

ŽILinskÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2026

Ing. Andrej Czán



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Andrej Czán

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Výskum v oblasti aditívnych technológií pre kovovú väzbu na báze oceli

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„**philosophiae doctor**“, v skratke „**PhD.**“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Automatizované výrobné systémy

Žilina 2026

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

Predkladateľ: Ing. Andrej Czán
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra obrábania a výrobných techník

Školiteľ: doc. Ing. Mário Drbúl, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra obrábania a výrobných techník

Oponenti:

1. prof. Ing. Juraj Beniák, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta
Ústav výrobného inžinierstva a kvality produkcie
Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava
2. prof. Ing. Peter Demeč, CSc.
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta
Katedra výrobných techník a robotiky
Letná 1/9, 042 00 Košice sever
3. Ing. Juraj Martinček, PhD.
MAR Sučany
Priemyselná 1940/14, 038 52 Sučany

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 31.8.2026 o 9:30 hod. v miestnosti PP122 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. Robert Čep, PhD. v. r.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

Vývoj hospodárstva a konkurencieschopnosti krajín je výrazne ovplyvňovaný spoločenskými, ekonomickými a technologickými faktormi, ktoré reflektujú meniace sa požiadavky trhu a potreby koncových používateľov. Dôležitú úlohu v tomto procese zohráva inovačná politika, ktorej cieľom je identifikovať perspektívne oblasti rozvoja a podporovať ich prostredníctvom vhodných nástrojov výskumu, vývoja a transferu technológií. Na základe analýzy potenciálu jednotlivých regiónov vznikajú stratégie zamerané na podporu oblastí s vysokou pridanou hodnotou a schopnosťou dlhodobého rastu. Medzi takéto dokumenty patrí aj Stratégia inteligentnej špecializácie Slovenskej republiky (RIS3 SR).

Stratégia RIS3 SR vytvára rámec pre rozvoj inovácií a technologického pokroku s cieľom posilniť konkurencieschopnosť Slovenska na národnej aj regionálnej úrovni. Je založená na princípe inteligentnej špecializácie, ktorý podporuje efektívne využívanie existujúcich znalostí, výskumného potenciálu a priemyselných kapacít jednotlivých regiónov. Hlavným cieľom je vytvárať podmienky pre udržateľný hospodársky rast, podporu inovatívnych podnikov a vznik nových pracovných príležitostí. Predkladaná dizertačná práca nadväzuje na priority tejto stratégie a zameriava sa na oblasť aditívnej výroby, ktorá patrí medzi progresívne výrobné technológie s vysokým inovačným potenciálom.

Aditívna výroba v posledných rokoch významne ovplyvnila spôsob navrhovania a výroby technických produktov. Vďaka princípu postupného vytvárania súčiastok po jednotlivých vrstvách poskytuje vysokú mieru konštrukčnej voľnosti a umožňuje realizovať geometrie, ktoré sú tradičnými výrobnými metódami len ťažko vyrobiteľné. Hoci boli tieto technológie pôvodne vyvíjané predovšetkým pre potreby rýchleho prototypovania a reverzného inžinierstva, ich súčasný vývoj smeruje k výrobe funkčných komponentov a malosériovej produkcii. Mimoriadny význam pritom získava najmä kovová aditívna výroba, ktorá umožňuje produkciu tvarovo zložitých súčiastok z moderných konštrukčných materiálov pri zachovaní požadovaných mechanických vlastností.

Dizertačná práca je zameraná na hodnotenie rozmerovej presnosti a kvality povrchu komponentov vyrobených technológiou kovovej aditívnej výroby. Teoretická časť obsahuje prehľad súčasného stavu poznania v oblasti aditívnych technológií a charakteristiku vybraných výrobných postupov. Experimentálna časť sa venuje analýze vyrobenej série vzoriek, pričom sledované sú najmä rozmerové charakteristiky, kvalita povrchu a ďalšie vlastnosti ovplyvňujúce výslednú kvalitu výrobkov. Získané poznatky poskytujú podklady pre lepšie pochopenie správania kovových aditívnych technológií a ich efektívnejšie využitie v priemyselnej praxi.

1 ADITÍVNA VÝROBA Z KOVOVÝCH MATERIÁLOV

Aditívna výroba patrí medzi najvýznamnejšie inovácie v oblasti moderných výrobných technológií. Jej rozvoj priniesol nový prístup k navrhovaniu a výrobe komponentov, ktorý umožňuje realizovať geometricky zložité súčiastky s vysokou mierou konštrukčnej voľnosti. V porovnaní s tradičnými výrobnými postupmi poskytuje efektívnejšie využitie materiálu, skracuje čas potrebný na vývoj výrobkov a umožňuje ekonomickú výrobu malých sérií aj individuálne prispôbených komponentov [1,2].

Význam aditívnej výroby neustále rastie vďaka rozširujúcemu sa portfóliu spracovateľných materiálov a technologickému pokroku výrobných zariadení. Napriek tomu zostávajú predmetom intenzívneho výskumu otázky zvyšovania produktivity, optimalizácie výrobných procesov a dosahovania vyššej rozmerovej presnosti pri zachovaní priaznivých výrobných nákladov [3].

Medzi prvé komerčne využívané technológie patrila stereolitografia (SLA), ktorá významne prispela k rozvoju rýchleho prototypovania a otvorila priestor pre ďalšie smerovanie aditívnej výroby [4]. Následne boli vyvinuté ďalšie technológie, medzi ktoré patrí aj technológia extrúzie materiálu (Fused Deposition Modeling (FDM)). Vďaka jednoduchej obsluhu, širokej dostupnosti materiálov a priaznivým prevádzkovým nákladom sa táto technológia stala jednou z najrozšírenejších metód aditívnej výroby a našla uplatnenie v mnohých priemyselných odvetviach [5].

S postupným technologickým vývojom sa pozornosť výrobcov a výskumných pracovísk začala presúvať od spracovania polymérnych materiálov k výrobe kovových komponentov. Tento trend bol podmienený rastúcimi požiadavkami na výrobu funkčných dielov s vysokými mechanickými vlastnosťami, rozmerovou presnosťou a dlhodobou prevádzkovou spoľahlivosťou. Významný rozvoj preto zaznamenali technológie kovovej aditívnej výroby, medzi ktoré patrí najmä technológia selektívneho laserového natavovania (Selective Laser Melting (SLM)). Táto technológia umožňuje výrobu vysoko presných kovových súčiastok so zložitou geometriou, ktoré nachádzajú uplatnenie predovšetkým v leteckom, automobilovom, energetickom a medicínskom priemysle [2, 6].

Dynamický rozvoj aditívnej výroby vytvára predpoklady na jej čoraz širšie uplatnenie vo výrobe funkčných komponentov. Neustále zdokonaľovanie výrobných technológií, materiálov a softvérových nástrojov zároveň prispieva k zvyšovaniu kvality, spoľahlivosti a ekonomickej efektívnosti výrobných procesov.

2 AKTUÁLNY STAV KOVOVÝCH ADITÍVNYCH TECHNOLOGIÍ

Kovová aditívna výroba zahŕňa dve základné skupiny technológií, a to priame aditívne technológie a nepriame technológie založené na procese spekania. Rozdiel medzi nimi spočíva predovšetkým v spôsobe dosiahnutia finálnych vlastností vyrábaného dielca. Pri priamych technológiách dochádza k taveniu a spájaniu kovového materiálu priamo počas procesu výroby, pričom výsledný komponent je vytváraný vrstvu po vrstve až do jeho konečnej podoby. Takto vyrobený diel je spravidla pripravený na použitie alebo vyžaduje iba minimálne dokončovacie operácie. Naproti tomu nepriame technológie pozostávajú z viacerých výrobných krokov. Po vytvorení základného tvaru dielca nasleduje proces spekania, počas ktorého sa dosahujú požadované mechanické vlastnosti, hustota materiálu a pevnosť výrobku [16].



Obrázok 2.1 Prehľad jednotlivých aditívnych technológií a foriem materiálov vstupujúcich do procesu

Priame technológie kovovej aditívnej výroby si v mnohých priemyselných odvetviach získali významné postavenie vďaka schopnosti vyrábať zložité komponenty s vysokou presnosťou a bez potreby rozsiahlych dodatočných operácií. Ich výhodou je najmä efektívne prepojenie návrhu a výroby do jedného výrobného procesu. Napriek dosiahnutému pokroku však zostáva dôležitou súčasťou ďalší výskum zameraný na optimalizáciu procesných parametrov, zvyšovanie kvality vyrábaných dielov a zlepšovanie spoľahlivosti výrobných systémov. Rastúci záujem o tieto technológie zároveň podporuje rozširovanie ich priemyselného využitia a dostupnosti na trhu [16].

