



## Oponentský posudok dizertačnej práce

**Meno doktoranda:** Ing. Ivana Zetková  
**Pracovisko:** KTO FST ZČU v Plzni  
**Názov práce:** Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem  
**Študijný program:** P2301 Strojní inženýrství  
**Študijný odbor:** Strojírenská technologie – technologie obrábění

- A. Zhodnotenie významu pre odbor
- B. Vyjadrenie k postupu riešeného problému, k použitým metódam a ku splneniu stanoveného cieľa
- C. Stanovisko k výsledkom dizertačnej práce a pôvodného konkrétneho prínosu predkladateľa dizertačnej práce (ďalej len „dizertanta“)
- D. Vyjadrenie k systematickosti, prehľadnosti, formálnej úprave a jazykovej úrovni dizertačnej práce
- E. Vyjadrenie k publikáciám dizertanta
- F. Jednoznačné vyjadrenie oponenta o odporučení/neodporučení dizertačnej práce k obhajobe (podľa zákona ČR č. 111/1998 Zb. § 47)

### A. Zhodnotenie významu pre odbor

Technológia výroby strojních kovových súčiastok 3D tlačou, známa aj pod názvom Direct Metal Laser Sintering (DMLS), je relatívne mladou technológiou, ktorej začiatky siahajú do roku 1995. Je preto možné označiť ju aj prívlastkom „moderná“. Napriek jej neobyčajnému rozmachu v minulých rokoch, predstavuje táto technológia aj dnes výzvu pre dizajnérov, konštruktérov i technológov, pretože do procesu aditívnej výroby vstupuje veľmi veľa parametrov. Je preto dôležitou úlohou vedecko-výskumných pracovníkov celého sveta, aby identifikovali všetky obmedzujúce parametre, či aspekty, ktoré ovplyvnia výsledné vlastnosti produktu, resp. aby zistili mieru ich vplyvu na požadovanú kvalitu výrobku.

Aj napriek tomu, že za posledné roky bolo vykonaných veľa experimentov súvisiacich s DMLS technológiou a bolo publikovaných množstvo dosiahnutých výsledkov, zostáva naďalej v tejto oblasti priestor pre nový výskum, dôkazom čoho je i predložená dizertačná práca.

Pokiaľ mi je známe, súhrn dosiahnutých výsledkov prezentovaný v tejto práci nebol doteraz v takomto rozsahu a takto podrobne nikde uverejnený, čím považujem túto prácu za jedinečnú a hodnotím ju ako veľmi významnú pre daný vedný odbor.

### Záver bodu A

Tému dizertačnej práce považujem za aktuálnu a vhodnú pre výskum riešený v rámci doktorandského štúdia. Problematika, ktorou sa práca zaoberá má veľký význam nielen pre rozvoj daného vedného odboru, ale aj pre strojársku prax, pretože využitie dosiahnutých výsledkov a vedomostí získaných v rámci výskumu umožní producentovi voľbu vhodnej stratégie a vhodných technologických parametrov v konkrétnych podmienkach výroby. Minimalizácia negatívnych vplyvov zvýši efektivitu výroby, čo zabezpečí lepšiu konkurencieschopnosť podniku na domacom i zahraničnom trhu.

## **B. Vyjadrenie k postupu riešeného problému, k použitým metódam a ku splneniu stanoveného cieľa**

Metódy a postupy používané pri riešení danej problematiky nie sú autorkou priamo špecifikované, je však možné povedať, že pri plnení cieľov práce použila dizertantka tieto metódy:

- analýza problematiky a syntéza poznatkov v oblasti kovových materiálov používaných pre 3D tlač,
- analýza a syntéza poznatkov v oblasti obmedzujúcich parametrov 3D tlače kovových súčiastok,
- metóda plánovaného experimentu pre výskum tvaru a veľkosti zŕn kovového prášku, ako aj jeho distribučného rozloženia,
- metóda plánovaného experimentu pre výskum mechanických vlastností aditívne vyrobenej ocele,
- meranie a štatistické spracovanie dát,
- komparácia získaných údajov (napríklad: porovnávanie získaných údajov s dátami deklarovnými výrobcom, porovnávanie mechanických vlastností tlačenej vzorky so vzorkami z konvenčne vyrábanej ocele, porovnanie mechanických vlastností vzoriek s rôznou tepelnou úpravou, porovnanie výhod/nevýhod jednotlivých variantov riešenia pri aplikácii DMLS technológie v reálnej praxi, ...),
- abstrakcia a konkretizácia pri návrhu nových variantov konštrukčného riešenia reálnej súčiastky,
- metóda lomovej fraktografie, RTG analýza a skenovanie pomocou spektrálneho elektrónového mikroskopu.

