

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Efektivní obrábění nástrojových materiálů laserem

Ing. Tomáš Primus

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: *Strojírenská technologie*

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

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

červen 2023

Název anglicky: *Effective laser machining of the materials for the cutting tools*

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: *Ing. Tomáš Primus*

Ústav *technologie obrábění, projektování a metrologie*, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6

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

Ústav *Technologie obrábění, projektování a metrologie*, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6

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

Ústav *Výrobních strojů a zařízení*, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Horská 3, Praha 2

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Strojní inženýrství.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
předseda oborové rady oboru
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Anotace

Tato disertační práce s názvem „Efektivní obrábění nástrojových materiálů laserem“ se zabývá metodami pro zvyšování efektivity mikroobrábění laserem. Výzkum je věnován hybridní technologii, v práci nazvané komplexní přístup, kombinující výhody nanosekundového a femtosekundového laserového obrábění. V navrženém a otestovaném postupu je nanosekundový laser použit pro intenzitní odebrání většího objemu materiálu v procesu hrubování, následně pak femtosekundový laser pro odebrání tepelného ovlivnění a dokončení povrchu. Práce podrobně popisuje navrženou metodiku včetně empirického modelu pro stanovení přídatku pro dokončování na základě předchozích experimentů efektivity obrábění s ohledem na kvalitu obrobenej plochy. Vhodnost komplexního přístupu byla otestována při vytvoření utvařečů třísek na slinutém karbidu a jejich následné otestování při obrábění podélným soustružením a přímým porovnáním s lisovaným utvařečem. Z naměřené trvanlivosti nástrojů, utváření třísek a generovaných sil při obrábění vyplynulo, že laserem vytvořené utvařeče, a konkrétně utvařeč vytvořený navrženým komplexním přístupem, mají srovnatelnou řezivost s nástrojem s lisovaným utvařečem třísek. V závěru práce byly provedeny ekonomické kalkulace zohledňující pořizovací náklady druhého laserového zařízení na cenu vyráběného nástroje, které potvrdily smysluplnost navrženého a realizovaného řešení. Práce přináší nové poznatky v oblasti laserového mikroobrábění nástrojových materiálů s přesahem do vědecké sféry i průmyslové praxe.

Annotation

This dissertation thesis “Effective laser machining of the materials for the cutting tools” deals with methods for increasing of effectivity of laser micromachining. Research is based on a hybrid technology, named as complex approach, combines advantages of nanosecond and femtosecond laser machining. In the presented approach, nanosecond laser is used for intensive high-volume material removal in roughing process, followed by femtosecond laser machining for removing of heat affection and finish the surface. In this thesis presented methodology was describe in detail including empirical mathematical model for the determination of the finishing allowance based on the previous experiments regarding to effectivity of laser machining with respect to surface quality. This complex approach was tested during fabrication of the chip breakers in the sintered carbide tools and tested during turning. Obtained results (durability, chip formation and cutting forces) were compared with the pressed formed chip breaker. It was found that the laser prepared chip breakers and the pressed formed chip breaker have similar cutability. Finally, economical model was performed to calculate acquisition second laser device cost and corresponding prices for the fabricated tools. This thesis brings novelty to science and industry in the field of laser micromachining of the cutting tool materials.

Obsah

Anotace	6
Annotation	7
1 Současný stav problematiky.....	10
1.1 Úprava geometrie řezných nástrojů laserem	10
1.2 Zvyšování efektivity mikroobrábění laserem	10
2 Cíle disertační práce	11
3 Návrh a zpracování metodiky efektivního mikroobrábění laserem	12
3.1 Komplexní přístup a metody pro zvyšování efektivity mikroobrábění laserem.....	13
4 Výsledky	14
4.1 Testování interakce paprsku laseru s materiálem.....	14
4.2 Ověření navržené metodiky komplexního přístupu	15
4.3 Výroba utvařečů třísek laserem a testy řezivosti nástrojů	17
4.4 Ekonomické zhodnocení komplexního přístupu	20
5 Závěr.....	22
6 Důsledky pro vědu a průmyslovou praxi	23
7 Doporučení pro další výzkum	23
8 Splnění cílů práce	24
9 Seznam použité literatury v tezích	26
10 Publikace související s tématem disertace	29
11 Ostatní publikace	29

11.1	Výzkumné zprávy.....	30
11.2	Patenty a užitné vzory	31
11.3	Ostatní publikace.....	31

1 Současný stav problematiky

Technologie laserového mikroobrábění je vhodná pro úpravu jak mikrogeometrie, tak makrogeometrie řezného nástroje. Laserem lze na povrchu nástrojů vytvářet různé mikro-entitty v podobě důlků, drážek, pyramid [1] [2] nebo naopak makroentitty jako jsou utvařeče třísek pro změnu jeho funkčních vlastností, zejména zlepšení tvorby a odchodu třísky z místa řezu [3] [4] [5]. Utvařeče třísek vytvořené laserem mohou být prototypem před sériovou výrobu nebo se může jednat o unikátní nástroje.

1.1 Úprava geometrie řezných nástrojů laserem

Úprava makrogeometrie řezných nástrojů laserem pro zvýšení jejich řezivosti je již částečně v literatuře popsána [6] [7] [8] [9] [10], a i v průmyslu se tímto tématem několik firem zabývá [11] [12]. Stále ale roste vývoj nových nástrojových materiálů a zároveň i nutnost tyto materiály obrábět. Laser je na to vhodným nástrojem, protože dokáže obrábět všechny materiály bez rozdílu jejich tvrdosti. Podstatná je přitom jejich interakce s laserovým zářením, zejména absorpce jeho vlnové délky a tepelná vodivost.

