

Multi-materiálová 3D tlač priestorovo tvarovaných rozhraní

Adam Fábry, Ing.

Vedúci: **doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**

Vedúci špecialista: **Ing. Martin Malý, Ph.D.**

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně
Brno, 21.10.2026



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ



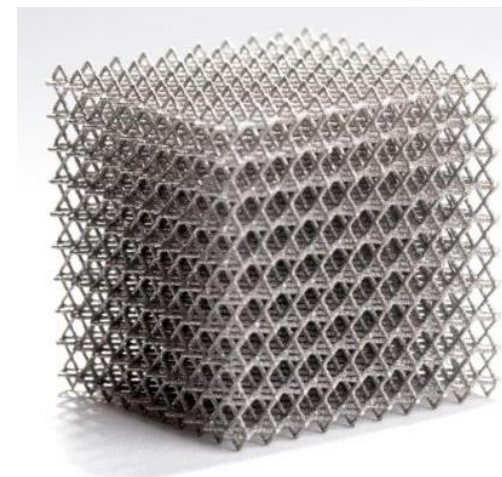
Obsah prezentácie

- Motivácia pre riešenie problému
- Zhrnutie súčasného stavu poznania
- Vymedzenie cieľov dizertačnej práce
- Vedecké otázky a hypotézy
- Materiál a metódy
- Súčasný stav riešenia
- Záver

Motivácia

Aditívna výroba

- Tvarovo zložité súčiastky
- Ultraľahké prútové konštrukcie
- Vnútorne dutiny a TPMS štruktúry
- Topologicky optimalizované a organické tvary



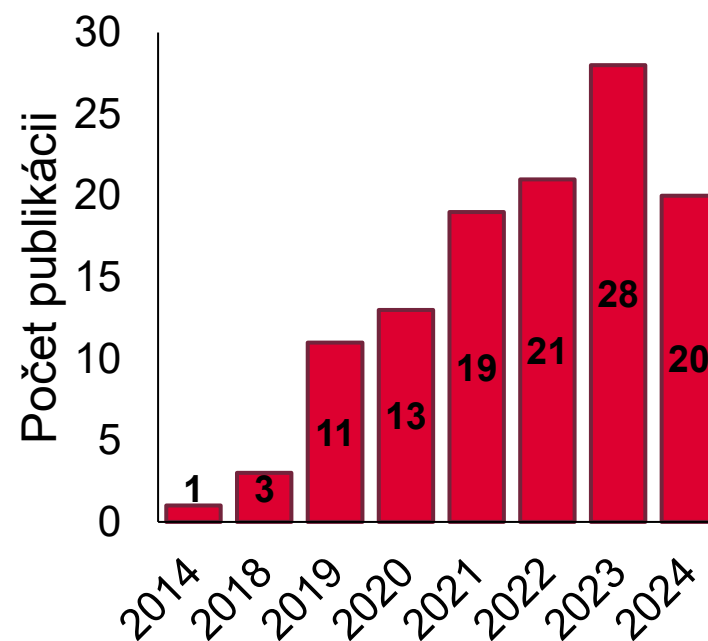
Motivácia

Aditívna výroba

- Tvarovo zložité súčiastky
- Ultraľahké prútové konštrukcie
- Vnútorne dutiny a TPMS štruktúry
- Topologicky optimalizované a organické tvary

Multi-materiálová aditívna výroba (MMAM)

- Využitie rozdielnych fyzikálnych a termálnych vlastností oboch materiálov
- Hot topic so širokým spektrom aplikácií (elektromobilita, tepelné výmenníky, zvyšovanie efektivity a znižovanie spotreby materiálov)



ZainElabdeen, 2024



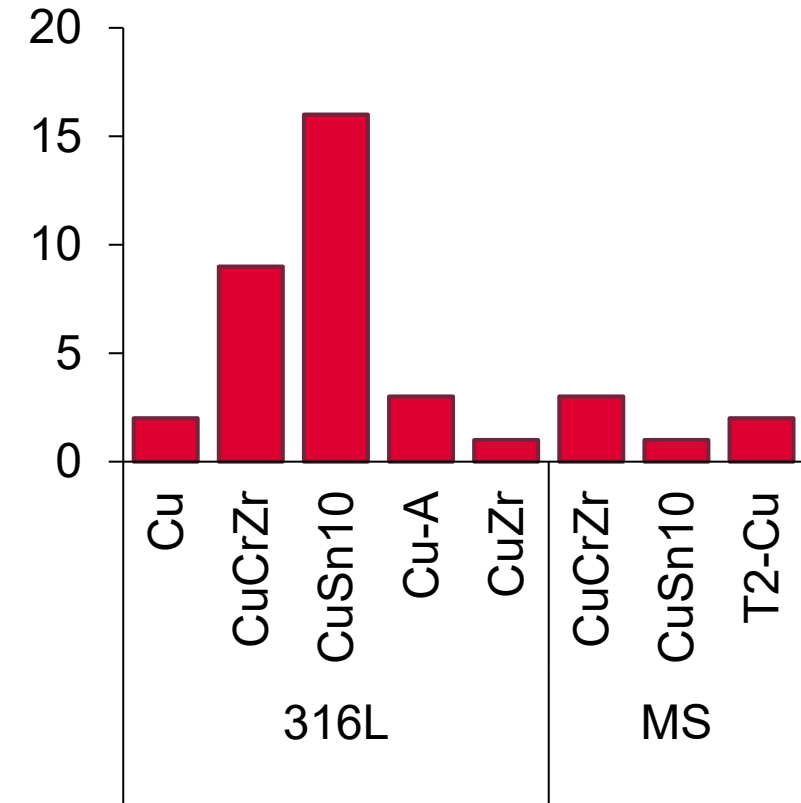
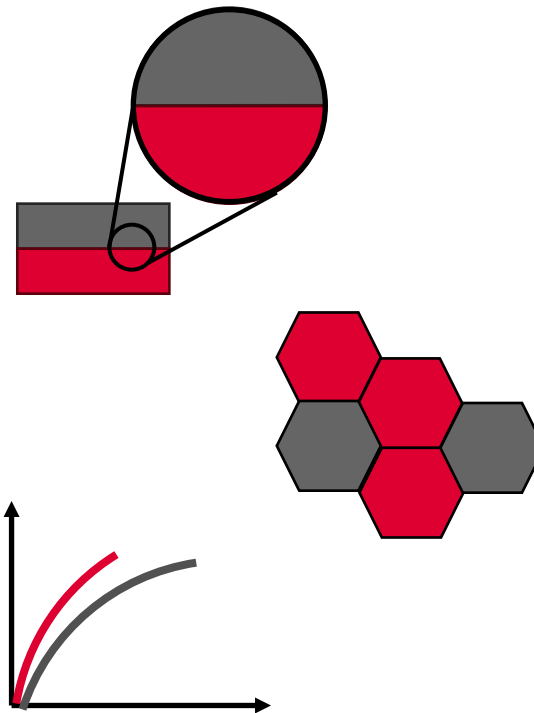
Zhrnutie súčasného stavu poznania