Metódy výskumu i postupy, ktoré dizertantka použila pre dosiahnutie stanovených cieľov, považujem za vhodné a primerane zvolené. Autorka práce zároveň demonštrovala aj zmysel pre ich správnu kombináciu a aplikáciu v jednotlivých fázach výskumu.

Hlavným cieľom dizertačnej práce bol výskum vstupného materiálu používaného pre technológiu DMLS a tiež výskum mechanických vlastností tlačenej vzorky pri použití výrobcom prednastavených parametrov 3D tlače. Ciele práce boli stanovené originálne, boli teda zamerané na výskum, ktorý nebol podľa mojich znalostí doteraz realizovaný. Všetky ciele boli v úvode práce (v kapitole č. 1.2) definované jasne a zreteľne, s jednoznačnou možnosťou kontroly ich splnenia.

V rámci plnenia čiastkových cieľov boli vykázané nasledujúce aktivity:

- Výskum vstupného materiálu z hľadiska jeho tvaru a rozloženia veľkosti častíc.
- Overenie základných informácií udávaných výrobcom o veľkosti zŕn prášku a ich rozložení v určenom objeme.
- Vytvorenie interného metodického postupu pre hodnotenie distribučného rozloženia veľkosti častíc v požadovanom objeme.
- Popis vplyvu rozloženia veľkosti prášku v zásobníku na kvalitu vytlačenej vzorky.
- Experimentálny výskum mechanických a materiálových vlastností tlačenej vzorky v závislosti na smere tlače, tepelnom spracovaní a na veľkosti prierezu.
- Porovnanie nameraných mechanických vlastností s údajmi, ktoré deklaruje výrobca.
- Porovnanie aditívne vyrobenej vzorky s konvenčne vyrábanym materiálom.
- Praktické overenie všeobecne uznávaných zásad a pravidiel 3D tlače na reálnej súčiastke s ohľadom na nové poznatky získané v priebehu experimentálneho výskumu.

### **Záver bodu B**

Po dôslednom preštudovaní predloženej práce a analýze dosiahnutých výsledkov konštatujem, že v dizertačnej práci boli použité vhodné metódy i postupy pre splnenie stanovených cieľov vyplývajúcich zo zadania práce, pričom všetky ciele boli bezpochyby splnené.

### **C. Stanovisko k výsledkom dizertačnej práce a pôvodného konkrétneho prínosu predkladateľa dizertačnej práce**

Dizertačná práca obsahuje veľké množstvo realizovaných meraní a pozorovaní. Spracované údaje sú prezentované vo forme tabuliek, obrázkov a grafických závislostí, ktoré výstižne a názorne dopĺňajú sprievodný text. Jedným z výstupov práce je aj vlastný návrh a vytvorenie metodického postupu pre hodnotenie rozloženia veľkosti častíc vo vybranom objeme prášku prevažne guľovitého tvaru.

Výsledky dosiahnuté v rámci predloženého výskumu je možné označiť ako veľmi významné a v mnohých prípadoch až prekvapujúce. Ide hlavne o výsledky, ktoré vyvracajú tvrdenie výrobcu o distribučnom rozložení veľkosti zrn, podľa ktorého by podiel častíc s veľkosťou 50  $\mu\text{m}$  mal byť 90 %. Reálne merania však ukázali, že 85 % sledovaného objemu tvoria zrná s rozmermi 1-30  $\mu\text{m}$ , čo vo veľkej miere ovplyvňuje nielen kvalitu tlače, ale aj bezpečnosť pri práci s týmto materiálom. Výsledky tiež poukázali na to, že rozloženie častíc v transportnom bareli a zásobníku bolo nerovnomerné, pričom nezodpovedalo Gaussovmu rozloženiu, ktoré deklaruje výrobca, ale Weibullovej distribučnej funkcii.