Nepriame technológie založené na spekaní predstavujú alternatívny prístup ku kovovej aditívnej výrobe. Ich popularita rastie predovšetkým vďaka možnosti dosahovať vyššiu produktivitu a nižšie výrobné náklady pri väčších objemoch produkcie. Hoci tento segment zatiaľ nedosiahol úroveň rozšírenia typickú pre priame technológie, ponúka značný potenciál pre sériovú výrobu kovových komponentov. Z tohto dôvodu sa výrobcovia a dodávatelia čoraz viac orientujú na vývoj riešení určených pre rozsiahle priemyselné aplikácie, kde môže využitie spekania priniesť významné časové aj ekonomické úspory v porovnaní s tradičnými výrobnými postupmi [16].

2.1 Atómová difúzia aditívnej výroby

V rámci realizovaného výskumu bolo zvolené zariadenie Markforged Metal X, ktoré využíva technológiu ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) určenú na výrobu kovových súčiastok [21]. Táto technológia predstavuje moderný prístup ku kovovej aditívnej výrobe a umožňuje vytváranie komponentov s vysokou rozmerovou presnosťou, zložitou geometriou a dobrými mechanickými vlastnosťami [13]. Vďaka svojim možnostiam nachádza uplatnenie pri výrobe funkčných dielov, prototypov aj konštrukčných komponentov určených pre priemyselné využitie.

Princíp technológie ADAM je založený na ukladaní materiálu vrstvu po vrstve prostredníctvom tlačovej hlavy, pričom sa využívajú dva typy materiálov. Základný kovový materiál slúži na vytváranie samotného dielca, zatiaľ čo pomocný keramický materiál je určený na tvorbu separačnej vrstvy podporných štruktúr [13]. Kombinácia týchto materiálov umožňuje efektívnu výrobu geometricky náročných súčiastok, ktoré by bolo komplikované realizovať pomocou konvenčných výrobných postupov [29]. Podporné štruktúry zabezpečujú stabilitu vyrábaného komponentu počas procesu tlače a zároveň prispievajú k zachovaniu požadovanej presnosti výsledného výrobku [21].

Podpery sú navrhnuté tak, aby po skončení procesu výroby bolo možné ich oddelenie bez poškodenia vyrobenej súčiastky [13]. To zabezpečuje keramický materiál slúžiaci ako separačná vrstva vďaka čomu sa dajú podpery po skončení celého procesu bezpečne odstrániť. Ich úlohou je podopierať previsy, tenkostenné časti a ďalšie kritické oblasti súčiastky, pri ktorých by mohlo dôjsť k deformáciám alebo strate geometrickej presnosti [21]. Po ukončení výrobného procesu vzniká tzv. „zelený diel“ (green part), ktorý pozostáva z kovového prášku viazaného polymérnym spojivom. Tento medzistupeň ešte nedisponuje požadovanými mechanickými vlastnosťami a vyžaduje následné spracovanie [29].



Obrázok 2.2 Zariadenie Markforged Metal X [21]

Po dokončení výrobného procesu nasleduje etapa odstraňovania spojiva, ktorá sa realizuje v zariadení Markforged Wash-1 (obrázok 2.3). Úlohou tejto fázy je odstrániť časť polymérneho spojiva obsiahnutého v kovovom filamente, ktoré počas tlače zabezpečuje súdržnosť kovových častíc. Zníženie množstva spojiva je nevyhnutné pre úspešnú realizáciu následného procesu spekania a dosiahnutie požadovaných vlastností finálneho výrobku [21].

Proces čistenia prebieha v špeciálnom roztoku počas niekoľkých hodín. Počas tejto operácie dochádza k postupnému rozpúšťaniu spojiva z vyrobenej súčiastky, pričom čistiace médium preniká do vnútorných dutín a geometricky zložitých oblastí súčiastky [29] Výsledkom je tzv. „hnedý diel“ (*brown part*), ktorý je pripravený na ďalšie spracovanie vo vákuovej peci.

Nasledujúcou a zároveň záverečnou etapou výrobného procesu je spekanie (sintrovanie). Počas tejto operácie je súčiastka vystavená vysokým teplotám v sintrovacom zariadení, kde dochádza k odstráneniu zvyšného spojiva a k difúznemu spojeniu kovových častíc [21]. V dôsledku tohto procesu vzniká kompaktný kovový diel s požadovanou hustotou a mechanickými vlastnosťami. Sintrovanie predstavuje rozhodujúci krok, ktorý premieňa diel vyrobený pomocou technológie Metal X na plnohodnotný funkčný komponent pripravený na ďalšie využitie v priemyselnej praxi [13].



Obrázok 2.3 zariadenie Markforged WASH-1 [21]

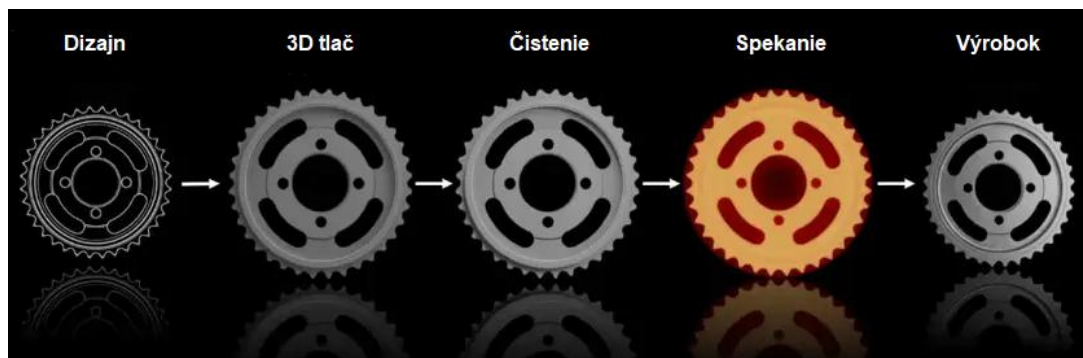
Zariadenie Sinter-2 zobrazené na obrázku 2.4 slúži na realizáciu procesu Sintrovania, ktorý predstavuje záverečnú fázu technológie ADAM. Do pece sa vkladá súčiastka v stave „brown part“, ktorá po procese odstraňovania spojiva obsahuje prevažne kovový prášok s minimálnym množstvom zvyškového spojiva. Počas sintrovania je súčiastka vystavená presne riadenému teplotnému cyklu v ochrannej atmosfére argónu, ktorá zabráňuje nežiadúcej oxidácii materiálu pri vysokých teplotách [21].



Obrázok 2.4 Zariadenie Markforged SINTER-2 [21]

V priebehu ohrevu dochádza k postupnému odstráneniu zvyšného spojiva a následne k zblížovaniu jednotlivých kovových častíc [13]. Vplyvom vysokej teploty sa medzi nimi aktivujú difúzne procesy, ktoré spôsobujú ich vzájomné spojenie a vytvorenie kompaktného kovového dielca [21]. Počas tejto fázy zároveň dochádza k zmršťovaniu súčiastky, s ktorým sa počíta už pri návrhu modelu a príprave výrobných dát.

Po dosiahnutí požadovanej teploty nasleduje riadené ochladzovanie, ktorého úlohou je zabezpečiť stabilizáciu materiálovej štruktúry a minimalizovať vznik vnútorných napätí. Výsledkom procesu je kovová súčiastka s finálnymi rozmermi a vlastnosťami pripravená na odstránenie podporných štruktúr a prípadné dokončovacie operácie. Znázornenie celého procesu je zobrazené na obrázku 2.5 [29].



Obrázok 2.5 Proces tvorby súčiastky pomocou technológie Markforged Metal X

3 CIEĽ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je analyzovať a vyhodnotiť vplyv vybraných technologických a konštrukčných parametrov na rozmerovú presnosť komponentov vyrobených technológiou kovovej aditívnej výroby ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) realizovanou prostredníctvom systému Markforged Metal X. Výskum je zameraný na identifikáciu vzťahov medzi orientáciou súčiastky, veľkosťou modelu, hrúbkou steny a hrúbkou vrstvy a ich vplyvom na výsledné rozmerové charakteristiky vyrábaných komponentov.

Na dosiahnutie stanoveného cieľa bola navrhnutá experimentálna vzorka umožňujúca hodnotenie rozmerovej presnosti v rôznych orientáciách vzhľadom na súradnicový systém X, Y a Z, vrátane plôch s pozitívnym a negatívnym sklonom. Návrh vzorky zohľadňuje špecifiká vrstveného spôsobu výroby a umožňuje sledovať vplyv smeru ukladania materiálu na jednotlivé merané plochy. Experimenty boli realizované na vzorkách rôznych rozmerov a s rozdielnou hrúbkou steny, pričom boli súčasne aplikované viaceré úrovne výšky vrstvy s cieľom komplexne posúdiť ich vzájomný vplyv na dosahovanú presnosť výroby.