K úpravě geometrie řezných nástrojů se používají různé laserové systémy, nejčastěji vybavené skenovací hlavou, pohybovými osami a laserovým zdrojem pracujícím v pulsním režimu [13] [14] [15] [16] [17]. V literatuře i v průmyslu se stále více objevují lasery pracující s pulsy kratšími než 10 ps, což přináší nové možnosti z hlediska velmi malé tepelně ovlivněné oblasti. Dále se také pro úpravu nástrojových materiálů používají lasery pracující s kratšími vlnovými délkami, např. 510 nm. Tato vlnová délka je podle výrobců [16] [15] lépe absorbovatelná nástrojovými materiály než např. základní vlnová délka 1030 nm. Výhodné je také použití laserových strojů s pěti pohybovými osami a dvěma osami optickými, které umožňují vytvářet komplexní geometrie, například celé šroubovice na frézovacích nástrojích.

1.2 Zvyšování efektivity mikroobrábění laserem

Obrábění nanosekundovým laserem je velmi produktivní, cena zařízení je nižší, vede ale k tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a k horší kvalitě povrchu [18] [19]. Vedle toho obrábění femtosekundovými a pikosekundovými lasery je méně produktivní s dobrou výslednou kvalitou povrchu [20] [21] [22] [23]. Možným zefektivněním celého ablačního procesu může být zvýšení opakovací frekvence [24], použití více svazků [19] nebo hybridní přístup tzv. komplexní laserové mikroobrábění, které kombinuje nanosekundovou a pikosekundovou (popř. femtosekundovou) laserovou ablací, kde může

vhodně kombinovat rychlý úběr materiálu v procesu hrubování a velmi precizní odebrání posledních vrstev v procesu dokončení [25]. Ke zkoumání této komplexní problematiky je ale třeba velmi přesně znát interakci daného materiálu s daným laserovým zařízením, chování materiálu v procesech ablace a hledání nejefektivnějších procesních parametrů. Tématu hybridní technologie laserového obrábění, kde se kombinují dva laserové zdroje s různou efektivitou úběru materiálu se v literatuře povrchově věnuje jen pár publikací. Z tohoto důvodu je v hybridní technologii, v práci označené jako komplexní přístup, prostor pro inovativní řešení, zejména v kombinaci s řeznými nástroji.

2 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je vytvoření a následně ověření metodiky laserového obrábění slinutého karbidu pro vyšší produktivitu procesu při zachování požadované kvality povrchu a řezivosti nástroje. Klíčovým aspektem řešení je návrh a ověření inovativního přístupu k mikroobrábění slinutého karbidu laserem, který spočívá ve vhodné kombinaci hrubovacích a dokončovacích strategií a podmínek.

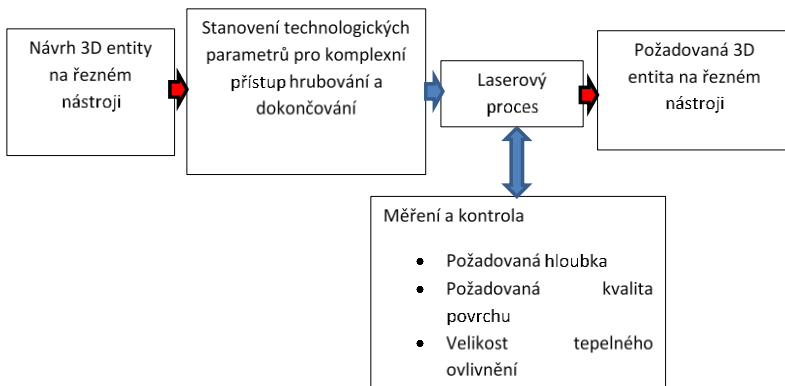
Dílčími cíli disertační práce jsou:

- Stanovení dílčích technologických parametrů pro efektivní mikroobrábění slinutého karbidu laserem, a to pro hrubovací (nanosekundový) i dokončovací (femtosekundový) proces.
- Definovat a otestovat velikost přídávku pro dokončování, jako klíčového parametru pro návaznost operací hrubování a dokončování s cílem požadovaného tvaru a kvality povrchu.
- Experimentální ověření navržené metodiky pro výrobu utvařeče třísek do nástroje ze slinutého karbidu a jeho následné otestování při obrábění. Součástí experimentu je také porovnání řezivosti inovativním přístupem laserem vytvořeného nástroje s konvenčně vyrobeným.
- Tvorba empirického modelu sloužícího k výpočtu přídávku pro dokončování s ohledem na požadovanou hloubku a kvalitu povrchu vytvářené 3D entity.
- Definování ekonomického hlediska zvolené strategie a porovnání efektivity inovativního přístupu s klasickým.

3 Návrh a zpracování metodiky efektivního mikroobrábění laserem

Součástí návrhu vlastního řešení metodiky pro efektivní mikroobrábění laserem je i inovativní komplexní přístup. Hlavní myšlenkou tohoto přístupu je vhodné zkombinování nanosekundového laseru pro proces hrubování a femtosekundového laseru pro dokončování. Pro hrubování je použito laserové zařízení s krátkými pulsy v řádech nanosekund, pro které je možné dosáhnout velmi vysoké intenzity ablace. Pro dokončování je navrženo použití laseru s ultrakrátkými pulsy (UKP) s délkou pulsu ve stovkách femtosekund. Tato zařízení jsou vhodná pro velmi jemné úběry a dosažení požadované kvality povrchu vytvářené 3D entity.