Monitorovanie procesu spekania vysokorychlostnou kamerou pomohlo objasniť vznik častíc s hladkým povrchom bez tzv. „slonej kože“, ktoré nielen znižujú čistotu štruktúry, ale aj jej mechanické vlastnosti.

K ďalším významným záverom dospela dizertantka počas overovania mechanických vlastností, u ktorých sa prejavil vplyv veľkosti vzorky, kvality prášku, tepelného spracovania a smeru tlače, avšak inde ako udáva výrobca. Mechanické vlastnosti vzoriek vyrobených 3D tlačou boli porovnávané s konvenčne vyrobenými vzorkami a tiež s hodnotami, ktoré udáva výrobca. Súčasťou tejto fázy výskumu bolo aj sledovanie mikroštruktúry žíhaných a vytvrdených vzoriek vyrobených DMLS technológiou. Výsledky tejto časti výskumu boli v práci prezentované najčastejšie prostredníctvom obrázkov a fotografií, ktoré boli doplnené odborným komentárom priamo v texte.

Skúsenosti, ktoré nadobudla Ing. Zetková počas základného výskumu boli aplikované pri výrobe reálnej súčiastky (išlo o kryt mazania hlavného pohonu jednocelovej frézy pre výroby príruby lopatky veternej elektrárne). Tu sa prejavili skúsenosti dizertantky nielen so samotnou technológiou 3D tlače (pri návrhu orientácie súčiastky a podporných štruktúr, pri nastavení hrúbky vrstvy pre „rozrezanie“ a spekanie, ...), ale aj pri úprave konštrukčného riešenia krytu, čím došlo k zníženiu objemu a tým aj hmotnosti vyrábaného dielu, ďalej došlo k úspore množstva prášku potrebného pre tlač tohto komponentu, ku skráteniu celkového času výroby a tým aj k zníženiu nákladov na jeho výrobu. Nesporným prínosom je však v tomto prípade aj spoľahlivá funkčnosť dielu v prevádzke (v porovnaní s pôvodne vyrábaným krytom z plastu).

#### **Záver bodu C**

Výsledky práce sú vlastným prínosom dizertantky. Tieto výsledky sú prezentované vhodnou formou, pričom svojou prácou študentka vo veľkej miere prispela k rozvoju poznatkov v oblasti laserového spekania kovových materiálov.

Pozitívne hodnotím nielen vysoký počet experimentov, či meraní vykonaných v rámci dizertačnej práce, ale aj spoluprácu s erudovanými pracovníkmi pôsobiacimi v špecializovaných laboratóriách na pracovisku dizertantky.

#### D. Vyjadrenie k systematickosti, prehľadnosti, formálnej úprave a jazykovej úrovni dizertačnej práce

Dizertačná práca je vypracovaná v rozsahu 131 strán, na ktoré nadväzuje 19 strán príloh. Jej súčasťou je 141 obrázkov a grafov, 23 tabuliek, Zoznam použitých symbolov i skratiek a 87 odkazov na použitú literatúru.

Práca je vhodne členená do šiestich základných kapitol, ktoré v logickej nadväznosti tvoria jeden kompaktný celok, od analýzy súčasného stavu až po Záver s vyhodnotením dosiahnutých výsledkov a predstavením smerovania budúcej práce, pričom spolu so Zoznamom použitej literatúry a Prílohou tvoria ucelenú koncepciu pohľadu na problematiku výroby kovových súčiastok pre strojársku prax.

Teoretická, výskumná a experimentálna časť práce boli vhodne doplnené aplikačnou časťou, ktorá overila schopnosť dizertantky uplatniť získané poznatky v praxi. Zároveň oceňujem prácu dizertantky so zahraničnou literatúrou.

Grafická úprava je na veľmi dobrej úrovni, obrázky sú zobrazené jasne a zreteľne. Aj keď je počet obrázkov relatívne vysoký, charakter práce si toto množstvo vyžaduje. Jazykovú a štylistickú úroveň práce hodnotím kladne, objektívne však musím povedať, že čeština nie je mojím rodným jazykom.