Dôležitou súčasťou práce je vytvorenie metodiky hodnotenia rozmerovej presnosti kovových súčiastok vyrobených technológiou ADAM a následné spracovanie získaných dát pomocou štatistických metód. Na vyhodnotenie experimentálnych výsledkov budú využité princípy plánovania experimentov (DOE), regresné modelovanie a optimalizačné nástroje umožňujúce identifikovať významnosť jednotlivých faktorov a ich interakcií. Výsledkom bude stanovenie technologických parametrov, ktoré najvýznamnejšie ovplyvňujú rozmerovú presnosť vyrábaných komponentov.

Práca sa zároveň zameriava na posúdenie možností využitia technológie ADAM pri výrobe funkčných kovových dielov s dôrazom na požiadavky priemyselnej praxe. Získané poznatky umožnia lepšie pochopiť správanie sa technológie pri výrobe geometricky náročných súčiastok a prispejú k efektívnejšiemu nastavovaniu výrobných parametrov. Výstupy práce môžu slúžiť ako podklad pre optimalizáciu výrobných procesov, zvyšovanie kvality vyrábaných komponentov a rozšírenie využívania kovovej aditívnej výroby v strojárskom, automobilovom, leteckom a ďalších priemyselných odvetviach.

4 VÝBER TECHNOLOGIE PRE EXPERIMENT

4.1 Technológia použitá pri experimente

Pre potreby experimentálnej časti dizertačnej práce bola zvolená technológia ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) vyvinutá spoločnosťou Markforged. Táto technológia patrí medzi moderné metódy kovovej aditívnej výroby a umožňuje produkciu súčiastok s vysokou geometrickou zložitou, dobrou rozmerovou presnosťou a priaznivými mechanickými vlastnosťami. V porovnaní s konvenčnými výrobnými technológiami poskytuje možnosť vytvárať zložité vnútorné štruktúry a tvarovo náročné prvky, ktorých výroba by bola tradičnými metódami technologicky komplikovaná alebo ekonomicky nevýhodná.

Experimentálny výskum bol zameraný na hodnotenie kvality povrchu a rozmerovej presnosti súčiastok vyrobených technológiou ADAM. Uvedené charakteristiky patria medzi najdôležitejšie ukazovatele kvality aditívne vyrábaných komponentov, pretože významne ovplyvňujú ich funkčnosť, montážnu presnosť a prevádzkovú spoľahlivosť. Požiadavky na dosahovanie vysokej rozmerovej presnosti a vhodnej kvality povrchu sú obzvlášť dôležité v oblastiach automobilového, leteckého a zdravotníckeho priemyslu, kde aj malé geometrické odchýlky môžu negatívne ovplyvniť výsledné vlastnosti výrobku.

Hlavným cieľom experimentov bolo analyzovať vplyv orientácie súčiastky počas procesu výroby na sledované parametre kvality. Hodnotené boli plochy vytvorené v smeroch zodpovedajúcich súradnicovým osiam X, Y a Z, pričom osobitná pozornosť bola venovaná aj plochám s pozitívnym a negatívnym sklonom. Takýto prístup umožnil podrobnejšie posúdiť vplyv smeru vrstvenia materiálu na výslednú topografiu povrchu a rozmerové charakteristiky vyrábaných dielov. Keďže pri aditívnej výrobe môže orientácia modelu významne ovplyvniť priebeh tvorby vrstiev, tvorbu podporných štruktúr aj následné tepelné spracovanie, predpokladá sa jej významný vplyv na výslednú kvalitu výrobku.

Na dosiahnutie stanovených cieľov bola navrhnutá experimentálna súčiastka obsahujúca sústavu referenčných plôch orientovaných v základných smeroch súradnicového systému, ako aj plochy s rôznymi uhlovými odchýlkami. Takto navrhnutá geometria umožnila vytvoriť dostatočný počet meracích oblastí s rozdielnymi podmienkami výroby a poskytla reprezentatívne údaje pre následnú analýzu. Výsledky experimentov umožnili vyhodnotiť vzájomný vzťah medzi orientáciou súčiastky a dosiahnutou kvalitou povrchu, rozmerovou presnosťou a geometrickou stabilitou vyrábaných komponentov. Získané poznatky zároveň vytvárajú predpoklady pre optimalizáciu technologických parametrov a efektívnejšie využitie technológie ADAM v priemyselnej praxi.

4.2 Materiál použitý pri experimente

Pre experimentálne overenie vplyvu technologických parametrov na rozmerovú presnosť a rovinnosť experimentálnych vzoriek bol zvolený materiál 17-4PH (Precipitation Hardening Stainless Steel). Výber materiálu bol podmienený jeho širokým využitím v priemyselnej praxi, predovšetkým v leteckom, energetickom, automobilovom a strojárskom priemysle, kde sa vyžaduje kombinácia vysokej pevnosti, dobrej koróznej odolnosti a rozmerovej stability. Materiál 17-4PH patrí medzi precipitačne vytvrdzované nehrdzavejúce ocele, ktoré dosahujú svoje vysoké mechanické vlastnosti nielen vďaka chemickému zloženiu, ale aj prostredníctvom tepelného spracovania. Počas procesu vytvrdzovania dochádza k tvorbe jemných legujúcich častíc v štruktúre materiálu, ktoré obmedzujú pohyb dislokácií v kryštalickej mriežke. Výsledkom je zvýšenie pevnosti a tvrdosti materiálu pri zachovaní priaznivej odolnosti voči korózii a dobrej rozmerovej stabilite.

Z pohľadu aditívnej výroby predstavuje daný materiál jeden z najčastejšie používaných kovových materiálov pre technológiu ADAM, pričom výrobca Markforged poskytuje pre tento materiál stabilné a dlhodobo overené technologické parametre. Vzhľadom na jeho rozsiahle priemyselné uplatnenie a vhodnosť pre výrobu funkčných komponentov bol materiál 17-4PH vyhodnotený ako vhodný kandidát na realizáciu experimentov zameraných na hodnotenie rozmerovej presnosti vyrábaných experimentálnych vzoriek.

Tabuľka 4.1 - Chemické zloženie materiálu 17-4PH

Zloženie	Prvok	Obsah (%)
Oceľ 17-4PH	Chróm (Cr)	15-17,5
	Nikel (Ni)	3-5,1
	Meď (Cu)	3-5,1
	Mangán (Mn)	max. 1
	Kremík (Si)	max. 1
	Niób (Nb)	0,15-0,45
	Fosfor (P)	max. 0,04
	Uhlík (C)	max. 0,07

Vďaka kombinácii priaznivých mechanických vlastností a vysokej koróznej odolnosti patrí oceľ 17-4PH medzi významné konštrukčné materiály využívané v moderných výrobných technológiách a priemyselných aplikáciách, kde sú kladené vysoké požiadavky na spoľahlivosť a životnosť komponentov. Materiál 17-4PH sa vyznačuje vysokou pevnosťou, dobrou odolnosťou voči opotrebeniu, korózii a zvýšeným prevádzkovým teplotám. Zároveň je vhodný pre rôzne výrobné procesy vrátane zvarovania, obrábania a aditívnej výroby. Jeho vlastnosti je možné ďalej zlepšovať

prostredníctvom tepelného spracovania a povrchových úprav, čo rozširuje možnosti jeho využitia [21]. V rámci systému Metal X patrí vlákno 17-4PH medzi najpoužívanejšie materiály určené pre aditívnu výrobu kovových súčiastok. Vyznačuje sa priaznivými vlastnosťami počas spracovania a dobrou flexibilitou, čo prispieva k jednoduchej manipulácii a stabilnému priebehu výrobného procesu.



Obrázok 4.1 Materiál 17-4PH navinutý na cievke

Počas vývoja technológie Metal X boli pre materiál 17-4PH postupne zavedené dve generácie materiálu označované ako verzia 1 (V1) a verzia 2 (V2). Verzia V1 predstavovala pôvodné riešenie určené pre výrobu kovových súčiastok technológiou ADAM. Na základe praktických skúseností a ďalšieho vývoja bola následne predstavená verzia V2, ktorá priniesla optimalizované materiálové vlastnosti ako zvýšenú flexibilitu materiálu pri manipulácii, vyššiu stabilitu výrobného procesu a lepšiu opakovateľnosť výsledkov. V súčasnosti je verzia V2 štandardne využívaná pri výrobe funkčných komponentov s dôrazom na kvalitu a spoľahlivosť výsledných dielov.

