

ŽILinskÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2026

Ing. Natália Czánová



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Natália Czánová

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Výskum v oblasti aditívnych technológií pre Multi Jet Fusion systém sériovej produkcie
termoplastových komponentov v priemysle**

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. Natália Czánová
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 SK Sučany
Priemyselná 1940/14, 03852 Sučany

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 31.8.2026 o 10:30 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.

Dr.h.c. prof. Ing. Robert Čep, PhD. Feng., v. r.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

1 ÚVOD

V posledných rokoch zaznamenáva aditívna výroba (Additive Manufacturing, AM) výrazný technologický rozvoj, pričom medzi najperspektívnejšie technológie pre priemyselnú výrobu plastových dielov patrí technológia Multi Jet Fusion (MJF). Vďaka vysokej produktivite, rozmerovej presnosti, kvalite povrchu a možnosti výroby funkčných komponentov sa MJF postupne presúva z oblasti prototypovania do malosériovej a sériovej produkcie dielov určených na konečné použitie. Rastúci počet priemyselných podnikov preto skúma možnosti implementácie tejto technológie do výrobných procesov a jej začlenenia do existujúcich dodávateľských reťazcov.

Cieľom dizertačnej práce je vyhodnotiť potenciál technológie Multi Jet Fusion pri výrobe plastových komponentov určených na priame použitie so zohľadnením technických, kvalitatívnych a ekonomických aspektov výrobného procesu. Pozornosť je zameraná na identifikáciu faktorov ovplyvňujúcich kvalitu vyrobených dielov, posúdenie presnosti výrobného procesu a návrh metodiky hodnotenia vhodnosti implementácie technológie MJF do priemyselnej výroby.

Na základe analýzy výrobných požiadaviek bol navrhnutý nový dizajn experimentálnych vzoriek, ktorý slúži na overenie navrhnutého metodického rámca. Súčasťou metodiky je hodnotenie kvalitatívnych ukazovateľov s využitím princípov geometrickej špecifikácie výrobkov (GPS) a technicko-ekonomické posúdenie vyrábaných dielov. Experimentálne vzorky boli analyzované porovnaním nominálneho 3D modelu s reálne vyrobenými komponentmi, pričom dôraz bol kladený na rozmerovú a tvarovú presnosť, kvalitu povrchu a opakovateľnosť výroby.

Výskum je realizovaný so zameraním na technológiu Multi Jet Fusion, ktorá patrí medzi najmodernejšie práškové technológie aditívnej výroby plastov. Experimentálna časť práce je zameraná na analýzu vplyvu vybraných procesných parametrov na kvalitu vyrábaných dielov a na identifikáciu optimálnych výrobných podmienok. Súčasťou riešenia je využitie štatistických metód experimentálneho plánovania (DOE) a regresnej analýzy na vytvorenie predikčných modelov umožňujúcich optimalizáciu výrobného procesu.

Prínos dizertačnej práce spočíva vo vytvorení komplexnej metodiky hodnotenia technológie Multi Jet Fusion z pohľadu jej implementácie do priemyselnej výroby plastových komponentov. Výsledky výskumu poskytnú odporúčania pre výber vhodných výrobných parametrov, zvýšenie kvality produkcie a efektívnejšie využitie technológie MJF pri výrobe funkčných dielov určených na konečné použitie.

1 ANALÝZA DOTERAJŠIEHO STAVU ADITÍVNEJ VÝROBY NA BÁZE PLASTOV

Analýza publikovaná spoločnosťou Research and Markets [1] poukazuje na výrazný rast globálneho trhu aditívnej výroby (Additive Manufacturing, AM). Odhady uvádzajú, že jeho hodnota sa zvýši z 2,5 miliardy USD v roku 2015 na približne 10,2 miliardy USD do roku 2023 [1], [47], [48]. Význam tejto technológie bol pritom identifikovaný už v roku 1998, keď ju Národné centrum pre výrobné vedy (National Center for Manufacturing Sciences – NCMS) označilo za perspektívny výrobný prístup s potenciálom priemyselného využitia. Od tohto obdobia zaznamenala aditívna výroba výrazný technologický pokrok, najmä v oblasti rýchlosti výroby, kvality výsledných dielov, rozlíšenia a celkovej efektivity výrobných systémov. Tieto inovácie umožnili rozšíriť využitie AM z oblasti prototypovania a výroby polovýrobných aj na produkciu funkčných komponentov určených na konečné použitie [1], [2].

Rastúca úroveň technologickej vyspelosti sa prejavuje aj narastajúcim počtom úspešných priemyselných aplikácií. Prípadové štúdie dokumentujú využitie aditívnej výroby najmä v automobilovom, leteckom a zdravotníckom priemysle, kde sa postupne stáva súčasťou moderných výrobných procesov [3]. Súčasný podniky čoraz intenzívnejšie analyzujú možnosti začlenenia AM do vlastnej výroby a jej prepojenia s existujúcimi dodávateľskými reťazcami, aby zvýšili flexibilitu výroby a efektívnejšie reagovali na požiadavky trhu (Wienken a Kilger, 2016) [4], [5], [47], [48]. Napriek rastúcemu záujmu sa predpokladá, že úplná integrácia aditívnej výroby do bežnej priemyselnej produkcie bude prebiehať postupne a v závislosti od odvetvia môže trvať ešte približne 5 až 10 rokov (Shanler a Basiliere, 2016) [5].

Podobný pohľad prezentuje aj spoločnosť Gartner GmbH, podľa ktorej bude plošné zavedenie aditívnej výroby závisieť nielen od ďalšieho technologického pokroku, ale aj od zvýšenia povedomia o možnostiach tejto technológie v priemyselnej praxi. [5] Na tento problém upozorňuje aj poradenská spoločnosť E&Y, ktorá konštatuje, že mnohé podniky stále disponujú iba obmedzenými internými znalosťami v oblasti AM [47], [48]. Nedostatok odborných skúseností následne spomaľuje implementáciu jednotlivých technológií aditívnej výroby a zároveň obmedzuje využívanie ich potenciálu vo výrobných procesoch (Wienken a Kilger, 2016) [4], [5].

Rozvoj aditívnej výroby preto nepredstavuje iba technologickú transformáciu výrobných systémov, ale zároveň vytvára požiadavku na systematické rozširovanie odborných znalostí a kompetencií pracovníkov. Úspešná implementácia AM si vyžaduje nielen vhodné technické vybavenie, ale aj efektívne vzdelávanie zamestnancov, budovanie interného know-how a vytvorenie stratégií, ktoré umožnia podniku naplno využiť potenciál moderných aditívnych technológií [4], [5].

Aditívna výroba je v súčasnosti vo veľkej miere využívaná najmä pri výrobe prototypov, overovacích modelov a malosériových výrobkov. Napriek jej rastúcemu technologickému potenciálu zostáva implementácia do sériovej produkcie plastových komponentov určených na konečné použitie stále predmetom intenzívneho výskumu. S narastajúcim významom AM vo výrobných procesoch a dodávateľských reťazcoch vzniká potreba dôkladnejšieho poznania možností jednotlivých technológií, ich technických limitov a ekonomických prínosov [47], [48]. Podniky preto čoraz častejšie analyzujú vhodnosť implementácie aditívnej výroby z pohľadu kvality produkcie, flexibility výroby a celkovej efektívnosti výrobného procesu.

Úspešné zavedenie aditívnej výroby si vyžaduje komplexné posúdenie viacerých technických a ekonomických faktorov. Dôležitým predpokladom je výber vhodnej technológie a materiálu vzhľadom na požadované mechanické, rozmerové a funkčné vlastnosti vyrábaných dielov. Rovnako významnú úlohu zohráva optimalizácia konštrukčného návrhu komponentov, správne nastavenie výrobných parametrov a výber metodiky hodnotenia kvality vyrobených súčiastok. Neoddeliteľnou súčasťou rozhodovacieho procesu je aj ekonomické posúdenie výroby, ktoré zahŕňa analýzu výrobných nákladov, produktivity, využitia materiálu a celkovej efektívnosti implementácie technológie do priemyselnej praxe.

Komplexná analýza uvedených aspektov umožňuje objektívne posúdiť vhodnosť aditívnej výroby pre produkciu plastových komponentov určených na konečné použitie [4]. Získané poznatky vytvárajú základ pre návrh metodického postupu hodnotenia implementácie AM, identifikáciu oblastí s najväčším aplikačným potenciálom a formulovanie odporúčaní pre efektívne zavádzanie tejto technológie do moderných výrobných systémov. Takýto prístup prispieva k lepšiemu využitiu výhod aditívnej výroby a podporuje jej širšie uplatnenie v priemyselnej praxi [4].

2 VÝBER TECHNOLOGIE MULTI JET FUSION PRE EXPERIMENTÁLNU ANALÝZU

2.1 Princíp fungovania technológie Multi Jet Fusion

Princíp technológie Multi Jet Fusion je založený na postupnom vytváraní komponentu nanášaním tenkých vrstiev polymérneho prášku na stavebnú platformu. Na každú vrstvu sa pomocou tlačových hláv selektívne nanášajú dve funkčné činidlá – fúzne činidlo (Fusing Agent), ktoré zabezpečuje spojenie častíc materiálu, a detailizačné činidlo (Detailing Agent), ktoré zvyšuje presnosť hrán a kvalitu povrchu vyrábaného dielu. Po aplikácii činidiel nasleduje ožarovanie vrstvy infračerveným žiarením, ktoré spôsobí natavenie iba oblastí s naneseným fúznym činidlom. Po dokončení vrstvy sa stavebná platforma zníži o výšku jednej vrstvy, nanese sa nová vrstva prášku a celý proces sa opakuje až do vytvorenia finálneho komponentu [21].