Pripomienky k práci a chyby formálneho charakteru:

- V práci mi chýba cenové vyčíslenie výroby kovového komponentu. Autorka porovnáva verzie určené pre DMLS technológiu medzi sebou, pričom pre finálnu verzia V4 udáva 57 % časovú úsporu i úsporu z hľadiska množstva prášku oproti pôvodnému zadaniu. Pri konkrétnom vyčíslení nákladov na 3D tlač kovového dielu by však bolo možné porovnať aj cenovú náročnosť verzie V4 s výrobou plastového krytu.
- Anglická verzia Anotácie na str. 4 obsahuje väčšie množstvo chýb, ktoré vyznačujem priamo v práci.
- Dizertantka používa v niektorých prípadoch pojem „váha“ pre označenie *hmotnosti* objektov.
- Str. 19, 2. riadok – „*recoter*“ namiesto *recoater*.
- Str. 25, popis Obr. 18 – v jednotke pre rýchlosť chladenia je nesprávne označenie jednotky času, malo by byť malé „s“ (predpokladám, že ide o [K/s]).
- Str. 27, Obr. 23 – chýba popis významu jednotlivých čísel/pozícií, ktoré sú súčasťou obrázka.
- Str. 29 – chybná formulácia vety „*Příprava stroje má na významný podíl na celkové ...*“
- Str. 44 – Tab. 4 – použité rôzne oddeľovače desatinných miest (niekde čiarka, niekde bodka); podobne - v Tab. 11, 12, 16, 17, 21, 22 je použitá bodka, ale v Tab. 13, 14, 15, 23 je použitá čiarka ...
- Na str. 45 je podľa môjho názoru nesprávne použitý pojem „tekutosť“ v súvislosti s pevnými časticami vo vete „*Výrobce preferuje sférický tvar částic kvůli jeho dobré zabíhavosti (tekutosti), ale zároveň udává, že ani tvarově nepravidelné částice nemusí snižovat kvalitu finálního výrobku*“ ...
- Na str. 49 je nesprávne uvedený odkaz na Obr. 44.
- Str. 70 – nesprávne uvedená jednotka rýchlosti pre pohyb priečnika skúšobného stroja vo vete: „... bylo provedeno zkouškou tahem ... konstantní rychlostí posuvu přičníku zkušebního stroje 0,00025 1/s v oblasti Hookeova zákona a do meze kluzu a rychlostí 0,006 1/s dále do lomu ...“.
- Nejednotné zadávanie jednotiek v grafických závislostiach – bez zátvoriek (Obr. 80, 81, 83, ...), v okrúhlych zátvorkách (Obr. 82) alebo v hranatých zátvorkách.
- Popisy Obr. 96 a Obr. 139 nie sú pod obrázkom, ale na začiatku ďalšej strany.
- Tab. 21, 22 - použitá jednotka „um“ namiesto  $\mu\text{m}$ .

- Chýbajúce medzery medzi slovami, prípadne medzi číslom a jednotkou; naopak, v niektorých spojeniach medzi slovami sú medzery navyše.

#### Otázka

- Z popisu hodnotenia rozloženia veľkosti zrn prášku v transportnom bareli nie je jasné koľko vzoriek bolo odobraných z jednotlivých hladín, resp. či všetky vzorky boli odobraté z jedného barelu. Autorka uvádza len počet analyzovaných zrn (250) pri skúmaní percentuálneho zastúpenia zrn danej veľkosti v jednej hladine. Boli tieto zrná odobraté z jedného miesta (na jedno nabratie lopatkou na to určenou) alebo z celej plochy danej hladiny?

#### Záver bodu D

Dizertačná práca je spracovaná prehľadne s logickou obsahovou následnosťou jednotlivých kapitol. Z hľadiska štruktúry a grafického prejavu (grafy, obrázky) hodnotím prácu veľmi pozitívne. V práci vyskytuje niekoľko drobných formálnych chýb, ktoré však neznižujú úroveň práce ani po stránke zrozumiteľnosti, ani jej odbornosti.