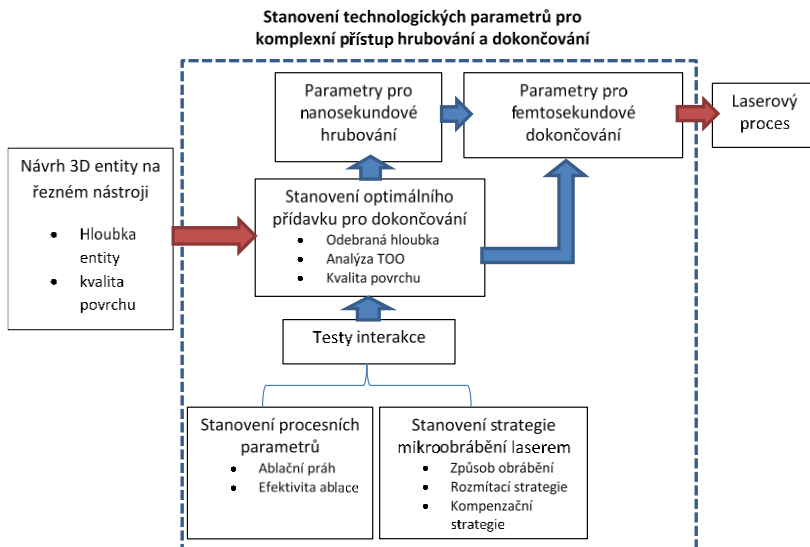
Zpracování řezných nástrojů laserem pro vytvoření určité 3D entity, např. utvařeče třísek lze popsat podle následujícího schématu - Obr. 1. V prvním kroku je vytvořen návrh předmětné 3D entity, pro kterou je vytvořen soubor technologických parametrů pro její realizaci na základě postupů dále popsaných v této práci, označených jako komplexní přístup k mikroobrábění laserem. Navrhnuté technologické parametry jsou následně použity v laserovém procesu a případně dále optimalizovány pro výrobu požadované 3D entity na řezném nástroji. Součástí výsledku je také kontrola a měření požadovaného tvaru, kvality povrchu a potenciálního tepelného ovlivnění řezného materiálu.



Obr. 1: Schematické znázornění navržené metodiky efektivního mikroobrábění nástrojových materiálů laserem

3.1 Komplexní přístup a metody pro zvyšování efektivity mikroobrábění laserem

Pro správné navržení komplexního přístupu je potřeba stanovit technologické parametry laserového obrábění, tak aby byly procesy hrubování a dokončování efektivní a přesné. Klíčové je zejména stanovení přídavku pro dokončování, který je určen zejména velikostí tepelně ovlivněné oblasti a kvalitou povrchu po hrubování včetně požadavku na výslednou hloubku mikroobráběné entity, případně i podle velikosti a odsazení čelní fazety. Pro určení tohoto přídavku je zapotřebí experimentálně testovat interakci obou použitých laserů s vybraným materiálem, v této práci konkrétně se slinutým karbidem typu K, a určit podmínky pro jeho efektivní a přesné laserové mikroobrábění. Mezi testy interakce patří stanovení procesních parametrů, mezi které lze zařadit vlnovou délku, intenzitu energie nebo opakovací frekvenci, a stanovení strategie mikroobrábění, např. styl šrafování. Následuje finální aplikace komplexního přístupu v samotném laserovém procesu. Popsaný postup pro stanovení technologických parametrů komplexního přístupu včetně požadovaného vstupu a výstupu je schematicky zobrazen na Obr. 2.



Obr. 2: Schematicky znázorněný postup pro stanovení technologických parametrů komplexního přístupu včetně požadovaného vstupu a výstupu

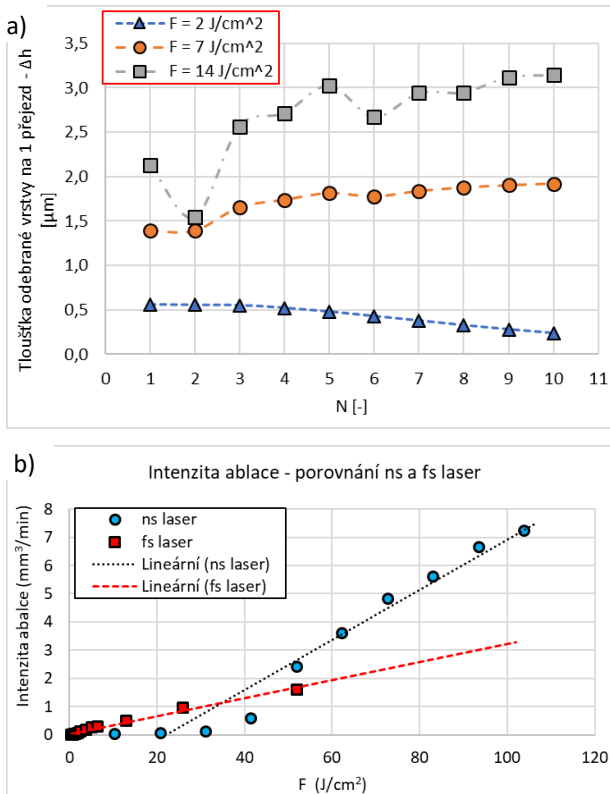
4 Výsledky

Součástí samotného řešení jsou provedené dílčí experimenty k určení interakce paprsku laseru s materiálem a určení optimálních procesních parametrů. Následuje ověření smysluplnosti komplexního přístupu, a to na schopnosti dokončit povrch laserem s ultrakrátkými pulsy. Na závěr experimentální části jsou popsány výsledky experimentů obrábění s laserem vytvořenými nástroji pro jejich aplikovatelnost v praxi včetně zhodnocení ekonomické náročnosti samotného procesu jejich výroby.