5 NÁVRH A VÝROBA EXPERIMENTÁLNYCH VZORIEK

5.1 Konceptia experimentálnej vzorky

Koncept experimentálnej vzorky vychádzal z požiadavky analyzovať vplyv orientácie súčiastky vzhľadom na jednotlivé osi súradnicového systému X, Y a Z. Pri aditívnej výrobe je známe, že výsledné vlastnosti vyrábaných komponentov sú významne ovplyvnené spôsobom vrstvenia materiálu a orientáciou modelu v pracovnom priestore zariadenia. V dôsledku vrstveného charakteru výroby môžu v rôznych smeroch vznikáť odlišné geometrické a rozmerové charakteristiky, ktoré je potrebné zohľadniť pri hodnotení presnosti vyrobených súčiastok.[47]

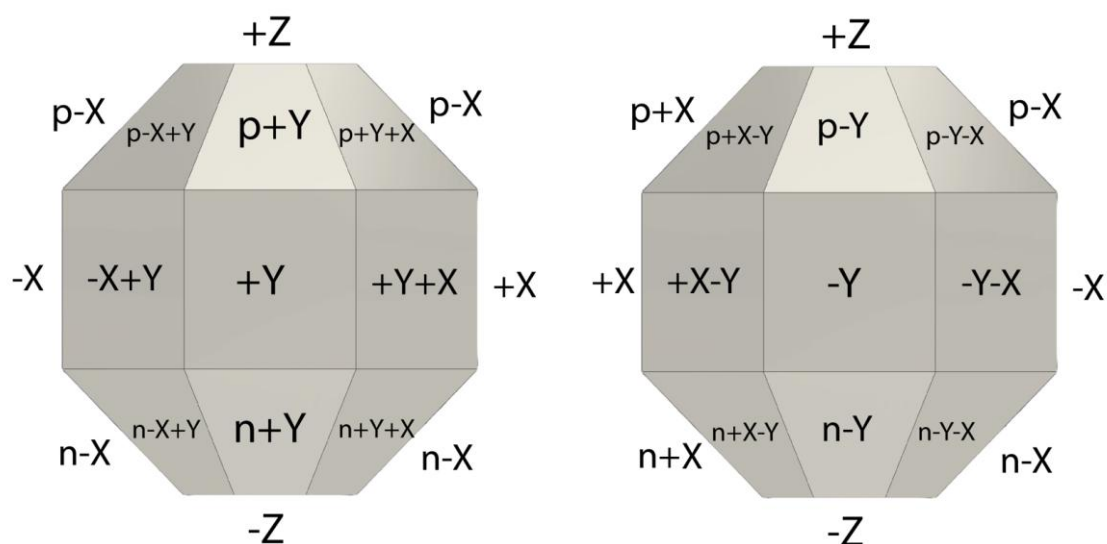


Obrázok 5.1 Referenčná vzorka pre hodnotenie orientácie v rovine XY a výsledky povrchovej analýzy aj s vyhotovením [39]

V odbornej literatúre sa nachádza množstvo referenčných vzoriek určených na hodnotenie schopnosti aditívnych technológií reprodukovat' jemné detaily, zložité geometrie alebo rozmerovo náročné prvky [38, 47]. Tieto vzorky spravidla obsahujú kombináciu vonkajších a vnútorných geometrických prvkov, ktoré umožňujú posudzovať kvalitu výroby z rôznych hľadísk. Príklad takejto referenčnej vzorky je uvedený na obrázku 5.1. Jedná sa o vzorku ktorá diagnostikuje kapilaritu pri výrobnom procese, ktorá slúžila ako základ pri návrhu experimentálnych vzoriek použitých pri experimente.

Napriek širokému využitiu existujúcich referenčných modelov ich geometria často neumožňuje systematické vyhodnotenie vplyvu jednotlivých orientácií modelu a smerov ukladania vrstiev na výsledné charakteristiky súčiastky [39]. Takto navrhnutá referenčná vzorka poskytuje vhodné podmienky na analýzu rozmerovej presnosti a opakovateľnosti výroby v jednotlivých smeroch vrstvenia. Jej obmedzením však zostáva skutočnosť, že umožňuje hodnotenie iba v dvojrozmernom priestore, pričom nezohľadňuje vplyv naklonených plôch ani orientácií mimo roviny XY [47].

Referenčná vzorka určená na hodnotenie vplyvu orientácie v rovine XYZ bola navrhnutá tak, aby umožňovala analyzovať správanie súčiastky pri rôznych smeroch ukladania vrstiev. Geometria modelu vychádza z pravidelného osemuholníka, ktorého jednotlivé steny sú orientované do smerov X, Y, a Z pričom jednotlivé strany boli označované podľa tejto orientácie tak aby bolo možné odsledovať správanie sa jednotlivých smerov pri technológii Metal X. Strany boli označené ako Y, YX, X, XY, -Y, -YX, -X, -XY, strany ktoré boli pod pozitívnym alebo negatívnym sklonom boli označené pridaním indexu p- pozitívny sklon a n-negatívny sklon (pY, pYX, pX, pXY, -pY, -pYX, -pX, -pXY, nY, nYX, nX, nXY, -nY, -nYX, -nX, -nXY). Vrchná a spodná plocha bola označená podľa osi Z ako +Z a -Z. Takéto usporiadanie umožňuje sledovať vplyv orientácie vzorky na jej výslednú rozmerovú presnosť, pričom môžu byť jednotlivo identifikované vertikálne horizontálne alebo diagonálne smery (obrázok 5.3).

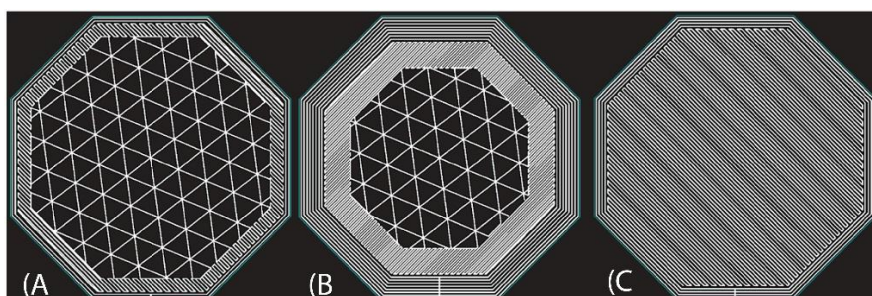


Obrázok 5.3 Označovanie jednotlivých strán experimentálnych vzoriek

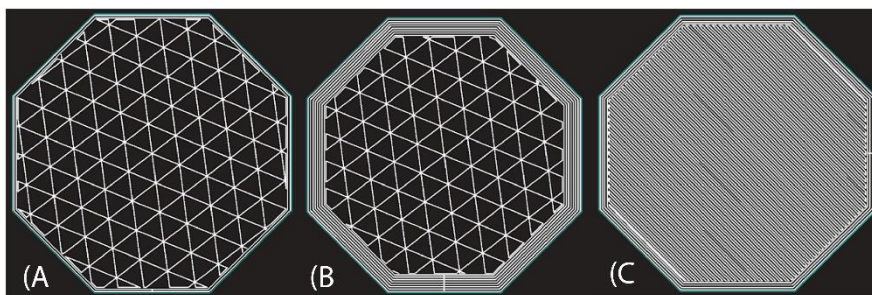
Model je tvorený ôsmimi rovnako veľkými stranami, ktoré vytvárajú symetrickú geometriu zabezpečujúcu porovnateľné podmienky pre všetky analyzované smery. V smere osi Z je vzorka ohraničená dvojicou navzájom rovnobežných plôch, pričom základný tvar telesa zostáva po celej výške zachovaný. Vďaka tejto konfigurácii je možné eliminovať vplyv geometrickej asymetrie a sústrediť sa predovšetkým na hodnotenie účinku orientácie v rovine XY.

Na zabezpečenie jednoznačnej identifikácie boli všetky experimentálne vzorky označované podľa materiálu, z ktorého boli vyrobené, menovitého rozmeru, hrúbky steny a použitej výšky vrstvy ako napríklad 17-4PH 15mm 0,127 (2-4), kde 17-4PH je materiál, 15mm menovitý rozmer 0,127 výška vrstvy a (2-4) je hrúbka steny. Takto vytvorený systém označovania umožnil jednoduchú orientáciu medzi jednotlivými experimentálnymi variantmi a ich jednoznačnú identifikáciu počas vyhodnocovania výsledkov.