Materiálová kombinácia med' + oceľ

- Cu zliatiny CuSn10, CuCrZr
- Nerezové ocele 316L
- Maraging ocele (MS)

Oblasti záujmu

- Rozhranie materiálov
- Mikroštruktúra
- Mechanické vlastnosti rozhrania



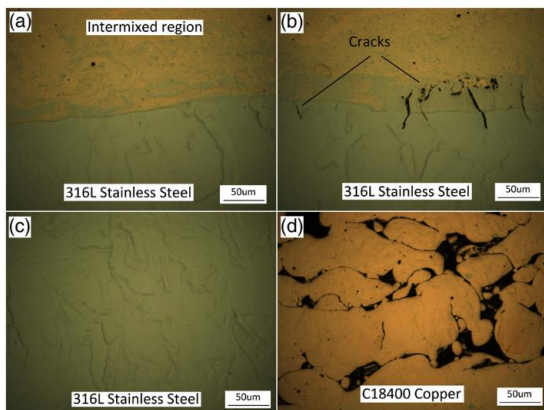
ZainElabdeen, 2024

Zhrnutie súčasného stavu poznania – vznik rozhrania

2014

Liu Z. H., 2014

- Prvá publikácia na PBF-LB spojenie SS 316L a Cu zliatiny
- Praskliny v Fe časti, Cu LOF porozita

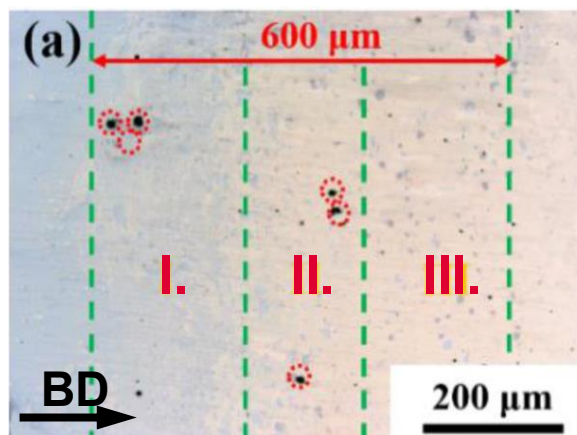


Liu Z.H., 2014

2020

Keyu C., 2020

- 316L/CuSn10
- Tri materiálové zóny v BD
- Cieľená minimalizácia defektov a úprava šírky rozhrania úpravou PP