2.2 Zariadenia využívajúce technológiu Multi Jet Fusion

2.2.1 Výrobné zariadenie Jet Fusion 3D Printer

Zariadenie je určené na spracovanie práškových termoplastických materiálov a umožňuje výrobu rozmerovo presných plastových dielov s vysokou produktivitou a opakovateľnosťou výroby.



Obrázok 2.1 Zariadenie Jet Fusion 5210 3D Printer [21]

Zariadenie HP Jet Fusion 3D Printer tvorí hlavná tlačová jednotka so stavebným priestorom a pohyblivým výrobným vozíkom, ktorý zabezpečuje jednotlivé operácie počas procesu výroby. Súčasťou zariadenia sú zásobníky funkčných činidiel (Fusing Agent a Detailing Agent), systém nanášania práškoveho materiálu, tlačové hlavy na aplikáciu činidiel, predhrievacie infračervené lampy, termokamera na monitorovanie teplotného poľa práškoveho lôžka, systém odsávania prebytočného tepla a integrovaný ovládací panel.

2.2.2 Procesná stanica (Processing Station)

Procesná stanica (Jet Fusion Processing Station) je zariadenie systému HP Multi Jet Fusion, ktoré zabezpečuje operácie nadväzujúce na samotný proces tlače. Jeho hlavnou úlohou je riadené chladenie

stavebnej jednotky po ukončení výroby, vybratie vytlačených komponentov a spracovanie nespečeného práškoveho materiálu.



Obrázok 2.2 Zariadenie spracovacia stanica (Processing Station) [21]

Zariadenie slúži primárne na manipuláciu so stavebnou jednotkou po ukončení výroby a zabezpečuje všetky operácie súvisiace s prípravou ďalšieho výrobného cyklu. V procesnej stanici prebieha vyberanie stavebnej (*unpacking*) jednotky z výrobného vozíka, ako aj plnenie vozíka novým práškovým materiálom.

2.3 Softvéry podporované technológiou MJF

V experimentálnej časti dizertačnej práce boli na prípravu výrobných dát využité softvérové nástroje HP 3D Build Manager a Materialise Magics. Softvér HP 3D Build Manager predstavuje hlavné prostredie na správu výrobných úloh, v ktorom sa vytvára výrobná zostava, nastavujú parametre tlače, spravuje použitý materiál a pripravujú dáta na odoslanie do zariadenia HP Jet Fusion 3D Printer. Na prípravu samotných 3D modelov bol využitý softvér Materialise Magics, ktorý umožňuje kontrolu a opravu geometrie modelov, ich orientáciu, optimalizáciu rozmiestnenia v stavebnom priestore a export dát pre následné spracovanie v prostredí HP 3D Build Manager.

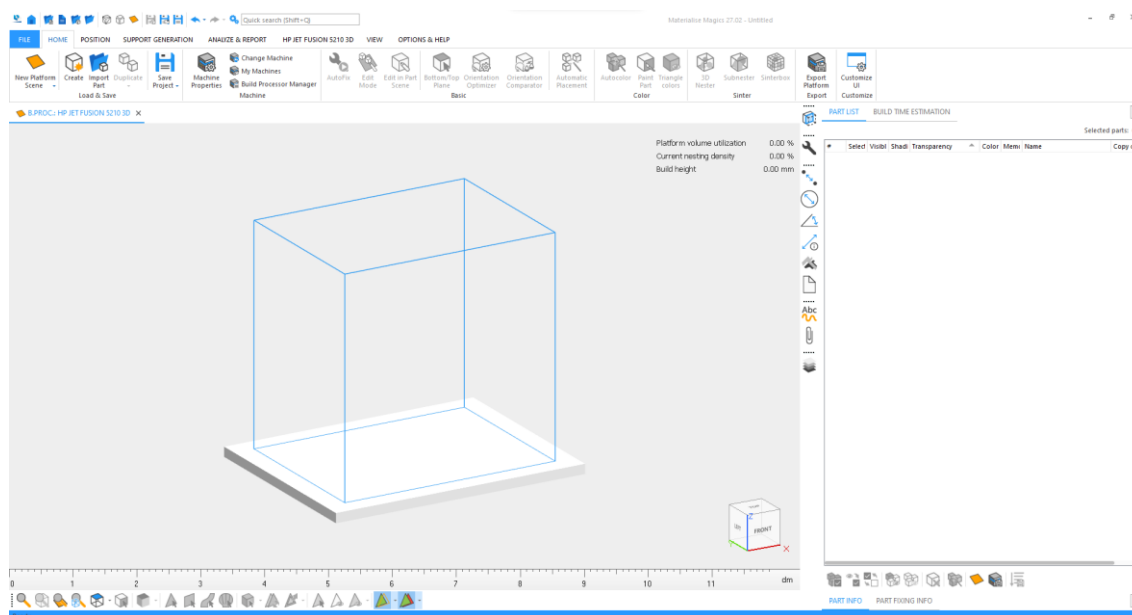
2.3.1 HP 3D Build Manager

HP 3D Build Manager je softvérové prostredie určené na prípravu a správu výrobných úloh pre technológiu HP Multi Jet Fusion. Softvér umožňuje import 3D modelov, vytvorenie výrobnéj zostavy, rozmiestnenie komponentov v stavebnom priestore a nastavenie základných parametrov výrobného procesu. Zároveň zabezpečuje komunikáciu medzi používateľom a tlačovým zariadením HP Jet Fusion 3D Printer, čím umožňuje efektívne riadenie celého výrobného procesu [21].

2.3.2 Materialise Magics

Materialise Magics predstavuje jeden z najrozšírenejších softvérov určených na prípravu dát pre aditívnu výrobu. Služi na import a spracovanie 3D modelov, kontrolu ich geometrickej správnosti, opravu chýb vzniknutých pri prevode do formátu STL a optimalizáciu modelov pred samotnou výrobou.

Významnou funkciou softvéru Materialise Magics je automatická optimalizácia orientácie komponentov v stavebnom priestore. Na základe geometrie jednotlivých modelov softvér intuitívne navrhuje ich najvhodnejšie priestorové usporiadanie tak, aby bolo možné maximálne využiť dostupný stavebný objem a umiestniť čo najväčší počet dielov do jednej výrobnéj zostavy.



Obrázok 2.7 Pracovné prostredie programu Materialise Magics

V experimentálnej časti dizertačnej práce bol softvér Materialise Magics využitý na kontrolu a opravu 3D modelov, orientáciu komponentov v stavebnom priestore a optimalizáciu ich rozmiestnenia pred exportom do prostredia HP 3D Build Manager.

3 VÝBER MATERIÁLU PRE EXPERIMENTÁLNE ÚČELY

Výber vhodného materiálu predstavuje jeden z rozhodujúcich faktorov ovplyvňujúcich kvalitu, mechanické vlastnosti a funkčnosť komponentov vyrábaných technológiou Multi Jet Fusion (MJF). Spoločnosť HP vyvinula pre túto technológiu portfólio termoplastických práškových materiálov, ktoré sú optimalizované z hľadiska spracovateľnosti, opakovateľnosti výroby a vysokej miery opätovného využitia nespotrebovaného prášku. Medzi najvýznamnejšie materiály patria polyamid 11 (PA11), polyamid 12 (PA12) a termoplastický polyuretán (TPU), pričom každý z nich je určený pre odlišné typy priemyselných aplikácií [21].

3.1 Materiál polyamid 12 (PA12)

Voľba vhodného materiálu závisí predovšetkým od požadovaných mechanických vlastností, prevádzkového zaťaženia, chemickej odolnosti a účelu použitia vyrábaného komponentu [47], [48]. V experimentálnej časti tejto dizertačnej práce bol zvolený materiál PA12, ktorý predstavuje štandardný materiál technológie MJF a poskytuje vhodnú kombináciu rozmerovej presnosti, mechanických vlastností a vysokej opakovateľnosti výroby [21].

Ide o vysoko kvalitný technický termoplast, ktorý je dostupný vo viacerých modifikáciách prispôbienených rôznym priemyselným aplikáciám [47], [48]. Vďaka svojim mechanickým a fyzikálnym vlastnostiam je vhodný na výrobu funkčných komponentov vystavených mechanickému namáhaniu, nárazom alebo prevádzke v prostredí, kde je požadovaná schopnosť tlmenia hluku a vibrácií. Uplatnenie nachádza najmä pri výrobe ložiskových prvkov, prevodových komponentov, ochranných krytov, tesnení, ventilov, rýchlospojok palivových systémov a ďalších technických dielov využívaných v strojárskom a automobilovom priemysle [21].



Obrázok 3.2 Materiál PA12 pred a po odstránení z vyrobeného dielu

Významnou výhodou polyamidu PA12 je jeho dobrá obrobiteľnosť, ktorá umožňuje realizovať dodatočné dokončovacie operácie podľa požiadaviek konkrétnej aplikácie.

