

Oponentský posudek disertační práce

Ve smyslu Zákona o vysokých školách České republiky č. 111/98 Sb.

Název práce: **Efektivní obrábění nástrojových materiálů laserem**

Autor práce: **Ing. Tomáš Primus**

Školitel: **prof. Dr. Ing. František Holešovský**

Školitel specialista: **doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.**

Předložená disertační práce zasahuje do oblasti laserových subtraktivních mikrotechnologií, konkrétně se zabývá problematikou zvyšování efektivity laserové ablace – úběru opracovávaného materiálu s využitím kombinace dvou laserových zdrojů s ns a fs pulsy, který autor definuje jako komplexní přístup.

Nutno podotknout, že myšlenka využití několika laserových zdrojů pro opracování stejného materiálu na jednom zařízení není zcela nová, protože již v současnosti existuje na trhu mnoho tímto způsobem řešených produkčních laserových systémů (viz např. LLT aplikation. |GFH GmbH aj.), ale technologický přístup a postup transformovaný do obecné metodiky, jak jej pojal autor je svým způsobem inovativní a i odvážný. Spočívá zejména v tom, že se snaží řešením najít způsob, jak zkombinovat dva odlišné fyzikální fenomény laserové ablace materiálu, dané použitými laserovými zdroji, na jednom obráběném tvarovém prvku v podobě návrhu laserových strategií hrubování a dokončování a jejich podmínek s akcentováním jejich přínosů a potlačení jejich nedostatků, přičemž společným jmenovatelem je vyšší produktivita mikroobrábění při zachování jakosti opracování obrábění geometrické 3D entity. Tato motivace obecně koresponduje se světovým trendem čím dál tím většího rozšiřování a využívání subtraktivních laserových technologií v průmyslu.

Doktorand rozčlenil věcný obsah své práce do 11 kapitol, ve kterých uvádí čtenáře do svého řešení předem nadefinovaných cílů. Nechybí analýza současného stavu, popis návrhu řešení s metodickým přístupem vč. experimentální části a ověření na konkrétním průmyslovém případě laserového mikroobrábění prototypové utvařeče třísek na vyměnitelné břitové destičce ze slinutého karbidu TH10 od firmy Tungaloy. Závěrečné kapitoly se týkají ekonomického hodnocení navrženého řešení, dále pak celkovému shrnutí a závěru vč. uvedení citované literatury a publikací autora.

Stanoviska oponenta k následujícím bodům:

a) Dosažení v disertaci stanoveného cíle

Základním cílem bylo vytvoření a ověření obecného metodického přístupu pro produktivnější laserové mikroobrábění slinutého karbidu s použitím hrubovacích a dokončovacích strategií a podmínek, což si myslím, že bylo splněno. Na druhou stranu bych však byl opatrnější ve vyjádřeních v kap.9, že tento přístup bude aplikovatelný na veškeré rezné a další materiály, protože jak autor na začátku své práce správně poukazuje, jedná se o materiály, které mohou mít silně odlišné fyzikálně-mechanické vlastnosti, zvláště ty, které jsou pro laserovou technologii nejvíce důležité (tepelná vodivost a roztažnost, absorpivita materiálu pro použité vlnové délky laserového paprsku) a které mohou daný obecný postup ovlivnit či si vyžádat jeho modifikaci. Pro skupinu slinutých karbidů na bázi WC-Co je tento metodický postup však použitelný. Další instrumentální cíle shrnuté v kap. 12 byly rovněž naplněny, tj. staly se důležitou oporou v argumentaci při interpretaci celkových výsledků.

