

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2024

Ing. Vladimír Bechný



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Vladimír Bechný

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Výskum v oblasti aditívnych technológií pre kovovú väzbu na
báze ocelí**

Na získanie akademického titulu **d o k t o r**
(„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Automatizácia a výrobné systémy

Žilina 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre obrábania a výrobnjej techniky.

Predkladateľ:

Ing. Vladimír Bechný

Žilinská univerzita v Žiline

Strojnícka fakulta

Katedra obrábania a výrobnjej techniky

Školiteľ:

prof. Ing. Andrej Czán, PhD.

Žilinská univerzita v Žiline

Strojnícka fakulta

Katedra obrábania a výrobnjej techniky

Oponenti:

1. prof. Dr. František Holešovský – České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Technická 1902/4, 160 00 Praha 6, Česká republika

2. prof. Ing. Jozef Svetlík, PhD. – Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Letná 9, 040 01 Košice

3. doc. Ing. Štefan Václav, PhD. - STU v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave, Ulica Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 15.7.2024

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 28.08.2024 o 9.00 hod. v miestnosti BA205 na SJF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Automatizované výrobné systémy, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SJF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Ing. Róbert Čep, PhD.
VŠB- Technická univerzita Ostrava
17.listopadu 2172/15
708 00 Ostrava
Česká republika
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

Práce publikované v zahraničních časopisech a zbornících

Matuš, M., **Bechný, V.**, Joch, R., Drbúl, M., Holubják, J., Czán, A., Šajgalík, M. (2023). Geometric Accuracy of Components Manufactured by SLS Technology Regarding the Orientation of the Model during 3D Printing. *Manufacturing Technology*, 23(2), 233-240.

Joch, R., Šajgalík, M., Drbúl, M., Holubják, J., Czán, A., **Bechný, V.**, Matúš, M. (2023). The application of additive composites technologies for clamping and manipulation devices in the production process. *Materials*, 16(10), 3624.

Kozový, P., Matuš, M., **Bechný, V.**, Holubják, J., Joch, R., Šajgalík, M. (2024). Analysis of Tool Load Concerning the Cross-Sectional Size of Removed Material. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(3), 92.

Bechný, V., Matuš, M., Joch, R., Drbúl, M., Holubják, J., Czán, A., Markovič, J. (2023). Design of an Injection Mould Utilizing Experimental Measurements and Reverse Engineering. *Manufacturing Technology*, 23(5), 597-603.

Bechný, V., Czán, A., Holubják, J., Czánová, T., Cedzo, M., Timko, P. (2023, November). Analysis and comparison of production parameters of additive technologies in the construction of objects based on metals using the ADAM and SLM methods. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2976, No. 1). AIP Publishing.

Bechný, V., Matuš, M., Joch, R., Drbúl, M., Czán, A., Šajgalík, M., Nový, F. (2024). Influence of the Orientation of Parts Produced by Additive Manufacturing on Mechanical Properties. *Manufacturing Technology*, 24(1), 2-8.

Bechný, V., Czán, A., Holubják, J., Matúš, M., Kozový, P., Timko, P., Beránek, L. (2023). Roughness surface analysis of samples produced by the additive manufacturing process. *Transportation Research Procedia*, 74, 702-708.

Matuš, M., Šajgalík, M., Holubják, J., Joch, R., Slabejová, S., Czán, A., **Bechný, V.** (2023). Modelling and simulation of a compact sample of composite materials. *Transportation Research Procedia*, 74, 724-731.

Cedzo, M., Czán, A., Holubják, J., Joch, R., Drbúl, M., **Bechný, V.** (2023, November). Verification of the use of a monolithic rotary tool for turning with actively driven rotation in machining of hardened steel. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2976, No. 1). AIP Publishing.

Joch, R., Šajgalík, M., Drbúl, M., Holubják, J., Czán, A., **Bechný, V.**, Matúš, M. (2023). The application of additive composites technologies for clamping and manipulation devices in the production process. *Materials*, 16(10), 3624.

Timko, P., Holubjak, J., **Bechný, V.**, Novák, M., Czán, A., Czánová, T. (2023). Surface Analysis and Digitization of Components Manufactured by SLM and ADAM Additive Technologies. *Manufacturing Technology*, 23(1), 127-134.

Identification of residual austenite and its impact on dimensional characteristics of steel for bearing components [print] / Richard Joch ... [et al.].

In: Smart manufacturing engineering [print] : international scientific journal. - ISSN 1336-5967. - Roč. 2, č. 2 (2021), s. 77-83 [print].

[Joch Richard (10%) - Czánová Tatiana (25%) - Holubják Jozef (25%) - Cedzo Miroslav (10%) - **Bechný Vladimír** (10%) - Prokein Denis (10%) - Balšianka Róbert (10%)]
[anonymné recenzné konanie]

Identification of process prime a turning when machining steel C56E2 and identification of cutting forces [print] / Andrej Horak ... [et al.].

In: Smart manufacturing engineering [print] : international scientific journal. - ISSN 1336-5967. - Roč. 2, č. 2 (2021), s. 50-58 [print].

[Horák Andrej (5%) - Cedzo Miroslav (20%) - Slabejová Silvia (20%) - Prokein Denis (15%) - Czánová Tatiana (20%) - Drbúl Mário (10%) - **Bechný Vladimír** (10%)]
[anonymné recenzné konanie]

Analyze of machine tool vibrations on dimensional and shape specification balls of bearing [print] / Jozef Holubjak ... [et al.].

In: Smart manufacturing engineering [print] : international scientific journal. - ISSN 1336-5967. - Roč. 2, č. 1 (2021), s. 18-25 [print].

[Holubják Jozef (30%) - Gavlas Martin (10%) - Drbúl Mário (10%) - Šajgalík Michal (10%) - Timko Pavol (15%) - Cedzo Miroslav (15%) - **Bechný Vladimír** (10%)]

[anonymné recenzné konanie]

V procese schvaľovania

Matuš, M., **Bechný, V.**, Šajgalík, M., Markovič, J., Drbúl, M., Cedzo, M., Joch, R., Krišák, D. (2024). Implementation of Advanced Techniques for Quality Assesment of Metal Parts Produced by SLM Technology

Bechný, V., Matuš, M., Joch, R., Drbúl, M., Czán, A., Cedzo, M., Krišák, D. (2024). The influence of Orientation of SLM Additive Manufacturing Process on Surface Integrity

Obsah

	Úvod	9
1	Súčasný stav problematiky	11
2	Tézy dizertačnej práce	13
3	Experimentálna časť	15
3.1	Konštrukčný návrh vyrábaného komponentu	15
3.2	Simulácia aditívnej výroby	16
3.3	Použité aditívne technológie	19
3.4	Vizuálna kontrola vyrobených dielov	22
3.5	Verifikácia geometrických a rozmerových špecifikácií dotykovou metódou	24
3.6	Skenovanie profilu a drsnosti vyrobených dielov	34
3.7	Identifikácia zvyškových napätí po aditívnej výrobe	41
3.8	Analýza nákladov	47
4	Prínosy práce	31
4.1	Prínosy pre vedu a teóriu	49
4.2	Prínosy pre prax	49
	Záver	50

Úvod

Aditívna výroba predstavuje technologický inovatívny spôsob pre rôzne priemyselné odvetvia. Tieto technológie umožňujú tvorbu tvarovo komplexných súčiastok bez nutnosti vytvárania modelového zariadenia a použitia rôznych nástrojov. To výrazne skracuje čas potrebný na technologickú prípravu výroby ako aj na výrobu samotnej súčiastky.

V súčasnosti existuje viacero výrobných metód aditívnej výroby pre kovy, pričom každá z týchto metód je špecifická pre určitý typ komponentov a má svoje výhody a nevýhody. Dizertačná práca sa zaoberá analýzou a vyhodnotením najrozšírenejších metód aditívnej výroby, ktoré boli vybrané z dôvodu ich dostupnosti, variabilite a vysokého potenciálu ich použitia v priemyselnej výrobe.

Výhodou technológie SLM je rýchlosť výroby, rovnako aj cenová dostupnosť, nevýhodou je rôznorodosť mechanických vlastností z dôvodu nerovnomerného natavovania kovového prášku laserovým lúčom. Ďalšou nevýhodou je nutnosť zakomponovania podperných štruktúr do súčiastky potrebných pre podporu previsov, pričom odstránenie je komplikované a časovo náročné. Táto metóda je vhodná pre tenkostenné súčiastky.

Technológia ADAM disponuje schopnosťou výroby nielen plných vnútorných štruktúr, ale aj lattice štruktúr, ktoré sú odľahčené, čo zabezpečuje zníženie hmotnosti komponentu a spotrebu nižšieho množstva materiálu. Zároveň pomáhajú rovnomerne rozložiť mechanické napätia v rámci celej konštrukcie, čo zvyšuje odolnosť voči deformáciám a mechanickému poškodeniu. Nevýhodou tejto technológie je nutnosť spekania dielu po samotnej aditívnej výrobe, ktorá výrazným spôsobom predlžuje celý výrobný proces a zároveň zvyšuje riziko deformácie pri spekaní. Obmedzením je rovnako

aj veľkosť pracovného priestoru aditívneho zariadenia, kde je potrebné zohľadniť rozmery s ohľadom na veľkosť a množstvo vyrobených dielov.

Technológia BJ je špecifická a efektívna najmä pre veľkosériovú výrobu dielov aditívnym procesom, príp. pri výrobe veľkých alebo komplexných dielov, z dôvodu veľkého pracovného objemu a vyššej efektivity výroby. Výhodou tejto technológie je výroba dielov bez potreby nutnosti podpier, čím sa výrazne zníži spotreba materiálu a časová úspora potrebná na odstránenie podpier. Nevýhodou technológie je, že po aditívnej výrobe je potrebné vytvrdenie súčiastok tepelným spracovaním.

Experimentálna časť dizertačnej práce je zameraná na prvotné experimentálne merania, ktoré zahŕňajú optimalizáciu výrobných technológií a parametrov, počiatočného návrhu komponentu, hodnotenia mechanických a fyzikálnych vlastností a analýzy integrity povrchu vyrobených súčiastok. Zmiený postup a vykonané analýzy sú vhodným nástrojom pre verifikáciu a validáciu vyrobených dielov a budú slúžiť pre výber vhodnej aditívnej technológie pre konkrétnu aplikáciu.

1 Súčasný stav problematiky

Aditívna výroba predstavuje inovatívny prístup pri výrobe plastových, kovových, kompozitných dielov v rôznych priemyselných odvetviach. Tento inovatívny spôsob výroby funguje na základe vrstvenia materiálu vo forme prášku, príp. filamentu (vlákno vo forme struny navinuté na cievke). Proces pozostáva z prvotného návrhu komponentu v softvéri CAD, po ktorom nasleduje export dát do formátu stl. Model je následne presunutý do špeciálneho softvéru určeného na rozdelenie vrstiev materiálu, čím je komponent pripravený na samotnú výrobu. Model môže byť vytvorený pomocou konštrukčného návrhu v systéme CAD alebo skenovaním fyzického objektu a následným vytvorením modelu z údajov skenovania. Správne nastavenie celého procesu zohráva dôležitú úlohu najmä pre zabezpečenie požadovanej kvality výrobku.

Pri výbere výrobnej technológie zohráva dôležitú rolu analýza nákladov. Náklady súvisia najmä s objemom výroby, kedy pri vyšších objemoch je vhodnejšie implementovať CNC obrábanie, prípadne použitie technológie odlievania kovov. Technológia aditívnej výroby sa ukazuje viac výhodná pri malosériovej výrobe, prípadne pri potrebe vyhotoviť diel s náročnejšou geometriou alebo s nevyrobiteľnou geometriou konvenčnými technológiami.

