

Oponentní posudek disertační práce

Název práce: Efektivní obrábění nástrojových materiálů laserem

Autor práce: Ing. Tomáš Primus

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Disertační práce se zaměřuje na laserové mikro-obrábění nástrojových materiálů, a to hlavně na slinutý karbid wolframu a zvyšování efektivity tohoto obrábění. Pro obrábění jsou používány nanosekundový a femtosekundový laser a jejich kombinace pro zvýšení efektivity obrábění při zachování dobré kvality obrobku. Hodnocená disertační práce v rozsahu 142 stran je členěna do 14. kapitol a obsahuje tři přílohy. Práce odkazuje na 112 literárních pramenů. Autor publikoval 8 článků ve vědeckých časopisech a z toho je na sedmi z nich prvním autorem. Autor měl dokonce jednu vyzvanou přednášku na mezinárodní konferenci.

Dosažení v disertaci stanoveného cíle

Cíle disertační práce byly splněny. Byla vytvořena a ověřena metodika laserového obrábění slinutého karbidu umožňující vyšší produktivitu procesu při zachování kvality a řezivosti nástroje. Nanosekundový laser je použit pro hrubování a femtosekundový laser pro dokončování. Pro konkrétní materiál bylo provedeno detailní nastavení parametrů laserového procesu pro oba laserové systémy a následně byla vypracována metodika kombinování obou procesů pro využití jejich výhod a eliminaci nedostatků. Po počátečních testech byly touto metodikou obrobena řezná destičky a byla testována jejich životnost při použití v obrábění, řezná síla a výsledná drsnost materiálu po obrobení. Podařilo se dosáhnout dobrých výsledků. Na konci práce bylo zpracováno technicko-ekonomické porovnání a výsledek je zajímavý i ekonomicky.

Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky

Rozbor je proveden pěkně a detailně. Jsou ukázány jak vědecké publikace, tak aktuální laserové technologie používané v průmyslu. Byly nalezeny práce, na které je možno v práci navázat a zároveň z rozboru vyplývají neprobádaná místa, kterým se pak věnuje tato práce. V textu jsou určité drobné nepřesnosti (viz formální úroveň práce).

Teoretický přínos disertační práce

Teoretický přínos práce je například v oblasti závislosti intenzity a efektivity obrábění a výsledné drsnosti na parametrech laserového procesu pro slinutý karbid wolframu. Hlavní zkoumané parametry procesu byly délka pulzu, časový tvar pulzu, hustota energie, překryv pulzů a celkový průměrný výkon laseru. Zajímavé je zde také použití různých vlnových délek, natočení šrafování a dávkového laserového zpracování (burst mode) s různým počtem pulzů v dávce. Zajímavá je i závislost řezné síly různých nástrojů na čase obrábění (Obr. 104), kde femtosekundovým laserem dokončená hrana v první třetině procesu snižuje řeznou sílu.

Praktický přínos práce

Praktický přínos práce vidím v ověření obráběcích schopností vyrobených břitů obráběcích destiček a to pro jak samostatně nanosekundovým a femtosekundovým laserem, tak pro vyvinutou časově efektivní kombinaci obou. Dále vyvinutí metodiky stanovení přídatku pro dokončování a empirického

modelu pro stanovení počtu vrstev a času obrábění pro jednotlivé kroky hrubování a dokončování. Zajímavé a přínosné je i technicko-ekonomické zhodnocení provedené inovace.

Vhodnost použitých metod řešení a způsob jakým byly aplikovány

Použité metody byly zvoleny a použity dobře. Práce má pěknou linku od počátečních laserových experimentů až po testování vyrobených nástrojů. Jednotlivé kroky na sebe dobře navazují. Výjimkou je pouze nejasný přechod od experimentu k určení vhodné křivky (5.4.1.1) k experimentu k určení vhodné energie a překryvu (5.4.1.2), kde se výrazně změnila skenovací rychlost (viz otázka 2. níže).

Prokázání odpovídajících znalostí v oboru

Autor prokázal odpovídající znalosti ve všech oblastech práce: návrh, nastavování a provádění laserových obráběcích experimentů, vyhodnocení výsledků obrábění pomocí 3D profilometru, mikroskopu a metalografie, pochopení vlivu jednotlivých parametrů na pulzní laserový proces, návrh, provedení a vyhodnocení klasických obráběcích experimentů a technicko-ekonomické zhodnocení výsledků.

