

STUDIUM ZPRACOVÁNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ SELEKTIVNÍM LASEROVÝM TAVENÍM ZA ZVÝŠENÝCH TEPLŮT

Martin Malý, Ing.

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

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

Libor Pantělejev, doc. Ing., Ph.D.

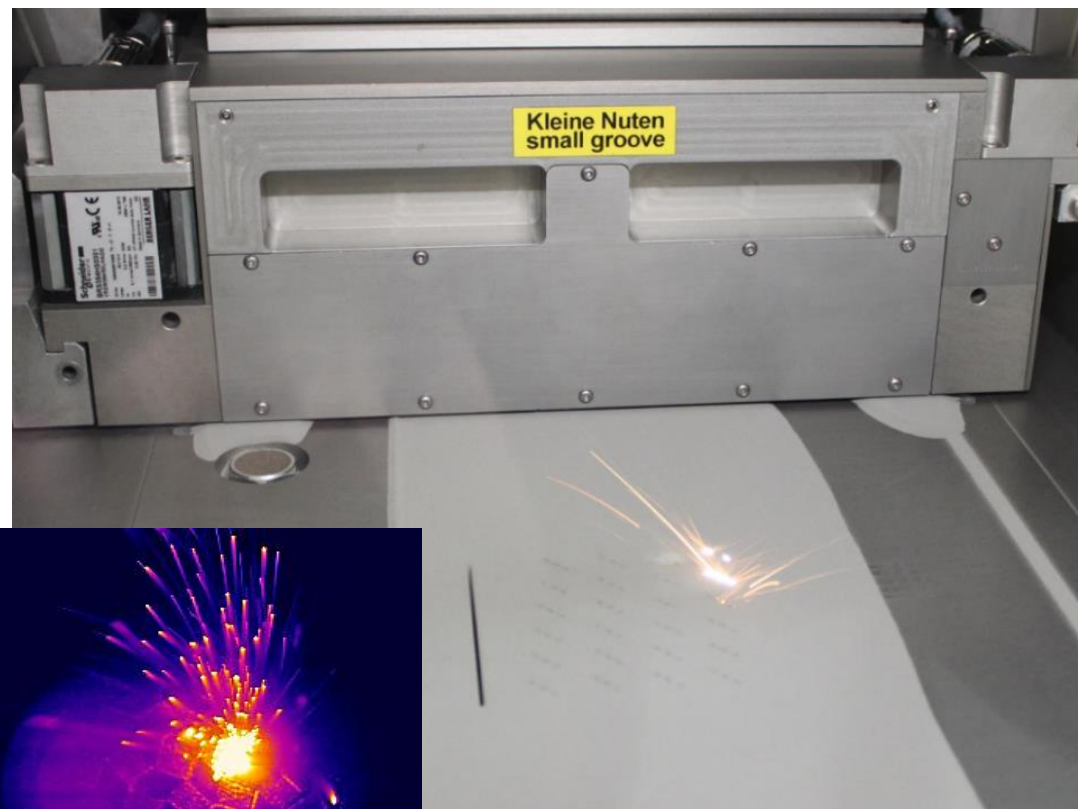
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

Brno, 05. 11. 2020



Obsah prezentace

- Motivace pro řešení problému
- Shrnutí současného stavu poznání
- Vymezení cílů disertační práce
- Vědecké otázky a pracovní hypotézy
- Materiál a metody
- Současný stav řešení disertační práce
- Závěr