4 CIEĽ DIZERTAČNEJ PRÁCE

Primárnym cieľom dizertačnej práce bolo experimentálnym výskumom posúdiť, akým spôsobom vybrané konštrukčné a výrobné parametre ovplyvňujú rozmerovú presnosť plastových komponentov vyrobených technológiou Multi Jet Fusion (MJF). Experiment bol zameraný na analýzu vplyvu veľkosti, hrúbky steny a polohy experimentálnej vzorky v pracovnom priestore na kvalitu výsledných dielov. Súčasťou výskumu bolo aj hodnotenie stability a opakovateľnosti výrobného procesu pri rôznych kombináciách sledovaných parametrov s cieľom posúdiť možnosti využitia technológie MJF pri výrobe funkčných plastových komponentov.

Na dosiahnutie stanoveného cieľa bola navrhnutá experimentálna vzorka umožňujúca komplexné hodnotenie rozmerových, tvarových a povrchových charakteristík v jednotlivých osiach súradnicového systému X, Y a Z. Návrh vzorky obsahuje geometrické prvky určené na analýzu rozmerových a tvarových odchýlok, pričom bude zohľadňovať špecifiká vrstveného spôsobu výroby. Experimentálne overovanie bolo realizované na vzorkách s rôznou veľkosťou, hrúbkou steny a polohou v pracovnom priestore zariadenia HP Jet Fusion. Takto navrhnuté experimenty umožňujú posúdiť vplyv jednotlivých parametrov aj ich vzájomných kombinácií na dosahovanú presnosť výroby a identifikovať faktory, ktoré najvýznamnejšie ovplyvňujú kvalitu výsledných komponentov.

Významnou súčasťou dizertačnej práce bol návrh metodiky hodnotenia rozmerovej, tvarovej a povrchovej presnosti dielov vyrobených technológiou Multi Jet Fusion. Získané experimentálne údaje boli spracované pomocou štatistických metód s využitím plánovania experimentov (Design of Experiments – DOE), regresného modelovania a optimalizačných postupov. Analýza bola zameraná na určenie štatistickej významnosti skúmaných faktorov, vyhodnotenie ich interakcií a identifikáciu optimálnych výrobných podmienok vedúcich k dosiahnutiu požadovanej presnosti vyrábaných komponentov.

Záverečná časť práce bola venovaná zhodnoteniu možností praktického využitia technológie Multi Jet Fusion pri výrobe plastových dielov určených na konečné použitie. Výsledky výskumu prispievajú k lepšiemu pochopeniu vplyvu sledovaných parametrov na kvalitu výroby a vytvoria metodický základ pre efektívnejšie nastavovanie výrobných podmienok. Navrhnuté odporúčania môžu byť využité pri optimalizácii výrobných procesov, zvyšovaní kvality vyrábaných komponentov a rozširovaní aplikácií technológie MJF v oblastiach, ako sú strojárstvo, automobilový priemysel, elektrotechnika či ďalšie odvetvia využívajúce aditívnu výrobu plastových materiálov.

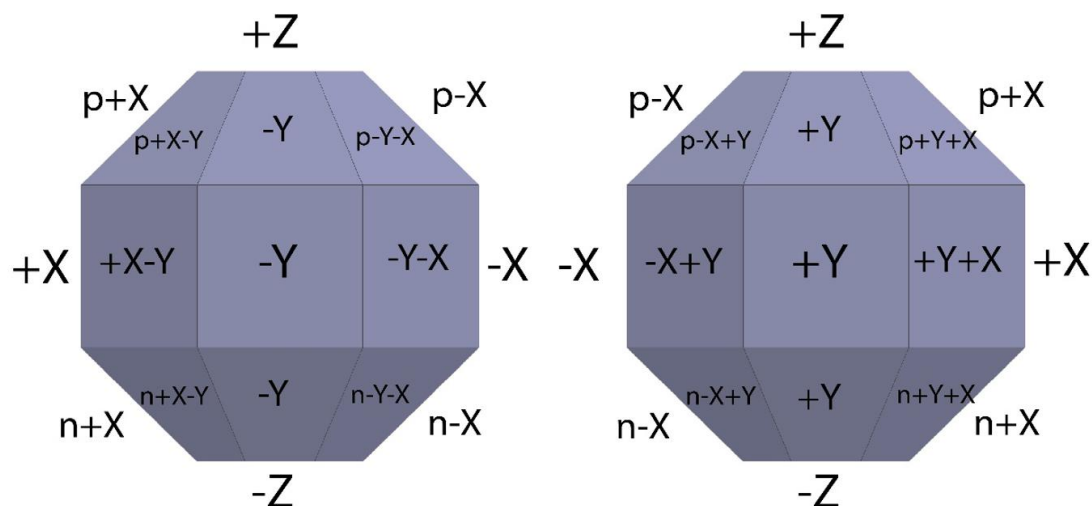
5 5 DIZAJN A REALIZÁCIA EXPERIMENTÁLNYCH VZORIEK

5.1 Dizajn experimentálnych vzoriek

Pri návrhu experimentálnej vzorky je potrebné venovať osobitnú pozornosť vlastnostiam vrstveného spôsobu výroby a orientácii komponentu v stavebnom priestore. Geometria vzorky musí umožňovať hodnotenie vplyvu polohy v osiach X, Y a Z, ako aj smeru ukladania jednotlivých vrstiev na výsledné vlastnosti vyrobených dielov. Takto navrhnutá vzorka poskytuje možnosť analyzovať vplyv výrobných podmienok na rozmerovú, tvarovú a povrchovú presnosť komponentov a vytvára predpoklady na optimalizáciu parametrov aditívnej výroby. Pri konštrukčnom návrhu experimentálnej vzorky je zároveň nevyhnutné zohľadniť požiadavky vyplývajúce z jej budúceho hodnotenia. Geometrické prvky musia byť navrhnuté tak, aby umožňovali spoľahlivé meranie sledovaných charakteristík a zároveň reprezentovali typické tvary vyskytujúce sa v technickej praxi.

Experimentálna vzorka určená na hodnotenie vplyvu orientácie v súradnicovom systéme X, Y a Z bola navrhnutá s cieľom analyzovať správanie jednotlivých plôch pri rôznych smeroch vrstvenia počas výroby technológiou Multi Jet Fusion. Konštrukcia vzorky vychádza z pravidelného osemuholníkového tvaru, pričom každá stena predstavuje konkrétnu orientáciu vzhľadom na pracovný priestor zariadenia. Jednotlivé plochy boli označené podľa príslušného smeru ako Y, YX, X, XY, -Y, -YX, -X a -XY, čo umožňuje jednoznačne identifikovať ich polohu a následne vyhodnotiť vplyv orientácie na rozmerovú, tvarovú a povrchovú presnosť vyrobených komponentov.

Na hodnotenie plôch vytvorených pod uhlom boli zavedené označenia využívajúce index p pre plochy s pozitívnym sklonom a index n pre plochy s negatívnym sklonom. Takto vznikli označenia pY, pYX, pX, pXY, -pY, -pYX, -pX, -pXY a nY, nYX, nX, nXY, -nY, -nYX, -nX, -nXY. Horná a spodná plocha experimentálnej vzorky boli označené podľa orientácie v osi Z ako +Z a -Z (obrázok 5.3). Index p určuje pozitívny sklon a index n určuje negatívny sklon.



Obrázok 5.3 Označenie jednotlivých strán experimentálnych vzoriek

Navrhnutý systém označovania zabezpečuje jednoznačnú identifikáciu všetkých hodnotených plôch a vytvára predpoklady na systematické porovnanie ich rozmerových odchýlok v závislosti od orientácie počas výrobného procesu. Rozmiestnenie jednotlivých plôch po celom obvode experimentálnej vzorky zároveň umožňuje komplexne posúdiť vplyv polohy vzorky na výslednú kvalitu vytvorených povrchov a rozmerovú presnosť.

5.2 Realizácia experimentálnych vzoriek

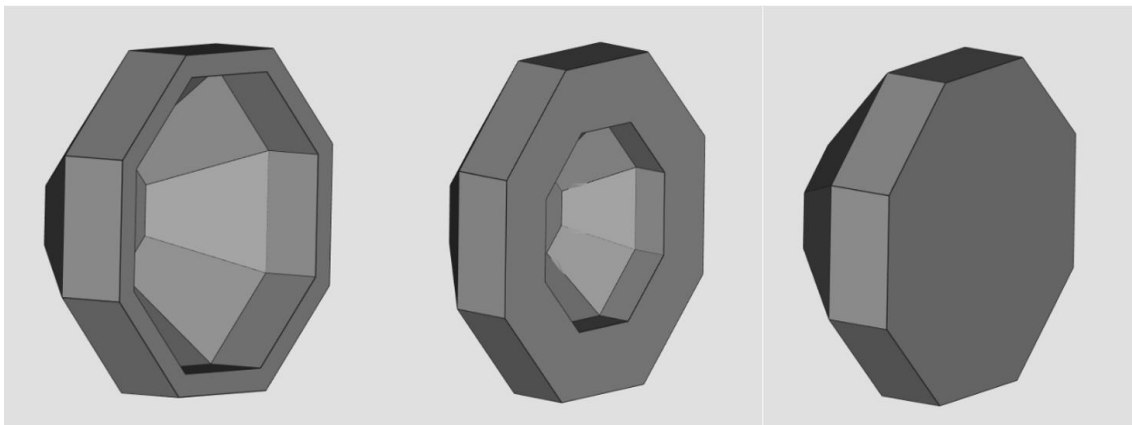
Experimentálne vzorky boli vyrobené technológiou Multi Jet Fusion (MJF) na zariadení HP Jet Fusion 5210. Táto technológia bola zvolená predovšetkým z dôvodu jej rastúceho významu v priemyselnej výrobe plastových komponentov určených na konečné použitie. V porovnaní s konvenčnými technológiami aditívnej výroby sa vyznačuje vysokou produktivitou, dobrou rozmerovou presnosťou, vysokou opakovateľnosťou výroby a kvalitnou povrchovou úpravou, čo vytvára vhodné podmienky na experimentálne hodnotenie vplyvu vybraných parametrov na kvalitu vyrábaných dielov.