Formální úroveň práce

V práci je mnoho drobných nedostatků v textu nebo obrázcích. Napočítal jsem jich přes 40. Ve větách občas chybí nebo přebývá nějaké slovo. Někdy se neshodují označení veličin v různých částech textu. Nebo se neshodují hodnoty v tabulce či obrázku s textem. Někdy je špatně odkaz na literaturu, nebo přehozeno a) a b) v obrázku a textu. Zde bych uvedl některé významnější příklady:

- Formulace „Většina laserové energie je absorbována elektrony, a proto se do mřížky přenáší velmi rychle bez ztrát tepelnou difúzí. Z tohoto důvodu je zahřátí okolního materiálu zanedbatelné.“ (str. 17) mi přijde nepřesná/nejasná.
- Co znamená vytvoření páru elektron-foton (str. 17)?
- „Struktura podporující tření může vést ke snížení tření ...“ (str. 22). Je myšleno: struktura podporující tribologické vlastnosti?
- Opravdu je použita rychlost 200 m/s v Tab. 3? Nemá to být 200 mm/s?
- Překvapuje mě použití energie v řádu 0,1 až 1 J pro fs laser (Obr. 24, str. 26). Má být na ose J/cm^2 ?
- „Přijatelný odebraný objem vzhledem ke kvalitě povrchu byl stanoven pro $\Delta V = 10 \text{ mm}^3/\text{min}$ pro použitou intenzitu $2,93 \text{ J}/\text{cm}^2$.“ (str. 28) Na Obr. 26 to spíše vypadá, že tento objem je dosažen při $4,8 \text{ J}/\text{cm}^2$.
- V Obr. 34 má být asi odkaz na [55] (ne [60]).
- Veličina F_0^{TH} označovaná jako hustota energie je asi totéž jako veličina F_{TH} označovaná jako intenzita (str. 44 a 45).
- Veličina I_{abl} v rovnici (11) není definována ani popsána v seznamu veličin, ale asi je totožná s veličinou \dot{V} nebo ΔV (obě jsou v práci použity pro stejný význam).
- „Při zvýšení opakovací frekvence v rámci jedné wf průměrný výkon nelineárně klesá, jak je vidět na Obr. 57 pro wf 0.“ (str. 52) Průměrný výkon laseru je asi konstantní se změnou frekvence. Je myšleno špičkový výkon? Na obrázku je časový profil výkonu v pulzu.
- Označení $\Delta V/t$ ($\text{mm}^3/\text{min}/\text{W}$, str. 69) asi není správné, protože ΔV již má v jednotce čas (mm^3/min).
- Obr. 90 (str. 86) – Žluté hodnoty nesedí s Tab. 17 (čas). Ani počet vrstev fs laseru. V textu je také přídavek $105,7 \text{ }\mu\text{m}$ jako v grafu a ne v tabulce ($100 \text{ }\mu\text{m}$).

- Str. 112 – Lepší dělení třísky bylo pro nástroj vyrobený komplexním přístupem, ne „pouze femtosekundovým laserem“. Nižší řezná síla byla pozorována u obou (ne pouze u fs).
- „Jelikož je slinutý karbid velmi používaným materiálem ..., nepatří mezi tak studované materiály ...“ (str. 114) Nemělo být místo „Jelikož“ spíše „I když“?
- Co to znamená „Z tohoto důvodu může být nynější investice do laserového mikroobrábění vysoká.“? Jako že vyjde draho nebo naopak výhodně?

Doporučení

Domnívám se, že předloženou práci Ing. Tomáš Primus prokázal schopnost provádět kompletní experimentální vědeckou práci od konceptu a metodologie přes provádění experimentů a analýzu výsledků až po psaní a diskusi výsledků. Disertační práci proto doporučuji k obhajobě.

doc. Ing. Jiří Martan, Ph.D.

Západočeská univerzita v Plzni
Nové technologie - výzkumné centrum

V Plzni, 22. 8. 2023

Otázky:

1. Jaké byly použity frekvence pro jednotlivé WF (str. 56, Obr. 62) při vybírání vhodné křivky průběhu pulzu? Ideální, maximální, nebo jiné?
2. Proč je tak nízká skenovací rychlost při prvotním stanovení parametrů (80 mm/s, Tab. 7) oproti dalším experimentům?
3. Co znamená „... dochází k lepšímu tavení obou fází“, když je překryv menší ($S_x=40\%$ a 50%)? (str. 59)? A jak to, že „energie potřebná k tavení klesá“, když je překryv menší?
4. Bylo by vhodné udělat více experimentů obrábění s vytvořenými nástroji (aby byla k dispozici statistika)? Jaká je ze zkušenosti variabilita pro různé kusy stejného nástroje?
5. Jaké jsou hodinové režijní sazby (HRS, str. 108) v první kalkulaci? V práci jsou uvedeny jen HRS-nano (HNS, str. 109). A kolik stojí nástroj bez utvařeců třísek – polotovar pro laserové obrábění (k porovnání s Tab. 30, str. 113)?
6. V čem vidí autor svůj největší osobní přínos na této práci?