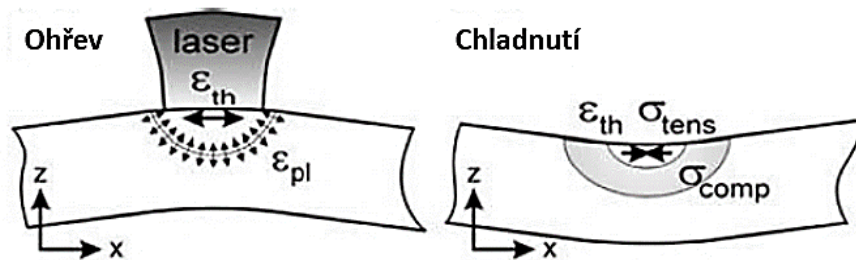


Selektivní laserové tavení kovového práškového materiálu

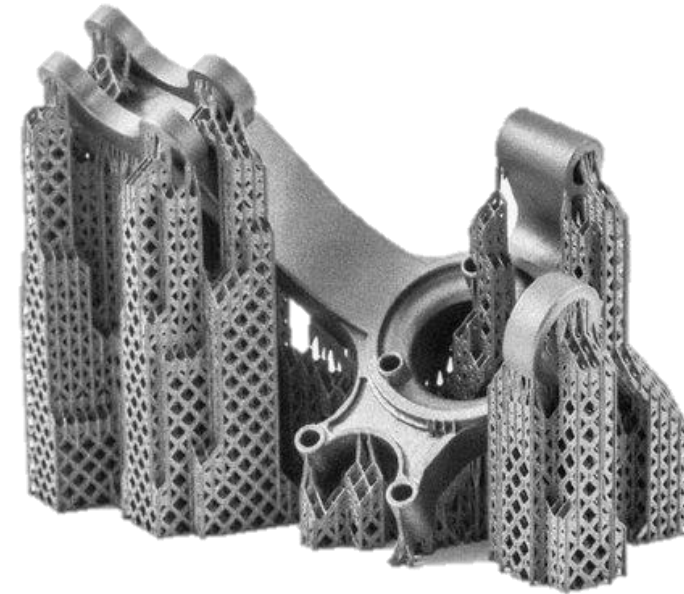
Motivace pro řešení problému

Limity technologie Selective Laser Melting (SLM)

- Zbytková napětí
- Podpůrné struktury
- Nízký počet zpracovatelných materiálů
- Textura povrchu
- Přesnost výroby



Princip vzniku zbytkových napětí (Merzelis, 2006)



Komponenta s podpůrnými strukturami (matmatch.com)

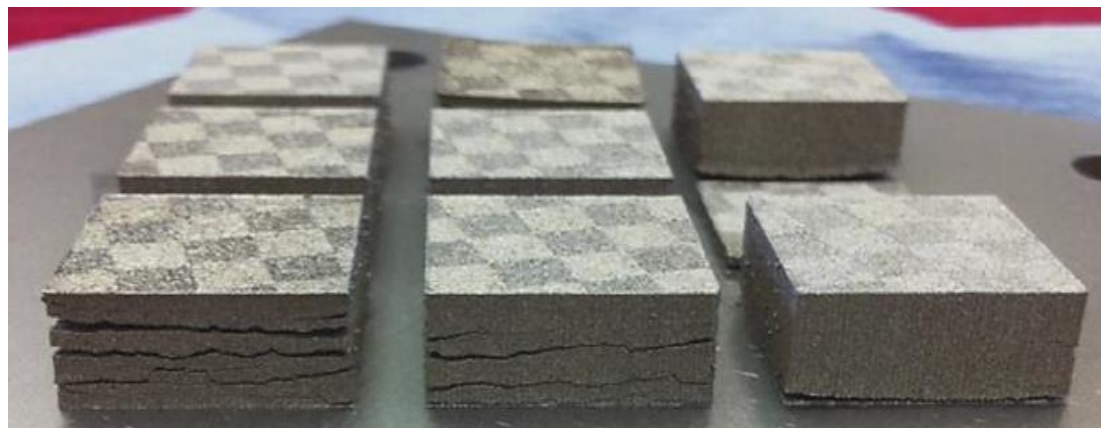
Motivace pro řešení problému

Potenciál zvýšené teploty předehřevu v SLM technologii

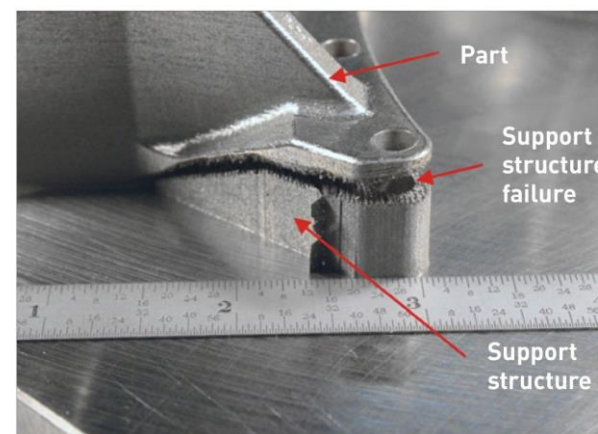
- Snížení zbytkových napětí
 - Redukce podpůrného materiálu
- Rozšíření portfolia zpracovatelných materiálů



Yttriem stabilizovaná keramika na bázi zirkonu zpracovaná SLM za teploty předehřevu 1670 °C (Liu, 2015)



Vliv předehřevu na nástrojovou ocel M2. Zleva: bez předehřevu, 90 °C a 200 °C (Kempen, 2014)