Mesíček a kol. skúmali vplyv umelého starnutia na pevnosť, tvrdosť a zvyškové napätia pri dieloch vyrobených technológiou SLM z recyklovaného prášku zliatiny AlSi10Mg. Zistili, že recyklovaný a nový prášok majú rovnaký tvar, fázu a chemické zloženie, ale recyklovaný prášok spôsobuje zníženie hustoty, zvýšenie priemernej veľkosti precipitátov Si a znižuje vzdialenosti medzi nimi. To vedie k zvýšeniu medze klzu a tvrdosti, ale k zníženiu ťažnosti. Zvyškové napätia klesajú so zvyšujúcim sa intervalom starnutia. (Měsíček, 2022)

Galati a kol. sa vo svojom výskume zamerali na analýzu hustoty, drsnosti a presnosti technológie ADAM. Technológia používa vlákno z kovového prášku v plastovom spojive, ktoré sa po zhotovení dielu odstráni práním a následným spekaním. Výskum analyzoval hustotu antikorošnej ocele 17-4 PH, pričom sa zistilo, že hustota výrazne závisí od hrúbky vrstvy a veľkosti vzorky. Technológia ADAM na rozdiel od iných aditívnych technológií, ktoré využívajú tepelný zdroj na natavovanie kovových práškov nedokáže dosiahnuť rovnakú hustotu. Povrchová drsnosť je tiež závislá od hrúbky vrstvy a je vyššia kvôli použitiu kovového vlákna. Presnosť výroby dosahuje triedu IT13, porovnateľnú s tradičnými metódami. (Galati, 2019)

Czán a kol. analyzovali presnosť technológií aditívnej výroby ADAM, SLM a BJ pomocou optického mikroskopu. Výskum sa zamerail na hodnotenie textúry, drsnosti a presnosti povrchu vyrobených vzoriek. Technológia ADAM dosiahla najlepšie výsledky v textúre a drsnosti povrchu, SLM vyžaduje podpery, ktoré negatívne ovplyvňujú kvalitu povrchu. Technológia BJ dosiahla výrazne lepšie výsledky pri hodnotení primárneho profilu a vlnitosti povrchu, najmä čo sa týka rovnomerného rozloženia. Najlepšia IT presnosť bola dosiahnutá pri technológii ADAM (IT5 až IT11), čo je o 5 stupňov lepšie ako pri SLM. ADAM vyniká vysokou presnosťou, výbornou štruktúrou povrchu a minimálnou potrebou dodatočného opracovania. Komponenty vyrobené touto technológiou sú ľahšie vďaka vnútornej mriežkovej štruktúre, čo je ekonomicky výhodné. (Czan, 2024)

Gel'atko a kol. skúmali vplyv tepelného spracovania na zníženie zvyškových napätí vo vzorkách vyrobených aditívnym procesom technológiou SLM (materiál antikorošná oceľ 316L). Zvyškové napätia vznikajú v materiáloch po výrobnom procese kvôli tlaku alebo tepelným gradientom. Vzorky boli tepelne spracované pri rôznych teplotách a časoch výdrže, a následne merané röntgenovou difraktometriou. Ukázalo sa, že kombinácia nižšej teploty (650 °C) a kratšej doby (4 hodiny) sa javí ako menej účinná, pretože napätia mali vyšší ťahový charakter. Vyššie teploty a dlhšie časy výdrže lepšie odbúravalí napätia a menili mikroštruktúru materiálu. Pre účinné zníženie zvyškových napätí je dôležité zvoliť správny teplotný režim a umiestnenie dielu v pracovnej komore aditívneho zariadenia. (Gel'atko, 2023)

Mahr a kol. analyzovali výrobu dielov pomocou aditívnych technológií SLM a ADAM určených pre elektromobilitu. Cieľom bolo vytvoriť udržateľnú výrobu náhradných dielov bez potreby fyzického skladovania, zvýšenia životnosti dielov a komplikovanej logistiky vyrobených dielov. Výsledky ukázali, že obe technológie dokážu vyrábať funkčné diely s dobrými mechanickými vlastnosťami, pričom dosiahli lepšie výsledky ako diely vyrábané konvenčne. Technológia SLM dosiahla nižšie náklady na energiu a plyn, zatiaľ čo ADAM má výrazne nižšie náklady na materiál. Aditívna výroba je vhodná pre rýchlu výrobu náhradných dielov s jednoduchou logistikou. (Mahr, 2024)

2 Tézy dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je priniesť nové poznatky v oblasti vývoja aditívnych technológií pre kovové materiály na báze ocelí s dôrazom na ich praktickú aplikáciu v priemyselnom odvetví. Práca posilní podporu rozvoja a inovácií vo vybraných technológiách kovovej aditívnej výroby s cieľom zlepšenia efektívnosti výrobných procesov, zvýšenia kvality vyrobených produktov, rozšírenia možností výroby komplexných geometrických komponentov a rozvoja aditívnej výroby pre konkrétne špecifické požiadavky a aplikácie určené pre priemysel.

V rámci riešenia dizertačnej práce je potrebné zamerať sa a analyzovať nasledujúce parciálne ciele:

1. Teoretická analýza súčasného stavu strategických technológií s dôrazom na aplikáciu do praxe
2. Analýza výrobných technológií s ohľadom na vyrobiteľnosť dielu
3. Analýza a následná optimalizácia technologických parametrov aditívnych zariadení s cieľom zlepšovania mechanických vlastností a kvality dielov na základe simulácií
4.
 - 4.1 Analýza mikroštruktúry
 - 4.2 Analýza tvrdosti
 - 4.3 Analýza integrity povrchu

4.4 Analýza zvyškových napätí

4.5 Analýza nákladov

5. Prínosy pre vedu a teóriu a prax

Experimentálna časť, spojená s experimentálnymi meraniami s použitými dostupnými meracími zariadeniami, bola realizovaná v laboratóriách na Katedre obrábania výrobnéj techniky, pričom diely boli vyrobené v spolupráci s univerzitným sektorom (VŠB-TUO) a súkromným sektorom (Printy s.r.o., 3Dwiser s.r.o.). Na základe vyrobenia konkrétneho dielu sú experimentálne spracované a vyhodnotené viaceré parametre s ohľadom na hodnotenie integrity povrchu, rozmerových charakteristík, zvyškových napätí, mechanických vlastností a mikroštruktúr vyhotovených dielov.

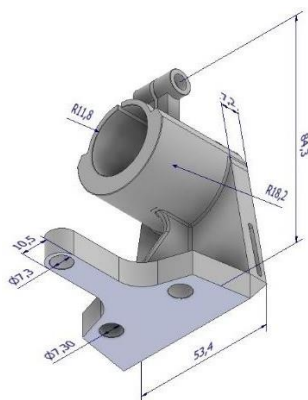
3 Experimentálna časť

Cieľom experimentálnej časti je priniesť nové poznatky v oblasti aditívnej výroby na kovovej báze. Experimentálna časť sa skladá z porovnaní troch strategických, perspektívnych a používaných technológií kovovej aditívnej výroby, ktoré sú zároveň rozdielne vo svojej technologickej podstate, pričom vybrané boli na základe dostupnosti a ich možnosti uplatnenia v praktickom využití v našom regióne (automobilový priemysel, letecký priemysel a pod.). Technológia SLM je založená na spekaní kovových práškov vysokovýkonným laserom, technológia ADAM je založená na báze kovovoskových vlákien a tretia technológia BJ pracuje na princípe nanášania tekutého spojiva na tenké vrstvy práškových častíc.

3.1 Konštrukčný návrh vyrábaného komponentu

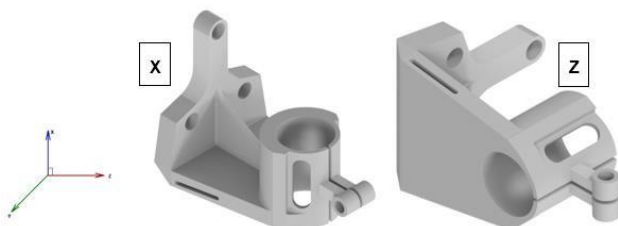
Konštrukčný návrh komponentu bol navrhnutý cez praktické využitie v priemyselnom odvetví a kvôli geometrickej a konštrukčnej variabilite. Jedná sa o komplexný diel, ktorý slúži ako držiak pre servomotor. Servomotory sú motory, ktoré disponujú schopnosťou nastavenia presnej polohy natočenia osi. Je možné nimi ovládať napr. posuvy pri CNC strojoch.

Navrhnutý diel predstavuje svojim tvarom a geometriou vhodný komponent pre porovnanie troch strategických technológií kovovej aditívnej výroby. Diel disponuje dominantným prvkom hlavným valcovým otvorom, ktorý slúži na umiestnenie valcového komponentu, napr. ložiska, príp. hriadeľa. Na vrchnej časti valcového otvoru sa nachádzajú dve závesné oká, ktoré slúžia na pripevnenie, prípadne uchytenie komponentu k inej časti stroja alebo zariadenia pomocou spojovacích prvkov ako sú napr. skrutky, čapy a iné. Dôležitou súčasťou je základňa, ktorá disponuje tromi otvormi, ktoré slúžia na pripevnenie dielu k podložke, príp. iného povrchu. Podložka je spojená s valcovým komponentom hlavnou časťou, v ktorej sa nachádza drážka. Podpera vedie od základne k hlavnej časti, pričom poskytuje stabilitu a pevnosť celej konštrukcii. Je navrhnutá tak, aby prenášala sily a zaťaženia z valcového otvoru priamo na základňu. Na Obr. 3.1 môžeme vidieť model navrhnutéj súčiastky v programe Autodesk Inventor.



Obr. 3.1 Konštrukčný návrh komponentu v softvéri Autodesk Inventor

Z dôvodu rozsiahlej analýzy a na základe predchádzajúcich vykonaných výskumov bol diel vyrobený v dvoch rôznych orientáciách v osiach X a Z (Obr. 3.2). Samotná orientácia dielov zohráva dôležitú úlohu, nakoľko orientácia vzorky ovplyvňuje mechanické vlastnosti, povrchovú kvalitu a deformácie.



Obr. 3.2 Návrh komponentu v dvoch vyrobených orientáciách v osiach X a Z

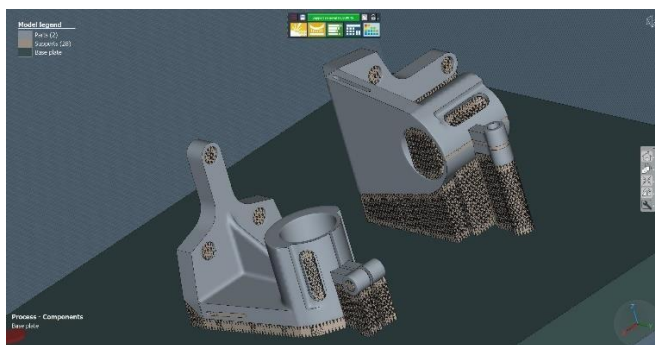
3.2 Simulácia aditívnej výroby

Dôležitou súčasťou aditívnej výroby je tvorba simulácií výrobného procesu, ktorá dokáže predikovať dôležité rozmerové charakteristiky, deformácie, normálové napätia a iné parametre ešte pred samotným aditívnym procesom. Na overenie presnosti simulácie je potrebné experimentálne overiť výsledky, tzn. súčiastku je potrebné vyrobiť a následne pomocou

nedeštruktívnych metód (ako je napr. reverzné inžinierstvo) overiť porovnanie nasimulovaných výsledkov s reálnymi výsledkami z vyrobených dielov.

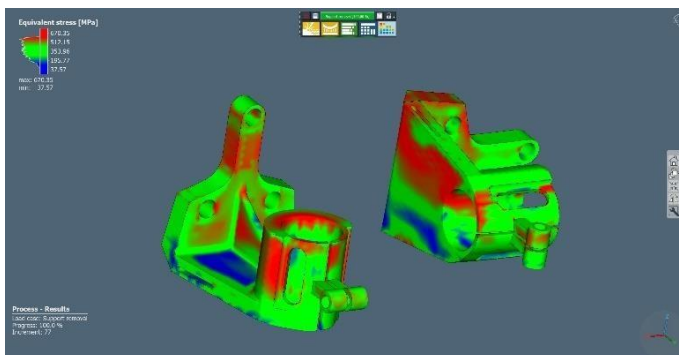
Na simuláciu aditívnej výroby bol použitý softvér Simufact Additive, ktorý je schopný simulovať aditívny proces od samotného návrhu dielu až po finálnu aditívnu výrobu. Softvér je však primárne určený na simuláciu procesu výroby SLM technológiou. Softvér umožňuje predikovať kompenzáciu zmrastenia dielov, určiť a definovať aké napätia vzniknú pri aditívnej výrobe, identifikovať distribúciu teploty pri výrobe. Pred samotnou simuláciou je potrebné preddefinovať typ stroja, materiál a parametre tlače. V našom prípade bol zvolený prístroj Renishaw AM 500S, ktorý je použitý aj pri výrobe experimentálnych súčiastok.

Na Obr. 3.3 je možné vidieť úvodnú simuláciu, ktorá predikuje tvorbu podpier, ktoré sú potrebné pri komplexných geometrických tvaroch najmä z dôvodu stabilizácie, aby nedošlo k prepadnutiu previsov a deformáciám.



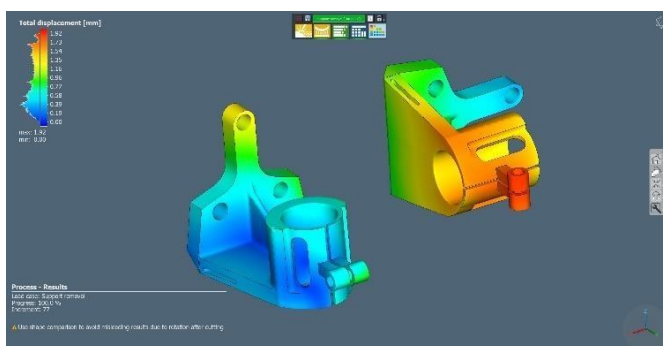
Obr. 3.3 Simulácia zobrazujúca diel s predikciou podpier

Predikcia deformácií a vzniknutých napätí je zobrazená na Obr. 3.4. Vďaka tejto simulácii je možné predikovať napätia, ktoré sa môžu vyskytnúť počas výrobného procesu.



