

# Zpracování hořčíkových slitin technologií SLM

Autor práce: Ing. **Jan Suchý**

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

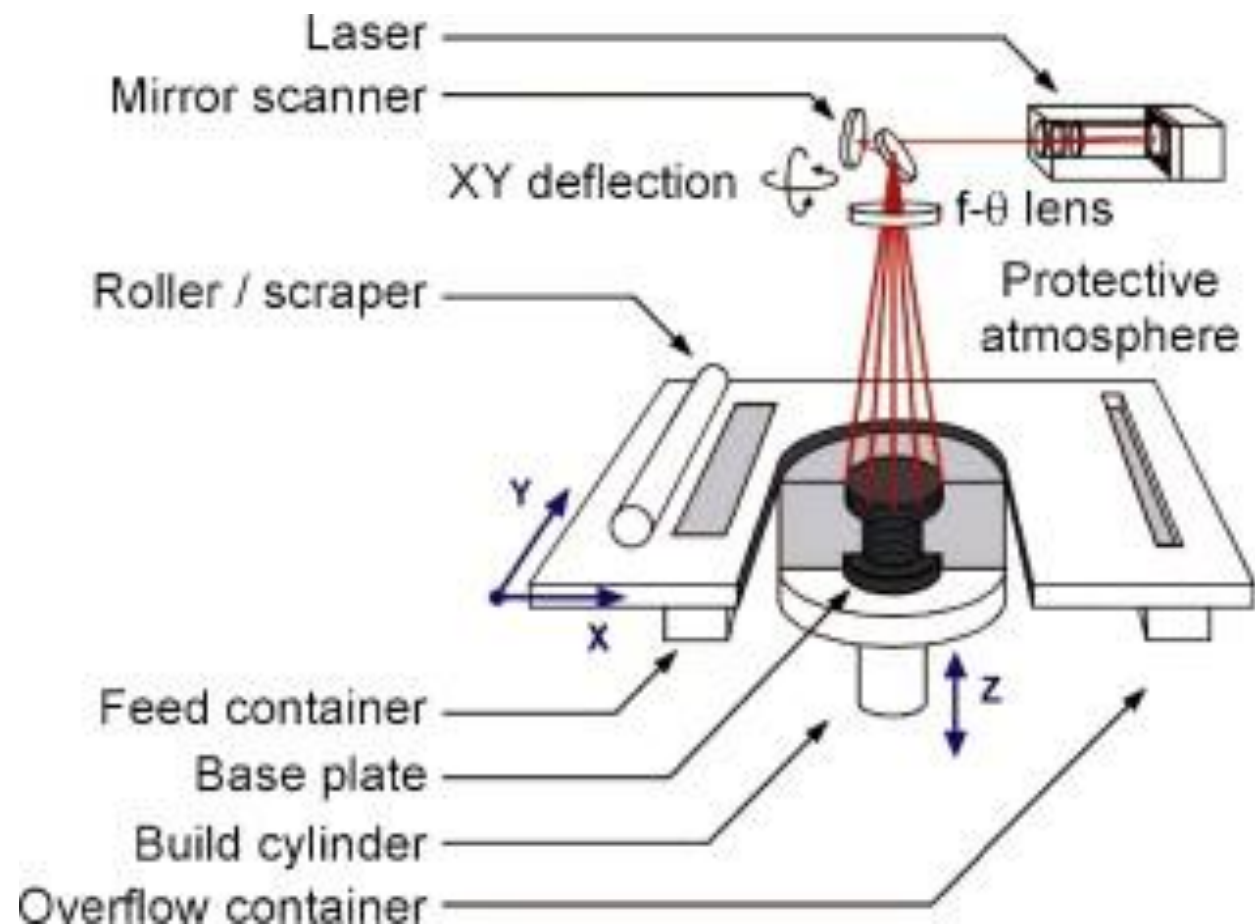
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ  
Fakulta strojního inženýrství  
VUT v Brně

SDZ, 5.11.2020



# Obsah

- Úvod do problematiky
- Současný stav poznání
- Cíl práce a vědecké otázky
- Metodika
- Současný stav řešené práce
- Závěr



# Úvod do problematiky

## Velké kostní defekty

### Standardní léčba

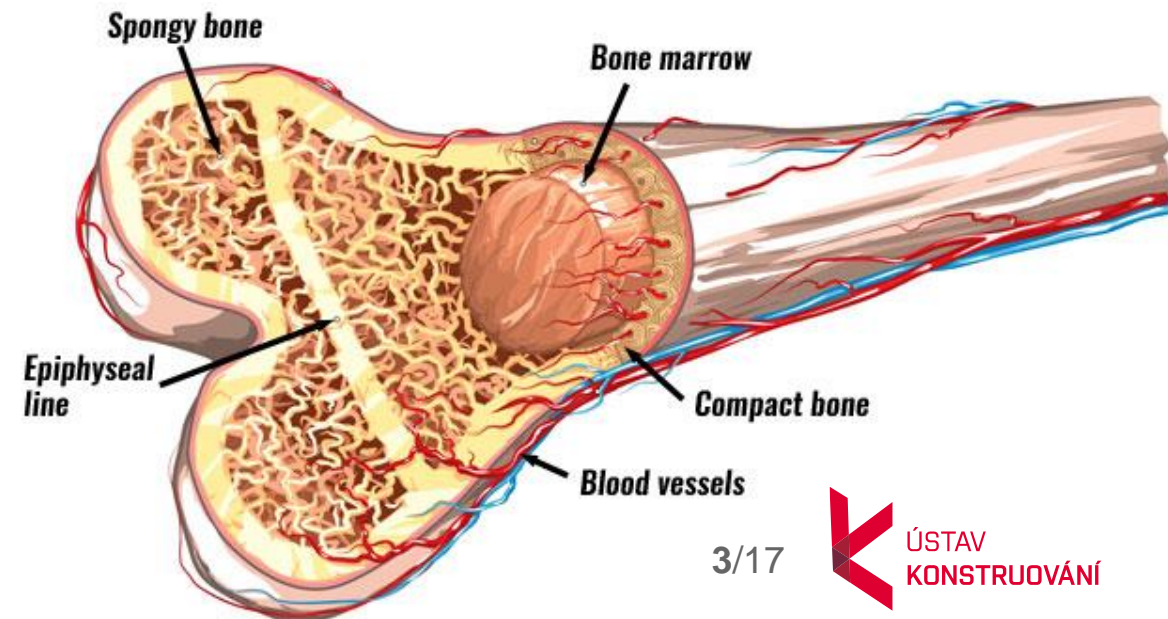
- Fixace šrouby
- Nutnost reoperace
- Použití inertních vysokopevnostních kovů (Ti, CoCr, Cr-oceli,...)

*Léčba velkých kostních defektů patří stále mezi výzvy ortopedické chirurgie  
(Singaram and Naidoo 2019)*

### Vývoj zlomenin u pacientů nad 50 let (EU)

- 2,7 mil zlomenin za rok 2017
- 37,5 bilionů € za rok 2017
- Do 2030 nárůst výskytu o 23 %