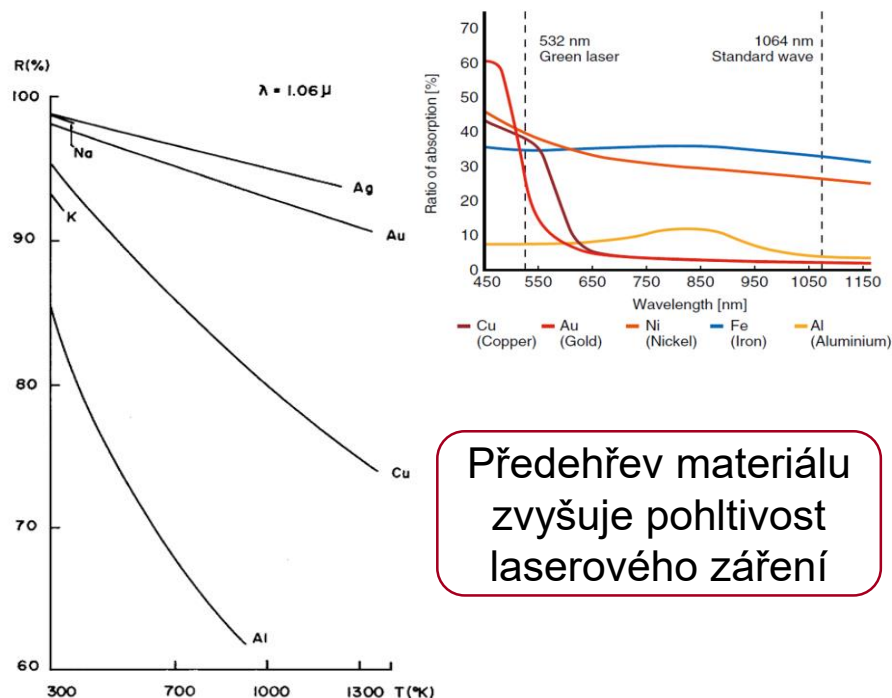
Porucha způsobena zbytkovým napětím (metal-am.com)

Shrnutí současného stavu poznání

1971

Ujihara K., 1971

- Pohltivost laserového záření



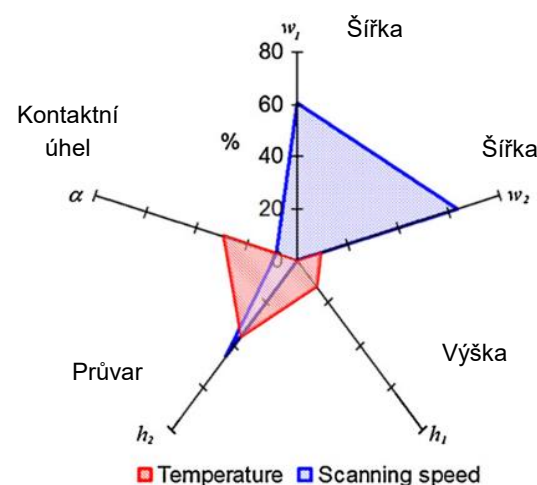
Předehřev materiálu zvyšuje pohltivost laserového záření

Státní doktorská zkouška

2012

Yadroitsev I., 2012

- SS316L
- Kontrola geometrie návaru
- $T_p > 0,5 T_m$ – nestabilita návaru



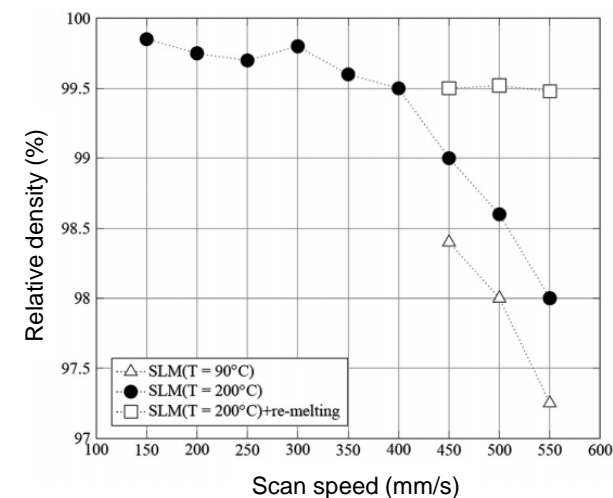
Snížení nutné energie pro natavení prášku