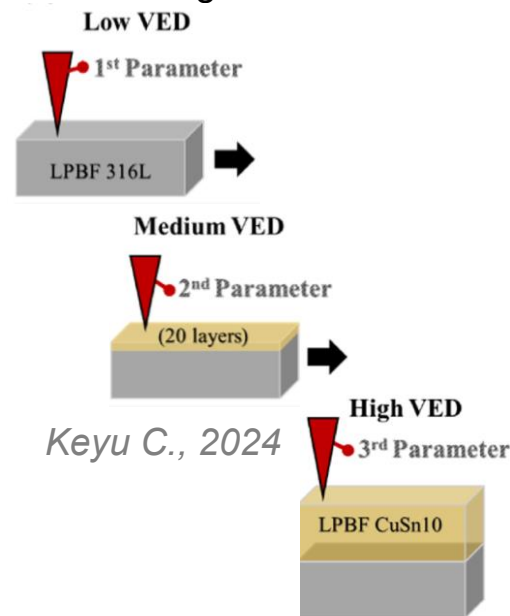


Keyu C., 2020

2024

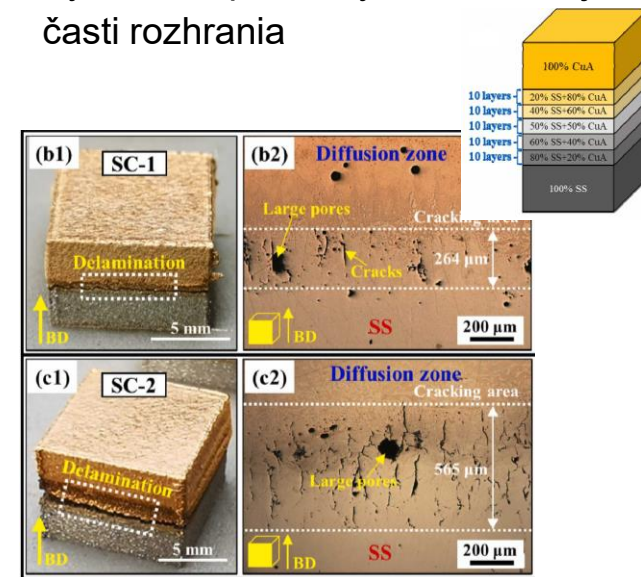
Keyu C., 2024

- 316L/CuSn10
- Úprava PP prvých 20 vrstiev po zmene materiálu
- Vplyv PP na defekty a morfológiu rozhrania



Liu L., 2024

- Gradientný prechod 316L/CuSn10
- Zmena koncentrácie o 20/50% každých 10 vrstiev
- Významné praskliny v Fe bohatej časti rozhrania



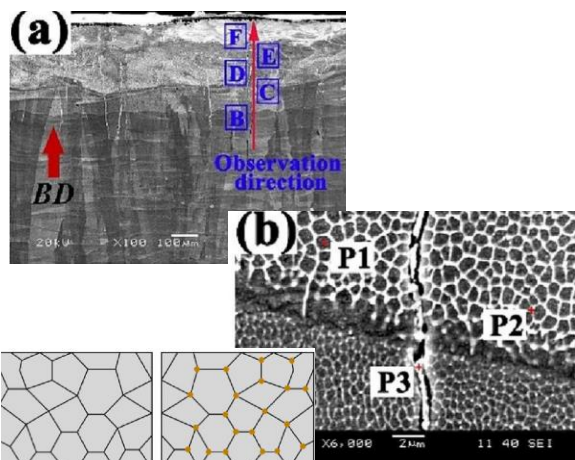
Liu L., 2024

Zhrnutie súčasného stavu poznania – mikroštruktúra

2024

Chen J., 2024

- Rast stĺpcových zŕn v single-materiálových častiach
- Výrazná zmena morfológie na rozhraní materiálu
- Dendritické Fe zrná vyplnené Cu fázou

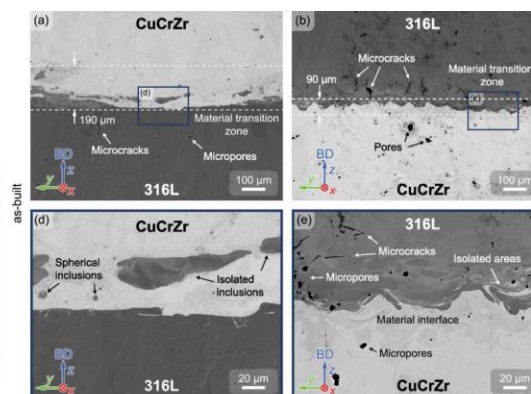


Chen J., 2024

2025

Meyer I., 2025

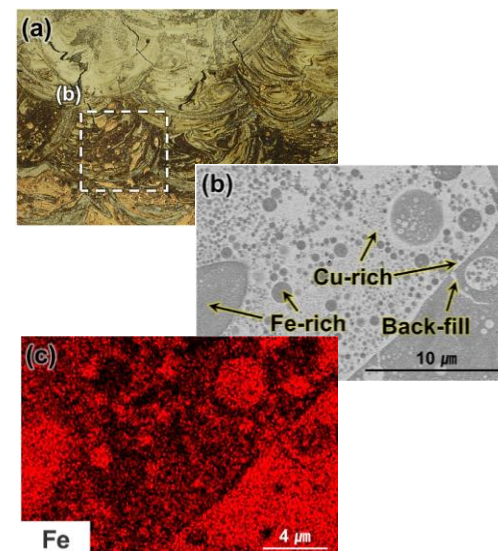
- Vplyv poradia materiálov na morfológiu, šírku a defekty rozhrania
- Praskliny v Fe bohatej oblasti
- Pre SC kombináciu vyplnené Cu bohatou fázou



Meyer I., 2025

Yang S. W., 2025

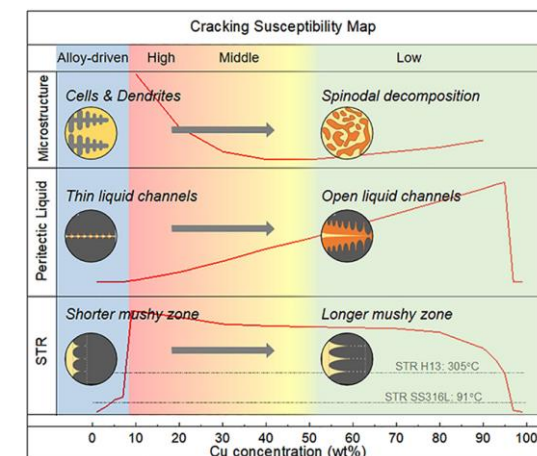
- Podrobná analýza MM rozhrania
- Separácia kvapalných fáz (LPS)
- Praskliny v Fe časti



Yang S. W., 2025

Zhao Z., 2025

- Preskúmanie viacero ocelí s medenou zliatinou
- Zovšeobecnenie vznikajúcej morfológie a mikroštruktúry na základe Fe-Cu binárneho diagramu
- Identifikácia oblastí vzniku trhlín v MM rozhraní