*Statistika šesti klíčových zemí EU  
(<https://www.osteoporosis.foundation/>)*



# Současný stav poznání

## Historický vývoj bioimplantátů z Mg slitin



# Současný stav poznání

## Textura povrchu

2010

2011-2014

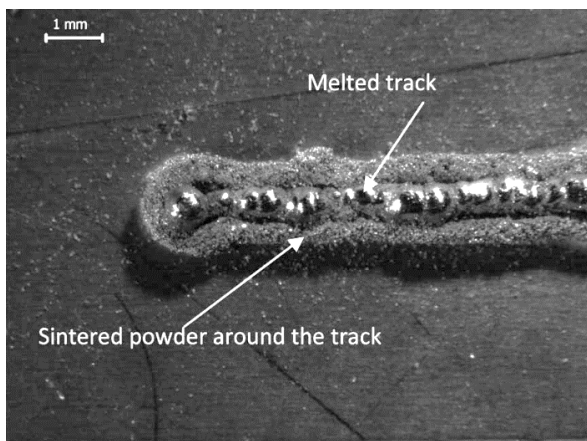
2015

2019

### Přítavování prášku u objemu

#### C. C. Ng, 2010

- Sintrovaný prášek na povrchu



#### Hu, 2015

- Dosaženo Ra 50  $\mu\text{m}$
- Většina prací zaměřena na porozitu



#### Kopp, 2019

- Zarůstání struktur práškem
- Praskliny po leptání



Pojednání ke státní doktorské zkoušce

5/17

# Současný stav poznání

## Volba hustoty energie



### Jauer, 2016

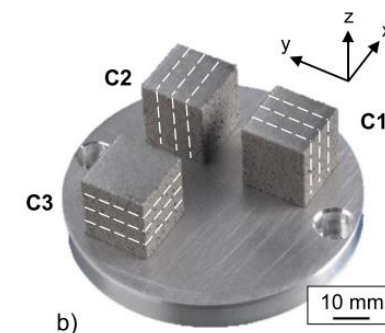
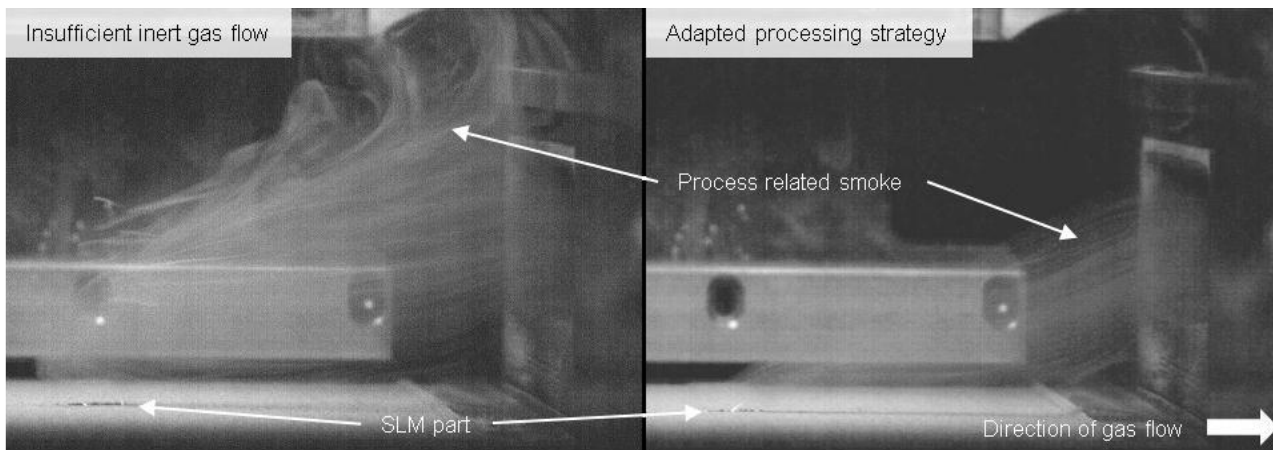
- Pokračování v trendu
- Úprava 3D tiskárny

### Tandon, 2016

- Kompletní změna procesu
- Nižší energie než Al

### Zumdick, 2019; Gangireddy 2019

- Relativní hustota nad 99,5 %
- Rozdílné přístupy a stroje



# Současný stav poznání

## Čistota inertní atmosféry

2011

2012 - dosud

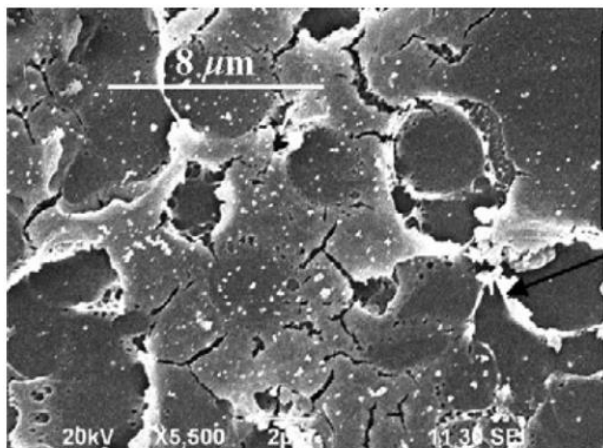
2018

2020

Kontinuální zaplavování Ar 5.0

**C. C. Ng, 2011**

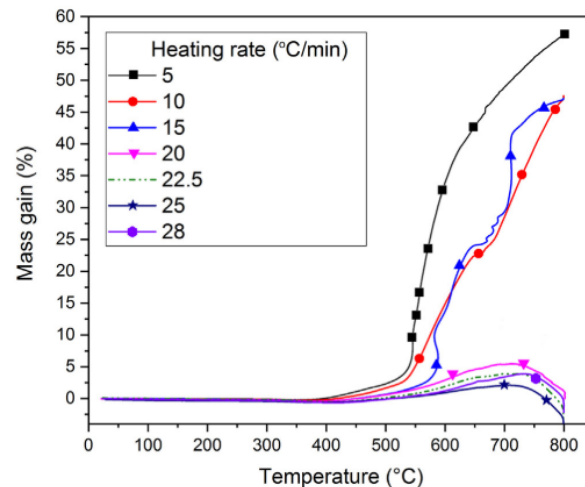
- Nárůst kyslíku ve výrobní komoře
- Vyloučení O<sub>2</sub> na hranicích zrn



Pojednání ke státní doktorské zkoušce

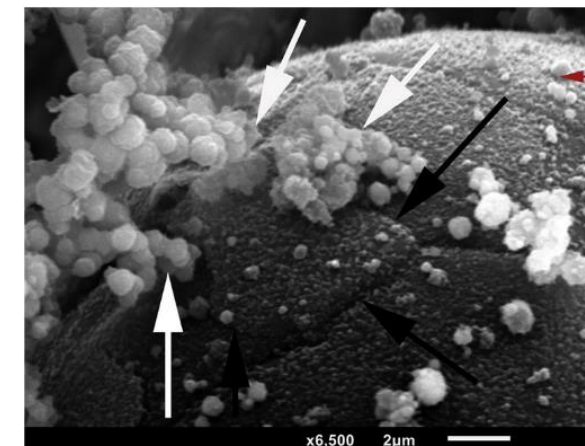
**Mojtaba Salehi, 2018**

- Oxidace Mg slitin v Ar atm
- Velmi citlivé na parciální tlaky



**Zhang, Wan, 2020**

- O<sub>2</sub> se uvolňuje při tavbě prášku



7/17

# Cíl a vědecké otázky

## Hlavní cíl práce

Hlavním cílem disertační práce je vylepšit aditivního způsobu výroby dílů z hořčíkové slitiny WE43 třídou laserů Nd:YAG. Hlavní úsilí bude zaměřeno na snížení korozní rychlosti a množství defektů v materiálu sloužících jako iniciátory trhlin během mechanického zatěžování.