Obr. 3.4 Výsledky simulácie zobrazujúce miesta s vysokými napätiami v diele

Poslednou simuláciou bolo zistenie celkovej deformácie dielov a s tým spojená analýza rozmerových charakteristík (Obr. 3.5). V ľavej časti môžeme vidieť legendu, ktorá udáva rozsah celkovej zmeny rozmerových charakteristík (deformácií), pričom modrá farba reprezentuje minimálne deformácie a červená maximálne deformácie.



3.3 Použité aditívne technológie

Nasledujúca podkapitola popisuje vybrané aditívne technológie určené pre výrobu experimentálnych súčiastok, vrátane technologických parametrov a použitých materiálov, ktorých analýza chemického zloženia bola vykonaná pomocou spektrometrie.

Technológia Selective Laser Melting (SLM)

Technológia SLM patrí medzi pokročilé technológie aditívnej výroby, ktorá selektívne natavuje jemné vrstvy kovového prášku vrstvu po vrstve vysokovýkonným laserom na základe digitálneho 3D modelu. Tenká vrstva kovového prášku (obvykle o hrúbky 20 - 100 μm) je rovnomerne rozprestretá na stavebnú platformu. Následne laserový lúč selektívne roztavuje kovový prášok na požadovaných oblastiach. Roztavený materiál sa pri ochladzovaní spevní a vytvorí pevnú kompaktnú vrstvu. Po dokončení jednej vrstvy sa stavebná platforma zníži o hrúbku vrstvy a proces sa opakuje ďalšou vrstvou, až kým nie je vyrobený kompaktný diel.

Použité zariadenie

Aditívne zariadenie Renishaw AM500S je vysokovýkonné zariadenie určené pre aditívnu výrobu presných kovových dielov, ktorá pracuje na báze selektívneho laserového natavovania kovového prášku. Je ideálnou voľbou pri sériovej výrobe, nakoľko poskytuje vysokú kvalitu vyrobených dielov, efektivitu a flexibilitu. Používa sa pri rôznych priemyselných aplikáciách najmä pri výrobe dielov určených pre automobilový priemysel. V leteckom priemysle sa používa na výrobu pevných a ľahkých komponentov, ktoré musia byť vysoko odolné voči extrémnym podmienkam, v medicíne sa používa na výrobu ortopedických náhrad, implantáty a iné aplikácie.

Použitý materiál

Pre experimentálne diely vyrobené technológiu SLM bol zvolený materiál antikoročná oceľ 316L (Tab. 1), ktorý je typický nízkym obsahom uhlíka, vďaka čomu je odolná voči senzibilizácii, teda zrážaniu karbidov na hraniciach zŕn.

Materiál sa vyznačuje vysokou pevnosťou v ťahu najmä pri vysokých teplotách, dobrou zvariteľnosťou a tvrdosťou. Používa sa najmä v strojárskvej výrobe (vstrekovacie formy), automobilový a lodný priemysel a chirurgické nástroje.

Tab. 1 Chemické zloženie materiálu 316L (hm. %)

Chemický prvok	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	N	C	P	S	Fe
Hodnota	16,9	12,7	2,1	0,6	0,5	0,09	0,06	0,02	0,01	67

Technológia Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM)

Technológia ADAM patrí medzi pokročilé technológie aditívnej výroby, ktoré vyvíja spoločnosť Markforged. Technológia kombinuje prvky tradičnej aditívnej výroby s modernými postupmi na tvorbu vysokopevných kovových komponentov. Princíp nanášania vrstiev spočíva v podobnom princípe, ktoré používa technológia FFF. Materiál vo forme kovového prášku obaleného v plastovom spojive je postupne nanášaný na stavebnú platformu vrstvu po vrstve až pokiaľ sa vytvorí kompaktný diel. Po vyrobení dielu nasleduje odstránenie spojiva, kde dochádza k čiastočnému odstráneniu polymérnej častice z vyrobeného dielu. Poslednou operáciou je proces spekania, kedy je diel umiestnený do vysokoteplotnej pece, kde sa speká a vytvára pevný a hustý kovový komponent, ktorý dosahuje plnohodnotné mechanické vlastnosti a funkčnosť.

Použité zariadenie

Aditívne zariadenie od spoločnosti Markforged Metal X je zložené z 3 pracovných staníc, zariadenia na aditívnu výrobu, umývacej stanice a stanice určenej na spekanie dielov. Kvalitu vyrobených komponentov ovplyvňuje najmä presnosť aditívnej výroby, chemické zloženie vstupného materiálu, teplota procesu spekania a pracovná atmosféra pri spekaní. Toto zariadenie predstavuje cenovo dostupný systém s jednoduchým užívateľským rozhraním a jednoduchou údržbou. Zariadenie Metal X slúži na výrobu komponentov z rôzneho druhu materiálu ako sú antikoročná oceľ 17-4 PH, nástrojová oceľ H13, hliníkové zliatiny, titán, meď a iné.

Použitý materiál

Pre experimentálne diely vyrobené technológiu ADAM bol použitý materiál antikoročná oceľ 17-4 PH (Tab. 2). Jedná sa o martenzitickú precipitačne kalenú nerezovú oceľ, ktorá dosahuje vysoký pomer pevnosti a hmotnosti. Má dobrú odolnosť voči korózii a výborné mechanické vlastnosti pri teplotách do 316 °C. Mechanické vlastnosti je možné optimalizovať tepelným spracovaním. Používa sa najmä v strojárскеj výrobe pri výrobe špecifických komponentov, zariadenia určené na chemické spracovanie, rôzne aplikácie v kozmickom priestore.

Tab. 2 Chemické zloženie materiálu 17-4PH (hm.%)

Chemický prvok	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	N	C	Cu	S	Fe
Hodnota	16,5	4,03	0,01	0,36	0,15	0,52	1,71	3,77	0,05	72,9

Technológia Binder Jetting (BJ)

Technológia Binder Jetting je inovatívna aditívna technológia, ktorá umožňuje vytvárať komplexné diely aditívnym procesom na princípe vrstvenia materiálu. Materiál vo forme kovového prášku je rovnomerne nanosený na stavebnú platformu, následne tlačová hlava nanáša tekuté spojivo na prášok, čím sa vrstvy spoja do kompaktného celku. Následne sa stavebná platforma zníži o hrúbku jednej vrstvy a cyklus sa opakuje, až kým dôjde k vyrobeniu celého komponentu. Následne je diel podrobený vytvrdzovaniu a tepelnému spracovaniu vo forme spekania, čím dosiahne požadovanú pevnosť a mechanické vlastnosti. Technológia sa používa na rôzne praktické aplikácie ako napr. biomedicínske implantáty, komponenty pre priemysel a iné.

Použitie zariadenie

Zariadenie ExOne X1 160 Pro sa odlišuje od iných aditívnych zariadení najmä veľkou výrobnou kapacitou a kvalitou, čím predstavuje vhodné riešenie pre priemyselnú aditívnu výrobu. Vďaka veľkému pracovnému objemu je možné vyrábať diely väčších rozmerov, príp. sériu menších dielov v jednom výrobnom cykle. Zariadenie podporuje materiály ako sú antikoročná oceľ 316L,

17-4PH, nástrojová oceľ (H13), meď, superzliatiny (Inconel 625,718), titán a meď.

Použitý materiál

Materiálom pre technológiu BJ je nerezová oceľ 316 L, nízko uhlíková zliatina, ktorá je typická vysokou odolnosťou voči korózií s relatívne dobrou pevnosťou a mechanickými vlastnosťami. Pri aditívnej výrobe dosahuje dobrú tvárnosť, ťažnosť a tepelné vlastnosti. Používa sa vo viacerých priemyselných odvetviach ako je letecký a automobilový priemysel.

Tab. 3 Chemické zloženie materiálu 316L (hm.%)

Chemický prvok	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	N	C	P	Fe
Hodnota	16,8	10,8	2,2	0,84	1,4	0,2	0,04	0,02	67,7

3.4 Vizuálna kontrola vyrobených dielov

V nasledujúcej podkapitole je možné pozorovať detailne časti vyrobených dielov aditívnym procesom. Rozdiely medzi jednotlivými technológiami sú viditeľné, najmä na povrchu od podpíer. Technológie ADAM a SLM sú typické tým, že vyžadujú podpery z dôvodu minimalizácie deformácií. Kovové materiály majú tendenciu sa pri chladnutí zmrašťovať a samotné podpery umožnia udržať tvar dielu počas chladnutia a minimalizovať deformácie.

Na Obr. 3.6 sú znázornené vyrobené vzorky technológiami SLM, ADAM a BJ v orientácii X. Vzorka SLM X disponuje solídnym povrchom, môžeme však pozorovať zostatok po podperách, ktorý je však možné dodatočným postprocessingom kompletne odstrániť. Rovnako ostali podpery aj v oblasti závesných ôk, ktoré je veľmi náročné odstrániť. Z vizuálneho hľadiska dosahuje diel BJ X veľmi dobré výsledky. Pri vzorke ADAM X je možné pozorovať stopy po podperách a rovnako zvyškové podpery v drážkach, ktoré nebolo možné z daného miesta bezpečne odstrániť.



Obr. 3.6 Vzorky vyrobené v orientácii X

Pri vzorke SLM Z je možné konštatovať, že povrch je značne znehodnotený podperami. Pri odstraňovaní podpíer rovnako došlo k odtrhnutiu jedného z dvoch závesných ôk. Technológia Binder Jetting nevyžaduje pri výrobe podpery, čo poskytuje diel s pravidelným tvarom a povrchom. Pri vzorke BJ Z došlo vo viacerých miestach k tvorbe prasklín a trhlín, čo môže byť spôsobené nesprávne nastavenými parametrami pri procese spekania. Technológia ADAM predstavuje najvhodnejšie riešenie z vizuálneho hľadiska, kde je možné pozorovať iba minimálne zostatky po podperách pri vzorke ADAM Z a podperu v drážke (Obr. 3.7).



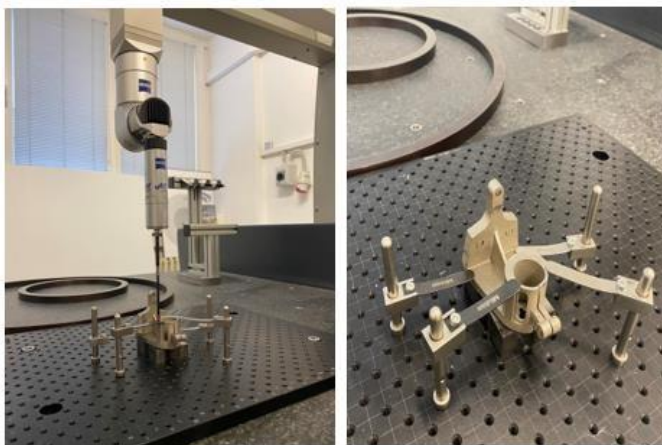
3.7 Vzorky vyrobené v orientácii Z

3.5 Verifikácia geometrických a rozmerových špecifikácií dotykovou metódou

Namerané výsledky optickou metódou sú v nasledujúcej podkapitole overené dotykovou metódou. Meranie geometrických odchýlok bolo realizované na 3D meracom súradnicovom stroji Zeiss Eclipse od spoločnosti Zeiss. Jedná sa o presný prístroj určený na meranie geometrických charakteristík meracieho objektu. Zariadenie umožňuje vykonať merania s vysokou presnosťou a spoľahlivosťou aj pri zložitých dieloch, vďaka čomu je vhodná pre rôzne priemyselné aplikácie a merania najmä pri overovaní rozmerových charakteristík dielov určených pre automobilový a letecký priemysel. Každý geometrický element je skenovaný kontaktnou metódou. 3D merací súradnicový systém disponuje otočnou hlavou RDS s počítačom podporovanou presnosťou, ktorý umožňuje meranie v 20 736 pozíciách s 2,5° krokovým natáčaním, pričom rozsah otáčania je $\pm 180^\circ$, čo umožňujú vertikálne a horizontálne usporiadané rotačné osi. Na meracej hlave je umiestnený pasívny dotykový skenovací senzor VAX XXT, ktorý zabezpečuje vysokú presnosť meraní, s tanierikom TL3 z dôvodu dĺžky snímača. V rámci

vykonaných meraní bol použitý merací dotyk z rubínovej guľôčky, ktorý bol zvolený z dôvodu vhodnosti a aplikovateľnosti aj pri veľmi tvrdých materiáloch. Rubínová guľôčka disponuje hladkým povrchom, výbornou pevnosťou v tlaku a veľkou odolnosťou voči fyzickému poškodeniu. Jedným z mála materiálov, ktoré nie je možné merať rubínom sú hliníkové zliatiny a liatinové odliatky. Vzorky vyrobené aditívnym procesom sú z materiálu antikoročná oceľ 316L a 17-4PH, tzn. meranie rubínovým dotykom je možné a nevznikajú žiadne obmedzenia využiť tento spôsob dotyku.

Vyrobené diely boli pred samotným meraním temperované v klimatizovanom laboratóriu pri teplote 21 °C, v rovnakom laboratóriu sa nachádza aj 3D merací prístroj (teplota meracieho stroja a verifikovaných vyrobených dielov bola identická, tým došlo k eliminácii chýb vplyvom teploty). Aditívne diely boli uchytené pomocou upínacích prípravkov, tzv. upínacej stavebnice, aby sme odobrali jej 6° voľnosti (Obr. 3.8). V rámci experimentálnych meraní boli vyhodnotené viaceré geometrické tolerancie a odchýlky, pričom z dôvodu rozsahu dizertačnej práce bol vybraný a spracovaný iba vybraný počet parametrov, ktoré predstavovali dôležitú výpovednú hodnotu pre celkovú analýzu experimentu.