Na výrobu experimentálnych vzoriek bol použitý materiál polyamid 12 (PA12) vo forme jemného prášku. Materiál PA12 bol vybraný pre jeho priaznivé mechanické vlastnosti, nízku absorpciu vlhkosti, vysokú chemickú odolnosť, optimálnu rozmerovú stabilitu a vysokú mieru opätovného využitia nespečeného prášku. Vďaka týmto vlastnostiam patrí medzi najčastejšie používané materiály technológie MJF pri výrobe funkčných plastových komponentov.

Po ukončení výrobného procesu neboli experimentálne vzorky podrobené žiadnym dodatočným postprocesným úpravám. Všetky merania boli vykonané na komponentoch v stave bez povrchových úprav, aby získané výsledky charakterizovali výlučne vplyv technológie a skúmaných výrobných parametrov na rozmerovú, tvarovú a povrchovú presnosť experimentálnych vzoriek.

Experimentálne vzorky boli navrhnuté v troch konštrukčných vyhotoveniach, aby bolo možné analyzovať vplyv hrúbky steny na rozmerovú presnosť vyrábaných komponentov. Prvé vyhotovenie predstavovala plná vzorka, ktorá slúžila ako referenčný model bez vnútorných dutín. Ďalšie dve vyhotovenia tvorili tenkostenná a hrubostenná vzorka, pri ktorých bola hrúbka steny definovaná ako percentuálny podiel z celkového rozmeru vzorky.

Pri tenkostennej variante bola hrúbka steny stanovená na 2mm, zatiaľ čo pri hrubostennej variante predstavovala hrúbka steny 8 mm.

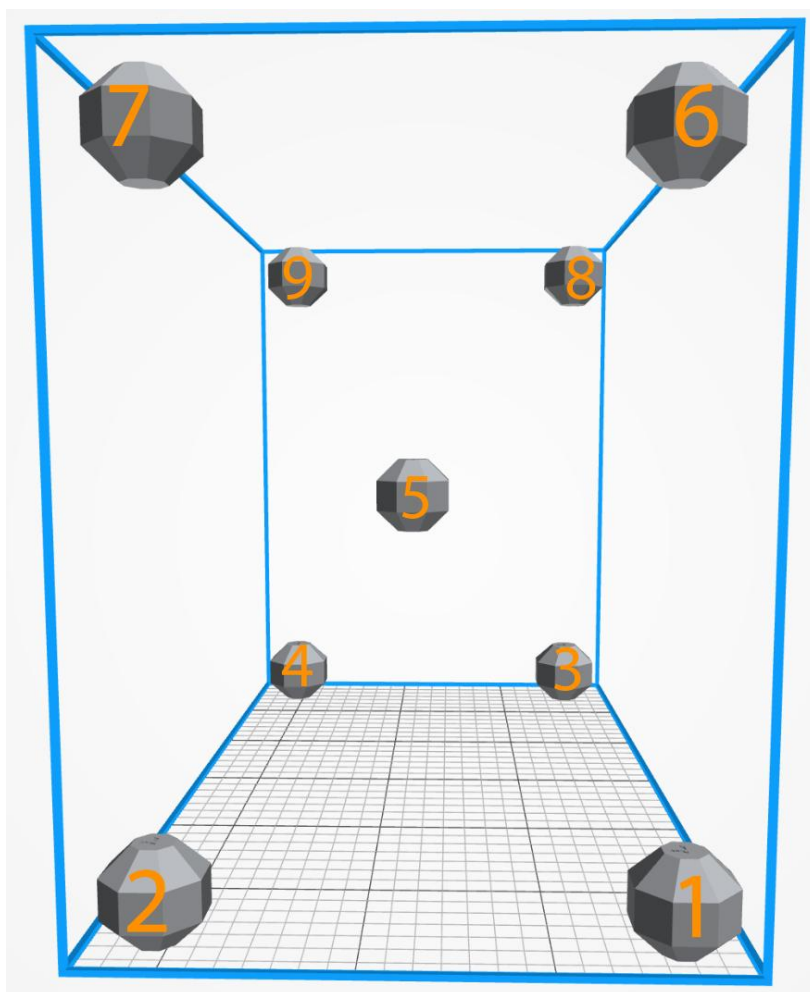


Obrázok 5.5 Rezy jednotlivých experimentálnych vzoriek s odlišnou hrúbkou steny

Ďalším sledovaným parametrom bola veľkosť experimentálnych vzoriek, ktorá bola zvolená s cieľom analyzovať vplyv veľkosti vzorky na rozmerovú presnosť pri výrobe danou technológiou. Na experiment boli navrhnuté vzorky so menovitými rozmermi 10 mm, 18 mm, 30 mm, 45 mm, 60 mm a 90 mm, čím bol pokrytý široký rozsah veľkostí – od malých až po rozmerovo väčšie komponenty.

Takto definované rozmery umožnili posúdiť, ako sa zmena veľkosti komponentu prejavuje na výsledných rozmeroch vzoriek a či má významný vplyv na dosahovanú presnosť výroby. Súčasne bolo možné vyhodnotiť vzájomné pôsobenie veľkosti vzorky s ostatnými skúmanými parametrami, predovšetkým hrúbkou steny a polohou komponentu v pracovnom priestore zariadenia HP Jet Fusion 5210.

Odlišný prístup bol zvolený pri vzorkách s rozmerom 30 mm, ktoré boli rozmiestnené v strede aj v jednotlivých rohoch pracovného priestoru. Takéto usporiadanie umožnilo analyzovať vplyv polohy komponentu na rozmerovú presnosť a overiť, či poloha v rôznych častiach stavebného priestoru ovplyvňuje kvalitu výslednej vzorky. Zároveň bolo možné porovnať výsledky vzoriek vyrobených v stredovej časti pracovného priestoru s výsledkami vzoriek umiestnených v jeho okrajových oblastiach a identifikovať prípadné odchýlky spôsobené rozdielnymi podmienkami počas výrobného procesu.



Obrázok 5.7 Označenie polohy jednotlivých vzoriek v pracovnom priestore

6 IDENTIFIKÁCIA STUPŇA IT PRESNOSTI

6.1 Príprava na vykonanie experimentu

Rozmerová kontrola experimentálnych vzoriek bola vykonaná pomocou digitálneho odchýlkomera Mahr MarCator 1087 R, ktorý je určený na vysoko presné meranie lineárnych rozmerov. Zariadenie disponuje rozlíšením 0,001 mm (1 μm), vďaka čomu umožňuje spoľahlivo zaznamenať aj veľmi malé rozmerové odchýlky vznikajúce počas výrobného procesu technológie Multi Jet Fusion. Pred začiatkom merania bol merací systém nastavený a overený prostredníctvom certifikovaných koncových mierok, čím bola zabezpečená správna kalibrácia prístroja, presnosť merania a reprodukovateľnosť získaných výsledkov.



Obrázok 6.1 Odchýlkomer od výrobcu Mahr osadený v magnetickom držiaku

Cieľom experimentálnych meraní nebolo posudzovať iba jednotlivé rozmerové charakteristiky vybraných geometrických prvkov, ale komplexne vyhodnotiť správanie celej experimentálnej vzorky počas výroby technológiou Multi Jet Fusion. Systematické meranie všetkých definovaných plôch umožnilo zachytiť lokálne aj globálne rozmerové odchýlky, identifikovať prípadné deformácie komponentov a analyzovať ich vzájomné súvislosti v závislosti od podmienok výroby.

Veľký počet nameraných údajov vytvoril rozsiahlu databázu experimentálnych výsledkov, ktorá predstavovala základ pre následné štatistické spracovanie. Získané dáta boli využité na hodnotenie vplyvu jednotlivých skúmaných faktorov, ktorými boli veľkosť vzorky, hrúbka steny a poloha komponentu v pracovnom priestore zariadenia, na rozmerovú presnosť vzoriek. Takto spracované výsledky umožnili identifikovať najvýznamnejšie faktory ovplyvňujúce kvalitu výroby a vytvorili podklad pre ich ďalšie štatistické vyhodnotenie a optimalizáciu výrobného procesu.

Na experimentálnych vzorkách bolo vykonané systematické meranie všetkých hodnotených plôch s cieľom získať reprezentatívny súbor údajov o ich rozmerovej presnosti. Meracie miesta boli navrhnuté tak, aby pokrývali celú geometriu vzorky a umožňovali hodnotiť odchýlky v rôznych smeroch a pri rozdielnych orientáciách jednotlivých plôch.

