

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav strojírenské technologie
Technická 2896/2
616 69 Brno

OPONENTSKÝ POSUDEK

na doktorskou disertační práci

Název: **EFEKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ LASEREM**

Autor: **Ing. Tomáš PRIMUS,**
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie,
Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze
Praha

Školitel: **prof. Dr. Ing. František HOLEŠOVSKÝ**
Školitel specialista: **doc. Ing. Pavel ZEMAN, Ph.D.**

Doktorská disertační práce v rozsahu 142 stran obsahuje mimo úvodní kapitoly a závěr 9 základních kapitol včetně tabulek, obrázků a grafických závislostí.

V *Úvodu* autor vysvětluje motivaci při psaní práce na zvolené téma, jehož těžištěm jsou návrhy a vytvoření metodiky vedoucí k nastavení nejlepších procesních laserových parametrů mikroobrábění při výrobě utvařeče třísek do VBD.

V následujících dvou kapitolách autor analyzuje současný stav poznání s charakteristikou řezných materiálů, technologií laserového mikroobrábění a se současnou úpravou geometrie řezných nástrojů pomocí různých typů laserů. Součástí dalších podkapitol je rovněž charakteristika aplikovaných dílčích metod, které vedou ke zvyšování procesu laserového mikroobrábění. Aplikovaný komplexní přístup a problematika spojená zejména s použitým laserovým zdrojem (nanosekundový, femtosekundový) pro proces hrubování respektive dokončování se následně stala předmětem řešení dizertační práce.

V navazující kapitole jsou stanoveny cíle disertační práce, jejichž stěžejní částí je vytvoření a zejména nezbytné ověření metodiky laserového mikroobrábění slinutého karbidu typu K za účelem zvýšení produktivity řezného procesu se současným zachováním požadované jakosti povrchu i řezivosti nově aplikovaného nástroje (VBD).

Čtvrtá kapitola se zabývá analýzou a postupy vedoucími ke stanovení efektivního laserového obrábění od nastavení jednotlivých procesních parametrů i strategií až po rozbor metodiky komplexního přístupu, přičemž zde vyzdvihují problematiku a složitost celého řešení s ohledem na nově získané znalosti.

Kapitola č. 5 charakterizuje výsledky z provedených experimentů, které se zabývají interakcí dvou typů laserů s aplikovaným slinutým karbidem typu K z pohledu stanovení procesních parametrů vedoucích k efektivní ablaci materiálu při dodržení požadované jakosti povrchu pro oba použité lasery (nanosekundový, femtosekundový). Součástí této kapitoly jsou provedené experimenty vedoucí k ověření komplexního přístupu subtrakce tepelně ovlivněné oblasti pomocí femtosekundového laseru se současným snížením drsnosti povrchu po operaci hrubování. Z této kapitoly vyzdvihují návrh prediktivního empirického modelu, který na základě parametrů hrubování a vlastní výroby utvařeče třísek stanoví velikost přídatku pro dokončování a predikuje čas celého výrobního procesu.

Kapitola č. 6 se zabývá vlastní výrobou utvařečů třísek do slinutého karbidu typu K s použitím odzkoušených procesních parametrů a navržených postupů z předchozích kapitol. Jednotlivě vyrobené utvařeče třísek byly analyzovány a současně porovnány s referenčním lisovaným rezným nástrojem (VBD) zejména z pohledu jejich řezivosti, trvanlivosti, rezných sil, jakosti obrobeného povrchu a tvorby třísky při obrábění.

Kapitola č. 7 se zabývá ekonomickými dopady v kontextu s vyčíslením vícenákladů spojených s pořízením dvou typů laserových zařízení vůči jednomu. V kapitole je rovněž proveden výpočet nákladů na výrobu jednoho kusu utvařeče třísek v kombinaci různých variant řešení (femtosekundový laser, komplexní přístup – kombinace obou typů laserů) doplněný o vyčíslení návratnosti investice při různých počtech vyráběných kusů utvařečů, přičemž pro komplexní přístup návratnost vynaložené investice vzhledem k hranici potřebného počtu kusů vychází smysluplně, ale k této záležitosti se vrátím formou dotazu v souvislosti s řešenou problematikou.

Poslední tři kapitoly charakterizují celkové shrnutí výsledků, důsledky pro vědu a průmyslovou praxi a doporučení pro další výzkum v souvislosti s obráběním jiných nástrojových materiálů (kubický nitrid bóru, rezná keramika, polykrystalický diamant), na které by se dala aplikovat komplexně navržená metodika řešení.

V *Závěru* jsou získané poznatky z provedeného výzkumu shrnuty do vědeckého a praktického konstatování charakterizující výsledky práce.