## Dílčí cíle

- Popsat chování návarových stop jako podklad pro návrh tiskových strategií
- Objasnění vlivu jakosti povrchu na rychlost koroze
- Vytvořit tiskovou strategii
- Popsat mechanické chování vytvořených vzorků

## Klíčová slova

- SLM, hořčík, WE43, koroze, mechanické vlastnosti, drsnost povrchu, 3D tisk

# Cíl a vědecké otázky

## Vědecká otázka č.1

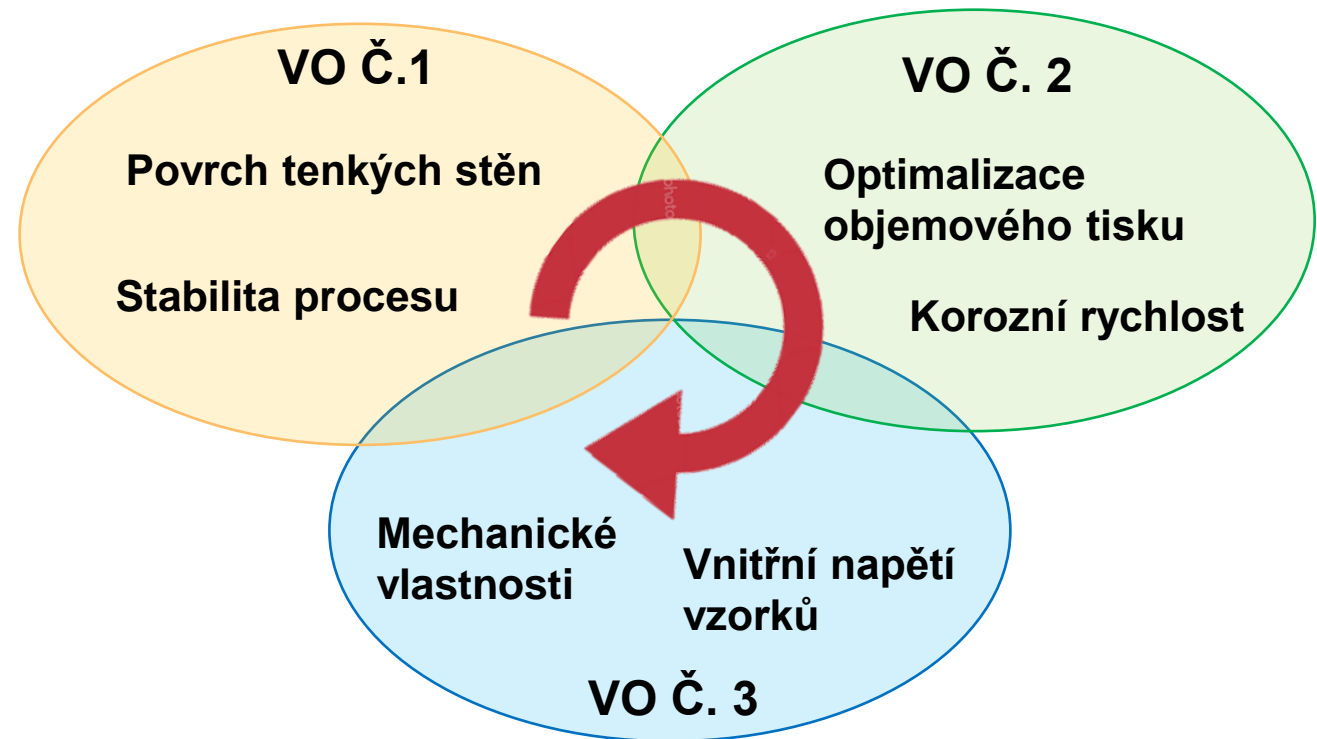
*Jaký vliv bude mít změna výkonu laseru a skenovací rychlosti na jakost povrchu hořčíkové slitiny WE43?*

## Vědecká otázka č.2

*Jakým způsobem se změní rychlost koroze aditivně vyrobeného materiálu WE43 v závislosti na změně procesních parametrů a jakosti povrchu?*

## Vědecká otázka č.3

*Do jaké míry lze ovlivnit vnitřní napětí ve struktuře aditivně vytištěného materiálu WE43 tak, aby se zlepšila mechanická integrita materiálu?*



# Metodika

1. Jaký vliv bude mít změna výkonu laseru (LP) a skenovací rychlosti (LS) na jakost povrchu hořčikové slitiny WE43?

Co?

- Stabilita procesu
- Kvalita povrchu

Na čem?

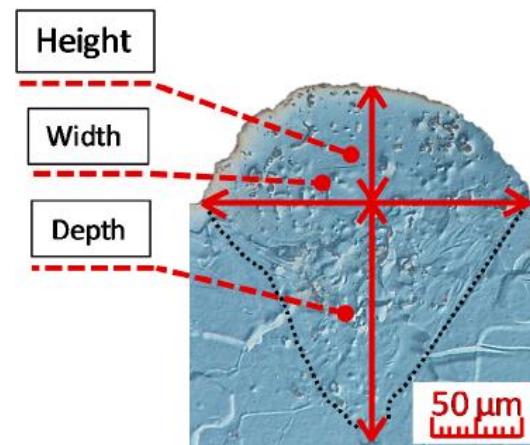
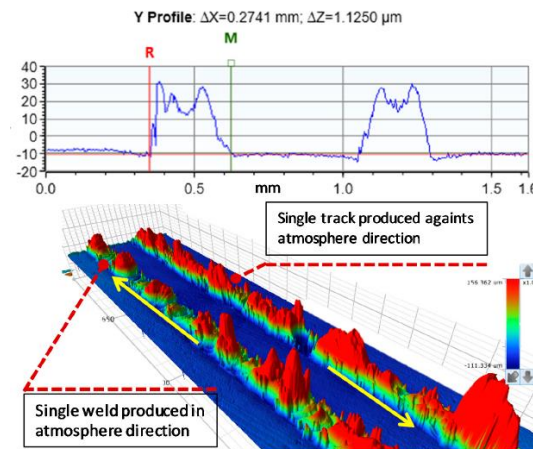
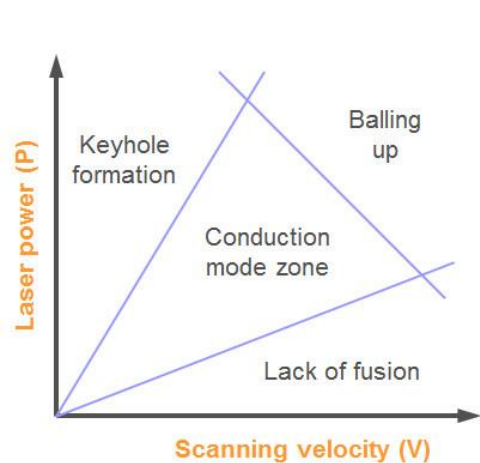
- Návarové stopy vyrobené různým LP a LS
- Tenké stěny vyrobené různým LP a LS

Jak?

- Tvar stopy
- Vývoj drsnosti povrchu

Čím?

- Optodigitální mikroskop
- Profilometr
- Optodigitální mikroskop



# Metodika

1. Jaký vliv bude mít změna výkonu laseru (LP) a skenovací rychlosti (LS) na jakost povrchu hořčíkové slitiny WE43?

Co?

- Stabilita procesu
- Kvalita povrchu

Na čem?

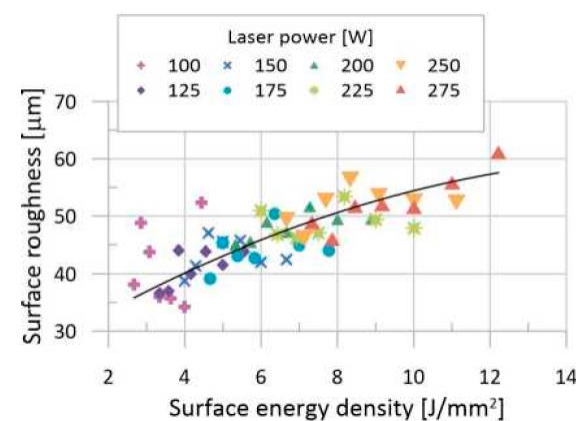
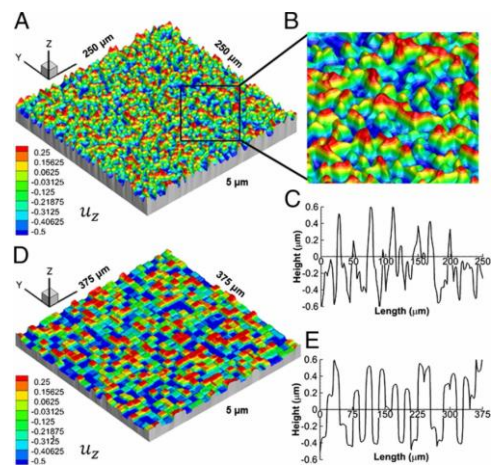
- Návarové stopy vyrobené různým LP a LS
- Tenké stěny vyrobené různým LP a LS

Jak?