Zhao Z., 2025

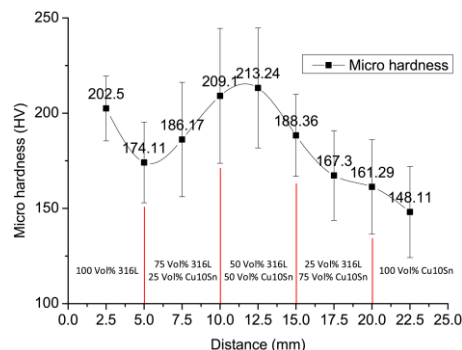
Multi-materiálová 3D tlač priestorovo tvarovaných rozhraní

Zhrnutie súčasného stavu poznania – mechanické vlastnosti

2019

Wei C., 2019

- Zmena tvrdosti pri prechode rozhraním
- Maximálna tvrdosť sa môže objaviť na rozhraní
- Prílišné podchladenie spôsobuje rast jemnozrnnej mikroštruktúry

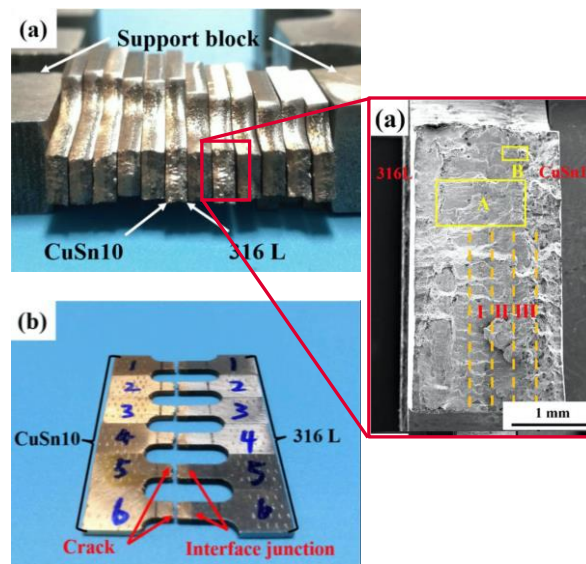


Wei, 2019

2020

Keyu C., 2020

- MM rozhranie v smere a kolmo na smer zaťažovania
- Tvárny lom v Cu časti
- Krehký lom na rozhraní

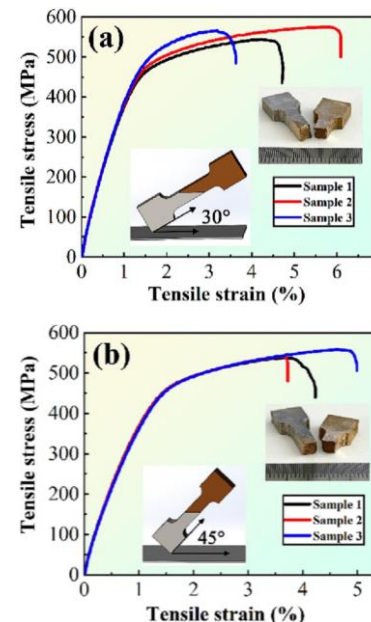


Keyu C., 2024

2024

Chen J., 2024

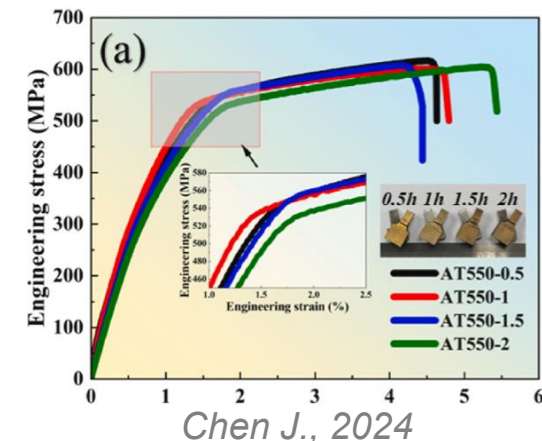
- Výroba naklonených vzoriek
- Vplyv naklonenia na mechaniku a lomovú plochu



Chen J., 2024

Chen J., 2024

- Úprava PP prvých 20 vrstiev po zmene materiálu
- Testovanie 16 spôsobov HT
- Výrazné zvýšenie mechanických vlastností vďaka HT



Vhodné HT má priaznivý vplyv na mech. vl.

Vymedzenie cieľov dizertačnej práce

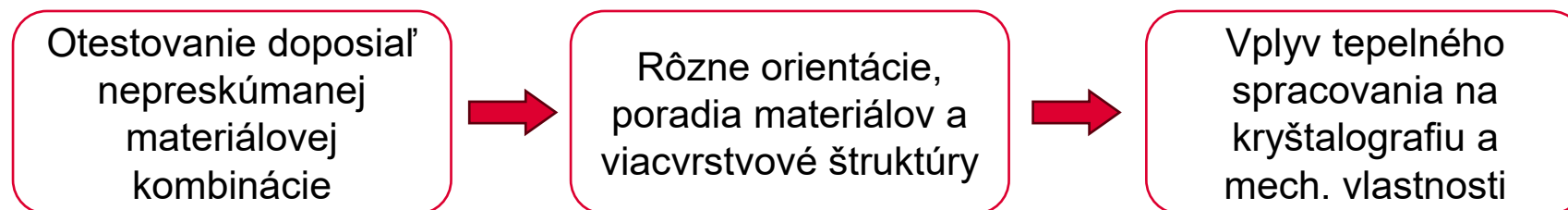
Hlavný cieľ dizertačnej práce

- Hlavným cieľom je objasniť vzťahy medzi poradím materiálov, tepelnou históriou spracovania, morfológiou rozhrania, výskytom defektov a mechanickým správaním multi-materiálového systému CuCr1Zr-Mar60 vyrobeného technológiou LPBF.