Obr. 3.8 Kontaktné skenovanie aditívne vyrobeného dielu na zariadení Zeiss Eclipse s meraným dielom uchyteným pomocou upínacích prípravkov

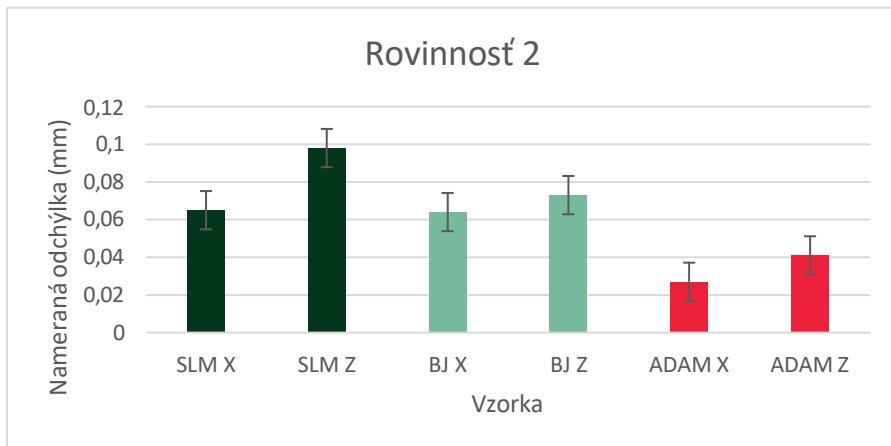
Po dotykovom meraní vybraných oblastí a parametrov nasledovalo vyhodnotenie nameraných hodnôt, pričom boli vyhodnocované nasledovné parametre, ktoré sa vyhodnotili na základe nasledujúcich prvkov, ktoré boli preložené cez namerané prvky (zosnímané body a oblasti):

- Priemer valca- na vyhodnotenie priemeru valca bola použitá metóda najväčšieho vpísaného prvku (valca), z dôvodu hodnotenia funkčnosti (ako tvar geometrického prvku ovplyvňuje jeho rozmer). Zelené šípky predstavujú normálové vektory povrchových extrahovaných bodov príslušného geometrického prvku.
- Rovinnosť 2 – geometrické odchýlky rovinnosti boli vyhodnotené metódou minimálnej zóny v súlade s normou STN EN ISO 1101
- Rovinnosť 4
- Rovinnosť 5
- Rovinnosť 13
- Rovnobežnosť R2_REF – referenčný prvkom je tangenčný element, ktorý bol vytvorený v súlade s normou STN EN ISO 5459, pričom tolerovaný element je vytvorený metódou najmenších štvorcov
- Kolmosť R3_REF – referenčný prvok bol vytvorený aproximačnou metódou vonkajší tangenčný element, tolerovaný geometrický prvok bol vytvorený metódou najmenších štvorcov
- Valcovitosť_VALEC – hodnotí sa geometrická odchýlka tvaru- valcovitosť, pričom je použitá metóda najväčší vpísaný element (valec). V súlade s normou STN EN ISO 1101 je odporúčaná minimálna zóna, avšak z hľadiska funkčnosti bola zvolená vyššie uvedená metóda. Filter bol nastavený na hodnotu UPR 2-15.

Experimentálnymi meraniami dotykovou metódou boli štatisticky vyhodnotené nasledovné parametre (Obr. 3.9 - Obr. 3.16) s ohľadom na geometrické tolerancie rovinnosti, kolmosti, rovnobežnosti a valcovitosti.

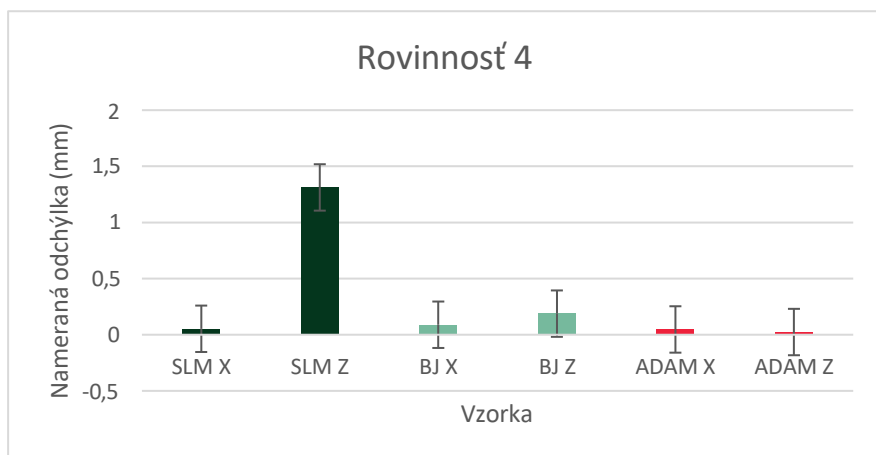
V rámci hodnotenia geometrickej odchýlky tvaru - rovinnosti boli verifikované viaceré plochy na skúšobných dieloch s cieľom analyzovať ich kvalitu. V prípade Rovinnosti 2 boli zistené odchýlky pre vybrané technológie aditívnej výroby (Obr. 3.9), kde najvyššia nameraná odchýlka je dosiahnutá pri

vzorke SLM Z s hodnotou 0,095 mm a najmenšia odchýlka bola zaznamenaná pri vzorke ADAM X s hodnotou 0,03 mm.



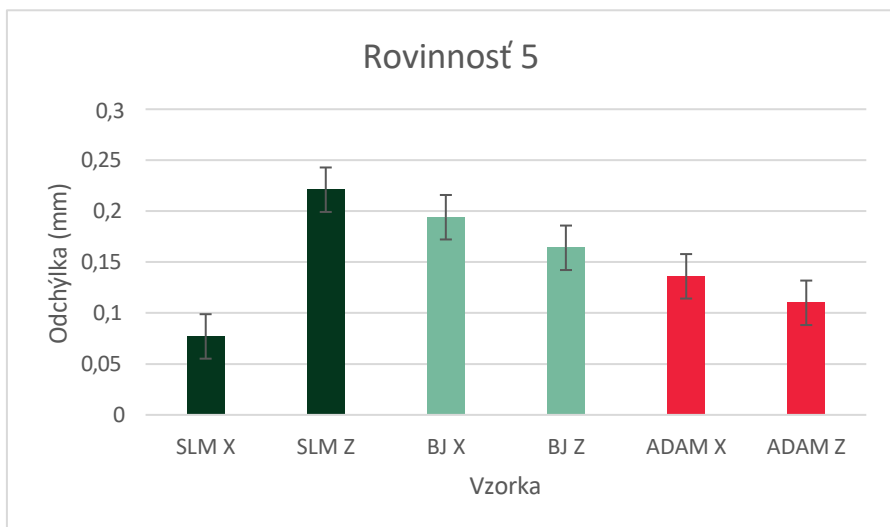
Obr. 3.9 Štatistické porovnanie nameraných hodnôt geometrickej odchýlky Rovinnosti 2

Pri zosnímaní roviny 4 je možné pozorovať v grafickom vyhodnotení (Obr. 3.10) extrémne hodnoty pri vzorke SLM Z, kde nameraná odchýlka bola 1,35 mm, čo môže byť spôsobené orientáciou vzorky na stavebnej platforme, kde z dôvodu orientácie boli potrebné v tejto oblasti podpery. Najlepšie hodnoty dosiahla vzorka ADAM Z s nameranou odchýlkou 0,05 mm.



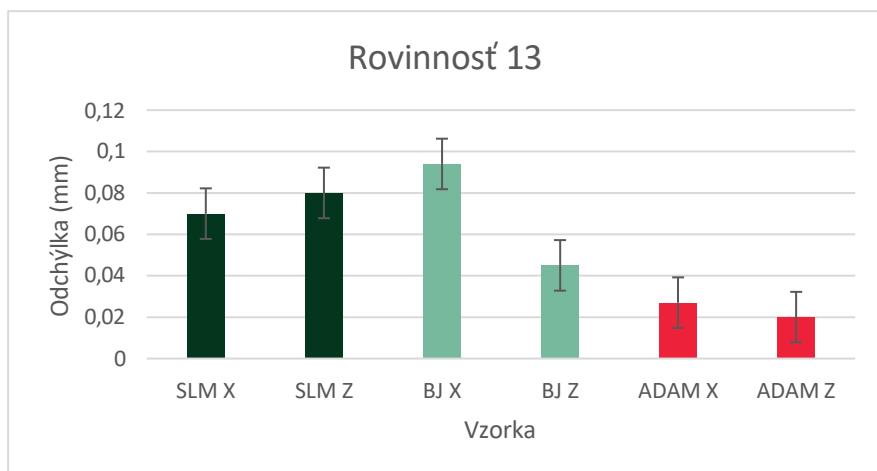
Obr. 3.10 Štatistické porovnanie nameraných hodnôt geometrickej odchýlky Rovinnosti 4

Zosnímaná rovina 5 je graficky porovnaná naprieč jednotlivými technológiami a orientáciami (Obr. 3.11), pričom najmenšiu odchýlku dosiahla vzorka SLM X s hodnotou 0,07 mm a najväčšiu odchýlku dosiahla vzorka SLM Z s hodnotou 0,22 mm.



Obr. 3.11 Štatistické porovnanie nameraných hodnôt geometrickej odchýlky Rovinnosti 5

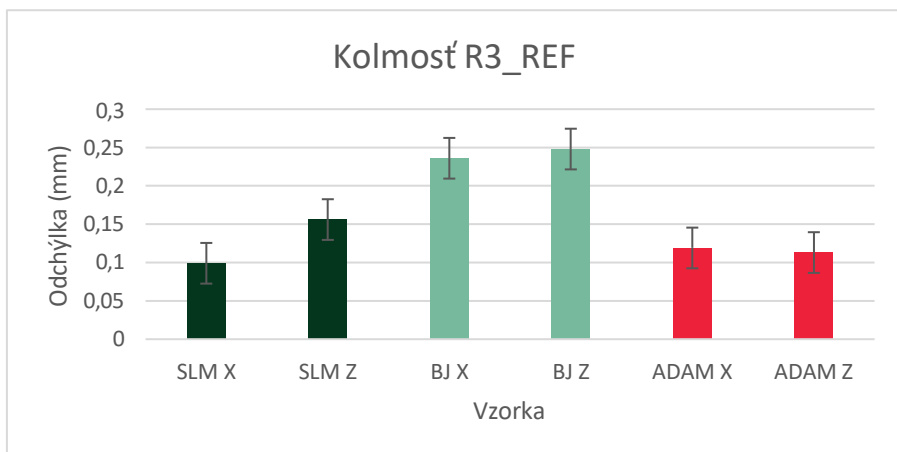
Poslednou zosnímanou rovinou je Rovina 13, ktorá je charakteristická zvýšenou odchýlkou (Obr. 3.12) v porovnaní s ostatnými vzorkami, pričom jedná sa o vzorku BJ X s nameranou hodnotou odchýlky 0,09 mm. Najnižšiu odchýlku dosiahla vzorka ADAM Z s hodnotou 0,02 mm.



Obr. 3.12 Štatistické porovnanie nameraných hodnôt geometrickej odchýlky Rovinnosti 13

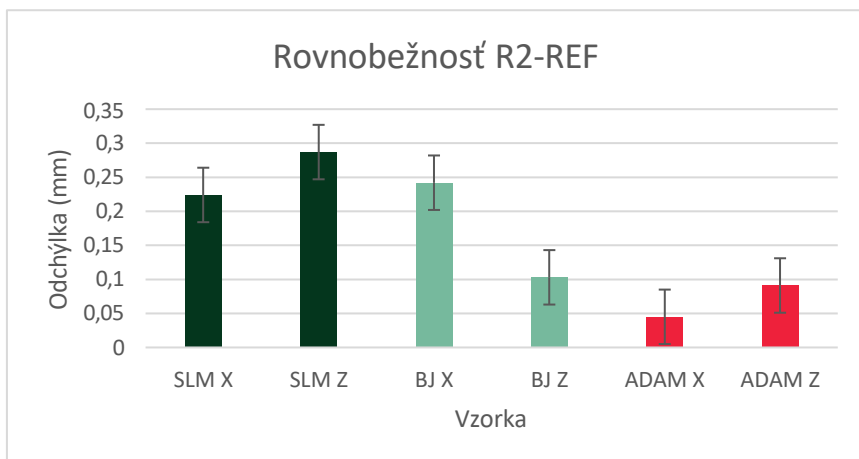
Na základe nameraných výsledkov merania rovinnosti je možné skonštatovať, že najrovnejší povrch dosiahli vzorky vyrobené technológiou ADAM.

