



## POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Název práce: **Vývoj prototypu 3D tiskárny na fotopolymery**

Autor: Ing. Iaroslav Kovalenko

### Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Téma disertační práce patří zcela jednoznačně mezi aktuální pro řadu aplikací, kde jsou využívány materiály na bázi polymerů, kovů nebo keramiky a výroba přesných a tvarově složitých komponent je předmětem výzkumně vývojových aktivit. Jde například o medicínu a náhrady částí lidského těla, či funkčně gradientní materiály a struktury pro absorpci energie a ochranu zdraví nebo odlehčené konstrukce v dopravě. Současné stereolitografické systémy stále zaostávají za očekáváním a požadavky průmyslu z pohledu přesnosti, kvality povrchu, rychlosti, velikosti pracovní komory a především spolehlivosti a heterogenity materiálových vlastností. Předložená práce přispívá přinejmenším ke zlepšení spolehlivosti výrobního procesu díky integraci nového způsobu detekce chyb.

### Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění stanoveného cíle

Autor si vytyčil poměrně rozsáhlý úkol navrhnout 3D tiskárnu na principu stereolitografie jenž bude schopna rychlé a přesné výroby modelů z různých fotopolymerních materiálů, bude vybavena systémem detekce chyb, bude umožňovat vzdálené sledování výrobního procesu a výsledné řešení nebude v kolizi s patentovou ochranou. V předložené práci jsou postupně popsány jednotlivé konstrukční a řídicí části řešení 3D tiskárny včetně technických parametrů použitých komponentů, tedy samotná osvětlovací jednotka, polohovací systém, platforma pro fixaci modelů, nádoba na fotopolymer, hardwarové a softwarové řešení řídicího systému a uživatelsky nastavitelné parametry tisku. Některé stěžejní konstrukční části zahrnují několik evolučních kroků či variant řešení, jenž byly v průběhu realizace prototypu 3D tiskárny navrženy, realizovány a experimentálně vyhodnoceny. Je tedy zřejmé, že autor při řešení uvedeného rozsáhlého a komplexního úkolu postupoval logicky, jednotlivé technické problémy studoval do dostatečné hloubky a navržená řešení komparoval a experimentálně ověřoval. Samostatná kapitola je pak věnována popisu vývoje systému pro detekci chyb včetně použitého algoritmu a zdrojového kódu. Dle popsáných výsledků, uvedených fotografií zařízení a vytištěných prototypových dílů lze říci, že většina cílů byla dosažena. 3D tiskárna je funkční, umožňuje 3D tisk z polymeru a keramiky a je vybavena systémem pro detekci nejvýznamnější chyby tiskového procesu a řídicí software umožňuje ovládání přes webové rozhraní. Nicméně v práci není nijak komentováno splnění posledního dílčího cíle, tedy zda řešení neobsahuje patentové kolize. Bohužel bez detailní znalosti navrženého řešení, které není možné z textové části práce získat, není v silách oponenta říci, zda byl tento dílčí cíl dosažen či nikoliv.

### Stanovisko k výsledkům disertační práce a významu původního konkrétního přínosu autora disertační práce

Výsledky dizertační práce lze z větší části považovat za rozsáhlejší inženýrské dílo. Nicméně přinejmenším dvě části naplňují vědecký přínos práce. Tou první je experimentální přístup k výběru osvětlovací jednotky pomocí hodnocení rozložení intenzity UV záření na ozařované ploše a s tím spojený popis chyb. Druhou částí je nepochybně návrh systému pro detekci chyb a vytvoření algoritmu vyhodnocování chybových stavů na základě snímání síly při odlepování modelu. Tyto výsledky jsou jasným původním přínosem autora. Navržené široce univerzální 3D tiskové zařízení tak umožňuje díky open source řešení další zlepšování technických parametrů jako je přesnost a rychlost či výzkum nových materiálů.

### **Případné další vyjádření k systematičnosti, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce**

K samotnému textu disertační práce lze uvést řadu výhrad. Práce postrádá systémový přístup, lze jen usuzovat, jaké vědecké otázky či problémy autor v práci řešil, explicitně nejsou nikde jmenovány. Chybí plán experimentů, sledované parametry rozsahy nastavení a zdůvodnění. Až z výsledků a popisu zvoleného řešení se lze dovítipit, jak autor postupoval. Řazení kapitol nepomáhá čtenáři v pochopení návaznosti a časové posloupnosti řešení. Autor využívá pro vysvětlení funkce výhradně slovního popisu, zcela opomíjí technická schémata. Rovněž některé výrazy jako např. přísavka by mohly být popsány vhodnějšími technickými termíny.