Autor se rovněž zamýšlí nad přínosem řešené problematiky v oblasti vědeckého významu pro obor, přínosů pro využití v praxi, budoucích přínosů pro výuku a navazující výzkumné činnosti.

Seznam literatury obsahuje celkem 112 referencí, kde se autor opírá o literární, odborné a elektronické zdroje. Práce obsahuje také vybrané publikace autora k řešenému tématu a to v časopisech „s“ a „bez“ IF indexovaných v databázích WoS a Scopus.

Součástí práce je rovněž výčet výsledků získaných od Úřadu průmyslového vlastnictví v Praze v počtu jednoho užitého vzoru, jednoho prototypu a jedné patentové přihlášky, které souvisí s řešenou problematikou.

Přílohy práce považuji za vhodné a týkající se přímo dílčího řešení práce.

Připomínky k práci:

- Str. 17 „S výhodou lze tedy tyto lasery využít pro velmi jemné mikro-obrábění bez negativních změn v materiálu. [15] [7] [20] [21] [22]“ Použitá literatura by měla být seřazena vzestupně a tato záležitost se nachází v práci na více místech.
- Str. 18 „V některých se objevovali i starší, stále v průmyslu zastoupené lasery s krátkou délkou pulsu s pulsy v řádech nanosekund.“ Text by bylo třeba lépe

a vhodněji formulovat – jedná se o technickou práci. V textu se navíc nachází gramatická chyba, přičemž uvedená záležitost se v práci opakuje na více místech.

- Str. 18 Obr. 7 a Obr. 8 by bylo vhodné prohodit, aby byla v práci zachována jednotnost a posloupnost.
- Str. 32 Obr. 32 a Obr. 33 uvedené jednotky v grafických závislostech nejsou v hranatých závorkách pro zachování jednotnosti v celé práci. Uvedená záležitost se nachází v práci na více místech včetně chybějících jednotek např. v grafické závislosti na obr. 35 viz str. 34.
- Str. 49 Obr. 53 je sjednocen s textem práce a působí velice nepřehledně.
- Str. 51 za zkratkou viz se nedělá tečka? Uvedená záležitost se nachází v práci na více místech.
- Str. 57 V práci se na několika místech nachází slovo „ideální.“ Slovo ideální by se nemělo vyskytovat v použitém technickém textu.
- Str. 77 V práci se na několika místech nachází opakující se slovo „optimální“, ale k této záležitosti položím otázku níže v návazujících dotazech.
- Str. 79 Obr. 82 b) je prakticky nečitelný.
- Str. 85 „Hodnota Sz v Tab. 17 byla uvažována pro hloubku hrubování 300 μm , s tím že byla vynásobena koeficientem 0,8, který kompenzuje hloubku použitou k výpočtu a skutečnou hrubovanou hloubku.“ V tab. 17 se žádná hodnota Sz nenachází.
- Str. 88 Obr. 93 + další obdobné obrázky – chybí u nich uvést měřítko.
- Str. 90 „Vzorek C vytvořený komplexním přístupem byl vytvořen za 111, což je téměř 2,5x více než utvařeč vytvořený pouze nanosekundovým laserem.“ Za číslem 111 chybí uvést jednotky.
- Str. 105 Tab. 23 legenda k tabulce se nachází mimo její oblast.
- Str. 112 „Spočítaným limitem je dávka o velikosti 38 tis. kusů, která při jednosměnném provozu.“ Chybí dokončit větu.
- Str. 112 „V následující tabulce jsou shrnuty....“ Chybí uvést odkaz na tabulku v textu práce.
- Str. 114 Slovo „nerezová“ ocel se nepoužívá a správně mělo být uvedeno „korozi vzdorná“ ocel.
- Str. 126 a 127 v seznamu použitých zdrojů od zdroje [100] do zdroje [112] jsou odskočené závorky.

DOTAZY:

1. Str. 13 „Optimalizováním a zefektivňováním procesu laserového mikroobrábění se zabývá i tato práce.“ Definujte pojem optimalizace řezného procesu v souvislosti s řeznými podmínkami respektive s procesními parametry? Na základě jakých omezení a kritérií lze optimalizovat řezné podmínky/procesní parametry? Jaký proces optimalizace byl v práci proveden?
2. Jakým způsobem lze stanovit velikost zbytkového napětí po procesu laserového obrábění? Jaké znáte způsoby měření zbytkového napětí?