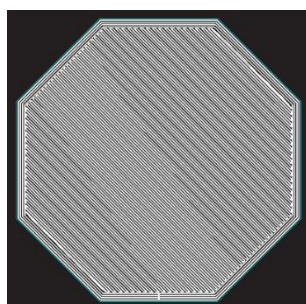
S cieľom analyzovať vplyv jednotlivých parametrov súčiastky na rozmerovú presnosť boli experimentálne vzorky vyrobené vo viacerých veľkostných variantoch. Pre experiment boli zvolené rozmery 15mm, 30mm, 45mm a 60mm (obrázok 5.4), ktoré umožnili sledovať správanie technológie ADAM pri výrobe súčiastok rôznych rozmerov. Takto navrhnutý rozsah veľkostí poskytol dostatočný priestor na identifikáciu prípadných zmien rozmerovej presnosti v závislosti od veľkosti vyrábaného dielu. V rámci experimentu boli použité tri úrovne výšky vrstvy. Základné nastavenie predstavovala hrúbka 0,127mm, ktorú systém odporúča ako optimálny kompromis medzi časom výroby a kvalitou súčiastky. Ďalej bola použitá hrúbka 0,169mm (Turbo), určená na zrýchlenie výrobného procesu za cenu možného zníženia presnosti detailov. Poslednou úrovňou bola hrúbka 0,084mm (Fine), ktorá umožňuje presnejšiu reprodukciu geometrických prvkov a vyššiu úroveň detailov, avšak za cenu dlhšieho výrobného času.



Obrázok 5.5 Experimentálne vzorky vo variante A) 0,169mm 2-8, B) 0,169mm (8-16), C) 0,169mm (Solid).



Obrázok 5.6 Experimentálne vzorky vo variante A) 0,127mm (2-4), B) 0,127mm (8-16), C) 0,127mm (Solid).



Obrázok 5.7 Experimentálna vzorka vo variante s plnou výplňou (Solid) 0,084mm Fine

6 MEDZINÁRODNÝ STUPEŇ IT PRESNOSTI

6.1 Príprava vzoriek a meracích zariadení

Rozmerové merania experimentálnych vzoriek boli realizované pomocou kalibrovaného digitálneho odchýlkomera Mahr MarCator 1087 R (obrázok 6.1), ktorý je určený na presné meranie lineárnych rozmerov a rozmerových odchýlok. Prístroj meria v presnosti 0,001mm (1 μ m), čo umožňuje zaznamenávať aj veľmi malé rozmerové zmeny vznikajúce počas procesu výroby a následného sintrovania. Pred začiatkom merania bol odchýlkomer kalibrovaný a nulový bod meracieho systému bol nastavený pomocou certifikovaných koncových mierok, čím sa zabezpečila požadovaná presnosť a opakovateľnosť merania.

Merania boli vykonávané v metrologickom laboratóriu spoločnosti Volkswagen Slovakia, závod Martin, za kontrolovaných laboratórnych podmienok. Pred začiatkom experimentu boli všetky vzorky ponechané počas 24 hodín v meracom prostredí s cieľom dosiahnuť ich teplotnú stabilizáciu a eliminovať vplyv teplotných zmien na výsledky merania.



Obrázok 6.1 Digitálny odchýlkomer Mahr MarCator 1087 R a magnetický držiak použitý pri experimente

6.2 Metodika stanovenia stupňa IT presnosti

Požadovanú úroveň rozmerovej presnosti pri technológiách aditívnej výroby je možné hodnotiť pomocou systému International Tolerance Grade (IT) definovaného normou ISO 286-1. Jednotlivé IT triedy určujú veľkosť tolerančného poľa, teda maximálnu prípustnú odchýlku skutočného rozmeru od jeho menovitej hodnoty pre vnútorné aj vonkajšie rozmery. Norma ISO 286-1 definuje celkovo 20 stupňov tolerancie (IT01, IT0 až IT18), pričom nižšie číslo IT triedy predstavuje vyššiu úroveň presnosti

a menšie tolerančné pole [47]. Naopak, vyššie IT triedy zodpovedajú väčším prípustným odchýlkam a nižším požiadavkám na presnosť výroby.

Pri návrhu súčiastky je možné na základe menovitého rozmeru a požadovanej tolerancie určiť príslušnú IT triedu a následne posúdiť, či je zvolená výrobná technológia schopná požadovanú presnosť dosiahnuť. Veľkosť tolerančného poľa sa vypočíta podľa vzťahov definovaných normou ISO 286-1, kde T predstavuje toleranciu vyjadrenú v mikrometroch (μm), D geometrický stredný rozmer v milimetroch (mm) a IT príslušný stupeň tolerancie [47].

$$T = 10^{0.2 \times (ITG - 1)} \times (0.45 \times \sqrt[3]{D} + 0.001 \times D) \quad (6.1)$$

Jednotlivé stupne medzinárodnej tolerancie (IT) predstavujú klasifikáciu rozmerovej presnosti, ktorú je možné dosiahnuť konkrétnym výrobným procesom. Zaradenie výrobného procesu do príslušného stupňa IT umožňuje posúdiť jeho schopnosť vyrábať súčiastky s požadovanou rozmerovou presnosťou. Vo všeobecnosti platí, že nižší stupeň IT predstavuje vyššiu výrobnú presnosť a menšie tolerančné pole, zatiaľ čo vyšší stupeň IT zodpovedá väčším prípustným odchýlkam a nižším požiadavkám na presnosť výroby [48].

6.3 Vyhodnotenie experimentu zameraného na IT presnosť

Na experimentálnych vzorkách boli sledované rozmerové odchýlky medzi navzájom rovnobežnými plochami. Celkovo bolo hodnotených 13 dvojíc plôch vytvorených na 26-stranovej experimentálnej vzorke. Menovitá vzdialenosť medzi meranými plochami bola v závislosti od veľkostného varianty vzorky 15mm, 30mm, 45mm a 60mm. Tolerancie pre jednotlivé rozmery boli stanovené podľa normy ISO 2768 so stanovenou triedou tolerancie mK uvedenej vo výkresovej dokumentácii.

Pre každú dvojicu rovnobežných plôch bolo vykonaných päť meraní v krajných bodoch a v strede plochy. Následne bola z nameraných hodnôt vypočítaná priemerná hodnota použitá na ďalšie spracovanie a vyhodnotenie výsledkov experimentu.

Tabuľka 6.2 - Namerané hodnoty pre vzorku 17-4PH 15mm 0,127 (2-4) a ich spracovanie

Plocha	Meranie 1 [mm]	Meranie2 [mm]	Meranie3 [mm]	Meranie4 [mm]	Meranie stred [mm]	Menovitý rozmer [mm]	Tolerancia $\pm$ [mm]	HMR (+0,3) [mm]	DMR (-0,3) [mm]
Y	15,021	14,993	15,02	14,995	14,998	15	0,1	15,1	14,9
YX	14,947	14,962	14,983	14,984	14,978	15	0,1	15,1	14,9
X	15,047	15,025	15,022	15,044	15,034	15	0,1	15,1	14,9
XY	14,834	14,83	14,839	14,832	14,84	15	0,1	15,1	14,9
pY	15,057	15,045	15,048	15,063	15,062	15	0,1	15,1	14,9
pYX	15,137	15,135	15,087	15,105	15,099	15	0,1	15,1	14,9
pX	15,25	15,249	15,208	15,195	15,224	15	0,1	15,1	14,9
pXY	15,043	15,056	15,03	15,03	15,043	15	0,1	15,1	14,9
nY	15,08	15,089	15,05	15,023	15,062	15	0,1	15,1	14,9
nYX	15,079	15,078	15,059	15,06	15,08	15	0,1	15,1	14,9
nX	15,111	15,098	15,072	15,073	15,113	15	0,1	15,1	14,9
nXY	15,024	15,032	15,021	15,025	15,035	15	0,1	15,1	14,9
Z	15,253	15,277	15,261	15,271	15,25	15	0,1	15,1	14,9
Spolu celkom	15,068	15,067	15,054	15,054	15,063	15,000	0,100	15,100	14,900

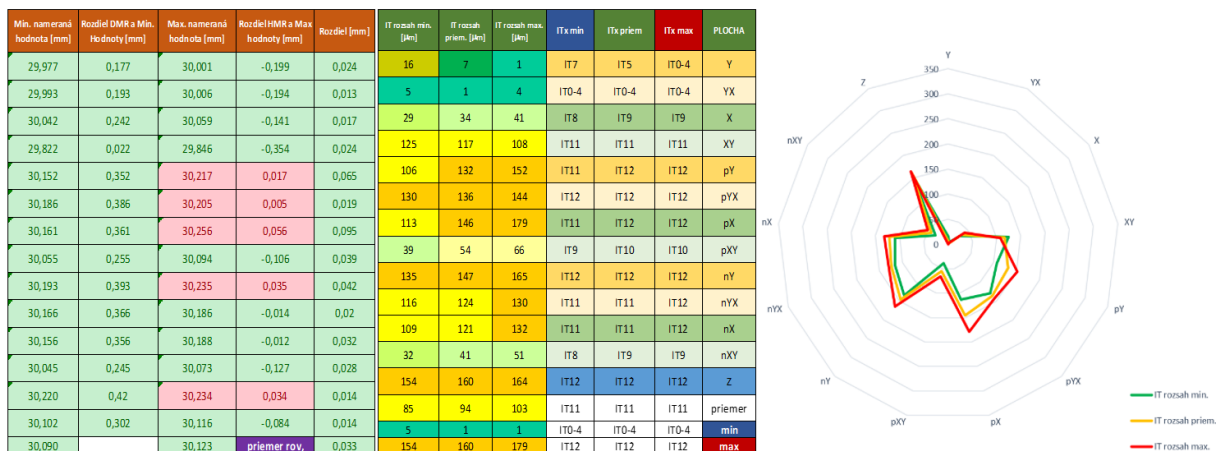
Tabuľka 6.3 - Namerané hodnoty pre vzorku 17-4PH 15mm 0,127 (2-4) a ich spracovanie