Prínos dizertačnej práce

- Rozšírenie možností využitia MM AM pri návrhu spoľahlivých multi-materiálových komponentov pre tepelne a mechanicky namáhané aplikácie.

Aplikačný potenciál



Vedecké otázky a pracovné hypotézy

Poradie spájaných materiálov

Vedecká otázka č. 1

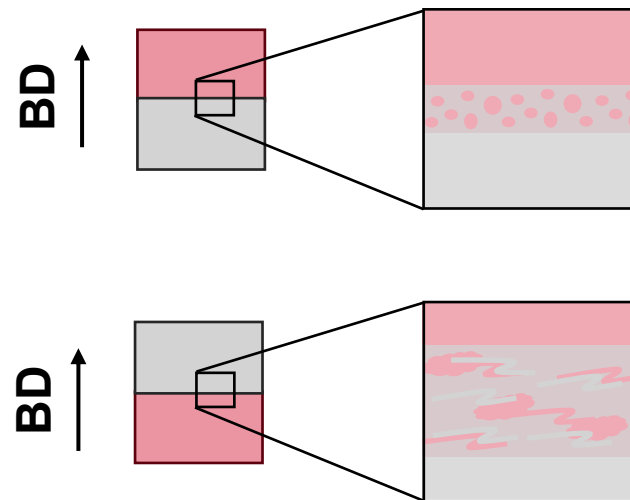
- Ako ovplyvňuje poradie materiálov v smere výstavby morfológiu rozhrania, šírku prechodovej oblasti a výskyt defektov pri tvorbe horizontálneho multi-materiálového rozhrania technológiou PBF-LB?

Pracovná hypotéza č. 1A

- Konfigurácia Mar60-CuCr1Zr vytvorí užšiu prechodovú oblasť, ktorej morfológia je tvorená separáciou tekutých fáz (LPS) a bude dosahovať nižšiu hustotu trhlín v porovnaní s konfiguráciou CuCr1Zr-Mar60.

Pracovná hypotéza č. 1B

- Konfigurácia CuCr1Zr-Mar60 povedie k širšej prechodovej oblasti tvorenej dynamickým zmiešavaním tekutých fáz s vyššou koncentráciou trhlín lokalizovaných vo Fe-bohatej časti rozhrania v porovnaní s konfiguráciou Mar60-CuCr1Zr



Vedecké otázky a pracovné hypotézy

Uhol sklonu rozhrania a vznikajúca mikroštruktúra

Vedecká otázka č. 2

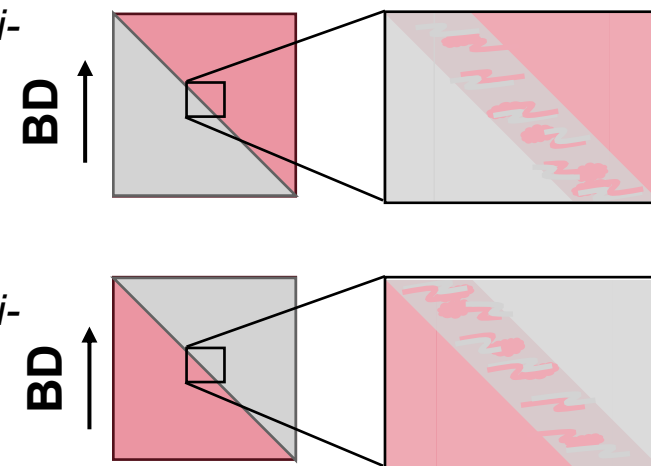
- *Aká kryštalografická štruktúra vzniká v šikmých a vertikálnych multi-materiálových rozhraniach Mar60 – CuCr1Zr, a aký na ňu má vplyv poradie spájaných materiálov a orientácia rozhrania?*

Pracovná hypotéza č. 2A

- *Pri postupnej zmene typu rozhrania z horizontálneho na vertikálne bude morfológia multi-materiálového rozhrania tvorená preferenčne dynamickým premiešaním kvapalných fáz pre všetky skúmané uhly naklonenia rozhrania, a to 30, 45, 60 a 90 stupňov.*

Pracovná hypotéza č. 2B

- *Pri postupnej zmene typu rozhrania z horizontálneho na vertikálne bude morfológia multi-materiálového rozhrania tvorená preferenčne dynamickým premiešaním kvapalných fáz pre obe kombinácie poradia materiálov v smere výroby.*

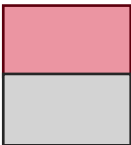
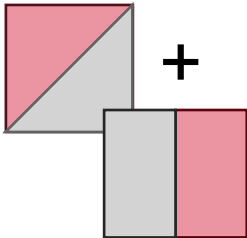


Vedecké otázky a pracovné hypotézy

Vplyv tepelného spracovania, mechanické vlastnosti a porušenie komponentov

Vedecká otázka č. 3

- Ako ovplyvní tepelné spracovanie mechanické vlastnosti, mechanizmus porušenia a miesto lomu multi-materiálových rozhraní Mar60-CuCr1Zr s rozdielnou morfológiou a orientáciou rozhrania?