4.1 Testování interakce paprsku laseru s materiálem

Testování interakce laserového záření se slinutým karbidem s označením TH10 (90% WC + 8% Co + 2% TaC/NbC) bylo rozděleno do dvou dílčích kroků – určení optimálních strategií obrábění a následné stanovení technologických parametrů. Byly popsány a otestovány skenovací strategie, jako je liniové a konturové šrafování a natočení jednotlivých šraf. Následně byla experimentálně stanovena vhodná zpoždění galvoskenneru, která významně ovlivňují vznik přepalů na začátcích a koncích skenovaných drah. Ze stejného důvodu bylo optimalizováno i použití funkce skywriting. Technologické parametry byly stanoveny pro jednotlivá laserová zařízení zvláště, jelikož se jedná o odlišné procesy. U nanosekundového hrubovacího procesu byl stanoven optimální průběh pulsu – tzv. waveform, optimální překryv pulsů a intenzita energie. Určení vhodnosti dílčích technologických parametrů proběhlo s ohledem na produktivitu procesu a kvalitu obrobeneho povrchu. U nanosekundového hrubování byly také provedeny experimenty ke stanovení tepelného ovlivnění podpovrchové vrstvy. Tyto analýzy byly provedeny na elektronovém mikroskopu, kde byla měřena tenká vrstva, ve které chybí pojivový kobalt. To je způsobeno rozdílnými teplotami tavení obou složek slinutého karbidu. Teplota tavení tvrdé složky WC je téměř shodná s teplotou vypařování Co. Výsledkem je pak znovu ztuhlá tavenina s jemným zrnem a s absencí kobaltu. Bylo změřeno, že tato oblast je velká jen několik mikrometrů a příliš se nezvyšuje s rostoucím úběrem materiálu do hloubky. Stanovení technologických podmínek pro femtosekundové dokončování bylo založeno na stanovení ablačního prahu a následné určení intenzity a efektivity ablace. Byl stanoven optimální rozsah podmínek intenzity energie pro základní nastavení laserového zdroje. Následně byly provedeny kroky pro maximalizaci efektivity ablace: zvýšení opakovací frekvence při zachování intenzity energie a překryvu pulsů a generace pulsů v tzv. burst-módu. Nárůst odebrané tloušťky materiálu na jednu vrstvu při použití různého počtu pulsů v jednom burstu je patrný na Obr. 3-a. Oba

zmíněné postupy vedly ke zvýšení efektivity ablace dvojnásobně až čtyřnásobně v závislosti na použitých parametrech. Experimenty k určení základní interakce paprsku laseru s materiálem potvrdily také zjištění z literatury, a to že pro nanosekundový laser je dosahováno vyšších intenzit ablace než pro femtosekundový laserový zdroj.

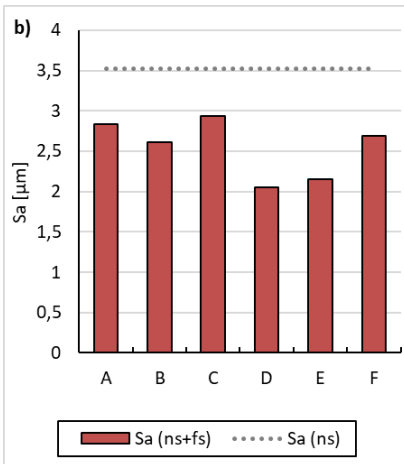


Obr. 3: a) Závislost tloušťky odebrané vrstvy na 1 přejezd pro různý počet pulsů v burstu a použitou intenzitu energie; b) Porovnání intenzity ablace ns a fs laseru při fundamentálním nastavení

4.2 Ověření navržené metodiky komplexního přístupu

Stanovené technologické parametry byly použity k prvnímu ověření navrženého komplexního přístupu, kde byly vytvořeny vzorky hrubovacím procesem na nanosekundovém laseru a následně byly vzorky dokončeny. V experimentu byl testován také vliv pulsů generovaných v burstech. Ukázalo se, že právě tato technika generování pulsů vede k lepšímu dokončení

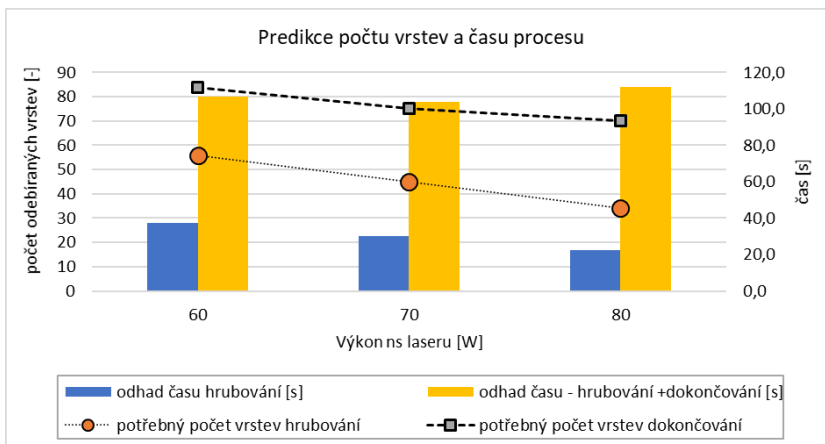
povrchu oproti klasickému režimu generace, a to zejména k většímu snížení drsnosti povrchu. Tento vliv je ukázán na grafu na Obr. 3-b, kde je drsnost povrchu (S_a) po hrubování S_a (ns) a po dokončování různými parametry S_a (ns+fs) včetně použití burstů, např. vzorek D. Úspěšně tak byla ověřena myšlenka komplexního přístupu.