Min. nameraná hodnota [mm]	Rozdiel DMR a Min. Hodnoty [mm]	Max. nameraná hodnota	Rozdiel HMR a Max hodnoty [mm]	Rozdiel [mm]	Menovitý rozmer [mm]	Faktor štandardnej tolerancie "i"	Priem. nameraná hodnota [mm]	odchýlka min. [µm]	odchýlka priem. [µm]	odchýlka max. [µm]	IT rozsah min. [µm]	IT rozsah priem. [µm]	IT rozsah max. [µm]	ITx min	ITx priem	ITx max	PLOCHA
14,993	0,093	15,021	-0,079	0,028	15	1,125	15,005	-7	5	21	6	5	19	IT5	IT0-4	IT7	Y
14,947	0,047	14,984	-0,116	0,037	15	1,125	14,971	-53	-29	-16	47	26	14	IT9	IT8	IT7	YX
15,022	0,122	15,047	-0,053	0,025	15	1,125	15,034	22	34	47	20	31	42	IT7	IT8	IT9	X
14,830	-0,07	14,840	-0,26	0,01	15	1,125	14,835	-170	-165	-160	151	147	142	IT12	IT12	IT12	XY
15,045	0,145	15,063	-0,037	0,018	15	1,125	15,055	45	55	63	40	49	56	IT9	IT9	IT10	pY
15,087	0,187	15,137	0,037	0,05	15	1,125	15,113	87	113	137	77	100	122	IT10	IT11	IT11	pYX
15,195	0,295	15,250	0,15	0,055	15	1,125	15,225	195	225	250	173	200	222	IT12	IT12	IT13	pX
15,030	0,13	15,056	-0,044	0,026	15	1,125	15,040	30	40	56	27	36	50	IT8	IT9	IT9	pXY
15,023	0,123	15,089	-0,011	0,066	15	1,125	15,061	23	61	89	20	54	79	IT7	IT10	IT10	nY
15,059	0,159	15,080	-0,02	0,021	15	1,125	15,071	59	71	80	52	63	71	IT10	IT10	IT10	nYX
15,072	0,172	15,113	0,013	0,041	15	1,125	15,093	72	93	113	64	83	100	IT10	IT11	IT11	nX
15,021	0,121	15,035	-0,065	0,014	15	1,125	15,027	21	27	35	19	24	31	IT7	IT8	IT8	nXY
15,250	0,35	15,277	0,177	0,027	15	1,125	15,262	250	262	277	222	233	246	IT13	IT13	IT13	Z
15,054	0,154	15,068	-0,032	0,014	15	1,125	15,061	80	91	103	71	81	92	IT10	IT10	IT11	priemer
15,044		15,076	priemer rov.	0,032							6	5	14	IT5	IT0-4	IT7	min
											222	233	246	IT13	IT13	IT13	max

Namerané údaje získané z jednotlivých meraní boli následne spracované s cieľom určiť dosahovanú IT presnosť technológie ADAM. V rámci analýzy boli sledované odchýlky nameraných rozmerov od menovitých hodnôt a zároveň bola vyhodnocovaná ich maximálna a minimálna medza rozmeru vzhľadom na stanovené tolerančné pole $\pm 0,2\text{mm}$. Na základe priemerných nameraných hodnôt bola pre jednotlivé rozmery vypočítaná odchýlka od menovitého rozmeru, určený tolerančný rozsah a následne stanovený príslušný stupeň presnosti IT. Súčasťou hodnotenia bolo aj určenie faktora štandardnej tolerancie „i“, ktorý slúži ako základ pre výpočet IT tried podľa normy ISO 2768.

Analýza bola vykonaná pre všetky merané plochy experimentálnych vzoriek, pričom boli porovnávané minimálne, priemerné a maximálne hodnoty dosiahnutých tolerančných rozsahov. Získané výsledky boli následne spracované a prezentované formou polárnych grafov, ktoré umožňujú vzájomné porovnanie dosahovanej presnosti v jednotlivých parametroch a pri rôznych rozmerových

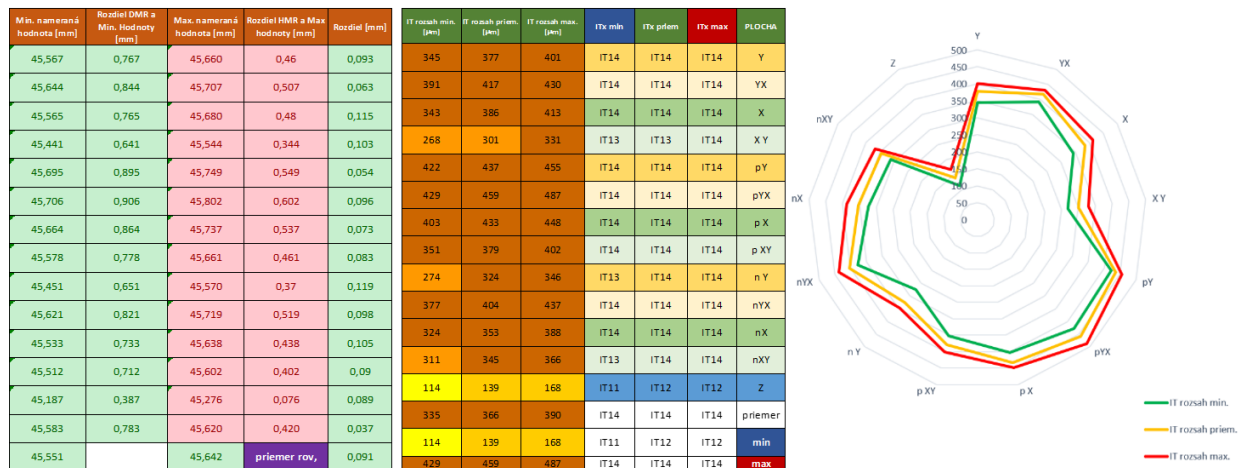
variantoch experimentálnych vzoriek. Taktiež poskytujú informácie o tom ktorá z meraných plôch vykazovala najväčšie odchýlky od menovitého rozmeru.



Obrázok 6.4 Namerané a spracované hodnoty pre vzorku 17-4PH 30mm 0,127 (2-4) s ich grafickým spracovaním

Obrázok 6.4 znázorňuje výsledky zistených rozmerovej experimentálnej vzorky 17-4PH 30mm 0,127 (2-4) s menovitým rozmerom 30mm vrátane hodnotenia dosiahnutej presnosti technológie ADAM. V ľavej časti sú uvedené namerané rozmery, ktorých hodnoty sa pohybujú v intervale približne od 29,822mm do 30,256mm. Rozsah medzi minimálnymi a maximálnymi hodnotami jednotlivých meraní dosahuje približne 0,013mm až 0,095mm, čo poukazuje na variabilitu rozmerov v závislosti od orientácie meranej plochy. Stredná časť obsahuje výsledky výpočtu tolerančných rozsahov a príslušných IT tried podľa normy ISO 286. Zistené stupne presnosti sa pohybujú približne od IT4 do IT12, pričom vypočítané tolerančné polia nadobúdajú hodnoty od približne 1µm do 179µm.

V pravej časti je zobrazený polárny graf, ktorý poskytuje vizuálne porovnanie minimálnych, priemerných a maximálnych hodnôt tolerančných rozsahov pre jednotlivé merané orientácie. Takéto grafické spracovanie umožňuje jednoduchšie identifikovať oblasti s vyššími rozmerovými odchýlkami a zároveň posúdiť rovnomernosť dosahovanej presnosti v rámci celej vzorky. Spomedzi všetkých analyzovaných vzoriek s menovitým rozmerom 30mm dosiahla táto konfigurácia najlepšie výsledky z hľadiska rozmerovej IT presnosti.