b) Úroveň rozboru současného stavu dané problematiky

Současný stav autor zpracoval v kap. 2. Některé formulace působí neobratně, jako např. na str.14, kde v posledním odstavci o vlastnostech materiálů, jako je tvrdost nebo elektrická vodivost píše tak,

jako by nepatřily k fyzikálně-mechanickým vlastnostem. V kapitole o absorpci laserového paprsku by slušela zmínka o Beer-Lambertovu zákonu. Autor v některých případech nesjednotil terminologii pro označování parametru či jeho pojmenování – např. F – fluence – hustota energie/intenzita záření/intenzita energie/intenzita, což může některému nezasvěcenému čtenáři připadat zmatečné. Některá označení vyskytující v textu se neobjevují v seznamu zkratk – viz např. míra ablace Q . Na druhou stranu velmi oceňuji fundované komentáře k rešeršním výstupům, i když je někdy velmi složité zachytit všechny souvislosti a okrajové podmínky zmiňované autory článků a správně tyto výsledky interpretovat, např. když zavádí další nestandardní parametry jako např. míra ablace Q na str. 28. Např. na obr. 28 autor popisuje jako intenzitu ablace podle jednotek na ose Y , ale grafy jsou nečitelně označeny jako míry ablace, která je definována mírně odlišně – viz vztah (1), který autor uvádí. K obr. 34 jsem nenašel odkaz z textu a vysvětlení.

V této kapitole mi dále chybí i zmínka o dalších faktorech důležitých pro laserový proces jako je polarizace laserového paprsku úzce spojená zejména i v práci se zmiňovanými funkčními povrchy a nebo průběh rozložení energie v laserovém paprsku ve smyslu užívaných modulací – základ Gaussův tvar, top-hat, apod. a nebo informaci o hloubce ostrosti laserového paprsku ve vztahu k velikosti jeho spotu vyjádřeného průměrem D . Ostatně tento parametr vnímám z hlediska zkoumání laserového paprsku jako základní, nicméně přiznávám, je zakomponován v parametru F . Na druhou stranu oceňuji zpracování stěžejní kapitoly k tématu práce a to je kapitola 2.5 o efektivitě mikroobrábění laserem a s tím spojenou analýzu délky pulsu laserového paprsku s ohledem na relaxaci materiálu a tím i efektivní využití těchto poznatků v burst-módu u laserového procesu – eliminaci plasmatického stínění, případně redepozice ablaovaného materiálu u UKP laserových procesů – s ultrakrátkým pulsem.

c) Teoretický přínos disertační práce

Teoretický přínos disertační práce shledávám ve zpracované kap.4, kde autor navrhl a zpracoval ve formě diagramů a schémat obecný metodický postup pro komplexní laserové mikroobrábění. I v této kapitole se doktorand dopustil některých mírných nepřesností v terminologii či zdvojení označení – např. výkon laseru namísto průměrný výkon laseru nebo označení D pro průměr ablovaného bodu – vztah (6) a i průměr laserového spotu – vztah (12).

d) Praktický přínos disertační práce

Praktický přínos disertační práce nacházím v experimentální části, zejména v praktickém nastavení laserových procesních parametrů a v ověření navržené metodiky na konkrétním praktickém případě výroby utvařeče na VBD, tj. kap. 5 a kap. 6. Současně z pohledu průmyslu vnímám důležitou i kap. 7 týkající se ekonomického zhodnocení navrženého komplexního přístupu.

V těchto kapitolách postrádám více dokumentujících obrázků s rozměry nebo výkresů vstupních vzorků polotovarů a následně jejich obrobků či výsledků měření, byť některá měření jsou uvedena v přílohách disertační práce a to zejména z důvodu lepší představy pro čtenáře, který nebyl součástí uskutečněných experimentů. Naopak některá měření úzce nesouvisející s navrženou metodikou – viz např. na obr.66 bych osobně přesunul do příloh. Zajímavý, ale méně okomentovaný z hlediska parciálních výsledků shledávám graf na obr.81, který ukazuje vyšší intenzitu ablace v rozmezí fluence 20-35 J/cm², což může mít i praktický dopad na efektivitu laserového procesu při obrábění slinutých karbidů pouze s použitím fs laserového zdroje. V kap. 6.3.1 popisujete, že pohybujete skenovací hlavou v ose Z , aby byla zajištěna správná fokusace. Otázkou je, zda-li je to z praktického hlediska výslovně nutné, zda by vám nepostačila hloubka ostrosti laserového paprsku s danou optikou pro cca 0,3mm hloubkový úběr? S tím souvisí i dotaz spojený se zvolením 17° šrafování při obrábění?