Obr. 4: Dosahovaná drsnost povrchu po prvním experimentu dokončování hrubovaného povrchu fs laserem

Již od stanovení metodiky komplexního přístupu byl jako klíčový parametr označován přídavek pro dokončování. Tuto tloušťku materiálu pro dokončování femtosekundovým laserem bylo vhodné volit co nejmenší, ale zároveň dostatečně velkou, aby bylo možné odstranit negativní tepelné ovlivnění a drsnost povrchu po hrubování. Současně je ale u řezných nástrojů kladen vysoký nárok na kvalitu mikrogeometrie v těsné blízkosti ostří. Z tohoto důvodu byla rozhodovacím kritériem stanovena kvalita a hloubka čelní fazety. Následně tento rozhodovací algoritmus, na základě celkové hloubky utvařeče a předpokládané

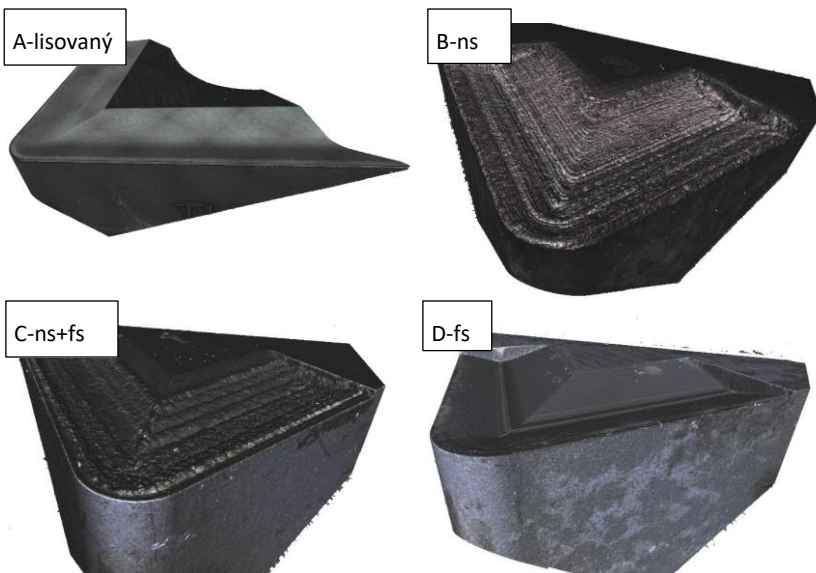
drsnosti povrchu a hloubky odsazení čelní fazety stanovuje, zda bude přídavek pro dokončování stanoven podle parametru plošné drsnosti povrchu S_z nebo podle hloubky čelní fazety. Výstupem tohoto prediktivního empirického modelu je výběr jednoho ze tří výkonů laseru pro hrubování (Obr. 5) s ohledem na produktivitu, ekonomičnost a kvalitu obrobeneho povrchu.



Obr. 5: Predikce času hrubování a dokončování v rámci komplexního přístupu včetně potřebných počet vrstev k odebrání při hrubování a dokončování

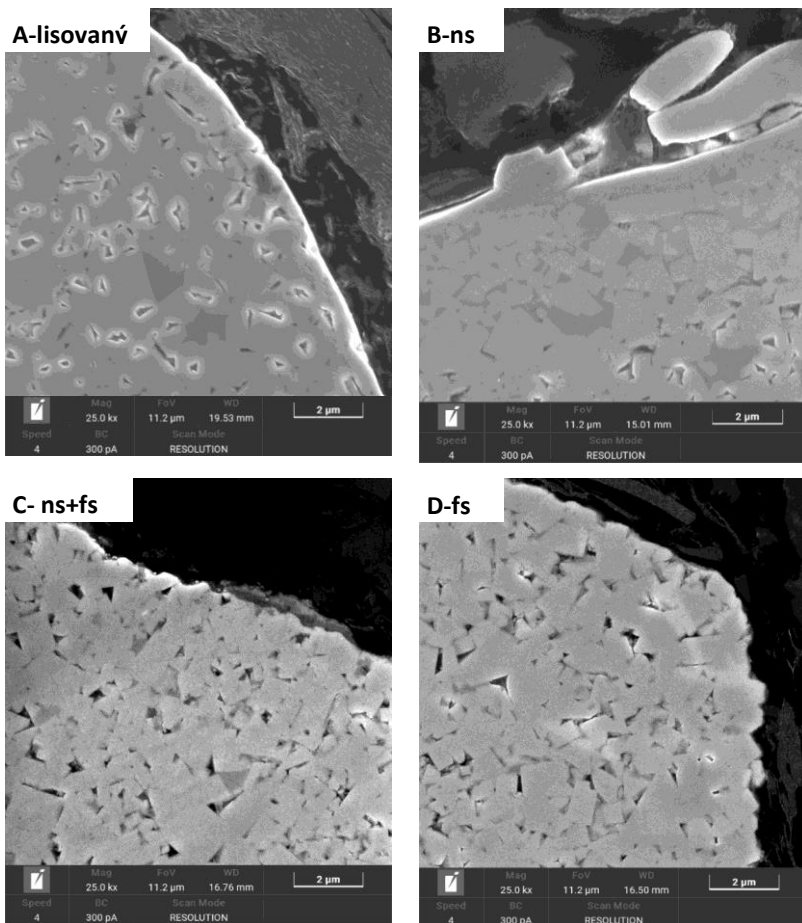
4.3 Výroba utvařečů třísek laserem a testy řezivosti nástrojů

. Do komerčně dostupných nástrojů ze slinutého karbidu (TH10) byly vytvořeny utvařeče třísek metodou komplexního přístupu, pouze femtosekundovým a pouze nanosekundovým laserem, aby byly co možná nejlépe prokazatelné výhody a nevýhody jednotlivých nástrojů. Pro porovnání byl vybrán nástroj s lisovaným utvařečem se stejnou geometrií, která byla vytvářena laserem. K výrobě utvařeče třísek komplexním způsobem byly použity procesní parametry a strategie obrábění z předchozích experimentů, stejně tak jako pro nástroj z nanosekundového a femtosekundového laseru. Laserem modifikované nástroje byly v dobré shodě s referenčním nástrojem, jak potvrzují i 3D skeny vytvořených nástrojů na Obr. 6.