Obrázok 6.9 Namerané a spracované hodnoty pre vzorku 17-4PH 45mm 0,169 (Solid) TURBO s ich grafickým spracovaním

Na obrázku 6.9 sú zobrazené výsledky hodnotenia rozmerovej presnosti vzorky 17-4PH 45mm 0,169 (Solid) TURBO s menovitým rozmerom 45mm vyrobenú technológiou ADAM. V tabuľkovej časti sú uvedené namerané hodnoty jednotlivých rozmerov, ktoré sa pohybujú približne od 45,187mm do 45,802mm. Rozsah medzi minimálnymi a maximálnymi hodnotami jednotlivých meraní dosahuje približne 0,037mm až 0,119mm, čo dokumentuje rozdielnu úroveň rozmerových odchýlok v závislosti od orientácie meraných plôch. Súčasťou vyhodnotenia je aj výpočet tolerančných rozsahov a zaradenie výsledkov do príslušných IT tried podľa normy ISO 286. Hodnoty tolerančných polí sa pohybujú približne od 114µm do 487µm, pričom väčšina analyzovaných plôch dosahuje presnosť na úrovni IT13 až IT14. Priaznivejšie výsledky boli zaznamenané pri orientácii Z, kde sa tolerančné rozsahy pohybovali približne v intervale 114µm až 168µm, čo zodpovedá triedam IT11 až IT12.

Polárny graf v pravej časti obrázka poskytuje porovnanie minimálnych, priemerných a maximálnych hodnôt tolerančných rozsahov pre jednotlivé orientácie plôch. Celkovo výsledky naznačujú, že väčšina meraných plôch dosahuje vyššie rozmerové hodnoty. Táto konfigurácia dosiahla spomedzi všetkých analyzovaných variantov najvyššie rozmerové odchýlky, čo sa prejavilo aj najmenej priaznivými hodnotami IT presnosti.

7 SPRACOVANIE EXPERIMENTÁLNYCH DÁT METÓDOU DOE

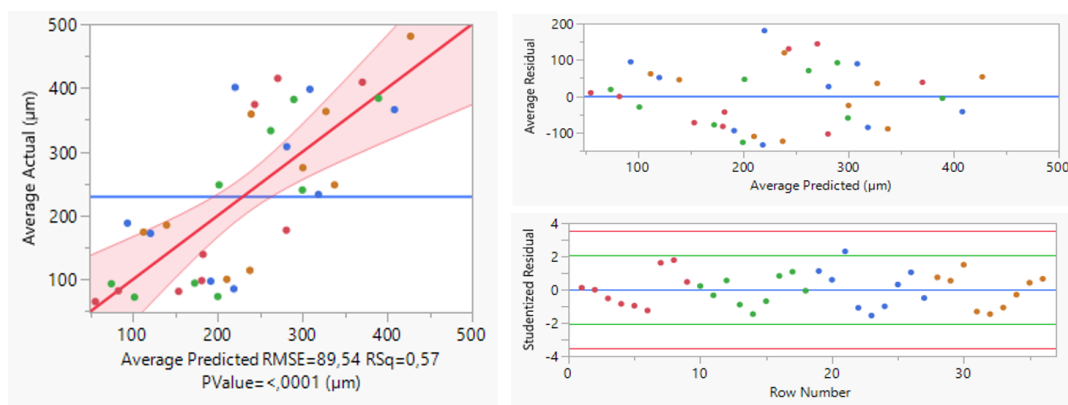
7.3 Komplexná analýza spriemerovaných dát z hľadiska rozmerov

Pre potreby jednoznačnejšieho štatistického vyhodnotenia bol z nameraných hodnôt jednotlivých experimentálnych variantov vypočítaný aritmetický priemer, ktorý reprezentoval výslednú hodnotu sledovanej veličiny. Hodnoty boli analyzované samostatne pre rozmerovú presnosť a rovinnosť daných experimentálnych vzoriek. Na základe takto pripravených dát boli vytvorené regresné modely a realizovaná analýza významnosti jednotlivých faktorov. Cieľom bolo určiť mieru vplyvu parametrov veľkosti (Size), hrúbky steny (Wall) a výška vrstvy (Layer) na sledované charakteristiky. Samostatné hodnotenie oboch veličín umožnilo podrobnejšie porovnať správanie sa jednotlivých faktorov. Zároveň bolo možné identifikovať parametre, ktoré majú najvýraznejší vplyv na dosahovanú rozmerovú presnosť a rovinnosť vyrábaných komponentov.

Source	Logworth	PValue
Layer(0,081,0,169)	4,888	0,00001
Wall(2,30)	3,047	0,00090
Size	0,782	0,16524

Obrázok 7.33 Jednotlivé faktory spriemerovaných hodnôt a ich štatistická významnosť z hľadiska rozmerov

Tabuľka súhrnu vplyvov faktorov (Effect Summary) pre vplyv na výsledné rozmery vzoriek preukázala, že najvýznamnejší vply má faktor výška vrstvy (Layer) ($p = 0,00001$), nasledovaný faktorom hrúbka steny (Wall) ($p = 0,00090$).



Obrázok 7.34 Regresné grafy spriemerovaných hodnôt plôch z hľadiska rozmerov

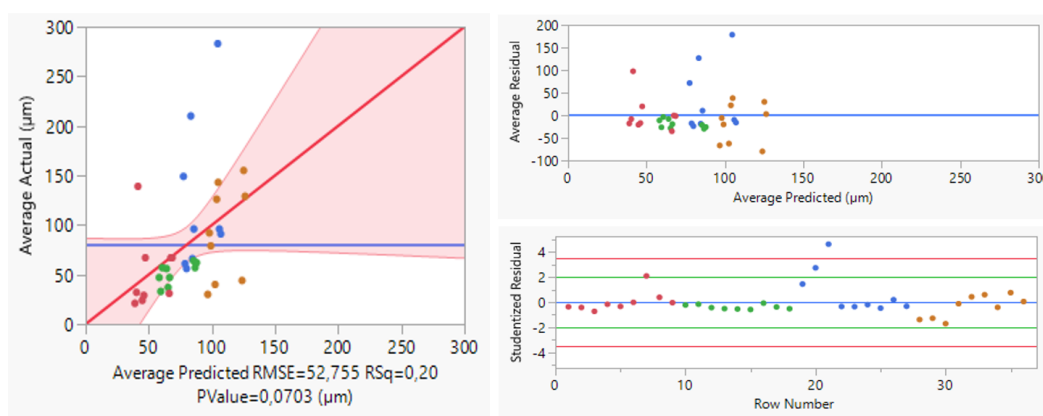
Výsledky regresnej analýzy potvrdili, že zvolené technologické parametre významne ovplyvňujú rozmerovú presnosť experimentálnych vzoriek vyrobených technológiou ADAM. Vytvorené regresné modely umožnili identifikovať štatisticky významné faktory, posúdiť ich vzájomný vplyv a určiť ich význam pri formovaní sledovaných charakteristík. Diagnostické grafy zároveň preukázali, že väčšina modelov dosahovala uspokojivú kvalitu a poskytovala spoľahlivú predikciu experimentálnych výsledkov, hoci pri niektorých odpovediach boli zaznamenané odchýlky naznačujúce obmedzenú presnosť modelu. Analýza odhadovaných profilov umožnila stanoviť kombinácie technologických parametrov vedúce k optimalizácii sledovaných veličín. Získané poznatky predstavujú vhodný podklad na optimalizáciu výrobného procesu a efektívnejšie nastavenie technologických parametrov pri výrobe kovových komponentov technológiou ADAM.

7.1 Komplexná analýza spriemerovaných dát z hľadiska rovinnosti

Source	Logworth	PValue
Size	1,696	0,02014
Wall(2,30)	0,713	0,19355
Layer(0,081,0,169)	0,040	0,91139

Obrázok 7.37 Jednotlivé faktory spriemerovaných hodnôt a ich štatistická významnosť z hľadiska rovinnosti

Významnosť jednotlivých faktorov pre vplyv na výslednú rovinnosť vzoriek (obrázok 7.37) bola hodnotená pomocou tabuľky súhrnu vplyvu faktorov (Effect Summary). Výsledky ukázali, že štatisticky významný vplyv na výslednú hodnotu rovinnosti má hlavne faktor veľkosti (Size) ($p = 0,02014$).



Obrázok 7.38 Regresné grafy spriemerovaných hodnôt plôch z hľadiska rovinnosti

Výsledky regresnej analýzy priemerných hodnôt rovinnosti potvrdili, že sledované technologické parametre majú významný vplyv na dosahovanú kvalitu vyrábaných vzoriek. Vytvorené regresné modely umožnili identifikovať rozhodujúce faktory ovplyvňujúce rovinnosť, posúdiť ich štatistickú významnosť a vyhodnotiť vzájomné interakcie. Diagnostické grafy zároveň preukázali, že

väčšina modelov poskytuje dostatočne spoľahlivú predikciu experimentálnych výsledkov a je vhodná na opis skúmaného procesu. Analýza odhadovaných profilov umožnila stanoviť optimálne nastavenie technologických parametrov vedúce k minimalizácii odchýlok rovinnosti. Získané výsledky predstavujú podklad pre optimalizáciu výrobného procesu a prispievajú k zvýšeniu geometrickej kvality komponentov vyrábaných technológiou ADAM.