2014

Kempen K., 2014

- M2 HSS
- Eliminace trhlin v materiálu 200 °C

Vyšší produktivita při použití předehřevu



5/18

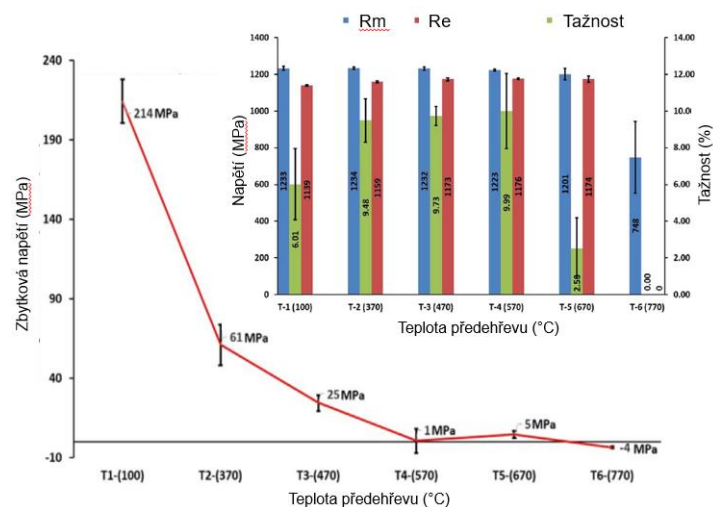
Shrnutí současného stavu poznání

2014

Ali H., 2014

- Ti6Al4V
- ↑370 °C zvýšení tažnosti
- Zvýšení únavové pevnosti

Eliminace zbytkových napětí $T_p > 570$ °C



2015

Vora P., 2015

- AlSi12
- Bezpodporový 3D tisk 380 °C

Převis 10 mm, zhoršená textura povrchu

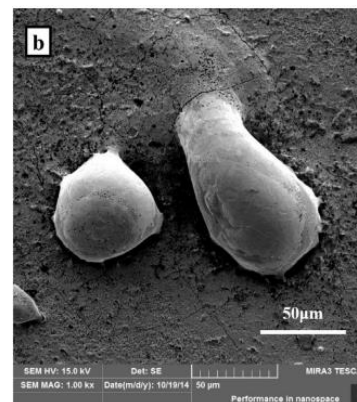


2015

Zhou X., 2015

- Wolfram
- Sferoidizační efekt

Předehřev zlepšuje smáčecí podmínky



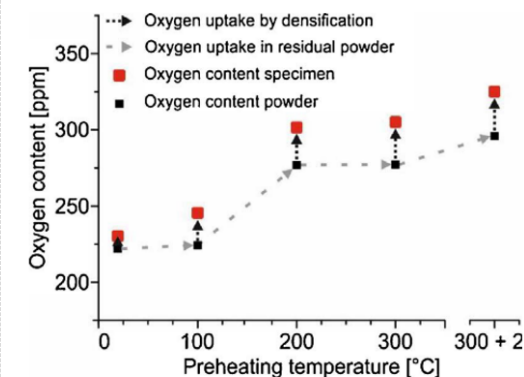
Prodloužení času solidifikace

2018

Krell J., 2018

- Nástrojová ocel H13
- Eliminace trhlin 300 °C

Zvýšená oxidace dílu i prášku



Analýza současného stavu poznání

Redukce zbytkových napětí

- Redukce zbytkových napětí Ti6Al4V T_p 570 °C, pouze standardní procesní parametry

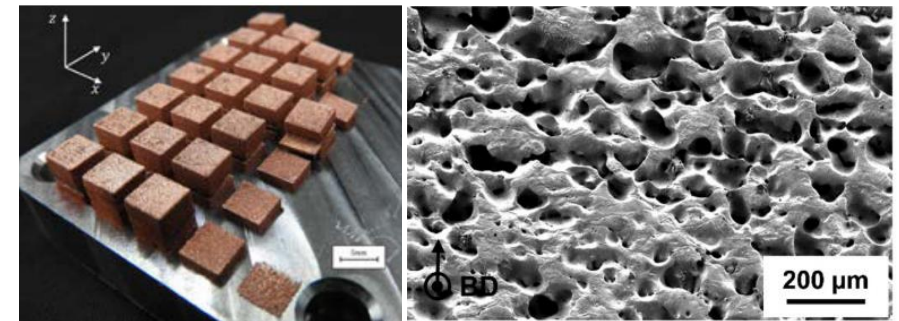
Vliv předehřevu a dalších procesních parametrů na zbytková napětí

Redukce podpůrných struktur

Rozšíření portfolia zpracovatelných materiálů

- Snížení odrazivosti laserového paprsku
- Snížení potřebné energie dodané laserem
- Změna smáčecích podmínek
- Prodloužení času solidifikace

Zpracování mědi metodou SLM za zvýšených teplot předehřevu



Měď zpracovaná SLM technologií bez zvýšené teploty předehřevu, maximální relativní hustota 98 % (Colopi M., 2018, Jadhav S.D., 2019)

Vymezení cílů disertační práce

Hlavní cíl disertační práce

- Experimentální ověření vlivu zvýšené teploty pracovní oblasti v SLM procesu na kvalitu obtížně zpracovatelných materiálů, redukci zbytkových napětí, trhlin a množství podpurných struktur. Zaměření práce je na Ti6Al4V a měď.