- Tvar stopy
- Změna drsnosti povrchu s procesními parametry

Čím?

- Optodigitální mikroskop
- Optodigitální mikroskop
- Profilometr



# Metodika

## 2. Jakým způsobem se změní rychlost koroze aditivně vyrobeného materiálu WE43 v závislosti na změně procesních parametrů a jakosti povrchu?

### Co?

- Optimalizace tisku
- Rychlost koroze

### Na čem?

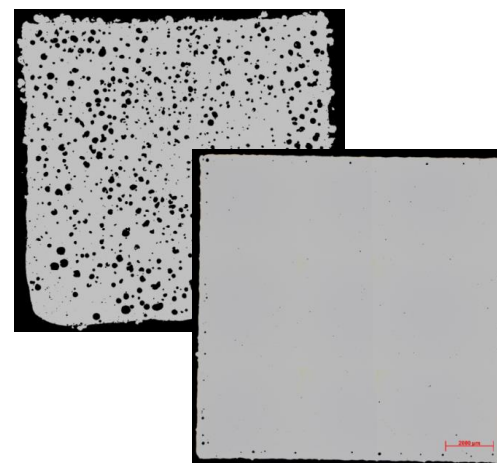
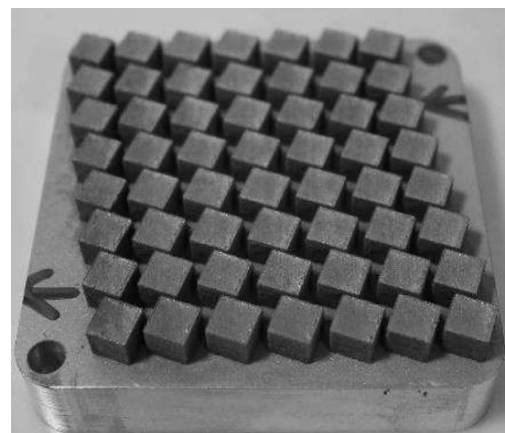
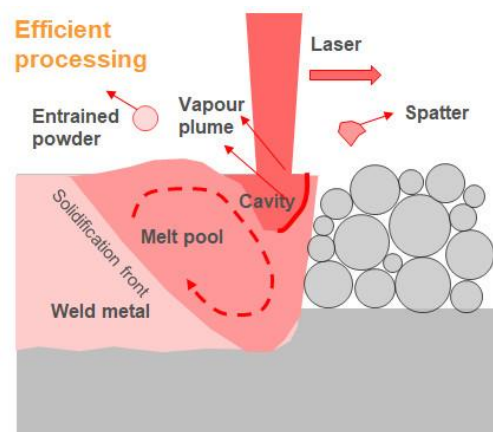
- Kostky vyrobené různou kombinací procesních par.
- 3D tisknuté kostky s upraveným povrchem

### Jak?

- Vývoj porozity
- Opakovatelnost
- Hmotnostní úbytek v čase
- Porovnání s litým mat.

### Čím?

- Optodigitální mikroskop
- $\mu$ CT
- Optodigitální mikroskop
- Laboratorní váha



# Metodika

2. Jakým způsobem se změní rychlost koroze aditivně vyrobeného materiálu WE43 v závislosti na změně procesních parametrů a jakosti povrchu?

## Co?

- Optimalizace tisku
- Rychlost koroze

## Na čem?

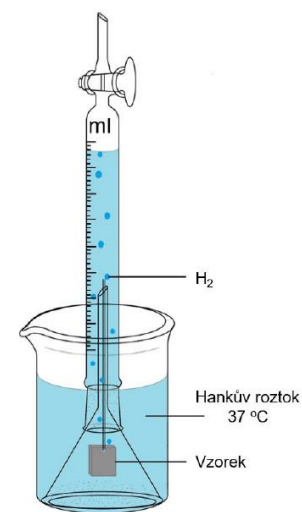
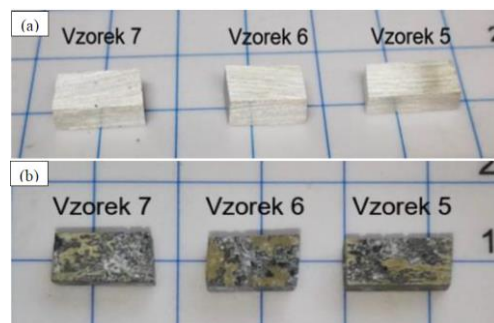
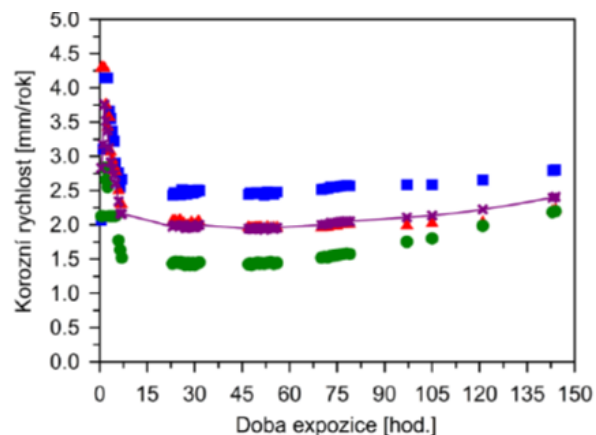
- Kostky vyrobené různou kombinací procesních par.
- 3D tisknuté kostky s upraveným povrchem

## Jak?

- Vývoj porozitv
- Opakovatelnost
- Hmotnostní úbytek v čase
- Porovnání s litým mat.

## Čím?

- Optodigitální mikroskop
- $\mu$ CT
- Optodigitální mikroskop
- Laboratorní váha



# Metodika

3. Do jaké míry lze ovlivnit vnitřní napětí ve struktuře aditivně vytištěného materiálu WE43 tak, aby se zlepšila mechanická integrita materiálu?

## Co?

- Změna vnitřního napětí
- Změna mechanických vlastností

## Na čem?

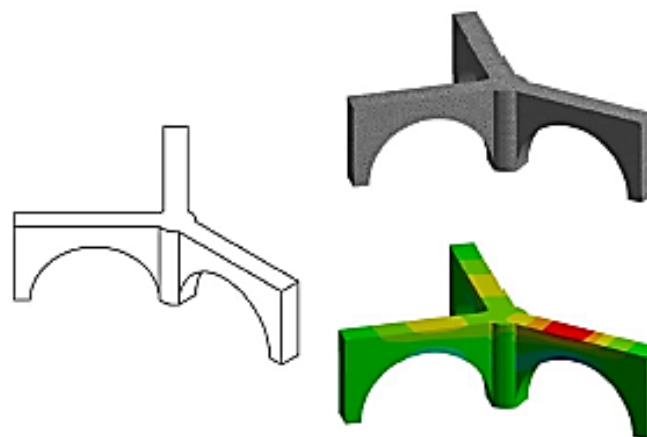
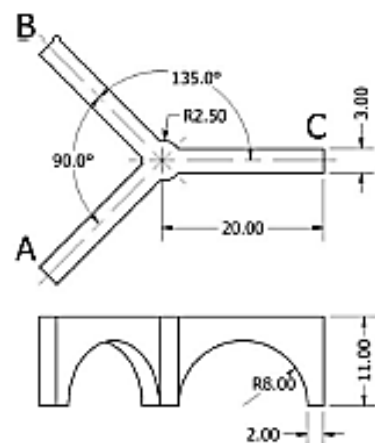
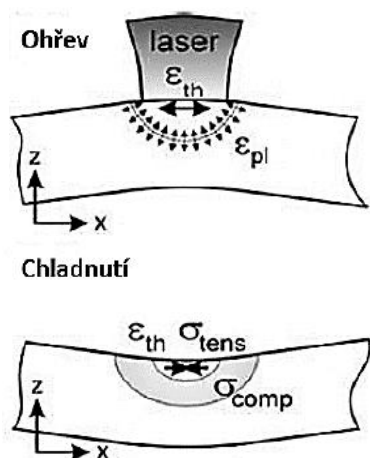
- Třípínové mosty vyrobené rozdílnými strategiemi
- Ohybové a tlakové vzorky

## Jak?

- Deformace odřezaných ramen
- Porovnání sérií vyrobených rozdílnými strategiemi

## Čím?

- 3D skener
- Universální zkušební stroj



# Metodika

## 3. Do jaké míry lze ovlivnit vnitřní napětí ve struktuře aditivně vytištěného materiálu WE43 tak, aby se zlepšila mechanická integrita materiálu?