	As-built	Heat treated 
	H:3A - Tvárne porušenie v Cu časti - Mech. vl. ako AB CuCr1Zr	H:3B - Krehké porušenie na rozhraní - UTS ako HT CuCr1Zr s polovičnou ťažnosťou
	H:3C - Tvárne porušenie v Cu časti - Mech. vl. ako AB CuCr1Zr	H:3D - Krehké porušenie na rozhraní - UTS ako HT CuCr1Zr s polovičnou ťažnosťou

Materiál a metódy

Materiál

Vstupy

Riešenie

Výstupy

CuCr1Zr – medená zliatina
Mar60 – martenzitická oceľ

SLM 280 HL, Aconity midi+,
Aerosint recoater, kaliaca pec

Optický mikroskop, SEM, EDX,
tvrdomer, Shimadzu

Pozorovanie a vyhodnocovanie,
štatistika

Etapa 1:

Procesné parametre,
poradie spájaných
materiálov

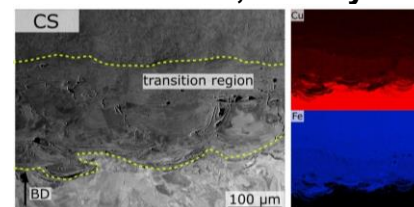
Typ rozhrania: Horizontálne

Sledované parametre:

Vplyv procesných parametrov výroby,
vplyv poradia materiálov na
mikroštruktúru



Mikroštruktúra, defekty



Vhodná kombinácia
procesných parametrov,
informácie o morfológii
horizontálneho rozhrania

Etapa 2:

Uhol sklonu a rôzne
typy rozhrania

Typ rozhrania: Vertikálne, šikmé, viac
rozhraní

Sledované parametre:

Vplyv sklonu rozhrania a poradia
materiálov na mikroštruktúru



Mikroštruktúra, defekty

Neverejné dáta

Morfológia, kryštalografia
a defekty na šikmom a
vertikálnom rozhraní

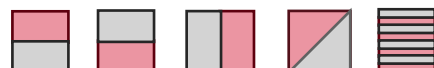
Etapa 3:

Vplyv tepelného
spracovania a
mechanické
vlastnosti

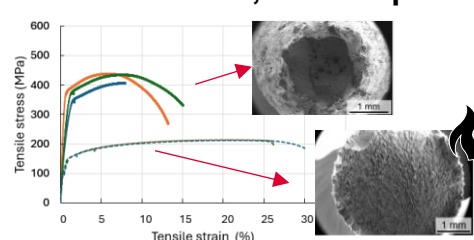
Typ rozhrania: Všetky typy

Sledované parametre:

Vplyv HT na mikroštruktúru, lom a
mechanické vlastnosti



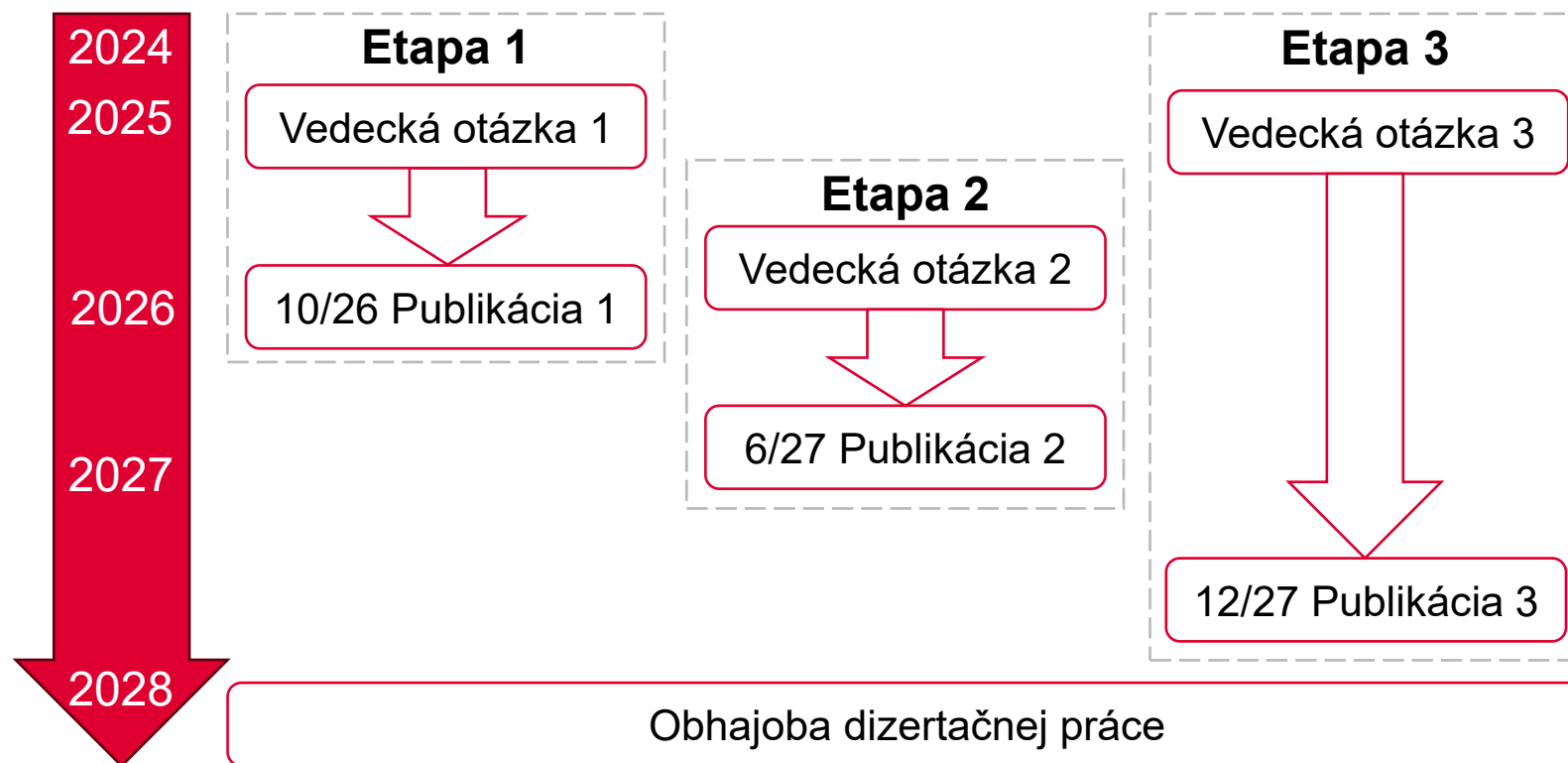
Mech. vlastnosti, lomová plocha



Mechanické vlastnosti v
AB a HT stave pre
všetky typy rozhrania a
materiály

Súčasný stav riešenia dizertačnej práce

- Etapa 1 – Vedecká otázka 1 – Poradie spájaných materiálov
- Etapa 2 – vedecká otázka 2 – Sklon rozhrania a viacero rozhraní
- Etapa 3 – vedecká otázka 3 – Vplyv tepelného spracovania, mechanické vlastnosti