Přínos disertační práce

- Snížení nákladů na výrobu a dokončovací operace komponent. Vyšší tvarová nezávislost. Rozšíření portfolia zpracovatelných materiálů s unikátními fyzikálními vlastnostmi.

Aplikační potenciál

Zvýšení
produktivity výroby

Výroba komponent
s vnitřními
dutinami bez
podpurného
materiálu

Výroba
efektivnějších
tepelných
výměníků

Vědecké otázky a pracovní hypotézy

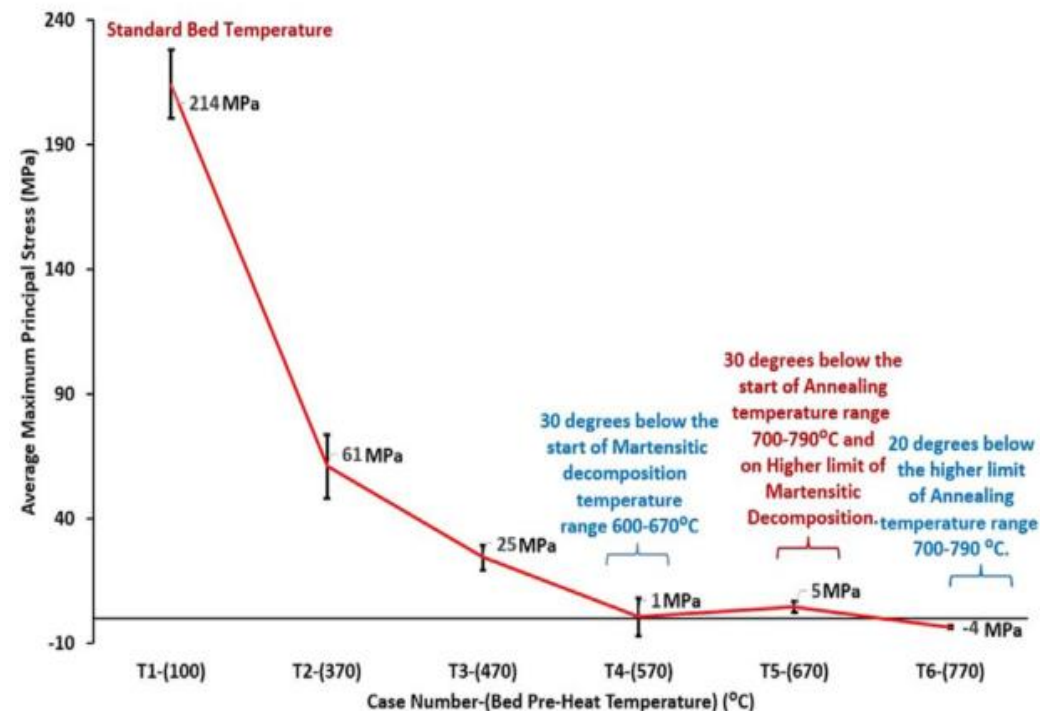
Vliv předehřevu a dalších procesních parametrů na zbytková napětí

Vědecká otázka č. 1

Lze vhodnou kombinací procesních parametrů eliminovat zbytková napětí při stavbě Ti6Al4V slitiny i s nižší teplotou předehřevu než 570 °C?

Pracovní hypotéza

Vhodným nastavením procesních parametrů dojde k eliminaci zbytkových napětí i při nižší teplotě předehřevu.



Vliv zvýšené teploty předehřevu na zbytková napětí slitiny Ti6Al4V. (Ali H., 2017)

Vědecké otázky a pracovní hypotézy

Redukce podpůrných struktur

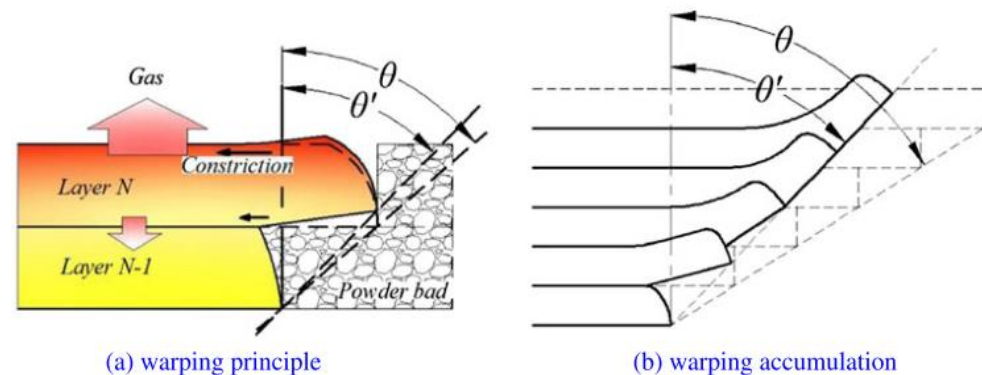
Vědecká otázka č. 2

Jaký vliv má vysoká teplota předehřevu pracovní oblasti na kritický úhel a drsnost převislého povrchu?