### Co?

- Změna vnitřního napětí
- Změna mechanických vlastností

### Na čem?

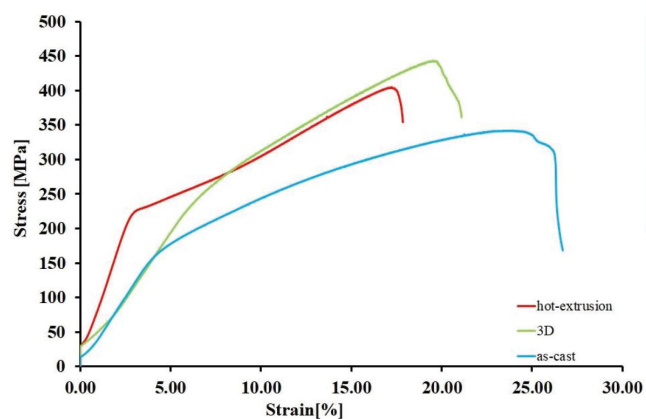
- Třípinové mosty vyrobené rozdílnými strategiemi
- Ohybové a tlakové vzorky

### Jak?

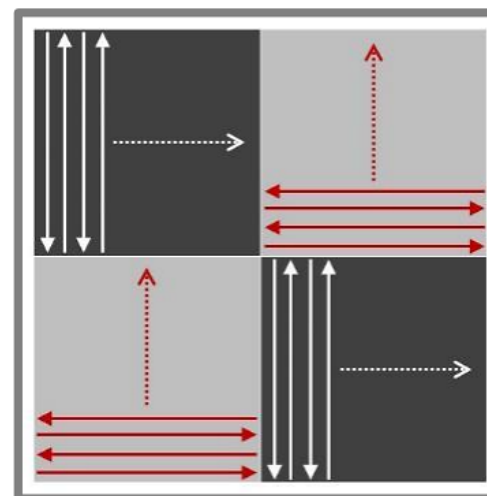
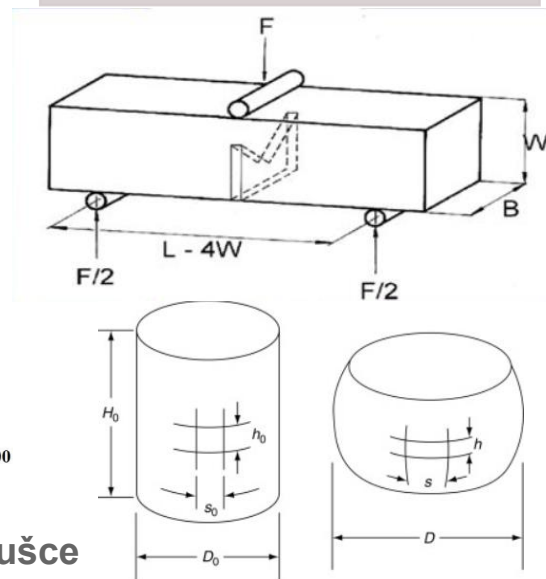
- Deformace odřezaných ramen
- Porovnání sérií vyrobených rozdílnými strategiemi

### Čím?

- 3D skener
- Universální zkušební stroj



Pojednání ke státní doktorské zkoušce

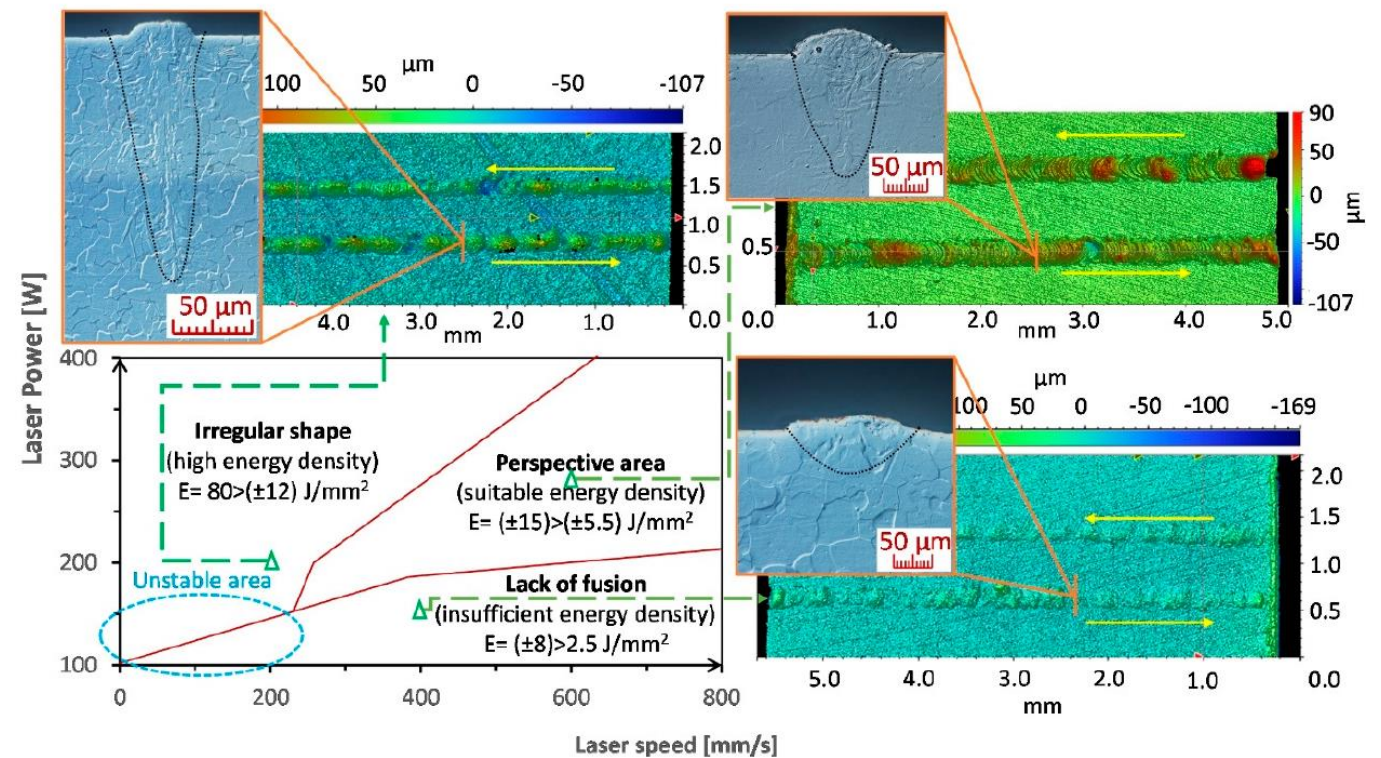


# Současný stav řešení práce

1. Jaký vliv bude mít změna výkonu laseru (LP) a skenovací rychlosti (LS) na jakost povrchu hořčikové slitiny WE43?

## Nejdůležitější poznatky

- Identifikováno stabilní procesní okno
- Výrazně vyšší vliv LP oproti LS na proces
- Množství přitaveného prášku k povrchu