ZÁVER

Predložená dizertačná práca bola zameraná na experimentálne hodnotenie vplyvu vybraných procesných a konštrukčných parametrov technológie atómovej difúzie aditívnej výroby (ADAM) na rozmerovú presnosť a rovinnosť kovových komponentov. Cieľom práce bolo identifikovať faktory ovplyvňujúce kvalitu vyrábaných súčiastok, vytvoriť regresné modely opisujúce ich vzájomné vzťahy a navrhnúť vhodné nastavenie výrobných parametrov pomocou optimalizačných metód.

Experimentálne údaje boli získané z meraní skúšobných vzoriek vyrobených na zariadení Markforged Metal X a následne spracované metódami návrhu experimentov (DOE), regresnou analýzou a optimalizačným nástrojom odhadovaný profil (Prediction Profiler). Výsledky preukázali, že význam jednotlivých faktorov závisí od vstupnej premennej. Pri hodnotení výsledných rozmerov sa ako najvýznamnejšie faktory vo väčšine prípadov preukázali výška vrstvy (Layer) a hrúbka steny (Wall), zatiaľ čo pri priemerovaných hodnotách rovinnosti bol dominantným faktorom veľkosť vzorky (Size).

Regresné modely dosahovali rozdielnu úroveň kvality, pričom pri viacerých odpovediach bola potvrdená ich štatistická významnosť a primeraná zhoda medzi experimentálnymi a predikovanými hodnotami. Diagnostické grafy zároveň poukázali na prípady nerovnomerného rozptylu rezíduí a výskytu odľahlých pozorovaní, ktoré predstavujú obmedzenia lineárneho regresného modelovania. Napriek tomu vytvorené modely umožnili identifikovať dominantné faktory ovplyvňujúce sledované charakteristiky a poskytli vhodný základ na optimalizáciu technologického procesu.

Výsledky optimalizácie ukázali, že vhodnou kombináciou vstupných parametrov je možné dosiahnuť priaznivejšie hodnoty sledovaných odpovedí, pričom úspešnosť optimalizácie závisela od hodnotenej veličiny. Získané poznatky prispievajú k lepšiemu pochopeniu vplyvu technologických parametrov na kvalitu komponentov vyrábaných technológiou ADAM a predstavujú podklad pre efektívnejšie nastavovanie výrobných podmienok aj pre ďalší výskum v oblasti kovovej aditívnej výroby.

Výber zoznam použitej literatúry

GIBSON, I. et al. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2010.

GAO, W. et al. *Additive Manufacturing: Current State, Future Potential*. 2015.

FERNANDEZ, J. et al. *Additive Manufacturing: A Framework for Implementation*. 2019.

SALMI, E. et al. Stereolithography – Additive Manufacturing in Dentistry. *Journal of Finnish Society of Dental Materials and Devices*. 2018, 34(2), pp. 28–34.

SCIENCEDIRECT. *Fused Deposition Modeling*. Online. Available from: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fused-deposition-modeling>.

SINGH, A. K. *Additive Manufacturing: Technologies, Applications and Limitations*. 2021.

WOHLERS, T. and GORNET, T. *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications*. New York: Springer, 2014.

CHUA, C. K., LEONG, K. F. and LIM, C. S. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. Singapore: World Scientific, 2010.

GIBSON, I., ROSEN, D. W. and STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2010.

BÁRTOLO, P. J. *Laser-Based Additive Manufacturing*. Boca Raton: CRC Press, 2011.

SANDGREN, J., NILSSON, J. and OLIVELLA, J. *Additive Manufacturing in the Automotive Industry: A Review on the Future Prospects*. 2022.

HAWORTH, J. *The Markforged Metal X: An Introduction to Metal 3D Printing*. Online. 2019. Available from: <https://hawkridgesys.com/blog/the-markforged-metal-x-an-introduction-to-metal-3d-printing>.

ADDITIVE MANUFACTURING REPORT. Online. Available from: <https://additive-manufacturing-report.com>.

MARKFORGED. *Sinter-2 Datasheet*. Online. 2020. Available from: <https://7196278.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7196278/Datasheets%20and%20Sales%20sheets/Markforged/Metal/Markforged%20Sinter%20%20Datasheet.pdf>.

SCIENCEDIRECT. *Stainless Steel: Properties, Production, Examples and Applications*. Online. Available from: <https://www.sciencedirect.com/>.

Journal of Materials in Civil Engineering. The Use of Stainless Steel in Construction. Online. Available from: <https://ascelibrary.org/>.

FOOD ENGINEERING. *Applications of Stainless Steel in the Food Industry*. Online. Available from: <https://www.foodengineeringmag.com/>.

MARKFORGED. Online. Available from: <https://www.markforged.com>.

BHADESHIA, H. K. D. H. Stainless Steels. *Materials Science and Technology*. 2021.

Rapid Tooling Technologies Based on Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. ResearchGate, 2023.

VIDO, M. et al. Computer-Aided Design and Additive Manufacturing for Automotive Prototyping. *Applied Sciences*. 2024, 14(16), Art. 7155.

SINTERIT. *3D Automotive: Additive Manufacturing in Car Production*. Online. 2024. Available from: <https://sinterit.com/>.

STRATASYS. *Jigs and Fixtures via Industrial 3D Printing*. Online. 2024. Available from: <https://www.stratasys.com/>.

NAGHSHINEH, B. et al. Rethinking Additive Manufacturing for Spare Parts Supply Chain Management. *Production and Inventory Management Journal*. 2023.

DALPADULO, E. et al. A Review of Automotive Spare-Part Reconstruction Based on Additive Manufacturing. *Manufacturing*. 2022, 6(6), Art. 133.

MARKFORGED. *Metal X System Technical Specifications*. Watertown: Markforged, 2020.

MARKFORGED. *Metal Materials for the Metal X System*. Online. Watertown: Markforged, 2024. Available from: <https://markforged.com/>.

Kompletný zoznam použitej literatúry de k dispozícii v dizertačnej práci

Zoznam publikačnej činnosti

CZÁN, A., CZÁNOVÁ, N., HOLUBJÁK, J., CZÁNOVÁ, T., KRIŠÁK, D., MARKOVIČ, M. 2026 *Comparison of Selective Laser Melting and Atomic Diffusion Additive Manufacturing Technologies: Evaluating Stainless Steel Materials in Terms of Accuracy and Key Performance Indicators*. Procedia CIRP 2026, 93, 509 (502), DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.077. Indexované vo Web of Science Core Collection (ESCI) a Scopus.

KRIŠÁK, D., STANISLAV, J., PETRŮ, J., ČEP, R., MATUŠ, M., CZÁN A., CZÁNOVA, N., *Degradation of PA12 Powder from SLS Technology*, Cham: Springer, 2026, 1667, 297 (287), DOI: 10.1007/978-3-032-07721-9_26

CZÁN, A., CZÁNOVÁ, T., HOLUBJÁK, J., NOVÁK, M., CZÁN, A., CZÁNOVA, N., KRIŠÁK, D., 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. *Manufacturing Technology*. 2024, roč. 24, č. 1, s. 15–27. ISSN 1213-2489. DOI: 10.21062/mft.2024.015.

CZÁN, A., CZÁNOVÁ, N., KURIC, I., CZÁNOVÁ, T., HOLUBJÁK, J., CZÁN, A. a KRIŠÁK, D. Selective Laser Sintering vs. Multijet Fusion as a Basic Comparative Study of PA12 Polyamide Based on Accuracy and Significant Indicators. In: RYSIŃSKI, J. a WIĘCEK, D., eds. *Production Engineering and Management*. Bielsko-Biała: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego, 2024. ISBN 978-83-67652-27-8. DOI: 10.53052/9788367652278.

CZÁN, A., CZÁNOVÁ, T., HOLUBJÁK, J., NOVÁK, M., CZÁNOVÁ, N. a KRIŠÁK, D. *Comparative Evaluation of Working Accuracy in the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process and the Binder Jetting (BJ) Process by Analyzing Key Characteristics*. *Manufacturing Technology*. 2023, roč. 23, č. 6, s. 769–780. ISSN 1213-2489. DOI: 10.21062/MFT.2023.108. Indexované vo Web of Science Core Collection (ESCI) a Scopus.

CZÁN, A., CZÁNOVÁ, T., HOLUBJÁK, J., NOVÁK, M., CZÁN, A., CZÁNOVÁ, N., KRIŠÁK, D. Comparative Evaluation of Working Accuracy in the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process and the Binder Jetting (BJ) Process by Analyzing Key Characteristics. *Manufacturing Technology*. 2023, roč. 23, č. 6, s. 769–780. ISSN 1213-2489. DOI: 10.21062/MFT.2023.108.