Další moje připomínky směřují k ekonomickému hodnocení, kde v tab. 24 a tab.25 uvádíte položku fixní energie. Můžete vysvětlit, co daná položka vyjadřuje a jak jste k výši této položky dospěl? Dále mám poznámky ke kapitole 7.4, kde hodnotíte návratnost investice, nicméně toto je ekonomický pojem - ROI, který je přesně definován, jak se vyhodnocuje. Proto by bylo lépe parametry hodnocené v grafech označovat jiným způsobem, nejlépe však standardním způsobem ve shodě s ekonomickou teorií a analýzami rentability a nákladovosti výrobních procesů – např. nákladové porovnání variantních technologií s určeným bodem zvratu apod.

e) Vhodnost použitých metod řešení

Autor postupoval při řešení problému systematicky, jednotlivé kapitoly plynule na sebe navazují. Použité metody řešení dané problematiky, tj. hledání řešení pro produktivnější technologii laserové ablace jsou vhodné a v práci v kap.4 okomentované a vyplývají z logického přístupu a teoretických základů nejen fyzikální ablace materiálu, ale i současného technologické know-how. Velmi oceňuji přemostění teoretického základu s praktickým a konkrétním výstupem řešení práce.

f) Způsob, jak byly použité metody aplikovány

Verifikace nového metodického přístupu pro produktivnější laserové mikroobrábění byla provedena na konkrétní případu výroby utvařeče třísek na vyměnitelné břitové destičce, což je opravdový reálný případ, který se v praxi vyskytuje zejména v případech návrhů prototypů, pokud výrobce řezných nástrojů – břitových destiček hledá optimální tvar žlábků za ostřím břitu sloužící k optimálnímu dělení a směřování třísek v řezném procesu pro dosažení způsobilejšího automatizovaného režimu obrábění za daných podmínek. Původní myšlenka pro řešení práce pramenící pravděpodobně z konvenčních obráběcích technologií, tj. hrubování tvaru geometrické entity následované jejím dokončováním za jiných podmínek, byla odvážně uchopena a úspěšně realizována.

g) Zda doktorand prokázal odpovídající znalosti v daném oboru

Doktorand nepochybně prokázal znalosti v daném oboru jednak tím, jakým způsobem si poradil se zpracováním komplexního tématu této disertační práce, jednak také svoji publikační činností v odborných časopisech a na konferencích včetně mnoha dílčích odborných spoluprací s průmyslovými firmami a to nejen na výzkumných projektech včetně svého dalšího zapojení do vědecké práce na svém pracovišti.

h) Formální úroveň práce

Disertační práce má dobrou jazykovou a formální úpravu s několika vlastními barevnými obrázky, grafy či fotografiemi. Některé obrázky či grafy, zejména v rešeršní části jsou však hůře čitelné. Zároveň se autor nevyvaroval několika překlepů – viz např. na str.71 natavit místo nastavit. Jak jsem již výše uvedl, některé statě v hlavním textu disertační práce by bylo vhodné uvést v příloze. Takto uvolněný prostor by bylo možné např. využít k detailnějšímu popisu experimentu nebo interpretaci výsledků. Další připomínkou je, že některé zkratky či symboly vyskytující se v hlavním textu autor v souhrnném výčtu opomněl.

e) Vyjádření oponenta dle zákona č.111/1998 Sb. § 47.

Práci i přes četné připomínky hodnotím jako přínosnou pro obor a proto práci **doporučuji** k obhajobě.

V Plzni, dne 22.8. 2023

.....
Ing. Pavel Kožmín, Ph.D.

HOFMEISTER s.r.o.

Mezi Ploty 12

326 00 Plzeň

E-mail: kozmin@hofmeister.cz

Otázky:

- 1) Ve své práci uvádíte několik přejatých teoretických vztahů z oblasti teorie ablačního procesu, které využíváte např. pro hodnocení efektivity laserového procesu (např. efektivita ablace, ablační práh, optimální špičková hustota energie apod.) Některé vámi uváděné vztahy pro výpočty jsou však mírně jiné od vztahů u vámi citovaného zdroje [50]. Můžete prosím vysvětlit, proč jsou tyto vztahy k danému výpočtovému parametru vzájemně rozdílné a zda-li je možné tedy dosažené výpočty mezi sebou porovnávat?