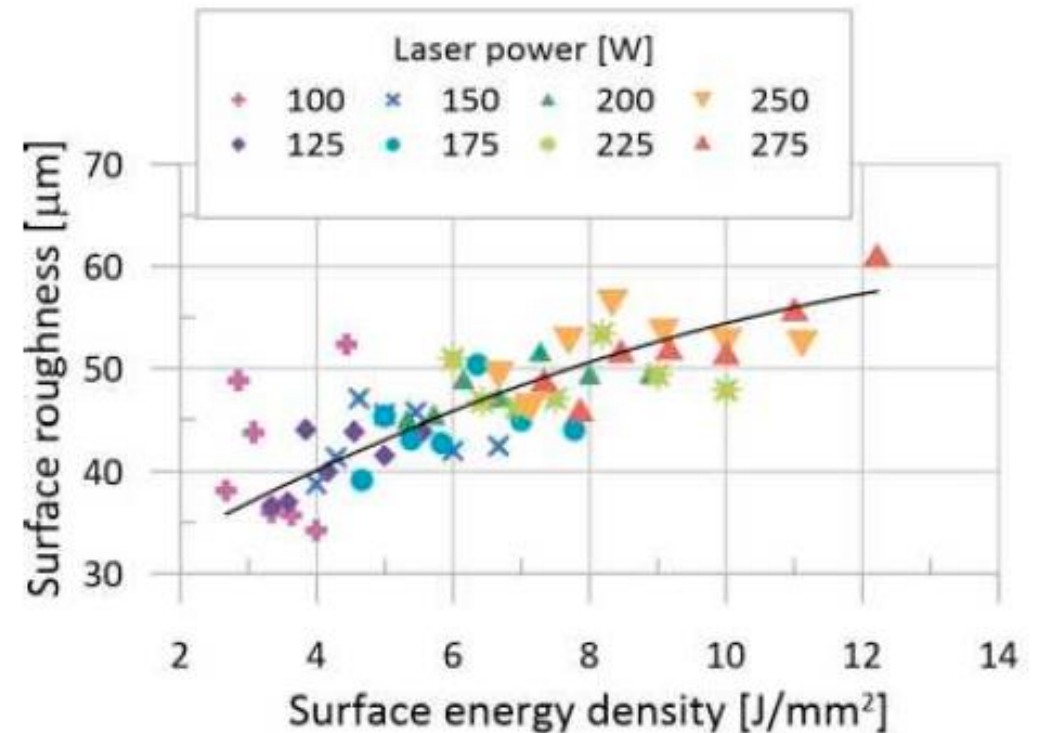
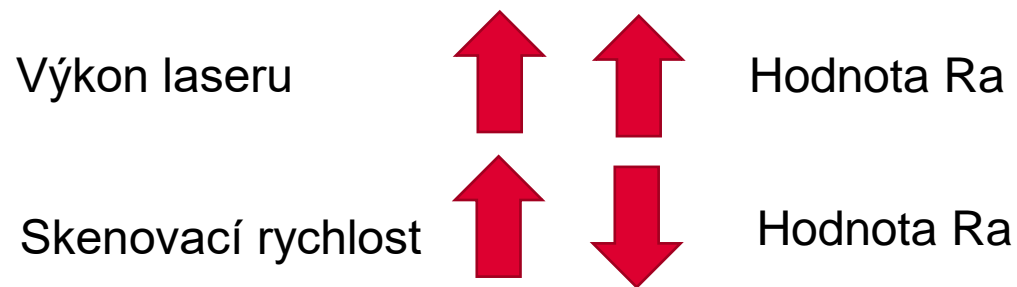


# Současný stav řešení práce

1. Jaký vliv bude mít změna výkonu laseru (LP) a skenovací rychlosti (LS) na jakost povrchu hořčíkové slitiny WE43?

## Nejdůležitější poznatky

- Identifikováno stabilní procesní okno
- Výrazně vyšší vliv LP oproti LS na proces
- Množství přitaveného prášku k povrchu
- Tenká stěna - Ra 34,3, LP = 100 W, LS = 500 mm/s

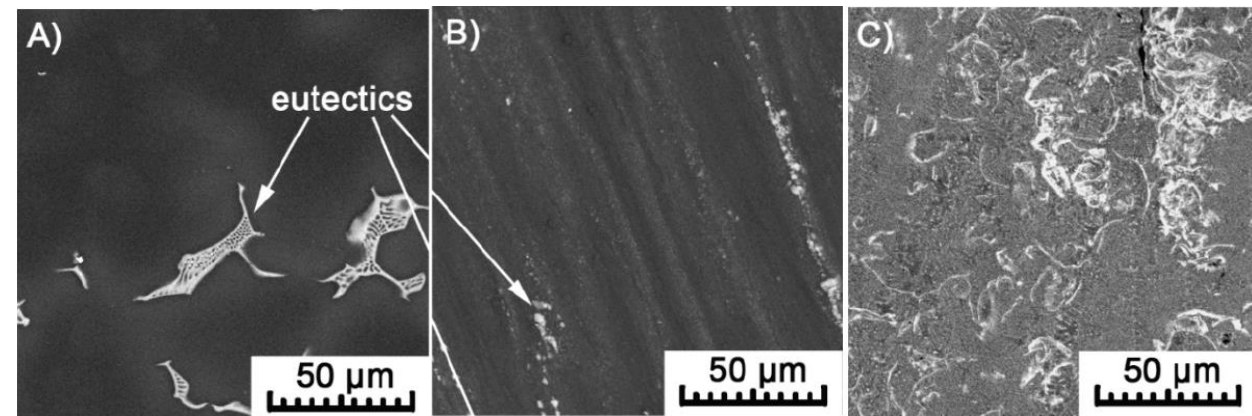


## Současný stav řešení práce

2. Jakým způsobem se změní rychlost koroze aditivně vyrobeného materiálu WE43 v závislosti na změně procesních parametrů a jakosti povrchu?

### Nejdůležitější poznatky

- Dosaženo relativní hustoty 99,57 %
- Zajištěna opakovatelnost tisku
- Vytvořen základní mikrostrukturní popis



Mikrostruktura slitiny WE43: a) lité, b) extrudované, c) 3D tištěné (Křištofová, 2019)

### Zbývající kroky

- Vyhodnotit korozní testy
- Sepsání publikace

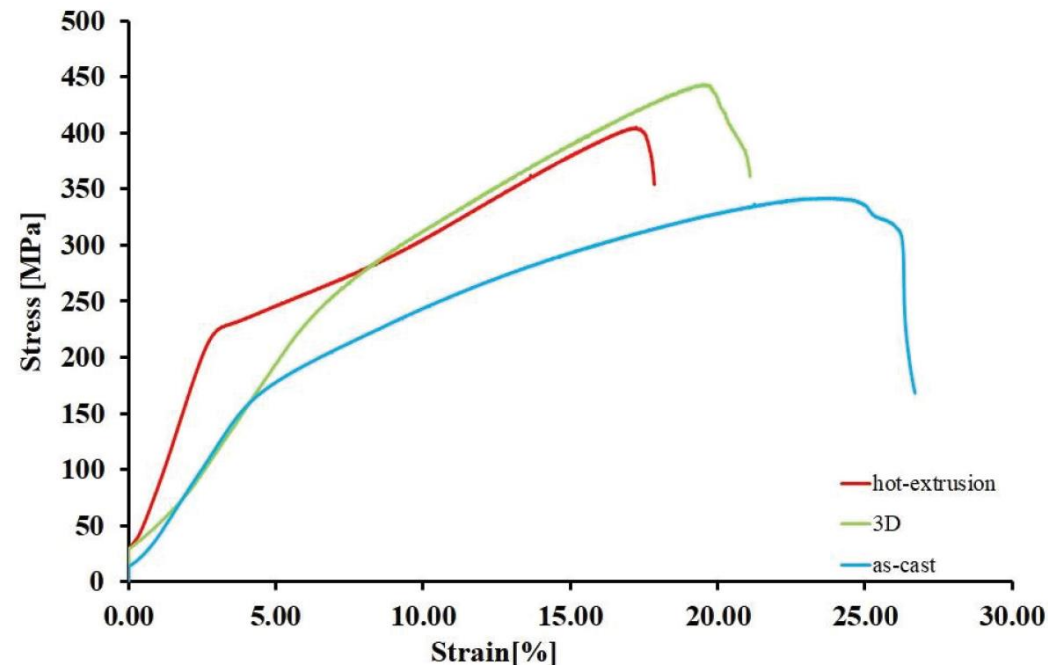
## Současný stav řešení práce

3. Do jaké míry lze ovlivnit vnitřní napětí ve struktuře aditivně vytištěného materiálu WE43 tak, aby se zlepšila mechanická integrita materiálu?