Obr. 6: 3D skeny utvařečů třísek pro referenční (A) a laserem vytvořené vzorky (C-D)

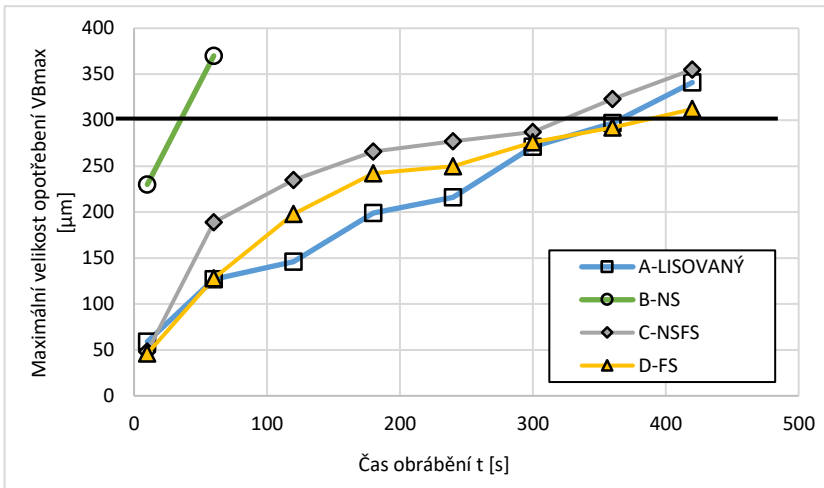
Analýzy také ukázaly, že u komplexním způsobem vytvořeného utvařeče třísek nedošlo k tepelnému ovlivnění a mikrostruktura byla srovnatelná s nástrojem obrobeným pouze femtosekundovým laserem. Naopak povrch vzorku vytvořeného pouze nanosekundovým laserem vykázal značné tepelné ovlivnění, poškození povrchu vlivem a také negativní drsnost povrchu. Použití komplexního přístupu také vedlo k ušetření výrobního času o téměř 60 % v porovnání s pouze femtosekundovým laserem, nicméně byl tento čas dvakrát delší než pouze pro nanosekundový laser.



Obr. 7: Snímky řezné hrany z elektronového mikroskopu pro referenční (A) a laserem vytvořené vzorky (B-D) (pozn. u vzorku A není vyšší nasvícení způsobeno změnou v mikrostruktuře ale vyšším nabíjením vzorku v elektronovém poli)

Pro popsání řezivosti laserem modifikovaných nástrojů byly provedeny experimenty podélného soustružení oceli 1.1191. Výstupem řezných zkoušek bylo srovnání trvanlivostí, mechanismů opotřebení, tvorby třísky, řezných sil a drsnosti obrobeného povrchu. Ukázalo se, že nástroj vytvořený pouze nanosekundovým laserem nedokáže svojí trvanlivostí ($T = 60$ s) konkurovat ostatním laserem modifikovaným nástrojům ($T = 360$, resp. $T = 420$ s). U nástroje s utvařčem vytvořeným komplexním přístupem byla řezivost

srovnatelná s lisovaným nástrojem, včetně řezných sil a utváření třísky. Pro příklad je zde ukázán graf maximálního opotřebení na hřbetě řezného nástroje VB_{max} (Obr. 8), kde je patrná shoda mezi laserem vytvořenými nástroji a lisovaným utvařečem, kromě nástroje vytvořeného pouze nanosekundovým laserem. Lepší dělení třísky a nižší řezná síla zejména v začátku obrábění byla pozorována u utvařeče vytvořeného pouze femtosekundovým laserem. Pravděpodobné vysvětlení tohoto jevu je ve vytvořené mikrogeometrii, kde právě tento nástroj měl nejmenší poloměr ostří ze všech nástrojů. Z hlediska drsnosti obrobeného povrchu nebyl pozorován větší rozdíl mezi jednotlivými nástroji.

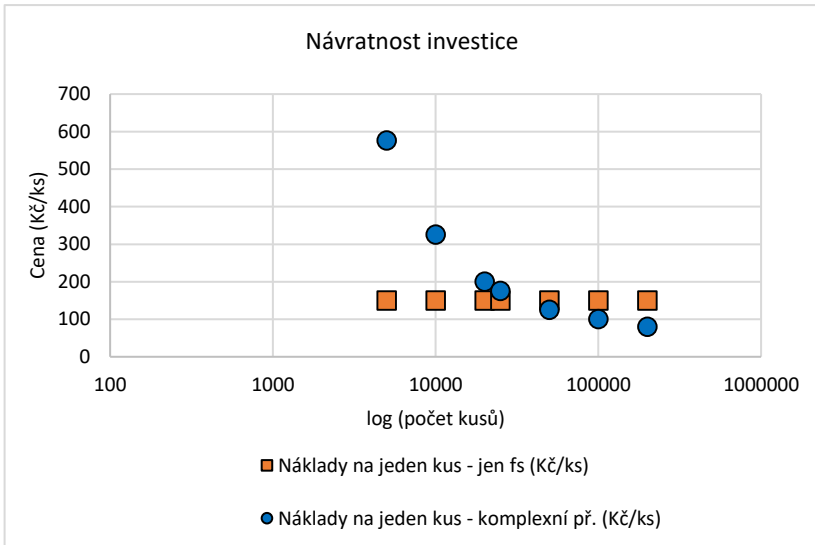


Obr. 8: Závislost maximální velikosti opotřebení na hřbetě VB_{max} na čase obrábění t