#### E. Vyjadrenie k publikáciám dizertanta

Na základe dostupných informácií je možné konštatovať, že Ing. Zetková (rod. Česáková) eviduje nasledujúce publikačné a technické výstupy (aj pod dievčenským menom):

- Články uverejnené v časopisoch – 15 (z toho 8 uverejnených v databázach **Scopus/WoS**)
- Články uverejnené v konferenčných zborníkoch – 36 (z toho 13 uverejnených v databázach **Scopus/WoS**)
- Citácie v databázach **Scopus/WoS** – 36 (bez autocitácií, resp. citácií najbližšími kolegami)
- Prednášky/postery – 6
- Prototypy/funkčné vzory – 50
- Ďalšie technické výstupy – 15

Počet publikácií doktorandky v časopisoch a konferenčných zborníkoch zodpovedá dĺžke jej aktívneho pôsobenia na fakulte (publikácie spadajú do obdobia od roku 2010). Je však potrebné vyzdvihnúť úroveň publikovaných článkov za posledné tri roky doktorandského štúdia, nakoľko väčšina z nich bola publikovaná v časopisoch alebo konferenčných zborníkoch registrovaných v databázach Scopus a WoS, čím študentka dosiahla nadštandardnú úroveň v kvalite publikovaných prác. O kvalite jej výskumu za posledné tri roky svedčí aj 31 citácií v databázach Scopus/WoS (počet citácií je uvedený bez autocitácií, resp. bez citácií najbližšími kolegami).

#### Záver bodu E

Publikačnú aktivitu dizertantky hodnotím ako nadpriemernú, s vysokou kvalitou dosiahnutých výstupov.

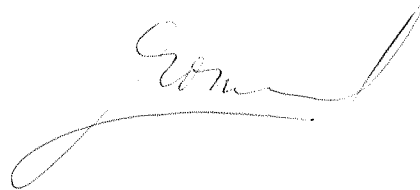
**F. Jednoznačné vyjadrenie oponenta o odporučení/neodporučení dizertačnej práce k obhajobe (podľa zákona č. 111/1998 Zb. § 47)**

Dizertačná práca Ing. Ivany Zetkovej „*Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem*“ splňa požiadavky kladené na tento typ prác. Autorka poukázala na schopnosť fundovane sa zhostiť danej problematiky, aktívne využívať vedecké metódy výskumu, spracovať, vyhodnocovať a správne interpretovať výsledku vlastného výskumu.

Na základe uvedeného hodnotenia, ako aj posúdenia formálnej a obsahovej stránky predloženej práce konštatujem, že prácou bola jednoznačne preukázaná schopnosť doktorandky orientovať sa v oblasti 3D tlače kovových súčiastok, preto

***odporúčam***

prácu k obhajobe v stanovenom odbore a po úspešnej obhajobe udeliť menovanej akademickú hodnosť philosophiae doctor (Ph.D.).



V Prešove dňa 1. septembra 2017

# Oponentní posudek disertační práce

Téma: „**Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem**“.

Autor: Ing. **ZETKOVÁ** Ivana

Doktorský studijní program: P2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

a) *zhodnocení významu pro obor:*

zaměření tématu DP patří mezi velmi aktuální, progresivně se rozvíjející výrobní technologie, tzv. **rychlých prototypů AM**, což potvrzují i reálné výsledky hybridních strojů kombinující plnohodnotnou generickou technologii DMLS (přímého laserového spékání kovových prášků) se subtraktivní technologií obrábění. Zaměření DP je součástí Národní iniciativy Průmysl 4.0 s cílem dosažení úspor času, nákladů při realizaci prototypů a tím zvýšení flexibility firem.

b) *hodnocení postupu řešení:*

s ohledem na šíři daného mezioborového zaměření DP, se doktorandka zaměřila na nejdůležitější faktory ovlivňující výsledek 3D tisku, tj. kvantifikaci kvality vstupního prášku (velikost, tvar, rozložení velikosti částic v objemu zásobníku) a vliv jakosti prášku na mechan. vlastnosti tištěného polotovaru metodou DMLS. DP má chronologické uspořádání, od současného stavu vývoje technologií výroby prášků, přes omezující parametry 3D tisku (TL vrstvy, podpurné struktury, parametry tisku, umístění na platformě, napěťové pole), vlastní výzkum, hodnocení a sumarizace technologických vlastností na 3D tisk včetně interní metodiky hodnocení distribučního rozložení velikosti prášku. Na závěr DP je provedeno ověření všeobecných zásad a pravidel 3D tisku na konkrétním příkladě krytu ozubeného převodu z jakosti W.Nr. 1.2709.