Hodnotenie geometrickej odchýlky smeru- kolmosti (Obr. 3.13) ukazuje priaznivé výsledky pre technológie ADAM a SLM, na rozdiel od technológie BJ, ktorá dosahuje priemerné odchýlky v oboch orientáciách približne 0,24 mm. Najnižšia hodnota odchýlky kolmosti je zaznamenaná pri vzorke SLM X s hodnotou 0,1 mm.



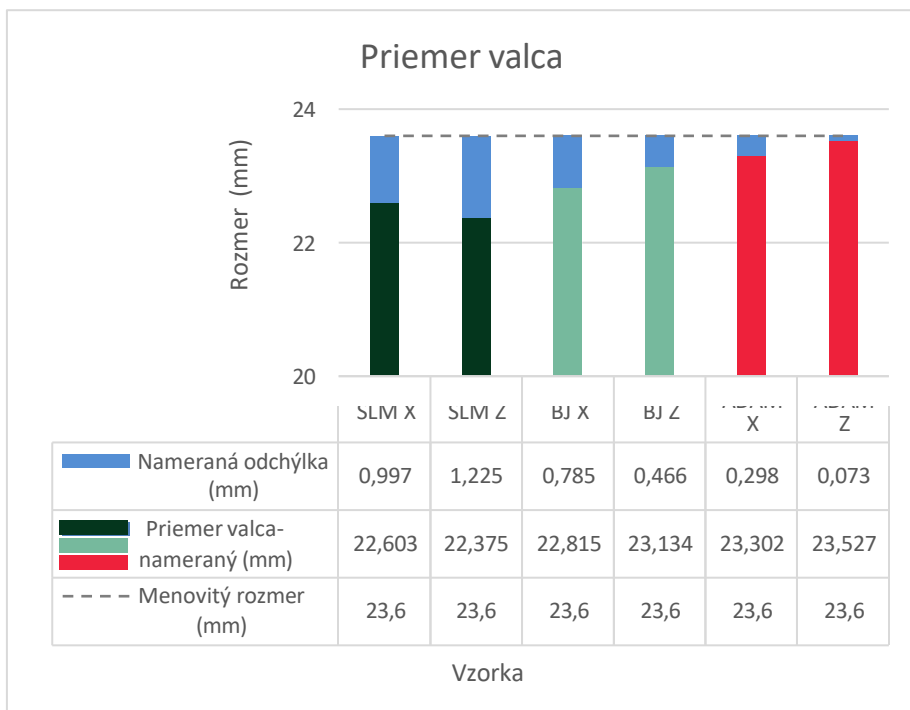
Obr. 3.13 Štatistické porovnanie nameraných hodnôt geometrickej tolerancie Kolmosti R3_REF

Nasledujúce grafické porovnanie (Obr. 3.14) ilustruje hodnotenie geometrickej odchýlky smeru - rovnobežnosti. Na základe nameraných dát je možné konštatovať, že vzorky SLM X, SLM Z a BJ X dosahujú vyššiu odchýlku v porovnaní s technológiou ADAM, čo môže byť výsledkom vyššej presnosti dosiahnutej prostredníctvom tejto technológie. Najmenšiu odchýlku vykazuje vzorka ADAM X s hodnotou 0,04 mm, najväčšiu odchýlku dosahuje vzorka SLM Z s hodnotou 0,29 mm.



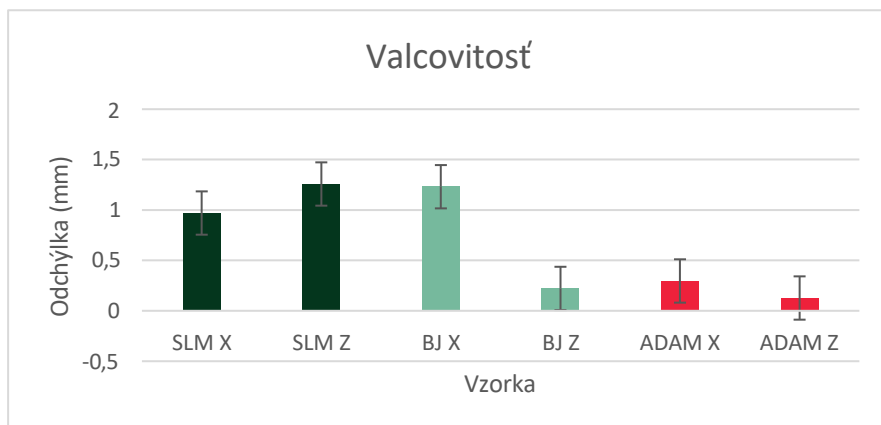
*Obr. 3.14 Štatistické porovnanie nameraných hodnôt geometrickej odchýlky
Rovnoběžnosti R2_REF*

Dominantným a zároveň dôležitým prvkom pre celkovú funkčnosť komponentu je otvor v tvare valca, kde bola dotykovou metódou meraná a analyzovaná odchýlka priemeru samotného otvoru. Na základe hodnôt, ktoré sú zobrazené na štatistickom grafe (Obr. 3.15) môžeme vidieť, že najväčšia odchýlka bola nameraná pri technológii SLM pri orientácii Z, pričom odchýlka dosiahla mimoriadne vysokú hodnotu 1,225 mm. Najmenšia odchýlka bola nameraná pri vzorke ADAM Z, ktorá má odchýlku na priemere valca 0,073 mm. Môžeme pozorovať, že najväčšie odchýlky sú vyhodnotené pri technológií SLM, technológia BJ zaznamenáva primerané hodnoty odchýlok a technológia ADAM dosahuje najvyššiu presnosť.



Obr. 3.15 Štatistické porovnanie odchýlok priemeru valca

Súčasťou hodnotenia tohto charakteristického elementu bolo aj celkové hodnotenie geometrickej odchýlky tvaru - valcovitosti (Obr. 3.16). Dané odchýlky sú vo veľkom rozptyle, kde je možné pozorovať veľké rozdiely medzi jednotlivými technológiami. Najmenšia odchýlka pri analyzovaní valcovitosti bola nameraná pri vzorke ADAM Z s nameranou hodnotou 0,13 mm a najväčšia odchýlka bola nameraná pri vzorke SLM Z, konkrétne o hodnotu 1,26 mm. Z hľadiska hodnotenia valcovitosti je možné skonštatovať, že technológia ADAM dosiahla najlepšie výsledky v porovnaní s technológiou SLM a BJ, kde vznikli väčšie deformácie. Rozdiel môže byť spôsobený dôsledkom použitia rozdielnych výrobných technológií, rozdielnou orientáciou v pracovnom priestore a spracovaním materiálu.



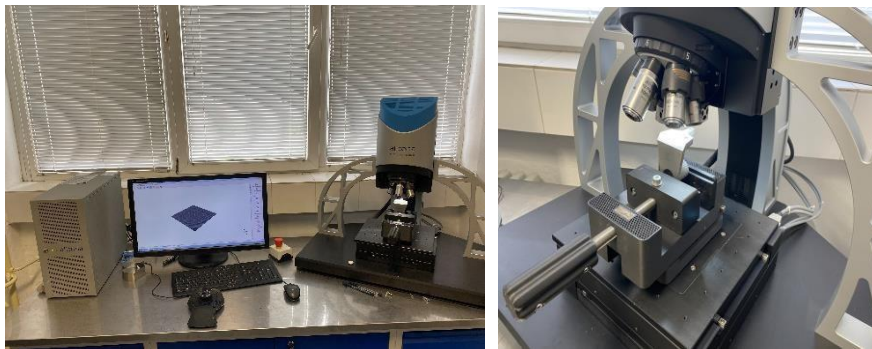
Obr. 3.16 Štatistické porovnanie nameraných hodnôt geometrickej tolerancie Valcovitosti

Pre každý priemyselný podnik zohráva presnosť dielov dôležitú úlohu, keďže úzko súvisí a ovplyvňuje celý výrobný proces, kvalitu výsledných vyrobených produktov a spokojnosť zákazníkov. Pri aditívnej výrobe je možné rozmerové odchýlky a odchýlky rôznych geometrických prvkov ako je valcovitosť, rovnobežnosť a iné eliminovať pomocou softvérovej optimalizácie procesu a simulácií, ktoré dokážu predikovať rozmerové nepresnosti a odchýlky v jednotlivých častiach komponentu. Dôležitý vplyv na rozmerovú presnosť komponentov majú rovnako aj vstupné technické parametre danej technológie (hrúbka nanášaného materiálu, teplota a iné), justácia a kalibrácia zariadenia.

3.6 Skenovanie profilu a drsnosti vyrobených dielov

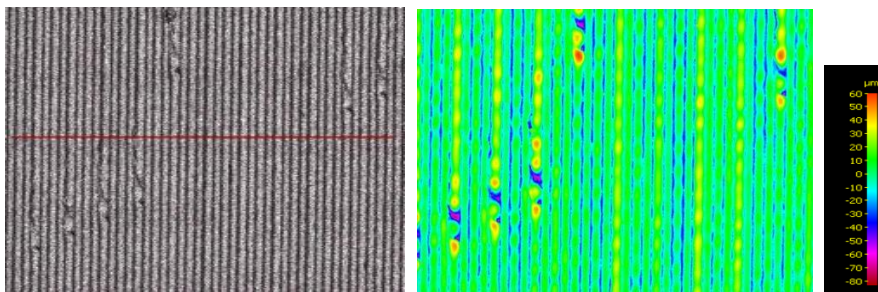
Vzhľadom na požiadavky na kvalitu povrchu vyrobených dielov v priemysle boli vykonané merania parametrov profilu a drsnosti. Integritu povrchu v strojárstve je možné definovať ako vzťah medzi geometrickými vlastnosťami povrchu a fyzikálnymi vlastnosťami materiálu ako sú napr. zvyškové napätia, tvrdosť, mikroštruktúra materiálu a iné. Ide o súbor vlastností povrchovej vrstvy, na ktoré vplývajú technologické procesy, a u ktorých je predpoklad vplyvu na funkčné vlastnosti vyrobeného komponentu.

Na hodnotenie integrity povrchu bol použitý 3D merací optický mikroskop Alicona Infinite Focus G5 (Obr. 3.17), ktorý slúži na skenovanie a meranie drsnosti povrchov komponentov. Zariadenie poskytuje výborné optické rozlíšenie, vďaka ktorému je možné detailne merať s presnosťou na nanometre s veľmi vysokou opakovateľnosťou. Alicona umožňuje na jednom stroji vykonávať analýzy a merania rôznych typov povrchov. Všetky polohovacie osi sú vybavené presnými snímačmi, ktoré zaisťujú presný pohyb pracovného stola.



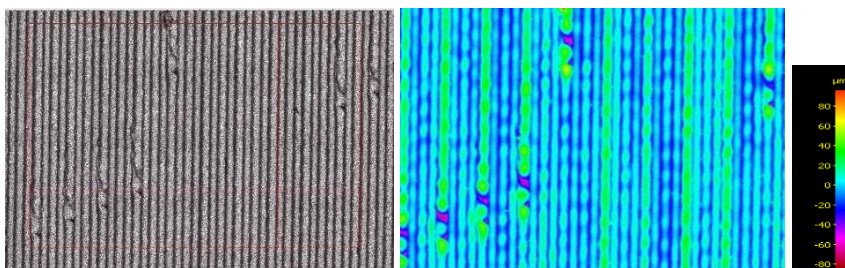
Obr. 3.17 Optický merací mikroskop Alicona Infinite Focus G5

Pred samotným meraním bolo potrebné ustaviť pomocou zveráka meraný diel v rámci pracovného priestoru meracieho prístroja, aby pri meraní nedošlo k jeho posunutiu. Drsnosť povrchu bola meraná v mieste základne, kde kvalita povrchu nebola ovplyvnená zvyškami od podpier. Pri profilovej drsnosti bola meraná 6 mm vzdialenosť (Obr. 3.18), ktorá sa merala kolmo na vrstvy.