4.4 Ekonomické zhodnocení komplexního přístupu

V závěru experimentální části této práce byly vytvořeny ekonomické kalkulace představeného komplexního přístupu, a to zejména započtení vícenákladů spojených s pořízením dvou laserových zařízení místo jednoho. Pouze nanosekundový laser nebyl v kalkulacích uvažován, jelikož jak ukázaly řezné testy, kvalita těchto nástrojů pro pokročilé obráběcí operace není dostatečná. Do porovnání také nebyly přidány lisované nástroje, jelikož nebylo k dispozici dostatek relevantních podkladů pro vyčíslení nákladů celé technologie. Dá se tedy uvažovat, že potenciální uživatel komplexního přístupu laserového obrábění bude využívat polotovary ve formě tyčí a nebude lisovat vlastní nástroje. Bylo spočítáno, že při provozu strojů na 85 % kapacity v jednosměnném provozu a při odpisové době strojů 10 let bude

cena výroby utvařeče třísek komplexním přístupem téměř o polovinu nižší (72 Kč oproti 134 Kč) oproti výrobě pouze femtosekundovým laserem. Následné kalkulace ukázaly, že výhodnost komplexního přístupu roste s objemem vytvářeného utvařeče. Pro malý objem utvařeče třísek je odebíraná vrstva pro hrubování tak malá, že se nevyplatí druhý laser používat. Na závěr byl vypočítán limitní objem dávky, při aktuálních cenách energií a laserových zdrojů, pro který se vyplatí pořízení druhé laserového zařízení pouze pro účely výroby utvařečů třísek včetně nákladů na jeho provoz viz Obr. 9.



Obr. 9: Graf závislosti ceny za jeden kus při různém počtu kusů v dávce při použití pouze fs laseru a komplexního přístupu.

Spočítaným limitem je dávka o velikosti 38 tis. kusů, která při jednosměnném provozu. V tomto výpočtu navíc není započítána úspora výrobní kapacity femtosekundového laseru, která činí asi 0,7 roku.

5 Závěr

Disertační práce s názvem „Efektivní mikroobrábění nástrojových materiálů laserem“ se komplexně zabývá problematikou efektivity laserových procesů a jejího zvyšování. Těžištěm práce jsou postupy a metodika vedoucí k optimálnímu nastavení procesních parametrů laserového mikroobrábění. Dílčí experimenty posloužily k navržení a ověření komplexního přístupu kombinujícího dva laserové zdroje vedoucímu ke skokovému zvýšení efektivity procesu při zachování požadované kvality a funkčnosti nástroje. V této práci navržená a otestovaná unikátní metoda komplexního přístupu přináší nový pohled na celou technologii laserového mikroobrábění a její vazby na nástrojové materiály. Koncept samotné práce je sestaven tak, aby se navržené metodiky daly použít při komplexním mikroobrábění téměř jakéhokoliv materiálu. Hlavní myšlenou oblastí zájmu jsou však nástrojové materiály, v této práci je to slinutý karbid s označením TH10 (90% WC + 8% Co + 2% TaC/NbC).

Součástí navržené metodiky bylo testování interakce laserového paprsku ze dvou laserových zařízení s materiálem. Tyto experimenty vedly k optimálnímu nastavení procesních a technologických parametrů vedoucích k dobré kvalitě obrobeného povrchu s dostatečnou produktivitou. Zároveň byly v této kapitole provedeny experimenty k ověření myšlenky komplexního přístupu, a to, zda je možné femtosekundovým laserem odebrat tepelně ovlivněnou oblast a snížit drsnost povrchu po hrubování. Tyto experimenty ukázaly, že je navržený postup správný, nicméně jako klíčové se ukázalo stanovení přídávku pro dokončování, tak aby byl proces efektivní a došlo ke zlepšení povrchu. K tomuto účelu byl navržen prediktivní empirický model, který na základě technologických parametrů pro hrubování a rozměrů vytvářené entity určí velikost přídávku pro dokončování a odhadne čas celého procesu.

Následně byly optimalizované technologické parametry a navržené postupy použity k výrobě utvařečů třísek na nástrojích ze slinutého karbidu. Laserem vytvořené utvařeče byly detailně analyzovány a jejich řezivost porovnána s referenčním nástrojem s lisovaným utvařečem stejné geometrie. Experimenty prokázaly dobrou řezivost nástrojů vytvořených femtosekundovým laserem a komplexním přístupem, při stejné trvanlivosti, řezných silách a kvalitě obrobeného povrchu. U komplexního přístupu byla pozorována lepší tvorba třísky, zejména v začátku obrábění, než u nástroje lisovaného.

Na závěr této práce, v kapitole, byly provedeny ekonomické kalkulace pro stanovení vícenákladů spojených s pořízením dvou laserových zařízení místo

jednoho. Zároveň byly vypočítány náklady pro výrobu jednoho kusu při použití pouze femtosekundového laseru a komplexního přístupu včetně návratnosti investice při různých počtech vyráběných kusů. Stanovená hranice potřebného počtu kusů pro návratnost investice do druhého zařízení není příliš velká a činí tak z komplexního přístupu smysluplný postup pro efektivní mikroobrábění nástrojových materiálů.