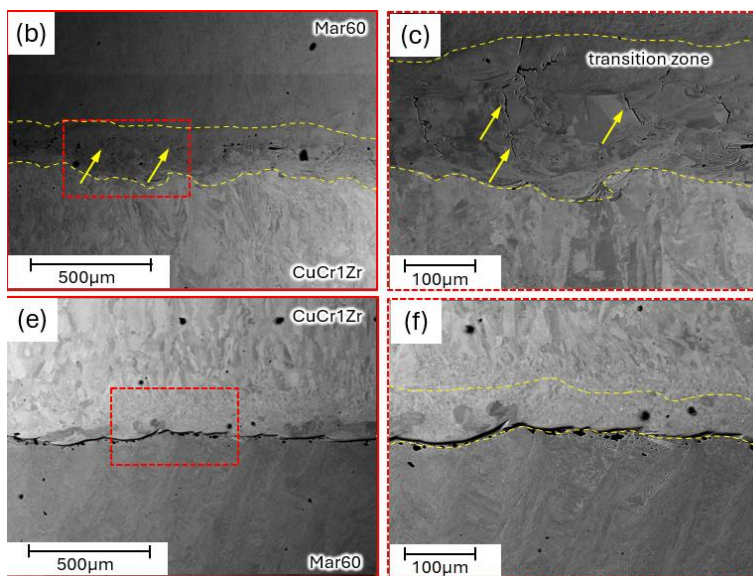
Súčasný stav riešenia dizertačnej práce

Etapa 1 – Poradie spájaných materiálov

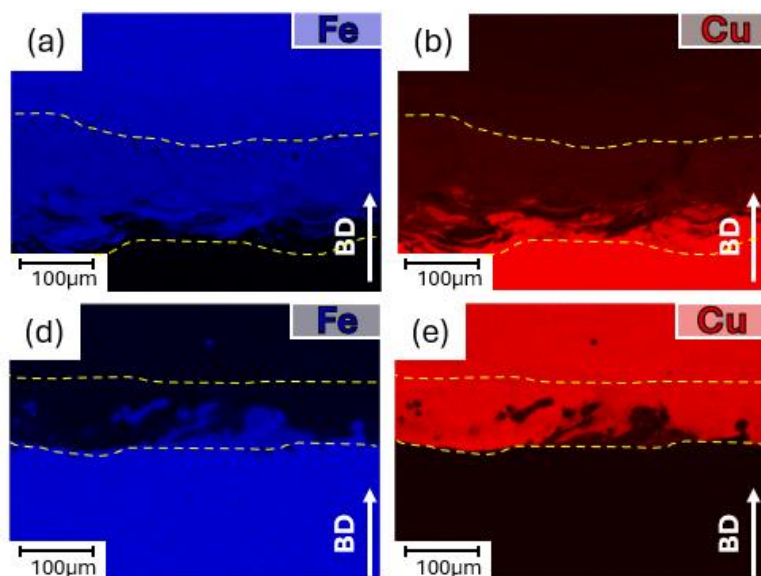
+

Etapa 3 – Mechanické vlastnosti AB + HT

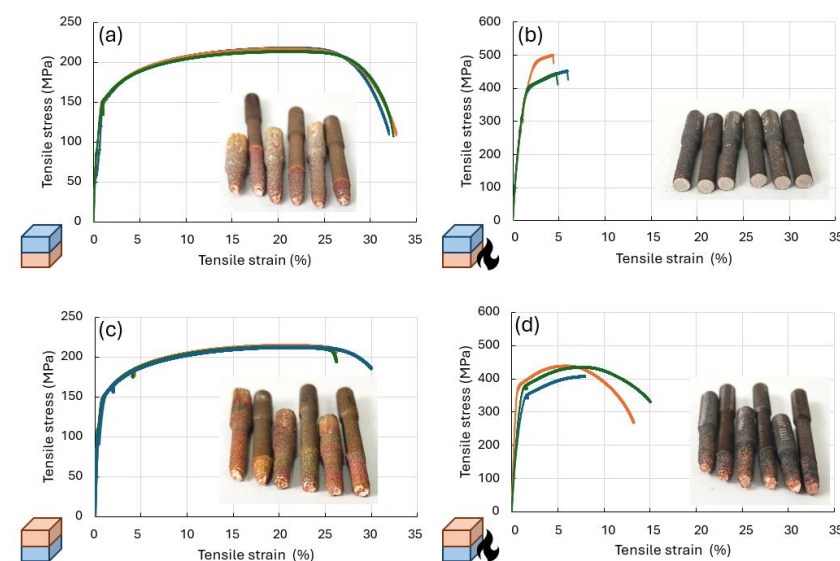
V. o. 1 - Vplyv poradia materiálov na vznikajúcu mikroštruktúru horizontálneho rozhrania



Fábry, 2026



Fábry, 2026



Fábry, 2026

FÁBRY, A., JAMBOR, M., MALÝ, M., ŠMÍD, M., DVOŘÁK, K., KOLMAN, R., KOUTNÝ, D. *Fundamental investigation of CuCr1Zr – Mar60 horizontal interface processed by PBF-LB*; **Journal of Materials Research and Technology – IF 7.3, Q1**

Publikované: 10/26

Súčasný stav riešenia dizertačnej práce

Etapa 2 – Naklonené rozhranie + viacero rozhraní

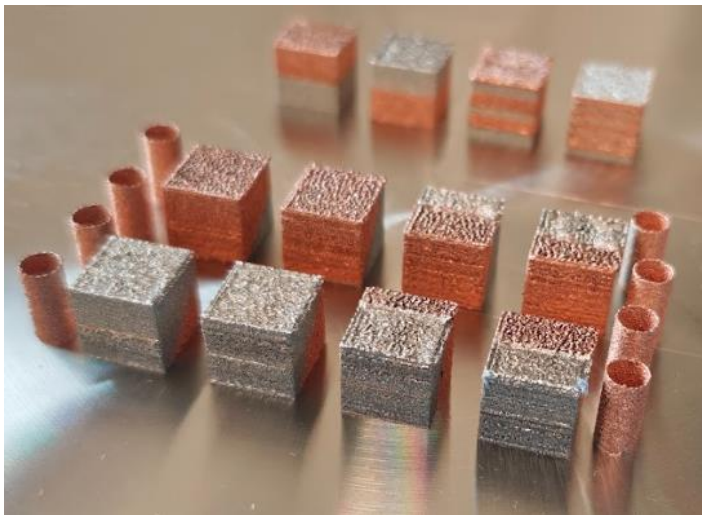
+

Etapa 3 – Mechanické vlastnosti AB + HT

FÁBRY, A., MARTENDAL, C., JAMBOR, M., ŠMÍD, M., TUCKER, M., KOUTNÝ, D. *Microstructural and mechanical assessment of CuCr1Zr – Mar60 inclined interface produced by PBF-LB*

Stav riešenia: - Komplexné multi-materiálové vzorky vyrobené

- Vyhodnotenie mikroštruktúry a mech. vlastností v procese



Neverejné dáta

Súčasný stav riešenia dizertačnej práce

Etapu 2 – Horizontálne + naklonené + viacero rozhraní

+

Etapu 3 – Mechanické vlastnosti AB + HT

Neverejné dáta

Záver

Dosiahnuté výsledky

- FÁBRY, A., JAMBOR, M., MALÝ, M., ŠMÍD, M., DVOŘÁK, K., KOLMAN, R., KOUTNÝ, D. *Fundamental investigation of CuCr1Zr – Mar60 horizontal interface processed by PBF-LB*; **Journal of Materials Research and Technology – IF 7.3, Q1**
- FÁBRY, A.; SVĚTLÍK, M.; ŠMÍD, M.; JAMBOR, M.; BÁRTA, J.; KOUTNÝ, D. *Mechanical and Microstructural Assessment of 316L/17-4PH Multi-material Interfaces Manufactured by LPBF*. WAMS-26 — **3rd Joint ESA/NASA Advanced Manufacturing Conference**, June 8-11, ESA/ESTEC in Noordwijk, Netherlands: 2026. p. 1 (1 s.).

Pripravované štúdie

- FÁBRY, A., SVĚTLÍK, M.; ŠMÍD, M., JAMBOR, M., DOBLER, C., VÍTEK, O., KOUTNÝ, D., BÁRTA, J. *Coupling 17-4PH/316L Martensitic and Austenitic Stainless Steels by Multi-Material PBF-LB* (finálne ladenie manuskriptu)
- FÁBRY, A., MARTENDAL, C., JAMBOR, M., ŠMÍD, M., TUCKER, M., KOUTNÝ, D. *Microstructural and mechanical assessment of CuCr1Zr – Mar60 inclined interface produced by PBF-LB* (publikovanie výsledkov zo stáže na ETH)

Neverejné dáta

Participácia na projektoch

- GAČR – Structurally controlled wave propagation in multi-material 3D-printed bodies
- TAČR – Pokročilé technológie pro kompresory subsystémů palivových článků
- Špecifický výskum – Rotor vysoko-otáčkového synchronního reluktančního stroje vyrobeného multi-materiálovou aditivní výrobou

ĎAKUJEM ZA POZORNOST

Adam Fábry, Ing.

Adam.Fabry@vut.cz



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

www.ustavkonstruovani.cz