Obr. 3.18 Stratégia merania profilovej drsnosti s farebnou mapou nasnímaného povrchu

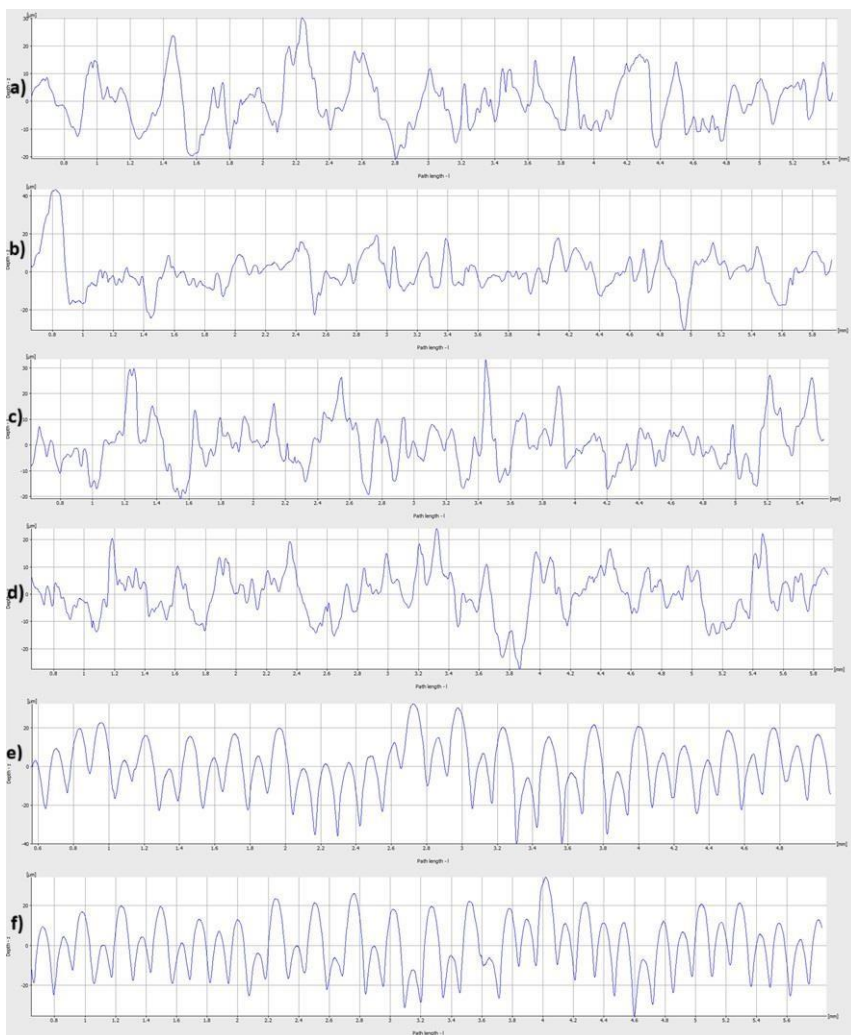
Plošná drsnosť bola vyhodnocovaná na extrahovanom povrchu 6 x 6 mm na mieste základne (Obr. 3.19), kde kvalita povrchu nie je ovplyvnená zvyškami od podpier. Vzorky sa merali pri 20-násobnom zväčšení, pričom drsnosť meraného povrchu sa hodnotila v súlade s normou STN ISO 21920 – pre profilovú drsnosť a STN ISO 25178 – pre plošnú drsnosť.



Obr. 3.19 Stratégia merania a hodnotenia plošnej drsnosti s farebnou mapou

Nasledujúce grafické vyhodnotenie (Obr. 3.20) spočíva v porovnaní kriviek profilovej drsnosti povrchu jednotlivých vzoriek. Krivky drsnosti povrchov vykazujú rôzne úrovne drsnosti a povrchových štruktúr, pričom je možné konštatovať, že krivky vzoriek SLM a BJ vykazujú vyššie a nepravidelné nerovnosti na rozdiel od technológie ADAM, ktorá disponuje pravidelnou a kontrolovanou štruktúrou s nižšou drsnosťou. Takáto štruktúra je výsledkom

kontrolovaného výrobného procesu, kedy boli jednotlivé vrstvy nanášané vrstvu po vrstve.



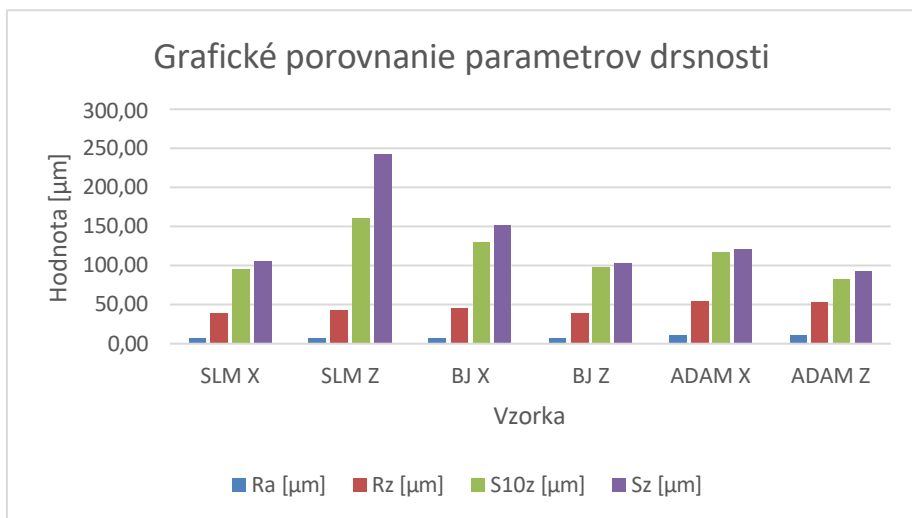
Obr. 3.20 Krivky drsnosti povrchov vyrobených vzoriek a) SLM X, b) SLM Z, c) ADAM X, d) ADAM Z, e) BJ X, f) BJ Z

Namerané parametre drsnosti povrchu pre jednotlivé vyrobené vzorky boli v ďalšom kroku zaznamenané do tabuľky (Tab. 4) a graficky spracované.

Tab. 4 Namerané parametre drsnosti povrchu vzoriek

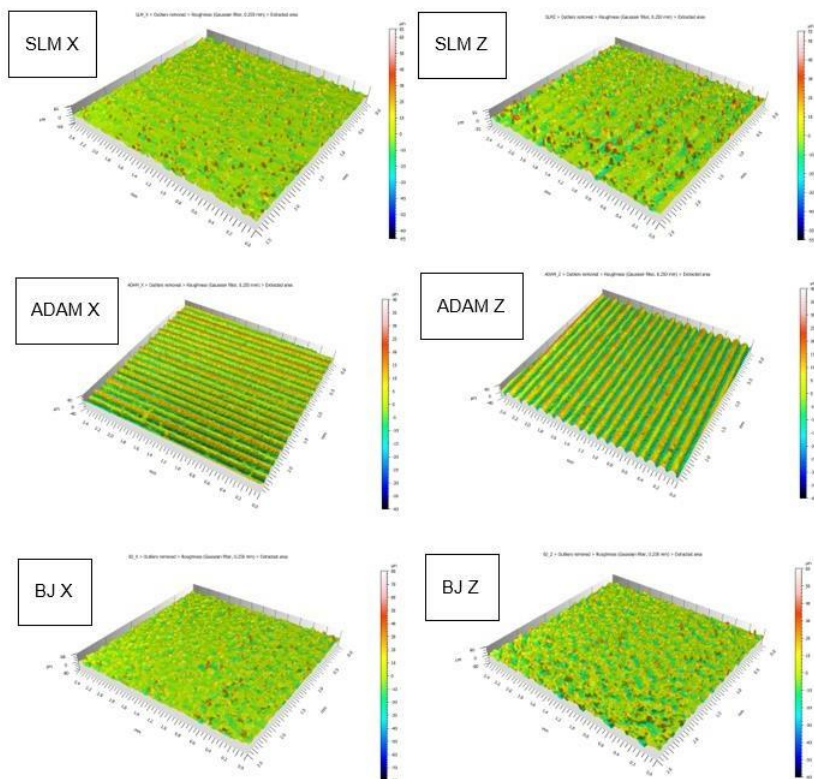
	Ra [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]	S10z [μm]	Sz [μm]	Ssk
SLM X	7,63	50,88	38,88	95,53	104,88	0,62
SLM Z	7,24	74,03	42,44	161,32	242,45	1,41
BJ X	7,24	54,11	45,33	129,68	151,71	0,81
BJ Z	6,77	51,44	39,47	98,31	103,57	0,09
ADAM X	11,02	72,42	54,09	117,06	121,52	-0,16
ADAM Z	11,12	69,40	53,19	82,57	93,15	-0,10

Z grafického porovnania vybraných parametrov drsnosti (Obr. 3.21) môžeme vidieť, že hodnoty sú diametrálne odlišné v závislosti od použitej technológie a od orientácie vzorky. Analyzované sú parametre Ra- stredná aritmetická výška profilu, Rz- aritmetický priemer najvyšších výšok profilu, S10z- priemerná výška najvyšších a najnižších bodov na povrchu od strednej línie, Sz- vzdialenosť medzi najvyšším a najnižším bodom meranej oblasti. V prípade vzoriek vyrobených aditívnym procesom je najdôležitejší parameter S10z. Najlepší povrch dosiahla vzorka ADAM Z, ktorej hodnota parametru drsnosti S10z bola 82,57 μm a najhorším povrchom disponuje vzorka SLM Z s hodnotou 161,32 μm .



Obr. 3.21 Grafické porovnanie vybraných parametrov drsnosti

Je dôležité poznamenať, že na samotnú kvalitu povrchu vzoriek vyrobených aditívnym procesom má vplyv viacero faktorov. Faktory, ktoré ovplyvňujú výslednú kvalitu povrchu vyrobených dielov sú vstupný materiál, parametre aditívnej výroby a samotná aditívna technológia. Vstupný materiál zohráva významnú rolu pri zabezpečení kvality povrchu, nakoľko nerovnosti a nečistoty obsiahnuté v materiáli môžu viesť k tvorbe nerovností na povrchu vyrobených dielov. Parametre aditívnych zariadení ako sú teplota, rýchlosť a tlak môžu v prípade nesprávneho nastavenia spôsobiť zlievanie vrstiev a tvorbu drsného povrchu. Dôležitým faktorom je spôsob nanášania vrstiev, teda celkový pracovný postup aditívnej technológie. Pri technológii ADAM môžeme pozorovať viditeľné stopy po vrstvení, na rozdiel od technológií SLM a BJ, ktoré vytvárajú hladší povrch (Obr. 3.22).

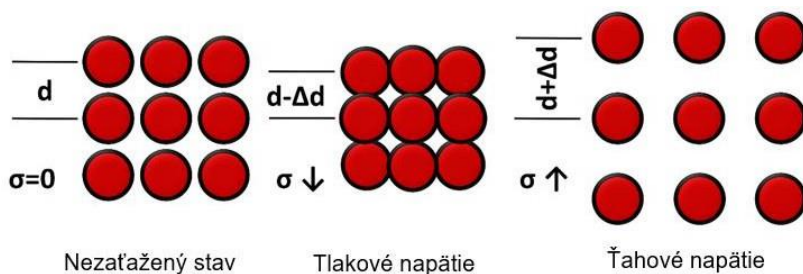


Obr. 3.22 Farebná mapa povrchov jednotlivých vzoriek

Kvalita povrchu je dôležitá z viacerých hľadísk, najmä pre estetický vzhľad, funkčné vlastnosti a aplikovateľnosť. Pre dosiahnutie optimálneho povrchu dielov je preto dôležité optimalizovať výrobné procesy a materiály, prípadne po aditívnej výrobe vykonať postprocessingové operácie ako napr. brúsenie, leštenie a iné povrchové úpravy, ktoré môžu výrazným spôsobom zlepšiť celkovú povrchovú kvalitu vyrobených dielov.

3.7 Identifikácia zvyškových napätí po aditívnej výrobe

Každá výrobná technológia je založená na silovom pôsobení. Pôsobenie vonkajších síl na samotný materiál spôsobuje deformácie, tvarové zmeny, príp. porušenie súčiastky. Rozsah deformácie závisí od interakcie medzi vonkajšími a vnútornými silami, ktoré deformácii bránia. Vnútorné sily sú výsledkom silového pôsobenia štruktúrnych elementov, ktoré súvisia s jeho štruktúrou (kryštalografickou mriežkou). Rozloženie napätí, ktoré vznikne po odstránení pôsobenia vonkajších síl sa charakterizuje ako zvyškové napätia v materiáli. Zvyškové napätia sú zapríčinené plastickou deformáciou a tepelným vplyvom povrchu najmä v povrchových a podpovrchových vrstvách materiálu. Napätia existujú I., II., III. rádu, podľa toho, do akého objemu zasahujú. Vo všeobecnosti môžeme napätia rozdeliť na ťahové, tlakové, normálové, šmykové a ekvivalentné. Ťahové napätia sa matematicky vyjadrujú kladnými číslami (kryštalografická mriežka s väčšími vzdialenosťami- rozmery sa zväčšujú). Vplyvom veľkých ťahových napätí môžu vzniknúť trhliny, buď v rámci zrna, na hraniciach zŕn, príp. vo väčšom objeme materiálu, čo spôsobuje porušenie a následné rozpadnutie materiálu. Tlakové napätia sú vyjadrené zápornými číslami (kryštalografická mriežka s menšími napätiami- rozmery sa zmenšujú) a pri ich pôsobení vzniká riziko plastickej deformácie materiálu, čo môže zhoršiť jeho mechanické vlastnosti a trvalé zmeny v štruktúre (Obr. 3.22).



Obr. 3.22 Grafické znázornenie zmien vzdialeností kryštalografických rovin pôsobením zvyškových napätí (Šajgalík, 2019)

Dôležitým faktorom, ktorý vplýva na vznik zvyškových napätí je chemické zloženie materiálu. Veľký vplyv má najmä uhlík, kedy pri rýchlom ochladzovaní

môže spôsobiť martenzitickú transformáciu, ktorá prispieva k tvorbe zvyškových napätí v dôsledku rozdielných objemových zmien. Vplyv majú aj legúry (napr. Cr- prispieva k vyšším zvyškovým napätiam z dôvodu vysokého koeficientu tepelnej rozťažnosti, Mo- zvyšuje hodnoty zvyškových napätí v dôsledku tvorby spevňujúcich fáz, Ni- znižuje teplotu transformácie martenzitu, čím napomáha k zmierneniu zvyškových napätí), ktoré vplyvajú na výsledný tvar kryštalografickej mriežky.