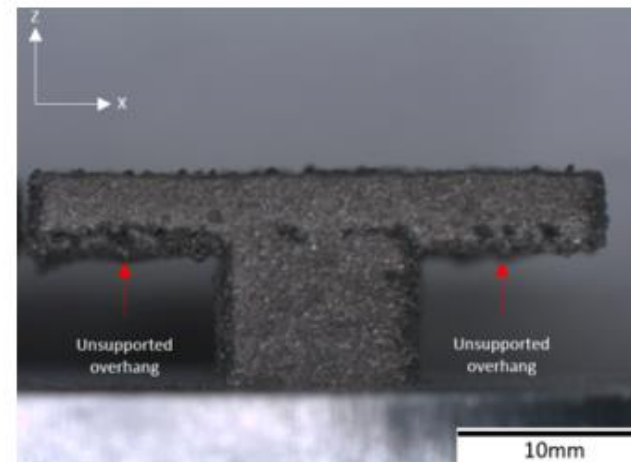
Jaké množství podpůrných struktur lze eliminovat zvýšenou teplotou předehřevu při výrobě technologií SLM?

Pracovní hypotéza

- ↓ teplotních gradientů
- ↓ zbytkových napětí
- ↓ zamezení akumulace tahových deformací



(a) warping principle (b) warping accumulation
Akumulace tahových napětí při stavbě nakloněných vzorků (Wang D., 2012)



Vzorek bez podpůrných struktur. AlSi12, předehřev 380 °C (Vora P., 2015)

Vědecké otázky a pracovní hypotézy

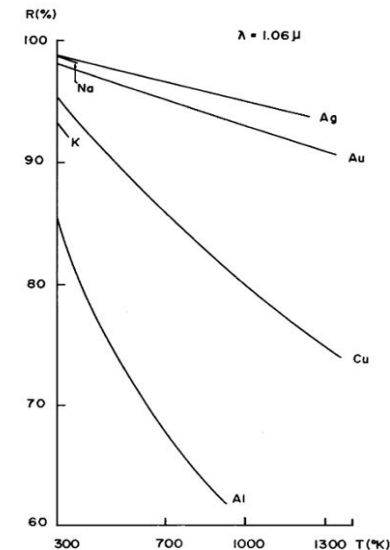
Zpracování mědi metodou SLM za zvýšených teplot předehřevu

Vědecká otázka č. 3

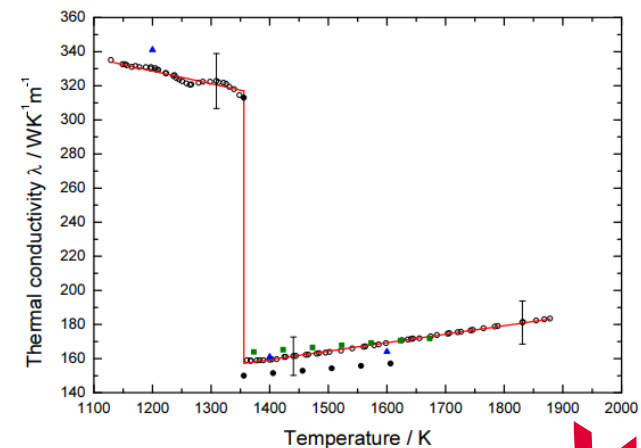
Jaký vliv má zvýšená teplota předehřevu na zpracovatelnost mědi metodou SLM?

Pracovní hypotéza

- ↑ absorbita měděného prášku
- ↓ nutná energie dodaná laserem pro roztavení prášku.
- ↓ tepelná vodivost mědi a delší solidifikační čas
- Lepší smáčivost povrchu



Pokles odrazivosti materiálů se zvyšující se teplotou předehřevu. (Ujihara K., 1972)



Změna tepelné vodivosti mědi s rostoucí teplotou (Cagran C., 2000)