6.2 Metodika určovania stupňa IT presnosti

Na klasifikáciu presnosti výrobných procesov sa využíva medzinárodný stupeň tolerancie (International Tolerance Grade – IT), ktorý je definovaný v norme ISO 286-1:2010. Tento systém určuje prípustné tolerančné polia pre menovité rozmery do 3150 mm a zahŕňa dvadsať stupňov presnosti označených IT01, IT0, IT1 až IT18. Platí, že s klesajúcim číslom stupňa IT rastú požiadavky na presnosť výroby. Najvyššie stupne presnosti sa využívajú predovšetkým pri výrobe meradiel a presných mechanických súčiastok, zatiaľ čo vyššie hodnoty IT sú určené pre bežné výrobné operácie s väčšími prípustnými odchýlkami [33], [34].

6.3 Analýza nameraných údajov

Rozmerová analýza experimentálnych vzoriek bola zameraná na hodnotenie vzdialeností medzi navzájom rovnobežnými plochami rozmiestnenými na celej geometrii vzorky. Merania boli vykonané na všetkých dvojiciach protíľahlých plôch, čím bolo možné posúdiť rozmerovú presnosť komponentov v jednotlivých smeroch. Celkovo bolo vyhodnotených 13 menovitých rozmerov vytvorených medzi protíľahlými plochami experimentálnej vzorky s celkovým počtom 26 hodnotených strán [47], [48].

Menovitá vzdialenosť medzi jednotlivými dvojicami plôch bola stanovená na 10 mm, 18 mm, 30mm, 45 mm, 60 mm a 90 mm. V súlade s normou ISO 2768-mK boli pre tieto rozmery uvažovaná všeobecná tolerancia udávaná danou normou. Meranie bolo realizované v piatich bodoch na jednotlivých plochách.

Tabuľka 6.1 - Namerané údaje pre tenkostennú vzorku veľkosti 30mm

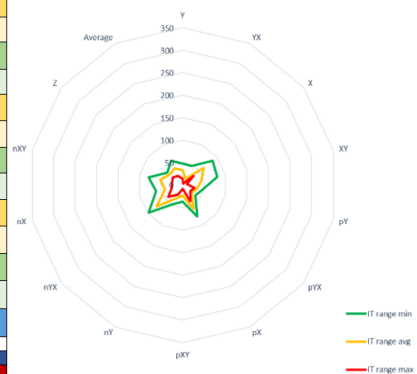
Plocha	Meranie 1 [mm]	Meranie2 [mm]	Meranie3 [mm]	Meranie4 [mm]	Meranie stred [mm]	Menovitý rozmer [mm]	Tolerancia $\pm$ [mm]	HMR (+0,3) [mm]	DMR (-0,3) [mm]
Y	29,942	29,967	29,98	29,931	29,944	30	0,2	30,2	29,8
YX	29,99	29,991	29,979	29,933	29,995	30	0,2	30,2	29,8
X	29,933	29,954	29,875	29,883	29,912	30	0,2	30,2	29,8
XY	29,986	29,958	29,884	29,921	29,935	30	0,2	30,2	29,8
pY	29,961	29,948	29,955	29,934	29,961	30	0,2	30,2	29,8
pYX	29,968	29,957	29,947	29,969	29,966	30	0,2	30,2	29,8
pX	29,908	29,889	29,917	29,943	29,927	30	0,2	30,2	29,8
pXY	29,96	29,948	29,953	29,989	29,984	30	0,2	30,2	29,8
nY	29,933	29,957	29,967	29,957	29,953	30	0,2	30,2	29,8
nYX	29,875	29,86	29,941	29,91	29,873	30	0,2	30,2	29,8
nX	29,913	29,946	29,965	29,957	29,932	30	0,2	30,2	29,8
nXY	29,888	29,888	29,965	29,958	29,931	30	0,2	30,2	29,8
Z	29,948	29,937	29,945	29,96	29,941	30	0,2	30,2	29,8
Spolu celkom	29,939	29,938	29,944	29,942	29,943	30,000	0,2	30,200	29,800

Tabuľka 6.2 - Spracované údaje pre tenkostennú vzorku veľkosti 30mm

Min. nameraná hodnota [mm]	Rozdiel DMR a Min. Hodnoty [mm]	Max. nameraná hodnota [mm]	Rozdiel HMR a Max. hodnoty [mm]	Rozdiel [mm]	Menovitý rozmer [mm]	Faktor štandardnej tolerance "Y"	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
29,931	0,131	29,980	-0,22	0,049	30	1,428	29,953	-69	-47	-20	48	33	14	IT9	IT9	IT7	Y
29,933	0,133	29,995	-0,205	0,062	30	1,428	29,978	-67	-22	-5	47	16	4	IT9	IT7	IT0-4	YX
29,875	0,075	29,954	-0,246	0,079	30	1,428	29,911	-125	-89	-46	88	62	32	IT11	IT10	IT8	X
29,884	0,084	29,986	-0,214	0,102	30	1,428	29,937	-116	-63	-14	81	44	10	IT10	IT9	IT6	XY
29,934	0,134	29,961	-0,239	0,027	30	1,428	29,952	-66	-48	-39	46	34	27	IT9	IT9	IT8	pY
29,947	0,147	29,969	-0,231	0,022	30	1,428	29,961	-53	-39	-31	37	27	22	IT9	IT8	IT8	pYX
29,889	0,089	29,943	-0,257	0,054	30	1,428	29,917	-111	-83	-57	78	58	40	IT10	IT10	IT9	pX
29,948	0,148	29,989	-0,211	0,041	30	1,428	29,967	-52	-33	-11	36	23	8	IT9	IT8	IT5	pXY
29,933	0,133	29,967	-0,233	0,034	30	1,428	29,953	-67	-47	-33	47	33	23	IT9	IT9	IT8	nY
29,860	0,06	29,941	-0,259	0,081	30	1,428	29,892	-140	-108	-59	98	76	41	IT11	IT10	IT9	nYX
29,913	0,113	29,965	-0,235	0,052	30	1,428	29,943	-87	-57	-35	61	40	25	IT10	IT9	IT8	nX
29,888	0,088	29,965	-0,235	0,077	30	1,428	29,926	-112	-74	-35	78	52	25	IT10	IT9	IT8	nXY
29,937	0,137	29,960	-0,24	0,023	30	1,428	29,946	-63	-54	-40	44	38	28	IT9	IT9	IT8	Z
29,938	0,138	29,944	-0,256	0,006	30	1,428	29,941	87	59	33	61	41	23	IT10	IT9	IT8	priemer
29,913		29,967	priemer rov.	0,054							36	16	4	IT9	IT7	IT0-4	min
											98	76	41	IT11	IT10	IT9	max

Po spracovaní nameraných údajov bola vyhodnotená rozmerová presnosť technológie Multi Jet Fusion (tabuľka 6.2). Analýza bola zameraná na porovnanie horných a dolných hodnôt nameraných rozmerov vzhľadom na stanovenú toleranciu a na určenie ich odchýlky od menovitého rozmeru. Následne bol vypočítaný faktor štandardnej tolerance i , stanovené priemerné namerané hodnoty, tolerančné pole a určený príslušný stupeň medzinárodnej tolerance (IT). Hodnotenie stupňov IT bolo vykonané pre všetky merané plochy experimentálnej vzorky, pričom boli porovnávané minimálne, priemerné a maximálne hodnoty. Získané výsledky boli následne spracované vo forme polárnych grafov.

Min. nameraná hodnota [mm]	Rozdiel DMR a Min. Hodnoty [mm]	Max. nameraná hodnota [mm]	Rozdiel HMR a Max. hodnoty [mm]	Rozdiel [mm]	IT rozsah min. [μm]	IT rozsah priem. [μm]	IT rozsah max. [μm]	ITx min	ITx priem	ITx max	AREA
29,931	0,131	29,980	-0,22	0,049	48	33	14	IT9	IT9	IT7	Y
29,933	0,133	29,995	-0,205	0,062	47	16	4	IT9	IT7	IT0-4	YX
29,875	0,075	29,954	-0,246	0,079	88	62	32	IT11	IT10	IT8	X
29,884	0,084	29,986	-0,214	0,102	81	44	10	IT10	IT9	IT6	XY
29,934	0,134	29,961	-0,239	0,027	46	34	27	IT9	IT9	IT8	pY
29,947	0,147	29,969	-0,231	0,022	37	27	22	IT9	IT8	IT8	pYX
29,889	0,089	29,943	-0,257	0,054	78	58	40	IT10	IT10	IT9	pX
29,948	0,148	29,989	-0,211	0,041	36	23	8	IT9	IT8	IT5	pXY
29,933	0,133	29,967	-0,233	0,034	47	33	23	IT9	IT9	IT8	nY
29,860	0,06	29,941	-0,259	0,081	98	76	41	IT11	IT10	IT9	nYX
29,913	0,113	29,965	-0,235	0,052	61	40	25	IT10	IT9	IT8	nX
29,888	0,088	29,965	-0,235	0,077	78	52	25	IT10	IT9	IT8	nXY
29,937	0,137	29,960	-0,24	0,023	44	38	28	IT9	IT9	IT8	Z
29,938	0,138	29,944	-0,256	0,006	61	41	23	IT10	IT9	IT8	priemer
29,913		29,967	priemer rov.	0,054	36	16	4	IT9	IT7	IT0-4	min
					98	76	41	IT11	IT10	IT9	max