Empiricky bolo zistené, že kryštalografická mriežka má roviny konštantne vzdialené pri nezaťaženom stave. Z Braggovej rovnice je možné zistiť difrakčný uhol charakteristický pre túto vzdialenosť. Výpočet normálového napätia pomocou röntgenovej difraktometrie závisí od toho ako sa naťahuje, príp. stláča kryštalografická mriežka. Meranie bolo vykonané prostredníctvom metódy $\sin^2 \psi$ rovinného odrazu pri určitých sklonoch uhla ψ . Meraný bol rozostup medzi kryštalografickými rovinami. Zvyškové napätia boli vypočítané na základe Braggovej rovnice (1), ktorá definuje vzťah vlnovej dĺžky röntgenového žiarenia a vzdialenosti medzi atómovými vrstvami v kryštalografickej mriežke smerom k uhlom pod ktorými sa dopadajúci röntgenový lúč odráža (Obr. 5.23).

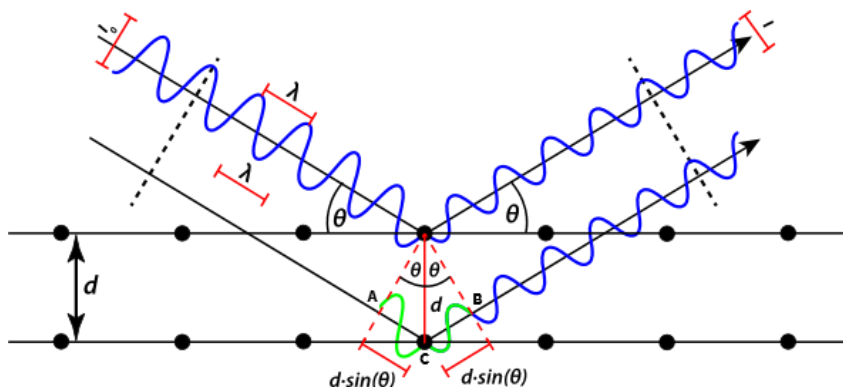
$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (1)$$

λ – vlnová dĺžka (n - celé číslo, ktoré reprezentuje násobok vlnovej dĺžky)

d – vzdialenosť rovín kryštalografickej mriežky

θ – uhol difrakcie

n – číslo reprezentujúce násobok vlnovej dĺžky



Obr. 5.23 Schéma Braggovej difrakčnej podmienky (Šajgalík, 2019)

Pre hodnotenie stavu zvyškových napätí vo vzorkách vyrobených aditívnym procesom bola vykonaná röntgenová difrakcia na povrchu vzoriek vo viacerých bodoch, ktoré boli určené na základe vykonanej simulácie. Na meranie zvyškových napätí bol použitý stroj Proto iXRD (Obr. 5.24).

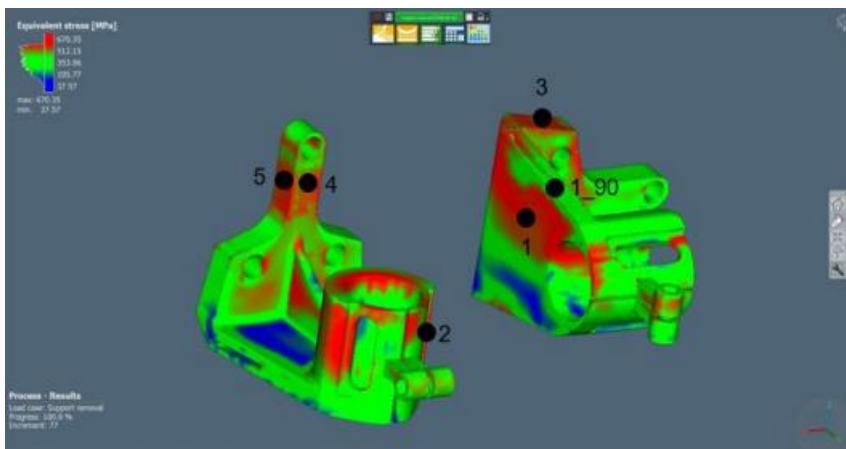
Tab. 5 Parametre röntgenovej difraktometrie

Parameter	Hodnota
Röntgenová trubica	<u>Mn_K</u> (α)
Filter	Cr
Priemer <u>kolimátora</u>	3 mm
Vstupné napätie	20 kV
Prúd	4 <u>mA</u>
β oscilácia	3
Počet uhlových polôh	15 ($\pm 30^\circ$)
Hĺbka prieniku	10 <u>μm</u>



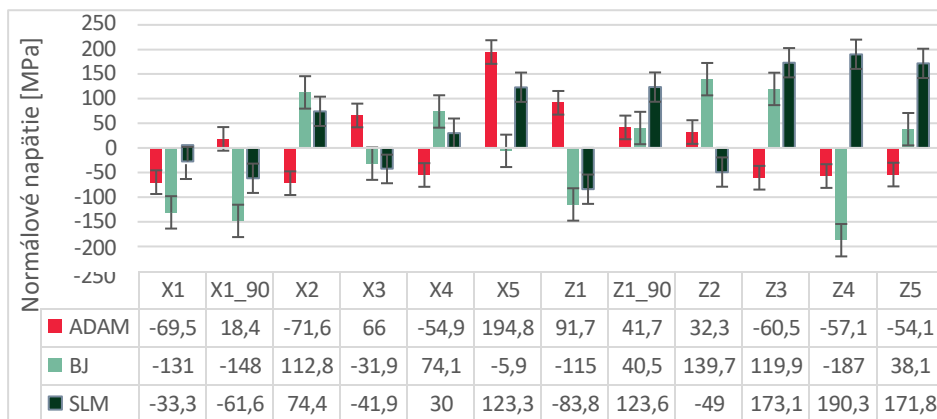
Obr. 5.24 Zariadenie Proto iXRD určené na meranie zvyškových napätí (vľavo), meranie zvyškových napätí na aditívne vyrobenej vzorke (vpravo)

Merania boli uskutočnené na každej vzorke v šiestich bodoch, pričom merané oblasti boli zvolené a identifikované na základe simulácie v programe Simufact Additive, ktorá umožňuje predikovať vznik napätí po samotnej aditívnej výrobe (Obr. 3.25). V prípade bodu 1 bolo možné zmerať zvyškové napätia aj pri otočení dielu o 90° (1_90). Zvyškové napätia pri aditívnej výrobe sa tvoria najmä z dôvodu rýchleho ochladzovania a zahrievania, čo je špecifické pre technológiu SLM, ktorá v rámci výrobného procesu zahŕňa rýchle lokálne zahrievanie a následné ochladzovanie, čo vedie k tepelným gradientom (tuhnutie a tvrdnutie materiálu). Vyrobene časti tuhnú rôznymi rýchlosťami, čo spôsobuje vznik napätí. Vzniknuté napätia sa rovnako kumulujú s napätiami, ktoré sú viazané v predchádzajúcich vrstvách. V procesoch aditívnej výroby sa tvoria rôzne fyzikálne a chemické reakcie a tepelné zmeny počas pridávania jednotlivých vrstiev zväčša vedú k tepelnej rozťažnosti a zmrašťovaniu stuhnutého tkaniva, čím vznikajú vysoké úrovne zvyškového napätia.



Obr. 3.25 Simulácia napätí pri aditívnej výrobe

Meranie zvyškových napätí prebehlo vo viacerých smeroch, pričom môžeme konštatovať, že hodnoty zvyškových napätí sú v každom smere rozdielne. Výsledky však môžu byť ovplyvnené aj tým, že röntgenový lúč narazil na nanášané vrstvy, príp. do pórovitej oblasti. Graf (Obr. 3.26) znázorňuje interpretáciu hodnôt zvyškových napätí v jednotlivých bodoch vyrobených dielov so zahrnutými odchýlkami, ktoré znázorňujú rovnomernosť rozloženia zvyškových napätí v meraných oblastiach, pričom nižšia hodnota predstavuje vyššiu rovnomernosť. Najnižšia hodnota zvyškových napätí bola nameraná pri vzorke BJ Z v bode 4, ktorá dosiahla hodnotu -187,5 MPa, naopak najväčšiu hodnotu dosiahla vzorka ADAM X v bode X5, kde bola nameraná hodnota 194,8 MPa. Z grafu je tiež možné vidieť, že vo vzorkách prevládajú prevažne ťahové napätia, ktoré vznikajú v dôsledku rýchlejšieho ochladzovania materiálu a lokálnych gradientov teploty počas procesu aditívnej výroby. Je možné pozorovať aj viacero oblastí s tlakovými napätiami, ktoré sa objavujú v oblastiach, kde dochádza k pomalšiemu tuhnutiu, zmrašťovaniu a v miestach kde sa materiál na povrchu stláča počas tuhnutia z dôvodu vnútorných napätí.



Obr. 3.26 Namerané hodnoty zvyškových napätí v jednotlivých bodoch

Z nameraných výsledkov je možné skonštatovať, že technológia ADAM dosahuje len malé zvyškové napätia na rozdiel od technológie BJ a SLM. Namerané hodnoty sú kolísavé, pričom môžeme pozorovať aj kladné aj záporné hodnoty zvyškových napätí, čo však úzko súvisí s orientáciou vzorky pri meraní. Pri SLM technológií vznikli pri vzorke Z výrazné tlakové napätia, čo môže byť spôsobené zmenou vrstvenia pri samotnej aditívnej výrobe. Parametre aditívnej výroby, počet vrstiev a rýchlosť nanášania jednotlivých vrstiev môžu mať vysoký vplyv na rôznorodosť zvyškových napätí vo vzorkách. Predpokladom pred samotným meraním bolo, že zvyškové napätia budú mať prevažne tlakový charakter, čo sa potvrdilo vykonaním experimentu.

S cieľom dosiahnutia tlakových napätí, ktoré pozitívne vplyvajú na pevnosť dielu je dôležité ešte pred samotnou výrobou optimalizovať parametre aditívnej výroby ako napr. rýchlosť nanášania vrstiev, hrúbka vrstvy, orientácia stavby a iné. Ďalším spôsobom je dodatočné tepelné spracovanie ako napr. žiňanie, ktoré zabezpečí uvoľnenie zvyškových napätí v komponente. Rovnako môžu napomôcť správne nastavené podporné štruktúry, ktoré môžu pomôcť pri rovnomernom ochladzovaní a znižovaní deformácií. Pred samotným aditívnym procesom je rovnako vhodné vykonať simulácie, ktoré dokážu predikovať rozloženie zvyškových napätí a napomôžu optimalizovať proces ešte pred samotnou výrobou.

3.8 Analýza nákladov

Nasledujúca podkapitola poskytuje porovnanie vybraných faktorov a ekonomických ukazovateľov pre výrobu dielov aditívnym procesom vybranými technológiami. Cieľom je identifikovať a porovnať rôzne nákladové faktory z dôvodu určenia ekonomickej efektívnosti v rôznych výrobných smeroch aditívnej výroby. V tabuľke (Obr. 3.27) sú spracované ekonomické porovnania aditívnej výroby použitých technológií v rámci experimentálnej časti.

Použitá technológia	SLM	BJ	ADAM
Materiál	316L	316L	17-4 PH
Hrúbka vrstvy (mm)	0,05	0,065	0,125
Rýchlosť stavby (mm/s)	650	100	120
Celkový čas stavby súčiastok (h)	19	12	43
Minimálna doba čistenia (h)	3	1	38
Spekanie (h)	0	24	26
Cena zariadenia (eur)	650 000	650 000	200 000
Celková cena za súčiastky (eur)	750 eur	820 eur	900 eur

Obr. 3.27 Ekonomické a časové porovnanie použitých technológií

Porovnanie zahŕňa celkové náklady, produktivitu a čas potrebný na výrobu samotných dielov. Dôležitým rozdielom medzi jednotlivými technológiami je použitý materiál. Z dôvodu nedostupnosti materiálu antikorošnej ocele 316 L pri technológii ADAM, bol použitý iný materiál, konkrétne antikorošná oceľ 17-4 PH. Z hľadiska časovej efektivity je najrýchlejšou technológiou SLM. Výroba experimentálnych dielov vyžaduje približne 19h. Ide o kratší časový interval, pretože technológia SLM nevyžaduje spekanie, čo výrazne skracuje výrobný čas dielov. Samotné spekanie predlžuje výrobný čas pri technológii BJ a ADAM o jeden deň. Z ekonomického hľadiska bola najlacnejšia technológia SLM, kde pri zohľadnení všetkých parametrov (cena energií, mzda pracovníka, materiál)

bola cena 750 eur za vzorky v oboch orientáciách. Technológia ADAM predstavuje najdrahšie riešenie, kedy diel v oboch orientáciách vyšiel na 900 eur. Pri dopyte priemyselných spoločností o aditívne zariadenie na výrobu kovových dielov sa z hľadiska ceny javí ako najlepšie riešenie technológia ADAM, ktorej zariadenie stojí 200 000eur.