### **Vyjádření k publikacím studenta**

Student je autorem nebo spoluautorem celkem 16 článků. U osmi publikací je hlavním autorem, přičemž 6 přímo souvisí s tématem disertační práce a dvě z těchto prací byly publikovány v recenzovaných časopisech. Z publikovaných prací jsou 4 v databázi Web of Science Thompson Reuters a 6 v databázi Scopus. Student se soustředil především na publikace na konferencích a méně již na publikaci výsledků v časopisech. Žádná z publikací tak není v časopise s impaktním faktorem, což není zcela odpovídající pro vědeckou práci. Nicméně, student má v současné době 4 citace jinými autory dle WOS a 5 citací dle Scopus. Nutno podotknout, že všechny citace na WOS jsou od zahraničních autorů a nejedná se o citace z mateřského pracoviště, což svědčí o přínosu vědecké práce studenta. Z tohoto pohledu jsou tedy publikační výstupy vyhovující.

### **Jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje nebo nedoporučuje disertační práci k obhajobě**

Předložená práce je i přes výše uvedené nedostatky jednoznačně přínosnou a její výstupy umožňují rozvoj dalších výzkumných aktivit.

**D o p o r u č u j i** k obhajobě.



**doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**

10. února 2020

Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií  
Ústav konstruování  
Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně  
Technická 2896/2  
616 69 Brno  
+420 541 143 356  
daniel.koutny@vut.cz

## Oponentní posudek disertační práce

**Název práce:** Vývoj prototypu 3D tiskárny na fotopolymery

**Doktorand:** Ing. Iaroslav Kovalenko

**Pracoviště:** Katedra výrobních systémů a automatizace Fakulty strojní TU Liberec

**Školitel:** Prof. Ing. Přemysl Pokorný, CSc.

Oponentský posudek byl zpracován na základě dopisu děkana Strojní fakulty TU v Liberci ze dne 8.11.2019, kterým mne na základě návrhu oborové rady jmenoval oponentem této disertační práce. Předložená disertační práce obsahuje 97 stran textu a 10 stran příloh.

Doktorandská práce je zaměřena na v současné době aktuální téma – problematiku 3D tiskáren. Doktorand se zabývá 3D tiskárnami s technologií fotopolymerizace v nádobě – stereolitografie s promítáním masky – DLP (Digital Light Processing) technologie. Detailně popisuje tuto technologii, typy tiskáren založených na této technologii, materiály pro 3D tisk a používané fotoiniciátory. Popisuje využití 3D tiskáren pro tisk z keramických materiálů, který má význam pro zubní lékařství.

Vlastní práce vychází z prototypu DLP tiskárny, jehož vývoj začal na pracovišti katedry v roce 2015 a na jehož realizaci se doktorand podílel velkou měrou. V práci je popsána konstrukce tiskárny: projekční zařízení, pohon, řídicí jednotka, rám, tisková platforma, tisková nádoba na fotopolymer a řídicí software.

Velkou pozornost věnuje doktorand detekci chyb během procesu tisku. Chyba, nepovolená odchylka některého z klíčových parametrů tisku, by měla být impulsem k zásahu do tisku tak, aby byl tento zachráněn. Za základní parametr ovlivňující proces tisku je v práci považována síla, kterou musí tiskárna překonat při odlepování vytištěné vrstvy ode dna nádoby. Jestli je tato síla větší než síla, kterou se model drží na platformě, dojde k chybě tisku. Proto je v práci měřena síla při odlepování a sledován její průběh. Na základě tohoto měření je sestaven algoritmus detekce chyb. Nejdříve to byl algoritmus, který nezasahoval do procesu tisku a pouze upozorňoval na chybu. Potom v rámci vývoje modelu byl navržen systém pro výpočet kritické síly v závislosti na ploše průřezu tisknutého modelu. Nově navržený algoritmus pak po naměření skutečné síly zkoumal, je-li v daném očekávaném rozsahu a pokud ne, hlásil chybu a zastavil tisk.

V rámci vývoje tiskárny doktorand zkoumá, který z možných projektorů je pro danou tiskárnu nejvhodnější. Alternuje klasický kancelářský projektor Acer H6510BD a průmyslový projektor od firmy Texas Instrument LightCrafter E4500. Jeho experimenty ukazují, že pro účely DLP tisku vyhovuje více druhů uváděný.

Třetí věc je experimentování, jak velké je smrštění tištěných keramických materiálů po spékání. Fotopolymery obsahující částice keramiky se musí po vytištění vypálit. Při tom dochází ke změně jejich rozměrů s kterými se musí dopředu při tisku počítat. A právě tímto koeficientem smrštění se doktorand ve své práci zabývá.

Závěr práce konstatuje, pro jaké parametry a materiály je tiskárnu možno použít.