Autorka zároveň uvedla směry dalšího nutného vývoje v dané oblasti z hlediska:

- mechanických a dynamických vlastností těles z 3D tisku;
- termodynamického popsání procesu 3D tisku ve vztahu na napěťové pole;
- minimalizace podpurných struktur a tím nákladů na obrábění, vlivu deformací;
- zobecnění metodiky použitelnosti 3D tisku na širší platformu jakostí mat.;

DP je zakončena rozsáhlou přílohou týkající se mat. listů použitých jakostí ocelí, výkresů zkušebních tyčinek pro statické tahové zkoušky a program na hodnocení prášků dle Weibulova rozdělení četnosti výskytu.

c) *stanovisko k výsledkům DP:*

autorka si vytyčila tyto cíle DP:

- výzkum vstupního mat. z hlediska jeho tvaru a rozložení velikosti částic v zásobníku, v barelu;
- vytvořit interní metodický postup pro hodnocení distribučního rozdělení velikosti částic v požadovaném objemu;
- v rámci experimentálního výzkumu porovnat vlastnosti vzorků z 3D tisku s konvenčně vyráběnými ocelmi;
- získané poznatky aplikovat při výrobě reálné součásti pomocí 3D tisku;

Všechny stanovené cíle byly detailně splněny, přičemž odhaleny i nepravdivé údaje o stavu rozložení velikosti prášku v barelu od výrobce, což zásadně ovlivňuje



proces spékání jednotlivých vrstev prášku. Získané výsledky výzkumu mají velký přínos nejen pro akademickou obec, (základní výzkum), ale především pro finální uživatele dané technologie DMLS. Na druhé straně potvrdily vysokou odbornost, erudovanost aspirantky v dané problematice.

*d) formální, štábní úroveň DP:*

obsahově a graficky je práce velmi přehledně zpracována, proložená řadou barevných grafů, fotografií, obrázků, skic, tabulek, což zvyšuje její vypovídací schopnost, čtivost, navíc formou přílohy jsou uvedeny důležité informace týkající se vlastní experimentální části výzkumu.

Vlivem značného objemu, rozsahu práce (131 str.), se autorka nevyhnula i některým gramatickým chybám, (např. str. 15 repasy forem !!!; str. 95 –porozity;...), které považuji za spíše přehlédnuté při kontrole pravopisu.

*e) publikační činnost autorky:*

doktorandka čerpala info z 87 cílených, především zahraničních publikací, odborných článků, příspěvků, mat. listů, apod., přičemž ve 3 případech je spoluautorkou původních vědeckých publikací v odborném periodiku.

*f) hodnocení oponenta:*

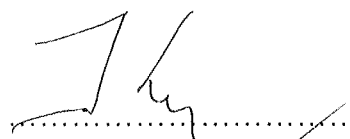
autorka prokázala schopnost samostatné výzkumné práce, a proto **doporučuji** DP k obhajobě ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. § 47.

**Otázky:**

1. Lze predikovat vztah mezi technologií výroby prášku, metodou DMLS, parametry procesu laserového spékání, zástavbovými poměry na platformě a finálním výsledkem 3D tisku?
2. Je softwarově řešitelný 3D tisk v závislosti na průběhu napětí v tělese, tzv. „dynamické škálování“, tj. proměnné TL vrstev, hustota výplně .
3. Z pohledu termodynamiky, není široký rozptyl velikosti částic při konst. energiovém příkonu fotonů, rozhodujícím negativním faktorem výsledného fázového stavu taveniny, případně následné heterogenní krystalizace a TZ?

Zpracoval: KESL Miloslav, Dr.Ing.

Dne: 2017-08-09



.....  
podpis