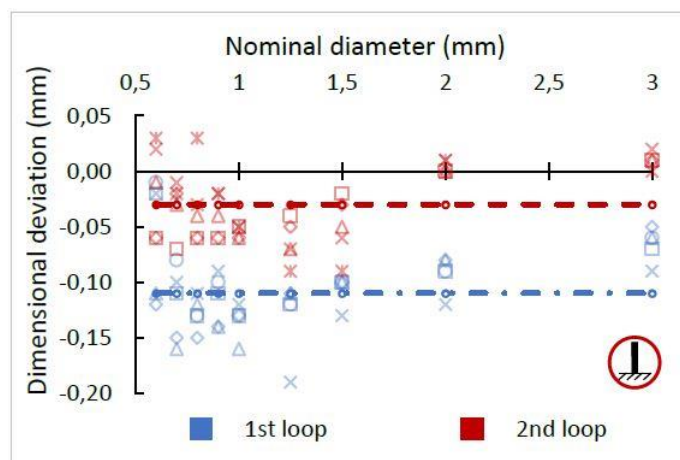
- Mechanické vlastnosti mikro-prutových struktur z hořčíkové slitiny WE43
- Odchylka do 15 % od predikce




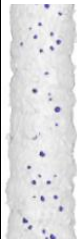






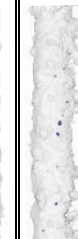



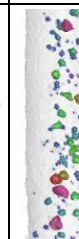






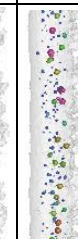


# Dosažené výsledky

## Odpověď na otázku č.1

- Pomocí contour skenovací strategie byly výrazně redukovány imperfekce v mikroprutových strukturách



	Vertical 					Inclined 				
$D_{nom}$ (mm)	0.6	0.8	1.25	2.0	3.0	0.6	0.8	1.25	2.0	3.0
LP (W)	214	325	243	263	263	171	251	263	263	263
LS (mm/s)	950	950	950	864	861	950	950	833	665	928
LE (J/mm)	0.23	0.34	0.26	0.30	0.31	0.18	0.26	0.32	0.40	0.28
Por. (%)	0.02	0.19	0.09	0.04	0.02	0.02	0.07	0.12	0.07	0.01
CS 3 <sup>th</sup> loop										
Bulk strategy										

R. Vrána, J. Jaroš, D. Koutný, J. Nosek, T. Zikmund, J. Kaiser, D. Paloušek, Contour laser strategy and its benefits for lattice structure manufacturing by selective laser melting technology, J. Manuf. Process. 74 (2022) 640–657.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.006>

# Dosažené výsledky

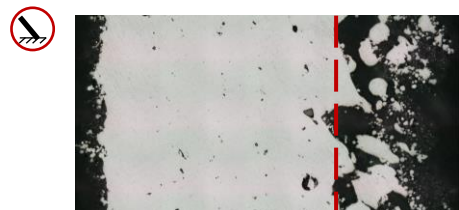
## Odpověď na otázku č.2

---

- Nízká porozita < 0,5 %



- Vysoká drsnost povrchu



- Vysoká rozměrová nepřesnost
  - Až dvojnásobné průměry prutu

## Zbývá dokončit

---

- Analýza výsledků z vyrobených prutů
- Návrh vhodných procesních parametrů s použitím DOE
- Ověřovací experiment

## Plánovaná publikace

---

- 03/2023

# Závěr

## Etapa 1

### Contour skenovací strategie

- Znalost postupu pro návrh procesních parametrů
- Porozita do 0,2 %

### Dosavadní postup řešení

- Vydána publikace Q2 (IF 5,874)
- 100 %

## Etapa 2

### Contour skenovací strategie

- Ověření uplatnění pro hořčíkovou slitinu WE43
- Porozita do 0,5 %

### Dosavadní postup řešení

- Vyhodnocení výsledků
- Příprava ověřovacího experimentu
- Plánovaná publikace 03/2023
- 70 %

## Etapa 3

### Mechanické testování

- Vliv procesních parametrů
- Vliv parametrů struktury

### Dosavadní postup řešení

- Nutnost splnit předchozí etapu
- 0 %

# DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

**Jan Jaroš, Ing.**

Jan.Jaros2@vut.cz



ÚSTAV  
KONSTRUOVÁNÍ

[www.ustavkonstruovani.cz](http://www.ustavkonstruovani.cz)