Pro zhodnocení splnění cílů disertační práce je nejdříve uvádím ve zkrácené verzi, jak je formuloval doktorand:

- Navrhnout 3D DLP tiskárnu v malém provedení.
- Navrhnout systém detekce chyb pro 3D tiskárnu.
- Tiskárna musí být navržena pro tisk velkého spektra volně dostupných fotopolymerů.
- Tiskárna musí umožňovat přístup přes internet a musí mít možnost monitoringu tisku a kontroly bez fyzického kontaktu obsluhy s tiskárnou.
- Technologie použité v tiskárně musejí být zvoleny tak, aby nenastaly patentové kolize při případné komercializaci výsledku v České republice a EU.

Pokud jsou z hlediska zadání disertační práce tyto cíle dostatečné, pak mohu konstatovat, že byly v plném rozsahu splněny.

Doktorand prokazuje velký přehled problematiky 3D tiskáren a stejně tak je možno dobře ohodnotit jeho snahu o zdokonalení prototypu, který je na Katedře výrobních systémů a automatizace.

Vlastní přínos doktoranda:

- po teoretické stránce je to seřídění názorů na problematiku detekce chyb u 3D tiskáren daného typu.
- po praktické stránce je to experimentování při měření síly při odlepování a sledování jejího průběhu a zjišťování koeficientu smrštění u fotopolymerů s keramickými částicemi.
- po programátorské stránce je to realizace algoritmu pro zastavání tisku při detekci chyby.
- ověření funkčnosti vytvořeného funkčního prototypu.

Je možné konstatovat, že doktorandovo úsilí je úspěšné, že na disertaci odvedl velký kus práce a že splnil vytčený cíl disertační práce. Název práce je „Vývoj prototypu 3D tiskárny na fotopolymery“. Otázkou je, kam až mohl disertant s vývojem dojít. V práci měnil typ projektoru, navrhoval a měnil provedení platformy, zkoušel a alternoval provedení nádoby na fotopolymer, hledal vhodný software pro řízení tiskárny, alternoval nastavení tiskových parametrů a intenzivně se zabýval detekcí chyb včetně měření určitých parametrů na tiskárně. Je možné, že by se dalo v rámci vývoje udělat více, ale to může být náplní práce pro další kandidáty. Domnívám se, že přínos pro praxi v daném oboru je a že jenom doktorandem vytvořený prototyp 3D tiskárny je dostatečným praktickým přínosem. Pokud se týče přínosu pro rozvoj oboru, je možné tento přínos nalézt více v praktické části. Formální úprava práce a jazyková úroveň je bez problému a nemohu jí nic vytknout.

Publikace doktoranda zahrnují podle jeho vyjádření v práci celkem 16 titulů, z toho 6 se jich přímo váže k náplni disertační práce. Ovšem pokud těchto 6 prací podělím počtem spoluautorů (v práci není uveden procentuální podíl spoluautorů), dostanu číslo 2,56 prací, z toho pouze 0,33 časopiseckých, ostatní jsou publikace ve sbornících konferencí. Domnívám se, že je to poněkud málo, ale pro doktorandskou obhajobu ucházející počet.

Nyní uvedu připomínky, které však nejsou z hlediska obsahu práce podstatné.

Připomínky:

- Za menší nedostatek předložené disertační práce považuji nejasné oddělení obecného popisu 3D tisku, 3D tisku z keramických materiálů, tepelné zpracování apod. od vlastní práce doktoranda. Domnívám se, že hlavně pro oponenta práce by bylo vhodnější, kdyby doktorand uvedl napřed teoretickou část, kde by v celé šíři popsal 3D tisk užitím DLP tiskárny a to po teoretické i praktické stránce. To by byla víceméně kompilace z literatury. Pak by teprve následovala část vlastní práce doktoranda, která by se pochopitelně členila na část teoretickou, na část praktickou a na část praktického ověření. Místo toho zvolil doktorand jakousi skriptovou formu své práce, v níž je vlastní práce zakomponována do obecného popisu a velmi těžce se odděluje.

K tomu ještě přispívá skutečnost, že text je psán (pravděpodobně ze skromnosti doktoranda) formou že něco je vytvořeno tím nebo oním způsobem, že něco vychází z toho anebo onoho a nikde není konstatováno, že toto je vlastní práce doktoranda.

Také není přesně uvedeno, nakolik je práce na tiskárně kolektivní a vlastní podíl doktoranda. Na str. 19 je uvedeno, že doktorand je hlavním řešitelem práce na projektu v letech 2015 – 2018.