3. Podle jakého kritéria byl zvolen dodavatel řezných nástrojů? Proč nebyli osloveni další potenciální výrobci / dodavatelé řezných nástrojů?
4. Disertační práce s názvem „Efektivní obrábění nástrojových materiálů laserem“ se zabývá pouze nástrojovým materiálem - slinutý karbid typu K. Proč není v disertační práci řešeno více nástrojových materiálů, jak je uvedeno v jejím nadpise?
5. Jaký je doporučený rozsah ablačního prahu pro ostatní druhy nástrojových materiálů typu kubický nitrid bóru, řezná keramika a polykrystalický diamant?
6. Proč se do VBD ze slinutého karbidu typu K pracně vyráběl utvařecí třísky vzhledem k jeho aplikačnímu použití viz obrábění zejména litin (temperovaná, globulární grafit) se vznikem krátké drobné třísky a předpokladu snadného dělení a odvodu třísky z místa řezu? Z jakého kritéria se vycházelo při vlastní volbě utvařecí třísek?
7. Proč byla pro podélné soustružení zvolena právě uhlíková ocel 1.1191?
8. Vysvětlíte, jakým způsobem se prováděla diferenční analýza a jakými postupy bylo provedeno ustavení 3D modelů?
9. Charakterizujte, jaký je rozdíl mezi parametry drsnosti Ra a Rz vs. Sa a Sz?
10. Str. 79 „Profil utvařecí byl následně vymodelován, aby bylo možné data ve formátu .stl přenést do laserového zařízení.“ V jakém programu byl profil utvařecí vymodelován a jakým způsobem se s daty dále pracovalo do výsledné výroby utvařecí třísek?
11. V práci se autor pokusil predikovat návratnost laserového zařízení v souvislosti s výrobou utvařecí třísek do VBD, ale je prezentované řešení vzhledem k náročnosti celého procesu vůbec smysluplné? Jaké může být další využití laseru při mikroobrábění v souvislosti s jeho nákladnou investicí?

Cílem disertační práce bylo vytvoření a ověření metodiky laserového mikroobrábění slinutého karbidu typu K za účelem zvýšení produktivity řezného procesu se současným zachováním požadované jakosti povrchu i řezivosti nově aplikovaného nástroje (VBD). Rozhodujícím aspektem tohoto řešení byl návrh a ověření inovativního přístupu k mikroobrábění slinutého karbidu typu K laserem, který zahrnuje vhodnou kombinaci hrubovacích a dokončovacích strategií, souvisejících podmínek a dílčích nastavení. Tento cíl byl podle výsledků práce splněn a použitá metodika odpovídá požadované úrovni disertační práce.

Práce má velmi dobrou grafickou i teoretickou úroveň. V práci je však několik formálních nedostatků, gramatických chyb, použitá i vynechaná interpunkce, drobných překlepů a superlativ, které lehce snižují celkový dojem a kvalitu práce. Autor provedl velké množství experimentů, jejichž výsledky a závěry mohou být využity při procesu laserového mikroobrábění s využitím jiných nástrojových materiálů a potřebných výrobních zařízení. Podklady potřebné pro svoji práci autor čerpal z literárních, odborných a z elektronických zdrojů, o které se také opírá.

Celkový výsledek práce má vysokou odbornou úroveň z hlediska vědecko-výzkumné činnosti v oblasti laserového mikroobrábění různých nástrojových materiálů s využitím nekonvenčních metod obrábění. Doktorand prokázal schopnost vědeckého přístupu při řešení daného tématu. Práce vykazuje hluboké teoretické i praktické znalosti doktoranda v uvedené oblasti a lze ji považovat za přínosnou pro praxi i pro další rozvoj v tomto vědním oboru.

Vzhledem k výsledkům dosažených v průběhu řešení disertační práce jsou splněny podmínky pro konání obhajoby a

- d o p o r u č u j i -

předloženou práci k obhajobě.

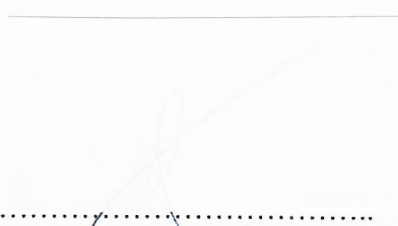
Žádám o zodpovězení dotazů a některých neformálních připomínek k práci a **po uspokojivém obhájení práce doporučuji udělit akademický titul „doktor“** (ve zkratce Ph.D. uváděné za jménem) pro doktorský studijní obor Strojní inženýrství.

Vyjádření k předloženým tezím.

Předložené teze jsou zpracované ve sledu korespondujícím s disertační prací.

Pro lepší čtivost textu však doporučuji teze editovat podle doporučení, které jsou popsány ve výše uvedených připomínkách.

V Brně 21. 08. 2023


.....
doc. Ing. Josef **SEDLÁK**, Ph.D.
ÚST FSI VUT v Brně