Materiál a metody

Vstupy

Sledované veličiny

Výstup

SLM 280 HL doplněné o modul pro výhřev stavěcí platformy

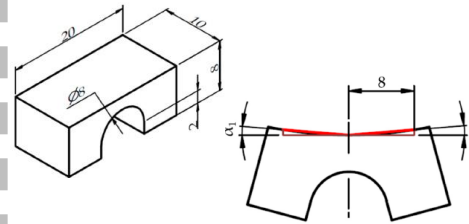
3D skener, optický 3D profilometr, LOM

Statistika, metody pro plánování experimentů

Vliv předehřevu a dalších procesních parametrů na zbytková napětí

Ti6Al4V
Procesní parametry: Výkon a rychlost laseru, vzdálenost drah
Procesní podmínky: teplota předehřevu

Deformace

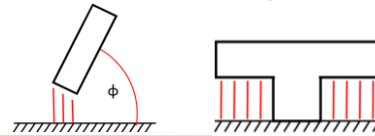


Optimální kombinace procesních parametrů pro redukci zbytkových napětí

Redukce podpůrných struktur

Výsledky optimálního nastavení procesních parametrů
Úhel sklonu
Délka převisu
Objem podpůrných struktur

Množství podpůrného materiálu, deformace, textura povrchu

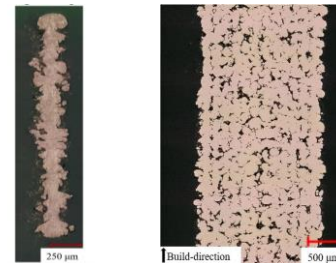


Vliv zvýšené teploty předehřevu na nakloněné a převislé povrchy s možnou redukcí podpůrných struktur

Zpracování mědi metodou SLM za zvýšených teplot předehřevu

Měď 99,95%
Procesní parametry: Výkon a rychlost laseru, vzdálenost drah,
Procesní podmínky: teplota předehřevu, výška vrstvy
Geometrie vzorku

Šířka návarů, relativní hustota



Vliv teploty předehřevu a dalších procesních parametrů na zvýšení relativní hustoty

Současný stav řešení disertační práce

Vliv předehřevu a dalších procesních parametrů na zbytková napětí

V.o. 1: Lze vhodnou kombinací procesních parametrů eliminovat zbytková napětí při stavbě Ti6Al4V slitiny i s nižší teplotou předehřevu než 570 °C?

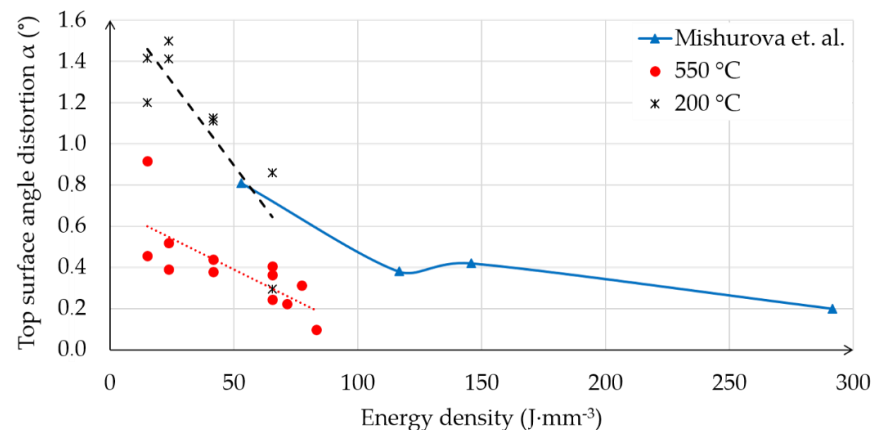
Řešeno v rámci zahraniční stáže na Graz University of technology

Publikace: *Effect of Process Parameters and High-Temperature Preheating on Residual Stress and Relative Density of Ti6Al4V Processed by Selective Laser Melting*, Materials IF 3,057

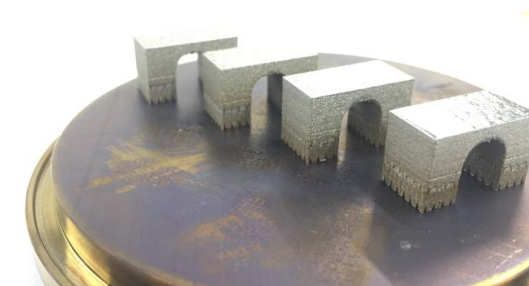
Hlavní závěry:

- předehřev (200 - 550 °C)
- ↓ deformace 46,3 % (lineární efekt)
- ↑ relativní hustota 2,9 % (lineární efekt)
- degradace prášku (O_2 , H)

Vliv hustoty energie a předehřevu na deformace



Degradace titanového prášku při předehřevu 550 °C



Vzorky pro měření zbytkových napětí

Současný stav řešení disertační práce

Redukce podpůrných struktur

V.o. 2: Jaký vliv má vysoká teplota předehřevu pracovní oblasti na kritický úhel a drsnost převislého povrchu?