### Nejdůležitější poznatky

- Definována tvrdost
- Definovaná pevnost v tlaku, ohybu
- Šíření trhlin podél pásů oxidů

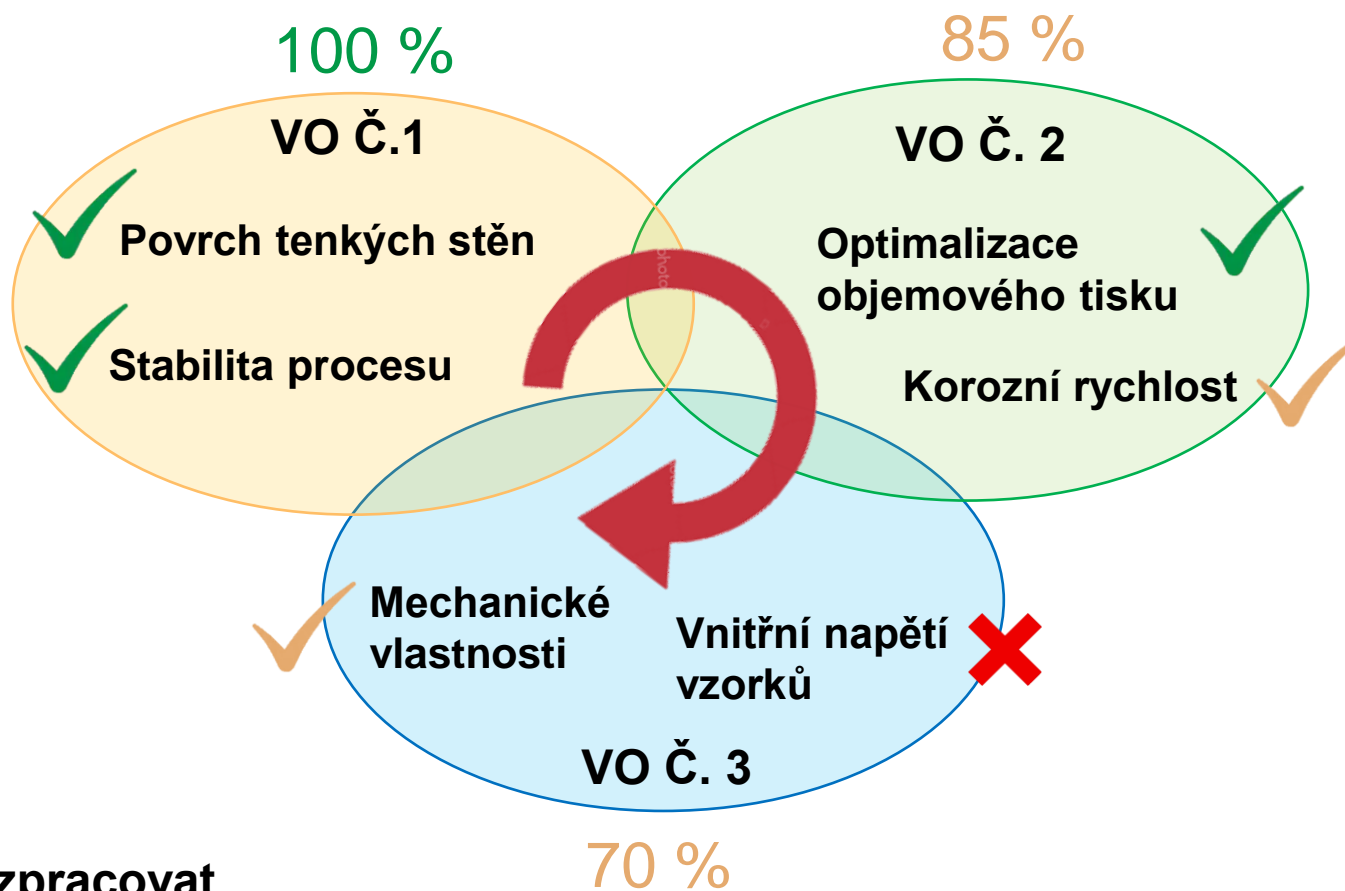
Test	Litý	Extrudovaný	3D tisknutý	Kost
HV0.1	97	132	86	40
Pevnost v ohybu (MPa)	221	398	219	200
Pevnost v tlaku (MPa)	341	403	441	210



### Zbývající kroky

- Tisk třípinových mostů
- Tisk vzorků šachovnicovou strategií
- Vyhodnocení dat
- Sepsání publikace