Obrázok 6.3 Analýza údajov a polárny graf pre tenkostennú vzorku rozmeru 30mm orientácie 1

Obrázok 6.3 zobrazuje výsledky analýzy rozmeru 30 mm, vrátane vyhodnotenia rozmerových odchýlok, stupňov medzinárodnej tolerance IT a ich grafického spracovania. V ľavej časti je uvedený prehľad minimálnych a maximálnych nameraných hodnôt, ktoré sa pohybujú v intervale približne 29,860 až 29,989 mm. Rozdiel medzi krajnými hodnotami neprekračuje približne 0,10 mm, čo poukazuje na dobrú opakovateľnosť meraní. Stredná časť obsahuje vypočítané hodnoty tolerancií vyjadrené v mikrometroch, z ktorých väčšina zodpovedá stupňom presnosti IT8 až IT11. Pravá časť zobrazuje výsledky vo forme polárneho grafu, v ktorom zelená, žltá a červená krivka predstavujú minimálne, priemerné a maximálne hodnoty tolerančných polí. Vzájomná blízkosť jednotlivých kriviek

naznačuje relatívne rovnomerné rozloženie rozmerových odchýlok medzi hodnotenými plochami. Výsledky celkovo poukazujú na stabilný výrobný proces s dobrou úrovňou rozmerovej presnosti.



Obrázok 6.11 Analýza údajov a polárny graf pre tenkostennú vzorku rozmeru 30mm orientácie 9

Vyhodnotenie výsledkov pre menovitý rozmer 30 mm ukazuje, že minimálne a maximálne namerané hodnoty sa pohybovali v intervale 30,048 až 30,445 mm. Rozdiel medzi krajnými hodnotami jednotlivých meraní dosahoval približne 0,01 až 0,08 mm, čo naznačuje dobrú opakovateľnosť merania, hoci pri niektorých orientáciách boli zaznamenané vyššie rozmerové odchýlky. Vypočítané tolerančné polia nadobúdali hodnoty od 34 μ m do 312 μ m, pričom výsledky zodpovedali prevažne stupňom presnosti IT9 až IT13. Najlepšia rozmerová presnosť bola dosiahnutá na plochách Y, X a XY, zatiaľ čo plochy pY, nY, nYX, nX a ich kombinácie vykazovali výrazne vyššie tolerančné polia, ktoré vo viacerých prípadoch zodpovedali stupňu IT13. Polárny graf potvrdzuje najväčší rozptyl minimálnych, priemerných a maximálnych hodnôt najmä pri plochách nY, nYX a nX, zatiaľ čo ostatné orientácie vykazovali podstatne vyrovnanejší priebeh. V porovnaní s predchádzajúcimi experimentálnymi vzorkami boli aj pri tomto variante dosiahnuté menej priaznivé výsledky, čo sa prejavilo vyššími hodnotami tolerančných polí a celkovým znížením rozmerovej presnosti (obrázok 6.11).

7 ANALÝZA EXPERIMENTU POMOCOU METÓDY DOE

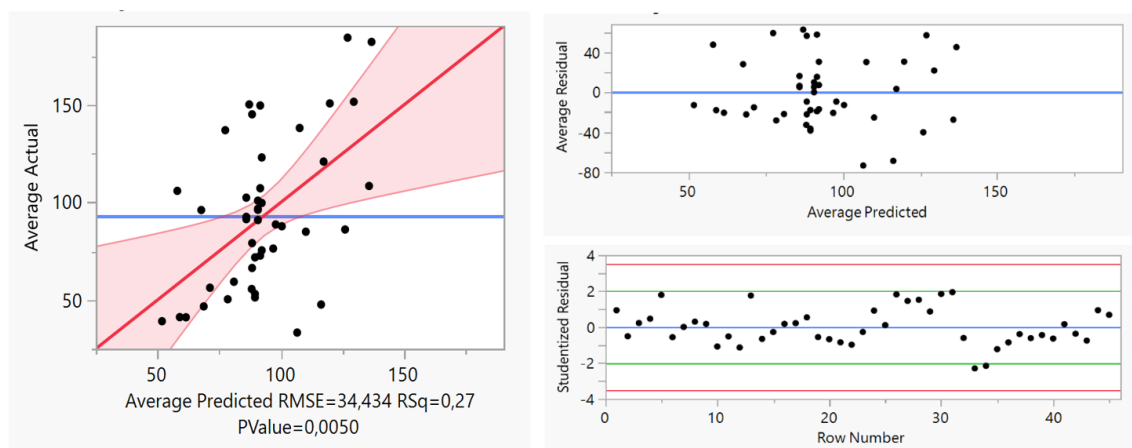
7.3 Spriemerované dáta z hľadiska rozmeru a ich komplexná analýza

Na účely štatistického spracovania experimentálnych výsledkov bola pre každý skúmaný variant stanovená aritmetická priemerná hodnota z nameraných údajov, ktorá predstavovala reprezentatívnu hodnotu sledovanej charakteristiky. Následne boli údaje samostatne spracované pre rozmerovú presnosť a rovinnosť experimentálnych vzoriek. Takto pripravený súbor dát slúžil ako vstup pre vytvorenie regresných modelov a analýzu štatistickej významnosti jednotlivých vstupných faktorov. Hodnotený bol vplyv parametrov veľkosti (Size), hrúbky steny (Wall) a polohy (Position), ako aj ich vzájomných interakcií na analyzované výstupné premenné. Vyhodnotenie oboch charakteristík umožnilo objektívne posúdiť účinok jednotlivých faktorov a identifikovať parametre, ktoré najvýznamnejšie ovplyvňujú rozmerovú presnosť a rovinnosť vzoriek.

Source	Logworth	PValue
Position(1,9)	3,308	0,00049
Wall(2,45)	0,272	0,53408
Size(10,90)	0,103	0,78858

Obrázok 7.33 Faktory s príslušnou štatistickou významnosťou pre hodnotenie priemeru rozmerov

Výsledky tabuľky súhrnu vplyvov faktorov (Effect Summary) potvrdzujú, že faktor polohy (Position) predstavuje štatisticky najvýznamnejší parameter. Dosiahol najvyššiu hodnotu logaritmickej významnosti (LogWorth) (3,308) a veľmi nízku p-hodnotu (0,00049), čo poukazuje na jeho výrazný vplyv na výslednú hodnotu priemeru.



Obrázok 7.34 Regresné grafy vytvorené pre priemer plôch z hľadiska rozmerov

Regresný model pre parameter priemeru (Average) bol zameraný na posúdenie vplyvu faktorov polohy (Position), hrúbky steny (Wall) a veľkosti (Size) na sledovanú odpoveď. Výsledky preukázali pomerne dobrú zhodu medzi experimentálnymi a predikovanými hodnotami, čo potvrdzuje uspokojivú predikčnú schopnosť modelu. Hraničná hodnota testu nevhodnosti modelu (Lack Of Fit, Prob > F = 0,0542) však naznačuje, že model nemusí úplne zachytávať všetky závislosti medzi premennými.

Ako štatisticky významný sa preukázal iba faktor polohy (Position), ktorý mal dominantný vplyv na výslednú hodnotu priemeru. Faktory hrúbky steny (Wall) a veľkosti (Size) významný vplyv nepreukázali.

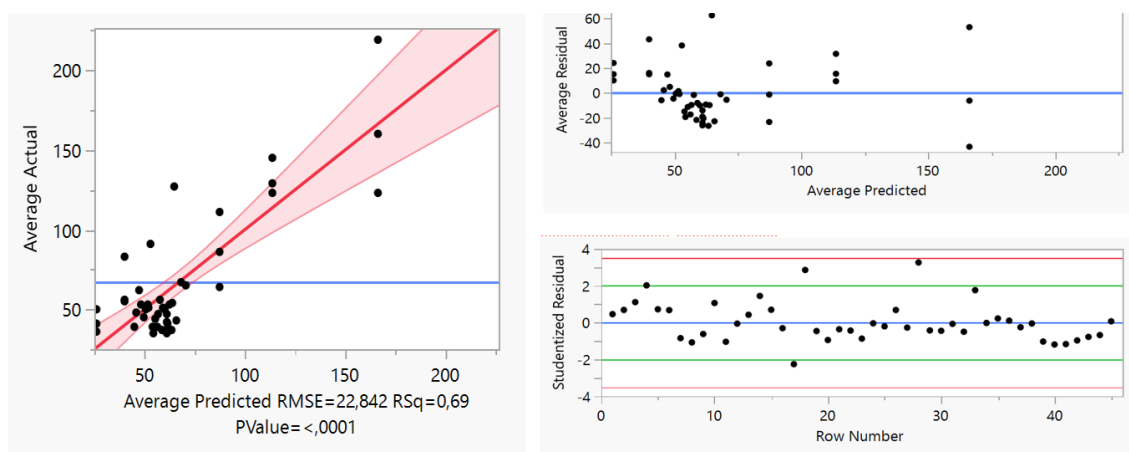
Diagnostické grafy potvrdili primeranú kvalitu regresného modelu. Reziduá boli rozložené okolo nulovej hodnoty bez výrazných odľahlých pozorovaní a analýza Študentových rezíduí (Studentized Residuals) nepreukázala prítomnosť extrémnych hodnôt, ktoré by významne ovplyvňovali stabilitu modelu (obrázok 7.34).