Jaké množství podpůrných struktur lze eliminovat zvýšenou teplotou předehřevu při výrobě technologií SLM?

Ti6Al4V

- Degradace prášku zvýšenou teplotou předehřevu – změna materiálu

Inconel 939 – žáruvzdorná niklová slitina

- Projekt TAČR Zéta - Aditivní výroba komponent turbínového motoru z žárupevné slitiny Inconel 939
- Nutno znovu stanovit vliv předehřevu a dalších procesních parametrů na zbytková napětí



Současný stav řešení disertační práce

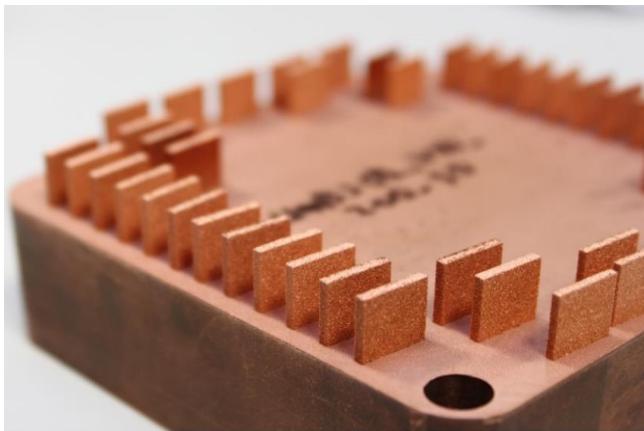
Zpracování mědi metodou SLM za zvýšených teplot předehřevu

V.o. 3: Jaký vliv má zvýšená teplota předehřevu na zpracovatelnost mědi metodou SLM?

Publikace: Effect of High-Temperature Preheating on Pure Copper Thick-Walled Samples Processed by Laser Powder Bed Fusion, v recenzním řízení

Hlavní závěry:

- Relativní hustota může být výrazně zvýšena
- Oxidické vrstvy



Závěr

Vliv předehřevu a dalších procesních parametrů na zbytková napětí

- V.o. 1: Lze vhodnou kombinací procesních parametrů eliminovat zbytková napětí při stavbě Ti6Al4V slitiny i s nižší teplotou předehřevu než 570 °C?
- **Hypotéza nepotvrzena:** zbytkové napětí klesly, ale ve sledovaném rozsahu procesních parametrů nebyly zcela eliminovány. Znehodnocení nepoužitého prášku.

Redukce podpůrných struktur

- Změna materiálu: Inconel 939, projekt zéta

Zpracování mědi metodou SLM za zvýšených teplot předehřevu

- V.o. 3: Jaký vliv má zvýšená teplota předehřevu na zpracovatelnost mědi metodou SLM?
- **Hypotéza potvrzena:** Relativní hustota může být výrazně zvýšena.

Závěr

Vydané studie

- MALÝ, Martin, Christian HÖLLER, Mateusz SKALON, Benjamin MEIER, Daniel KOUTNÝ, Rudolf PICHLER, Christof SOMMITSCH a David PALOUŠEK. Effect of Process Parameters and High-Temperature Preheating on Residual Stress and Relative Density of Ti6Al4V Processed by Selective Laser Melting. Materials; **Materials – IF 3,057**

Připravované studie

- Effect of High-Temperature Preheating on Pure Copper Thick-Walled Samples Processed by Laser Powder Bed Fusion – v recenzním řízení

Participace na projektech

- 2020 – dosud, TAČR Zéta TJ04000314, Aditivní výroba komponent turbínového motoru z žárupevné slitiny Inconel 939, **hlavní řešitel**
- 2020 – dosud, FSI-S-20-6296, Specifický výzkum – Výzkum mechanických a fyzikálních vlastností strukturovaného materiálu připravovaného pomocí aditivní výroby, člen řešitelského týmu
- 2017 – dosud, ESA Contract no. 4000123317/18/NL/GLC/hh, Additive Design for Aerospace Applications Capabilities (ADAAC), člen řešitelského týmu
- 2020, FV 20-21, Inovace výuky předmětu Aditivní technologie [ZAT] o úlohu na aplikaci pravidel pro návrh komponent pro 3D tisk, **hlavní řešitel**
- 2017-2020, MPO FV20232 - Biodegradovatelné strukturované implantáty vyrobené metodou 3D tisku kovů, člen řešitelského týmu
- 2019, FV 19-19, Inovace výuky předmětu Aditivní technologie (ZAT) o statistické metody pro plánování experimentu, **hlavní řešitel**

DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

Martin Malý, Ing.

Martin.Maly2@vut.cz



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

www.ustavkonstruovani.cz