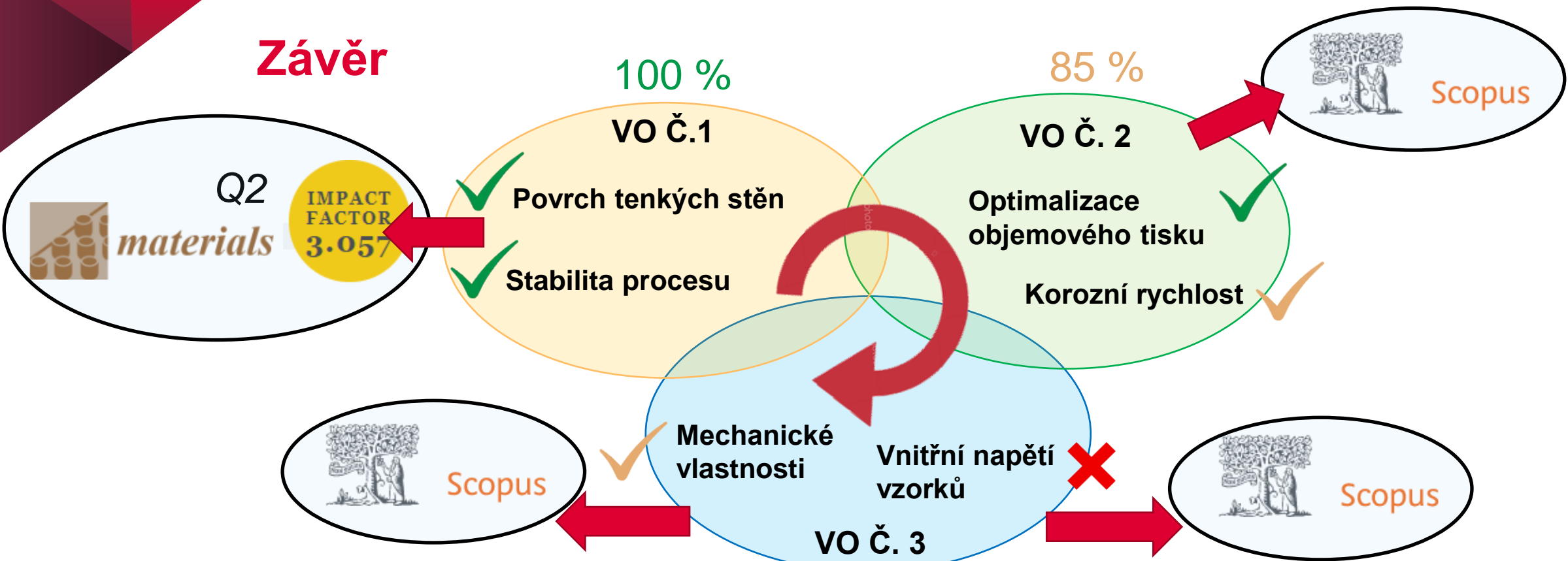
# Závěr



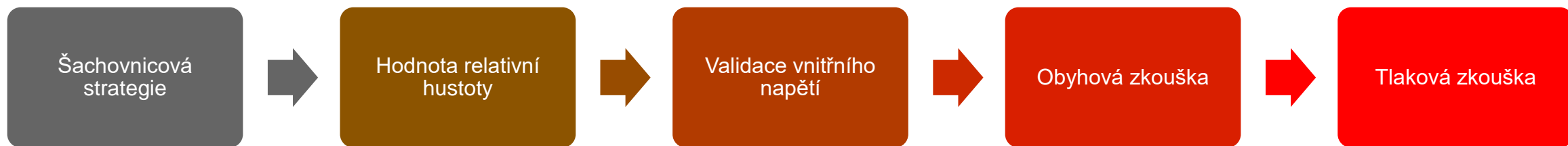
Zbývá experimentálně zpracovat



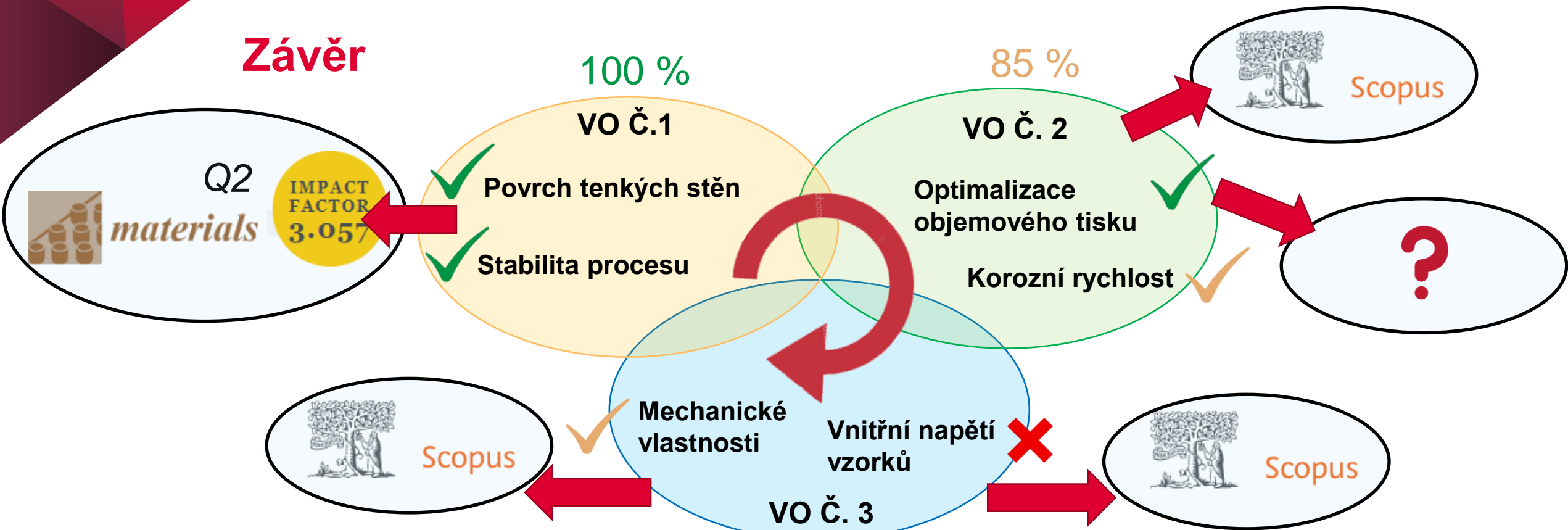
# Závěr



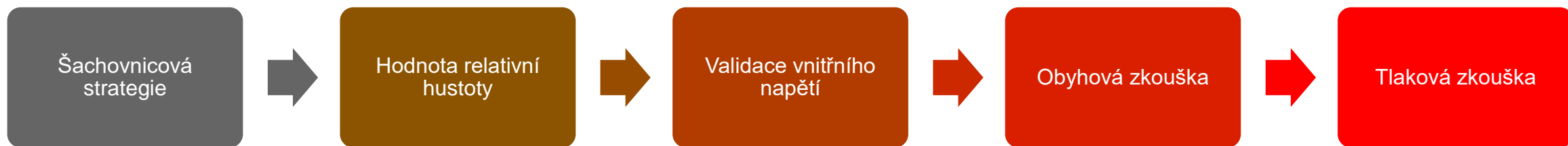
## Zbývá experimentálně zpracovat



# Závěr



## Zbývá experimentálně zpracovat



# Seznam publikací

1. **SUCHY, Jan**, Miroslava HORYNOVÁ, Lenka KLAKURKOVÁ, David PALOUSEK, Daniel KOUTNY a Ladislav CELKO. Effect of laser parameters on processing of biodegradable magnesium alloy WE43 via selective laser melting method. *Materials* [online]. 2020, 13(11). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13112623



Q2  
*materials*

IMPACT  
FACTOR  
3.057

2. KRIŠTOFOVÁ, Patrícia, Michaela ROUDNICKÁ, Jiří KUBÁSEK, David PALOUŠEK, **Jan SUCHÝ** a Dalibor VOJTĚCH. Influence of Production Parameters on the Properties of 3D Printed Magnesium Alloy Mg-4Y-3RE-Zr (WE43). *Manufacturing Technology* [online]. 2019, 19, 613–618. Dostupné z: doi:10.21062/ujep/343.2019/a/1213-2489/MT/19/4/6013



Scopus

3. KRIŠTOFOVÁ, Patrícia, Jiří KUBÁSEK, Michaela ROUDNICKÁ, Alena MICHALCOVÁ, **Jan SUCHÝ**, David PALOUŠEK a Dalibor VOJTĚCH. Structure and properties of additively manufactured WE43 magnesium alloy. In: 28th International conference on Metallurgy and Materials [online]. 2019, s. 1578–1582. Dostupné z: doi:10.37904/metal.2019.936



Scopus

4. KRIŠTOFOVÁ, P.; KUBÁSEK, J.; VOJTĚCH, D.; PALOUŠEK, D.; **SUCHÝ, J.** Microstructure of the Mg-4Y-3RE-Zr (WE43) Magnesium Alloy Produced by 3D Printing. *Manufacturing TECHNOLOGY*, 2019, roč. 19., č. 1., s. 89-94. ISSN: 1213-2489.



Scopus

5. **SUCHY, Jan**, Libor PANTELEJEV, David PALOUSEK, Daniel KOUTNY a Jozef KAISER. Processing of AlSi9Cu3 alloy by selective laser melting. *Powder Metallurgy* [online]. 2020, 63(3), 197–211. ISSN 17432901. Dostupné z: doi:10.1080/00325899.2020.1792675



Q2

2019  
Impact  
Factor  
1.793

6. SKŘIVÁNKOVÁ, V.; VLAŠIC, F.; **SUCHÝ, J.**; PALOUŠEK, D.; MAZAL, P. STUDY OF FATIGUE LOADING OF THE SLM AND CAST MATERIAL BY ACOUSTIC EMISSION METHOD. In *Metal 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava-Zabreh: TANGER LTD., 2019. s. 1345-1350. ISBN: 9788087294840.



Scopus

# Zapojení v projektech

## Aplikovaný výzkum

- **2017-2021, MPO FV20232 - Biodegradovatelné strukturované implantáty vyrobené metodou 3D tisku kovů, (člen řešitelského týmu)**
- **2020-2023, Research of Magnesium Alloys for Additive Manufacturing of Structural and Biocompatible Parts, ReMaP, INTERREG, (člen řešitelského týmu)**
- 2018-2022, Materiály s vnitřní architekturou strukturované pro aditivní technologie, ArMAdit, OP VVV, (člen řešitelského týmu)
- 2017-2020, ESA Contract, Additive Design for Aerospace Capabilities (ADAAC), (člen řešitelského týmu)
- 2017-2019, TACR TH02010514: Vývoj technologie 3D tisku pro vybrané materiály a topologická optimalizace komponent pro letecký průmysl, (člen řešitelského týmu)

# DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

**Jan Suchý, Ing.**

Jan.Suchy1@vut.cz



ÚSTAV  
KONSTRUOVÁNÍ

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