7.4 Spriemerované dáta z hľadiska rovinnosti a ich komplexná analýza

Source	Logworth	PValue
Size(10,90)	10,652	0,00000
Position(1,9)	0,764	0,17201
Wall(2,45)	0,416	0,38348

Obrázok 7.37 Faktory s príslušnou štatistickou významnosťou pre hodnotenie priemeru rovinnosti

Výsledky tabuľky vplyvu faktorov (Effect Summary) zobrazené na obrázku 7.37 potvrdili, že faktor veľkosti (Size) predstavuje najvýznamnejší parameter vytvoreného modelu. Dosiahol hodnotu logaritmickej významnosti (LogWorth) 10,652 a p-hodnotu prakticky rovnú nule, čo poukazuje na jeho výrazný vplyv na parameter priemeru rovinnosti.



Obrázok 7.38 Regresné grafy vytvorené pre priemer plôch z hľadiska rovinnosti

Regresný model pre parameter priemeru rovinnosti bol vytvorený na posúdenie vplyvu faktorov veľkosti (Size), polohy (Position) a hrúbky steny (Wall). Výsledky potvrdili, že rozhodujúci vplyv na sledovanú odpoveď má faktor veľkosti (Size), zatiaľ čo faktory Position a Wall sa na zmene rovinnosti podieľali len v obmedzenej miere.

Model dosiahol dobrú zhodu medzi experimentálnymi a predikovanými hodnotami a výsledok testu nevhodnosti modelu (Lack Of Fit, Prob > F = 0,5165) potvrdil jeho vhodnosť na opis skúmaného procesu. Diagnostické grafy zároveň nepreukázali výrazné systematické odchýlky ani prítomnosť kritických odľahlých hodnôt, čo poukazuje na stabilitu a spoľahlivosť vytvoreného regresného modelu (obrázok 7.38).

Na základe vykonanej analýzy možno konštatovať, že model predstavuje vhodný nástroj na hodnotenie priemernej rovinnosti a potvrdzuje dominantný vplyv faktora veľkosti (Size) na sledovanú odpoveď.

8 DISKUSIA VÝSLEDKOV EXPERIMENTU

Regresná analýza potvrdila, že rozmerová presnosť komponentov vyrobených technológiou Multi Jet Fusion (MJF) je výsledkom spoločného pôsobenia viacerých technologických faktorov. Najvýznamnejší vplyv na väčšinu sledovaných rozmerových odchýlok mali faktory veľkosti vzorky (Size) a polohy (Position), zatiaľ čo faktor hrúbky steny (Wall) vykazoval nižší, avšak vo väčšine prípadov štatisticky významný vplyv. Výsledky zároveň ukázali, že význam jednotlivých faktorov závisí od hodnotenej charakteristiky a smeru merania.

Kvalita vytvorených regresných modelov bola rozdielna. Väčšina modelov dosiahla štatistickú významnosť, avšak ich vysvetľujúca schopnosť sa pohybovala od nízkej po strednú úroveň. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri odpovediach YX, XY, pX, nX a nYX, zatiaľ čo modely pre odpovede pY a Z vykazovali nízku predikčnú schopnosť. Tieto výsledky naznačujú, že časť variability experimentálnych údajov je ovplyvnená ďalšími technologickými alebo materiálovými faktormi, ktoré neboli zahrnuté do regresných modelov.

Diagnostické grafy vo väčšine prípadov potvrdili primeranú kvalitu regresných modelov. Reziduá boli prevažne rozložené okolo nulovej hodnoty a analýza Študentových rezíduí (Studentized Residuals) nepotvrdila výskyt kritických odľahlých hodnôt. Pri niektorých modeloch sa prejavili mierne známky heteroskedasticity, ktoré však významne neovplyvnili stabilitu modelov.

Optimalizácia pomocou odhadovaných profilov (Prediction Profiler) potvrdila, že zmena vstupných parametrov nemenila poradie významnosti jednotlivých faktorov, ale ovplyvnila hodnotu funkcie vhodnosti (Desirability). Vo väčšine prípadov boli priaznivejšie výsledky dosiahnuté pri optimalizácii smerujúcej k maximalizácii sledovaných odpovedí než pri ich minimalizácii.

Analýza spriemerovaných experimentálnych údajov poskytla ucelenejší pohľad na správanie sledovaných charakteristík. Pri hodnotení rozmerových odchýlok sa ako dominantný faktor opätovne potvrdila poloha (Position), zatiaľ čo pri hodnotení rovinnosti zohrávala rozhodujúcu úlohu veľkosť vzorky (Size). Výsledky zároveň ukázali, že rozmerová presnosť a rovinnosť sú ovplyvňované odlišnými mechanizmami, a preto ich nie je možné optimalizovať rovnakým nastavením technologických parametrov.

Celkovo možno konštatovať, že regresná analýza spolu s metódou plánovania experimentov (DOE) predstavuje vhodný nástroj na hodnotenie vplyvu technologických parametrov procesu MJF. Napriek obmedzenej predikčnej schopnosti niektorých modelov umožnila identifikovať dominantné faktory ovplyvňujúce kvalitu vyrábaných komponentov a poskytla podklady pre optimalizáciu výrobného procesu. Ďalšie zvýšenie presnosti modelov by bolo možné dosiahnuť rozšírením experimentálneho návrhu, zahrnutím ďalších technologických premenných alebo využitím pokročilejších nelineárnych modelovacích metód.

9 Prínos pre teóriu a prax

9.1 Prínosy pre teóriu

Z teoretického hľadiska práca rozširuje poznanie v oblasti technológie Multi Jet Fusion (MJF), ktorá patrí medzi moderné a dynamicky sa rozvíjajúce technológie aditívnej výroby. Významným prínosom je najmä systematická analýza vplyvu konštrukčných a výrobných parametrov na rozmerovú presnosť vyrábaných plastových komponentov. V práci bolo preukázané, že faktory ako veľkosť vzorky, hrúbka steny a poloha v pracovnom priestore majú významný vplyv na výslednú kvalitu dielov, čo prispieva k lepšiemu pochopeniu fyzikálnych a technologických procesov prebiehajúcich počas výroby.

Dôležitým prínosom je aj návrh experimentálnej metodiky, ktorá umožňuje komplexné hodnotenie geometrickej presnosti komponentov v trojrozmernom priestore. Navrhnutá experimentálna vzorka, zahŕňajúca rôzne orientácie plôch v osiach X, Y a Z, predstavuje univerzálny nástroj pre analýzu odchýlok a môže byť využitá aj v ďalšom výskume aditívnych technológií. Práca zároveň prispieva k rozvoju metód hodnotenia rozmerovej presnosti na základe medzinárodných štandardov, najmä systému IT tolerancií podľa normy ISO 286. Zaradenie výsledkov experimentu do jednotlivých tolerančných stupňov umožňuje objektívne porovnanie presnosti aditívnej výroby s konvenčnými výrobnými technológiami.

V oblasti štatistického spracovania dát predstavuje prínos využitie metód Design of Experiments (DOE) a regresnej analýzy na identifikáciu štatisticky významných faktorov a ich vzájomných interakcií. Týmto spôsobom práca rozširuje teoretické poznatky o možnostiach modelovania a optimalizácie procesov aditívnej výroby, pričom poukazuje aj na obmedzenia lineárnych modelov a potrebu ďalšieho výskumu v oblasti nelineárnych závislostí.

9.2 Prínosy pre prax

Z praktického hľadiska práca poskytuje konkrétne odporúčania pre implementáciu technológie Multi Jet Fusion do priemyselnej výroby plastových komponentov. Na základe experimentálnych výsledkov bolo identifikované, že správna orientácia dielu, vhodná poloha v pracovnom priestore a optimalizácia hrúbky steny majú zásadný vplyv na dosiahnutie požadovanej presnosti.

Významným prínosom je vytvorenie metodického rámca pre hodnotenie kvality výroby, ktorý môžu podniky využiť pri zavádzaní technológie MJF do svojich výrobných procesov. Tento rámec umožňuje systematické posúdenie rozmerovej presnosti, identifikáciu kritických oblastí a návrh optimalizačných opatrení. Práca zároveň poskytuje praktické poznatky o dosahovanej úrovni presnosti, pričom bolo preukázané, že technológia MJF dosahuje tolerančné triedy približne IT7 až IT13, čo ju predurčuje pre výrobu funkčných dielov s požiadavkami na strednú až vyššiu presnosť. Tieto informácie sú dôležité pre konštruktérov a technológov pri rozhodovaní o vhodnosti použitia aditívnej výroby pre konkrétnu aplikáciu. Ďalším prínosom pre prax je identifikácia oblastí s vyššou náchylnosťou na vznik odchýlok, najmä pri plochách s negatívnym sklonom a pri okrajových častiach pracovného priestoru. Tieto poznatky umožňujú výrobcovi predchádzať chybám už v fáze návrhu a plánovania výroby.

V neposlednom rade práca prispieva k zvýšeniu povedomia o možnostiach a limitoch technológie Multi Jet Fusion, čím podporuje jej efektívnejšie využitie v priemyselných odvetviach, ako sú strojárstvo, automobilový priemysel alebo elektrotechnika.