- Kapitola 5.3: Při vypálení keramických modelů nastává jejich smrštění – výsledný výrobek má menší rozměry než vytištěný. Koeficient smrštění. Ale: Keramické materiály jsou více náchylné na parazitní přírůstky rozměrů. Závisí to na času ozařování. Rozumím tomu tak, že někdy se mohou jejich rozměry také zvětšovat?
- Kapitola 6.1: 3D tiskárna je schopna tisku z široké škály fotopolymery s vysokým rozlišením. Co jsou fotopolymery s vysokým rozlišením?
- Na obr. 2.12 je značen čas podivným písmenem  $h$ , symbol v seznamu symbolů ani není uveden. Co je to za podivnou škálu časů na obr. (b)?
- U všech obrázků v práci jsou jednotlivé grafy značeny např. Síla,  $N$ ; Napětí,  $V$  apod. Nebylo by techničtěji uvádět  $F [N]$ ;  $U [V]$  ....

#### **Závěr:**

Doktorská disertační práce

Vývoj prototypu 3D tiskárny na fotopolymery

doktoranda

Ing. Iaroslava Kovalenka

je vypracována pečlivě, bez závažnějších chyb a splňuje požadavky kladené na doktorandskou práci. Uvedené připomínky se týkají spíše formálních nedostatků a nesnižují celkovou úroveň práce. Doporučuji disertační práci k obhajobě.

V Brně, 6. 1. 2020.

  
Ivan Švarc



ZÁPADOČESKÁ  
UNIVERZITA  
V PLZNI

## Oponentní posudek k obhajobě disertační práce

Západočeská univerzita v Plzni

**Jméno:** Ing. Iaroslav KOVALENKO

**Název:** Vývoj prototypu 3D tiskárny na fotopolymery

**Fakulta:** Fakulta strojní

**Studijní program:** Strojní inženýrství

**Studijní obor:** Výrobní systémy a procesy

**Školitel:** prof. Ing. Přemysl POKORNÝ, CSc.

**Oponent:** doc. Ing. Milan EDL, PhD.  
Katedra průmyslového inženýrství a managementu  
Fakulta strojní  
Západočeská univerzita v Plzni

Práce se skládá ze 98 stran, 6 kapitol a 4 přílohy.

### Aktuálnost tématu

Předložená disertační práce je beze sporu prací aktuální. Práce zcela jasně reflektuje na současné problémy praxe v oblasti výrobní. Additivní technologie patří bezesporu k technologiím, které mají obrovský potenciál rozvoje ve výkumně-vývojové oblasti a tudíž i s obrovským potenciálem publikačním. Oponent velmi vyzdvihuje i dopad do praxe, který lze očekávat v krátkém časovém horizontu.

### Postup řešení problému

Autor práce věnovala definování cílům (hlavním i vedlejším) celou první kapitolu ze své disertační

práce. Z metodického pohledu musí oponent upozornit, že práce má absenci popisů přínosů a to jak pro rozvoj oboru, tak pro praxi. I přesto má práce jasnou a logickou stopu postupu řešení vědeckou-výzkumného úkolu, s implementací výsledků do praxe a jeho ověřením.

#### **Význam rozvoj vědního oboru a pro praxi**

Podle prezentovaných cílů disertace má disertační práce a předložené práce je možné dedukovat přínosy pro rozvoj vědního oboru i pro praxi, ale z metodického hlediska by práci slušela kapitola toto popisující. Tam je směřována i otázka č. 1 oponenta.

#### **Formální a jazyková úroveň**

Formální a prezentační úroveň je na velmi dobré úrovni, rovněž i jazyková úroveň psaného textu. Zde je vidět velmi dobrá vyjadřovací úroveň doktoranda. Práce obsahuje 41 obrázků a 10 tabulek na akceptovatelné úrovni.

#### **Publikační činnost**

Publikační činnost je na velmi dobré úrovni, kde jsou vidět i ohlasy v citačních databázích. Autor publikoval jak na domácích, tak i zahraničních akcích. Oponent musí zdůraznit, že publikování není důležité jen pro doktoranda samotného, ale také i pro rozvoj oboru a pracoviště.

#### **Poznámky, připomínky**

Oponent považuje předloženou práci za obsahově velmi zdařilou. Práce reflektuje na problémy dnešní praxe. Zde je vidět velmi silné propojení mezi teorií a praxí, kde přínosy je možné zaznamenat v poměrně krátkém časovém horizontu.

Po zodpovězení položených otázek a na základě předložené disertační práce ji **doporučuji** k obhajobě.

Doporučuji po úspěšné obhajobě udělit akademickou hodnost „philosophiae doctor” - Ph.D.”

Předloženou disertační práci na základě předchozího hodnocení **DOPORUČUJI** přijmout k obhajobě po jejím úspěšném obhájení navrhuji udělit akademický titul

**„philosophiae doctor (Ph.D.)**

**Doplňující otázky:**

1. Můžete popsat přínosy pro rozvoj vědního oboru a přínosy pro praxi?
2. Jaká je šance prosazení Vámi navržených opatření v reálném prostředí?

V Plzni, 26. 11. 2019



---

Milan EDL