4 Prínosy práce

Katedra OVT na Žilinskej univerzite v Žiline sa ako jedna z mála univerzít na Slovensku a v Českej republike zaoberá kovovou aditívnou výrobou. Predkladaná práca nadväzuje na výskumné aktivity, ktoré sa na katedre realizujú od roku 2020, kedy bol uskutočnený prvý výskum, kde sa porovnávali dve technológie SLM a ADAM. Na základe tejto výskumnej činnosti bolo na univerzite vytvorené Laboratórium aditívnej výroby, kde bolo obstarané nové aditívne zariadenie pre výrobu kovových súčiastok technológiou ADAM.

4.1 Prínosy pre vedu a teóriu

Prínosom pre vedu a teóriu sú nové poznatky a identifikácia potenciálnych aditívnych technológií na kovovej báze. Realizovaný výskum bol vykonaný na antikorošnej oceli 316L, príp. jej ekvivalente 17-4PH. Bol zistený vplyv jednotlivých technológií na drsnosť povrchu, zvyškové napätia, rozmerovú presnosť. Práca ponúka vhodný základ pre ďalší vývoj v oblasti aditívnej výroby s potenciálom ovplyvniť budúce metódy spracovania kovov a rozšírenia ich využitia v priemyselných aplikáciách. Vytvára sa tak platforma pre skúmanie účinkov aditívnych technológií na rôzne druhy materiálov, čím sa podporuje výskum a vývoj efektívnejších a kvalitnejších výrobných procesov.

4.2 Prínosy pre prax

V súčasnosti je kladený vo výrobných podnikoch vysoký dôraz na kvalitu vyrobených dielov a časovú výhodnosť a efektívnosť. Výrobné podniky čoraz viac čelia výzvam týkajúcim sa efektívneho využitia a dostupnosti ich výrobných kapacít. Aditívna výroba predstavuje rýchlu a efektívnu alternatívu tradičným technológiám.

Dizertačná práca ponúka prehľad vhodných a perspektívnych technológií aditívnej výroby na kovovej báze určených najmä pre použitie v priemysle. Prínosom práce pre priemyselnú prax je komplexná analýza týchto technológií, ktorá prináša prehľad o dostupnosti aditívnej výroby pre potenciálne uplatnenie v priemyselných podnikoch. Aditívna výroba javí veľký potenciál najmä pre rýchlu výrobu prototypových dielov, pri výrobe náhradných dielov,

príp. pri dieloch so špecifickými požiadavkami a komplexnou geometriou. Vykonaná analýza uľahčí priemyselným podnikom výber vhodnej technológie pre ich konkrétnu praktickú aplikáciu.

5 Záver

Cieľom dizertačnej práce bolo priniesť a analyzovať nové poznatky v oblasti aditívnej výroby na báze kovov rôznymi výrobnými technológiami. Vzhľadom na to, že sa jedná o nový technologický proces výroby, odborníci a užívatelia týchto zariadení prezentujú rôzne názory na to, ktorá z týchto technológií je najvhodnejšia pre praktické využitie pri priemyselnej výrobe.

Dizertačná práca obsahuje teoretickú časť, ktorá zdôrazňuje dôležitosť a potenciál aditívnej výroby v rámci priemyslu. Zároveň poskytuje prehľad literárnych poznatkov a predchádzajúcich experimentálnych výskumov, čo umožňuje lepšie pochopenie stavu poznania tejto oblasti. Experimentálna časť dáva odpoveď na vhodnosť využitia jednotlivých technológií. Pozostáva z rozsiahlej analýzy vybraných metód aditívnej výroby technológiami SLM, BJ a ADAM. Súčiastky boli navrhnuté a vyrobené v dvoch orientáciách v osiach X a Z z dôvodu nájdenia najlepšieho riešenia uloženia komponentu na stavebnej platforme. Dôležitou súčasťou v úvode experimentu bolo nasimulovať jednotlivé fázy procesu výroby, ktoré ukázali potenciálny výskyt deformácií a napätí v nasimulovanom diele. Simulácia slúžila na predikciu týchto stavov a na zoptimalizovanie výrobného procesu. Po vyrobení dielov nasledovala vizuálna analýza, na základe ktorej bol zvolený diel ADAM X, ktorý disponuje najlepším tvarom a povrchom. Následne bola vykonaná verifikácia rozmerových charakteristík pomocou optickej metódy, kde boli porovnávané rozmerové odchýlky medzi navrhnutým modelom a reálne vyrobeným dielom. Najväčšie rozmerové nepresnosti boli namerané pri súčiastke BJ X (s rozmerovou odchýlkou +2,46 mm), najmenšie boli dosiahnuté pri komponente ADAM Z (s rozmerovou odchýlkou +0,33 mm). Získané výsledky bolo potrebné následne overiť pomocou dotykovej metódy. Geometrické odchýlky boli merané z dôvodu prejavov príslušnej chyby a nedostatky aditívnej výroby z hľadiska funkčnosti. Dotyková metóda potvrdzuje namerané výsledky optickou metódou, kedy technológia ADAM dosiahla pri meraní geometrických odchýlok

rovinnosti, valcovitosti a kolmosti najlepšie výsledky. Drsnosť povrchu bola meraná pomocou optického meracieho mikroskopu, pričom najlepšiu integritu povrchu dosiahla vzorka ADAM Z. Posledným hodnotiacim kritériom bolo zisťovanie napätostných stav v dieloch po aditívnej výrobe. Simulácia určila miesta, kde dochádza k výskytu zvyškových napätí. Na základe tejto simulácie boli analyzované vybrané oblasti pomocou röntgenového difraktometra, pričom z výsledkov je možné konštatovať, že vo vzorkách prevládajú predovšetkým tlakové napätia, ktoré majú pozitívny vplyv na pevnostné charakteristiky vyrobených dielov. Analýza nákladov bola vyhodnotená na základe dvoch kritérií. Z hľadiska nákladov na výrobu experimentálnej súčiastky vychádza najlepšie technológia SLM, kedy vyrobené diely v oboch orientáciách vyšli na 750 eur. Z hľadiska obstarávacej ceny zariadenia je vhodným výberom technológia ADAM, kedy vstupná investícia na nové zariadenie predstavuje 200 000 eur.

Z experimentálneho hodnotenia pevnosti, mechanických vlastností, kvality povrchu, rozmerovej presnosti a náročnosti technologického procesu sa javí technológia ADAM ako najperspektívnejšia. Táto technológia predstavuje vhodné riešenie pre viaceré priemyselné aplikácie. Technológia ADAM vyniká schopnosťou vytvárať extrémne rovné povrchy, čo je kľúčové pre priemyselné aplikácie vyžadujúce vysokú presnosť a kvalitu povrchov.

Rozhodnutie o výbere technológie závisí od konkrétnej súčiastky. Pri výrobe tenkostenných súčiastok vychádza ako spoľahlivé riešenie technológia SLM, ktorá je zároveň efektívna z hľadiska výrobného času, nakoľko nie je potrebné dodatočné spekanie. Technológia BJ predstavuje efektívne riešenie pri výrobe väčšieho množstva komponentov v rámci jedného výrobného cyklu. Technológia ADAM sa javí výhodná z dôvodu odľahčených dielov prostredníctvom vnútornej štruktúry, ktorá umožňuje výrobu odľahčených dielov s vysokou presnosťou.

Dizertačná práca poskytuje vhodný východzí bod pre ďalší výskum v tejto oblasti s cieľom hlbšieho poznania parametrov aditívnej výroby a jednotlivých technológií. Pre budúci vývoj sa odporúča zahrnúť do výskumu aj výrobné

podniky, ktoré môžu identifikovať potenciálne oblasti uplatnenia týchto technológií v priemyselnom sektore.

Najdôležitejšie literárne zdroje riešenej problematiky

Ahangar, P., Cooke, M. E., Weber, M. H., Rosenzweig, D. H. 2019. Current biomedical applications of 3D printing and additive manufacturing. *Applied Sciences*. 1. apríl 2019, Zv. 9, 8.

Akessa, A. a kol. 2022. Investigations of microstructure and mechanical properties of 17-4 PH ss printed by MarkForged metal X. 2022.

Bastola, N., Jahan, M. P., Rangasamy, N., Rakurty, C. S. 2023. A review of the residual stress generation in metal additive manufacturing: Analysis of cause, measurement, effects, and prevention. 2023, Zv. 14, 7.

Bordón, P., Paz, R., & Monzón, M. D. 2022. Evaluation of the Performance of Atomic Diffusion Additive Manufacturing Electrodes in Electrical Discharge Machining. 2022, Zv. 15, 17.

Czan, A., Czanova, T., Holubjak, J., Novak, M., Czanova, N., Czan, A., Krisak, D. 2024. Analysis of the Basic Characteristics of the Working Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing ADAM Process by Comparison with the Selective Laser Melting SLM Process. 2024, Zv. 24, 1, s. 15-27.

DeRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Zhang, W. 2018. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018, Zv. 92, 112-224.

Galati, M., Minetola, P. 2019. Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. 2019, Zv. 12, 24.

Gel'atko, M., Hatala, M., Botko, F., Vandžura, R., Hajnýš, J., Šajgalík, M., Török, J. 2023. Stress Relieving Heat Treatment of 316L Stainless Steel Made by Additive Manufacturing Process. *Materials*. 2023, Zv. 16, 19.

Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. 2021. *Additive manufacturing technologies*. Switzerland : Springer, 2021.

Kedziora, S., Decker, T., Museyibov, E., Morbach, J., Hohmann, S., Huwer, A., Wahl, M. 2022. Strength Properties of 316L and 17-4 PH Stainless Steel Produced with Additive Manufacturing. 2022, Zv. 15, 18.

Kumar, P., Jayaraj, R., Suryawanshi, J., Satwik, U. R., McKinnell, J., Ramamurty, U. 2020. Fatigue strength of additively manufactured 316L austenitic stainless steel. 2020, Zv. 199, s. 225-239.

Měsíček, J., Čegan, T., Ma, Q. P., Halama, R., Skotnicová, K., Hajnýš, J., Pagáč, M. 2022. Effect of artificial aging on the strength, hardness, and residual stress of SLM AlSi10Mg parts prepared from the recycled powder. 2022, Zv. 855.

Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Chmielus, M. 2020. Binder jet 3D printing—Progress in Materials Science: Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. 2020.

Mugwagwa, L., Yadroitsev, I., & Matope, S. 2019. Effect of process parameters on residual stresses, distortions, and porosity in selective laser melting of maraging steel 300. *Metals*. 9, 2019, Zv. 10, s. 1042.

Timko, P., Holubjak, J., Bechný, V., Novák, M., Czán, A., Czánová, T. 2023. Surface Analysis and Digitization of Components Manufactured by SLM and ADAM Additive Technologies. *Manufacturing Technology*. 2023, Zv. 23, 1, s. 127-134.

Wang, L., Jiang, X., Zhu, Y., Zhu, X., Sun, J., Yan, B. 2018. An approach to predict the residual stress and distortion during the selective laser melting of AlSi10Mg parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, Zv. 97, s. 3535-3546.

Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Bernat, J. 2024. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. 2024, Zv. 24, 9, s. 2668.

ANOTÁCIA

Dizertačná práca sa zaoberá výskumom aditívnych technológií pre kovovú väzbu na báze ocelí pri výrobe komponentov automobilového priemyslu. Teoretická časť práce obsahuje zhrnutie poznatkov z literatúry, ako aj z doteraz vykonaných experimentálnych výskumov. Experimentálna časť zahŕňa komplexnú analýzu vybraných metód aditívnej výroby kovových súčiastok, kde sú vyhodnotené, porovnané a rozanalyzované tri metódy aditívnej výroby na kovovej báze: SLM, BJ, ADAM s cieľom priniesť nové poznatky a výskumné výstupy, ktoré uľahčia výrobným podnikom výber vhodnej aditívnej technológie pre konkrétnu špecifickú požiadavku. Analyzované a porovnávané sú mechanické a fyzikálne vlastnosti a integrita povrchu vyrobených dielov. Cieľom dizertačnej práce, a zároveň vedeckým prínosom, je podporiť rozvoj a vývoj nových technológií kovovej aditívnej výroby na báze ocelí pri priemyselných aplikáciách. Výsledky tejto štúdie môžu napomôcť k zvýšeniu efektivity výroby, zvýšeniu kvality vyrobených produktov a rozšíreniu možností výroby geometricky zložitých komponentov.

RESUMÉ

The dissertation thesis deals with the research of additive technologies for metal bonding based on steels in the production of automotive components. The theoretical part provides a summary of findings from existing literature and previous experimental investigations. The experimental part presents a comprehensive analysis of selected methods of metal additive manufacturing, focusing on three promising methods: SLM, BJ, ADAM. These methods are evaluated, compared and analyzed to generate new insights and research

outcomes that will assist manufacturing companies in selecting the appropriate additive technology for specific requirements. The mechanical and physical properties and surface integrity of the manufactured parts are analyzed and compared. The dissertation aims to contribute scientifically by supporting the development and evolution of new steel-based metal additive manufacturing technologies for industrial applications. The results of this study may help to increase production efficiency, improve the quality of manufactured products, and expand the possibilities for manufacturing geometrically complex components.