Celkovo možno konštatovať, že dizertačná práca prináša komplexný pohľad na problematiku hodnotenia rozmerovej presnosti aditívnej výroby, pričom spája teoretické poznatky s praktickými experimentálnymi výsledkami. Vytvorená metodika a získané poznatky predstavujú hodnotný základ pre ďalší výskum aj pre praktickú implementáciu technológie Multi Jet Fusion v moderných výrobných systémoch.

ZÁVER

Predkladaná dizertačná práca bola zameraná na analýzu vplyvu vybraných konštrukčných a technologických parametrov na rozmerové charakteristiky a rovinnosť plastových komponentov vyrobených technológiou Multi Jet Fusion (MJF). Hlavným cieľom bolo experimentálne overiť vplyv faktorov veľkosť vzorky (Size), hrúbka steny (Wall) a poloha vzorky v pracovnom priestore (Position) na výsledné rozmery a rovinnosť experimentálnych vzoriek a vytvoriť metodiku ich objektívneho hodnotenia.

Na splnenie stanoveného cieľa bola spracovaná literárna analýza zameraná na aditívnu výrobu polymérov, princíp technológie MJF, používané materiály a metódy hodnotenia rozmerovej presnosti a rovinnosti. Následne boli navrhnuté experimentálne vzorky, realizovaný experiment a získané údaje spracované pomocou metód plánovania experimentov (DOE), regresnej analýzy a optimalizačných nástrojov.

Výsledky potvrdili, že jednotlivé technologické faktory ovplyvňujú rozmerové charakteristiky a rovinnosť rozdielnym spôsobom. Pri hodnotení rozmerových charakteristík bol najvýznamnejší vplyv preukázaný najmä pri faktoroch veľkosť vzorky (Size) a poloha (Position), zatiaľ čo faktor hrúbka steny (Wall) vykazoval nižší, avšak štatisticky významný účinok. Pri hodnotení rovinnosti sa význam jednotlivých faktorov menil v závislosti od hodnotenej charakteristiky, čo potvrdilo potrebu samostatného posudzovania oboch kvalitatívnych ukazovateľov. Súčasťou práce bolo aj určenie stupňov medzinárodnej tolerancie IT, ktoré umožnili objektívne porovnanie úrovne presnosti jednotlivých experimentálnych variantov.

Na základe vytvorených regresných modelov boli identifikované vzťahy medzi vstupnými faktormi a sledovanými odpoveďami (response). Optimalizácia pomocou odhadovaného profilu (Prediction Profiler) umožnila určiť kombinácie technologických parametrov vedúce k najvyšším hodnotám funkcie vhodnosti (Desirability) a zároveň identifikovať dominantné faktory ovplyvňujúce kvalitu vyrábaných komponentov.

Získané poznatky rozširujú súčasné poznanie o vplyve vybraných procesných parametrov na výsledné vlastnosti plastových dielov vyrobených technológiou Multi Jet Fusion. Navrhnutá metodika experimentálneho hodnotenia predstavuje využiteľný nástroj pre ďalší výskum aj priemyselnú prax a môže prispieť k efektívnejšiemu nastavovaniu výrobných podmienok s cieľom dosiahnuť vyššiu rozmerovú presnosť a kvalitu vyrábaných komponentov.

RESUMÉ

This dissertation investigates Multi Jet Fusion (MJF) technology with a focus on the dimensional accuracy of polymer components manufactured from PA12 for end-use applications. The main objective was to experimentally evaluate the influence of selected technological and design parameters on the dimensional characteristics of printed parts and to propose a methodology for their systematic assessment.

The theoretical part summarizes the current state of knowledge in additive manufacturing, particularly powder bed fusion technologies for polymers. It describes the principles of the MJF process, the properties of PA12, industrial applications, dimensional accuracy, geometric product specifications (GPS), tolerance systems, and statistical methods for evaluating manufacturing processes.

The experimental research was carried out using specially designed reference specimens manufactured on an HP Jet Fusion 5200 Series system. The specimens were produced without any post-processing to evaluate only the influence of the printing process. The investigation focused on three main factors: specimen size, wall thickness, and position within the build chamber. Dimensional measurements were performed under controlled laboratory conditions using calibrated measuring equipment.

The measured data were processed using Design of Experiments (DOE) and regression analysis in JMP software. Statistical evaluation included regression modelling, analysis of factor significance, diagnostic evaluation of the models, and optimization using the Prediction Profiler and Desirability function. The developed models enabled the identification of relationships between the investigated parameters and the resulting dimensional accuracy.

The results confirmed that all selected factors significantly affect the dimensional accuracy of the manufactured components. The strongest influence was observed for specimen size and build chamber position, while wall thickness also contributed to dimensional stability. The proposed methodology provides an effective approach for analysing dimensional deviations and optimizing process parameters in MJF technology.

The dissertation contributes to the understanding of dimensional accuracy in polymer additive manufacturing and provides practical recommendations for improving process reliability and production quality. The obtained results can support the implementation and optimization of MJF technology in the industrial production of functional polymer components.

VÝBER ZOZNAMU POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] KHAJAVI, S. H., PARTANEN, J. and HOLMSTRÖM, J. Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*. 2014, 65(1), pp. 50–63. DOI: 10.1016/j.compind.2013.07.008.
- [2] LINDEMANN, C. et al. Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. 2015, 21(2), pp. 216–227. DOI: 10.1108/RPJ-12-2014-0179.
- [3] GIBSON, I. The changing face of additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2017, 28(1), pp. 10–17. DOI: 10.1108/JMTM-12-2016-0182.
- [4] WIENKEN, R. and KILGER, C. *How Will 3D Printing Make Your Company the Strongest Link in the Value Chain? EY's Global 3D Printing Report 2016*. London: EY, 2016.
- [5] SHANLER, M. and BASILIERE, P. *Hype Cycle for 3D Printing, 2016*. Stamford: Gartner, 2016.
- [6] GIBSON, I., ROSEN, D. W. and STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2nd ed. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2113-3.
- [7] WOHLERS, T. *Wohlers Report 2020: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Fort Collins: Wohlers Associates, 2020.
- [8] BIKAS, H., STAVROPOULOS, P. and CHRYSSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. *Advances in Manufacturing*. 2016, 4(4), pp. 389–405.
- [9] LIM, S. et al. The future of additive manufacturing: A review on the latest trends and developments. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2018.
- [10] GIBSON, I., ROSEN, D. W. and STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2nd ed. New York: Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
- [11] LI, Y. et al. Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: A comparative study. *International Journal of Production Research*. 2017, 55(5), pp. 1498–1515. DOI: 10.1080/00207543.2016.1231433.
- [12] SHANLER, M. and BASILIERE, P. *Hype Cycle for 3D Printing, 2016*. Stamford: Gartner, 2016.

- [13] WOHLERS, T. and CAFFREZ, T. (2016) 'Additive Manufacturing: The State of the Industry', pp. 45–52. Available at:
https://www.sme.org/uploadedFiles/Publications/ME_Magazine/2016/May/May%202016%20f1%20Wholers.pdf (viewed: 12 April 2025).
- [14] ECONOMIST. *Print Me a Jet Engine*. 2012. Online. Available from:
<http://www.economist.com/blogs/schumpeter/2012/11/additive-manufacturing>. (viewed: 13 April 2025).
- [15] OTT, T. *3D Opportunity for the Supply Chain: Additive Manufacturing Delivers – Driving Supply Chain Transformation*. 2015. Online. Available from:
<https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/multimedia/podcasts/additive-manufacturing3d-printing-supply-chain-transformation-business.html>. (viewed: 13 April 2025).
- [16] FORMLABS. *Understanding Accuracy, Precision and Tolerance in 3D Printing*. Online. Available from: <https://formlabs.com/blog/understanding-accuracy-precision-tolerance-in-3d-printing/>. (viewed: 18 March 2025).
- [17] ŠTEPÁNEK 3D. *Prášková 3D tlač*. Online. Available from:
<https://stepanek3d.sk/praskova-3d-tlac/>. (viewed: 11 June 2025).
- [18] 3DJAKE. *Resin Standard Black*. Online. Available from:
<https://www.3djake.sk/3djake/resin-standard-black>. (viewed: 7 October 2025).
- [19] HUBS. *What Is Multi Jet Fusion (MJF)* Online. Available from:
<https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-multi-jet-fusion/>. (viewed: 19 February 2026).
- [20] DASSAULT SYSTÈMES. *Multi Jet Fusion (MJF) 3D Printing Service*. Online. Available from: <https://www.3ds.com/make/service/3d-printing-service/mjf-multi-jet-fusion>. (viewed: 12 May 2026).
- [21] BOURELL, D. L. et al. *A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead*. Austin: University of Texas at Austin, 2009.
- [22] HANYKO PRAHA. *Metoda dle Shore*. Online. Available from: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrдост-a-jak-se-meri/shore/>. (viewed: 14 April 2026).
- [23] OVŠÍK, M. *Výskum možností nových metód merania údajov o polyméroch*. Zlín, 2013. 196 p. Dissertation. Tomas Bata University in Zlín.
- [24] EOS GmbH. *Selective Laser Sintering (SLS)*. Online. Available from:
<https://www.eos.info/about-us/what-we-do/sls>.

ZOZNAM VŠETKÝCH PUBLIKOVANÝCH PRÁC

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.