6 Důsledky pro vědu a průmyslovou praxi

V práci prezentované přístupy k jednotlivým laserovým technologiím vytváří metodiku pro nastavení optimálního procesu mikroobrábění na všechny typy nejen nástrojových materiálů. Bylo provedeno velké množství experimentů, z něhož vyplynula řada zajímavých závislostí pro vědeckou sféru, například grafy efektivity ablace, ablační práh a porovnání efektivity ablace při použitých různých vlnových délek. Jelikož je slinutý karbid velmi používaným materiálem při výrobě nástrojů, v celkovém měřítku nepatří mezi tak studované materiály jako je například nerezová ocel nebo měď. Postupy navržené a realizované v této práci směřují k uplatnění laserové technologie pro výrobu utvařečů třísek v průmyslu. Experimenty obrábění ukázaly, že laserem vytvořené utvařeče třísek dokáží plnohodnotně replikovat vlastnosti lisovaného utvařeče. Navíc výroba utvařeče laserem je flexibilní z hlediska jeho tvaru. Odpadá tak potřeba výroby lisovací formy a jejího následného testování. Výroba nástrojů laserem proto může najít své místo v prototypování utvařečů třísek před finální výrobou lisovací formy. Komplexní přístup je možné využít i při výrobě samotných lisovacích forem, které se také často právě ze slinutého karbidu vyrábí. Využití komplexního přístupu tak povede ke snížení procesních nákladů a času výroby. Lisovací forma pro celý nástroj ze slinutého karbidu se na femtosekundovém laseru může vyrábět tři až čtyři hodiny. Oproti tomu forma vytvořená komplexním přístupem laserového mikroobrábění může dle dosažených výsledků v této práci, vést k úspoře času až o 60 - 70%. Ukázalo se, že metoda komplexního přístupu vede k ušetření nákladů na jeden kus až o polovinu při maximálním využitím laserových zařízení pro sériovou produkci utvařečů třísek. Predikce času výroby může navíc vést k lepšímu plánování výroby a celého procesního řetězce.

7 Doporučení pro další výzkum

Další výzkum by bylo dobré směřovat do testování obrobiteľnosti komplexním způsobem polykrystalického diamantu. Tento materiál je velmi dobrý tepelný vodič a jeho obrobiteľnosť laserem je naopak veľmi nízka. Navíc je veľmi

teplotně citlivý a již při nízké teplotě dochází k jeho grafitizaci, která způsobuje snížení životnosti nástroje. Současně je také prostor pro studování pokročilých metod generování laserových pulsů, např. burst-mód nebo metody vícesvazkového laserového obrábění, které může vést k několikanásobnému zproduktivnění procesu. Dalšímu uplatnění laserových technologií je i trend snižování ceny za jednotku výkonu u laserových zdrojů spolu se zlevňováním laserů s ultrakrátkými pulsy. Dá se tedy předpokládat, že se s větší dostupností laserových zdrojů budou otevírat nové aplikační možnosti, mezi které i jistě patří další výzkum v oblasti femtosekundového obrábění spolu se zde představeným komplexním přístupem.

8 Splnění cílů práce

Cílem disertační práce je vytvoření a ověření metodiky laserového obrábění slinutého karbidu pro vyšší produktivitu procesu při zachování požadované kvality povrchu. Klíčovým aspektem řešení je návrh a ověření inovativního přístupu k mikroobrábění slinutého karbidu laserem, který spočívá ve vhodné kombinaci hrubovacích a dokončovacích strategií a podmínek. Ze stanovených cílů práce vyplynuly dílčí cíle, jejichž řešení a výsledky jsou níže popsány:

- Byly stanoveny optimální technologické parametry pro efektivní procesy hrubování a dokončování i s ohledem na kvalitu povrchu. Tyto parametry byly následně použity pro další experimenty.
- Byly provedeny experimenty k definování tepelně ovlivněné oblasti na základě použitých technologických parametrů. Následně bylo ověřeno odebrání tepelně ovlivněné oblasti a negativní drsnosti povrchu procesem dokončování. Vhodnost nastaveného přídatku pro dokončování byla také ověřena metalografickou analýzou u vzorků použitých pro test řezivosti.
- Součástí experimentu bylo také porovnání řezivosti inovativním přístupem laserem vytvořeného nástroje s konvenčně vyrobeným.
- Nástroj vytvořený komplexním způsobem laserového mikroobrábění byl vytvořen a porovnán v řezném testu s lisovaným utvařečem a utvařeči vytvořenými klasickými způsoby laserového mikroobrábění. Z experimentů vyplynulo, že utvařeč vytvořený komplexním způsobem má srovnatelnou řezivost jako nástroj lisovaný.

- Empirický model byl vytvořen a použit pro stanovení výpočtu přídatku pro dokončování. Výsledky z modelu byly použity k výrobě utvařeče třísek komplexním způsobem pro následné ověření řezivosti. Empirický model byl také využit při výpočtech ekonomických nákladů.
- Byl vytvořen ekonomický model obou laserových pracovišť, byly stanoveny náklady na pořízení zařízení a jejich provoz vzhledem k odpisové době. Dále byly také stanoveny náklady na výrobu jednoho kusu při použití komplexního přístupu v porovnání s pouze femtosekundovým laserem. Byly stanoveny náklady na výrobu utvařeče komplexním a klasickým přístupem podle objemů vytvářených utvařečů třísek. Následně byla stanovena návratnost investice do druhého laserového zařízení v závislosti na počtu vyráběných kusů nástrojů.

Práce přináší nové dosud nepublikované výsledky a rozšiřuje současné vědecké poznatky v oblasti laserového mikroobrábění nástrojů ze slinutého karbidu. Hlavního cíle práce bylo dosaženo prostřednictvím splnění všech dílčích cílů.

9 Seznam použité literatury v tezích

- [1] ELKASEER, Ahmed, Jon LAMBARRI, Jon SARASUA a Itxaso CASCON. *On the Development of a Chip Breaker in a Metal-Matrix Polycrystalline Diamond Insert: Finite Element Based Design With ns-Laser Ablation and Machining Verification*. 2017, .
- [2] WU, Maochao, Aibing YU, Qiujiu CHEN a Yanlin WANG. *Design of adjustable chip breaker for PCD turning tools*. 2020, .
- [3] BÜTTNER, H., K. MICHAEL, J. GYSEL a P. GUGGER. *Innovative micro-tool manufacturing using ultra-short pulse laser ablation*. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2020, (285).
- [4] HAJRI, M., J. PFAFF, H. BUTTNER a M. VOEGTLIN. *Fabrication of a ball end nose micro milling tool by tangential laser ablation*. *Procedia CIRP*, 2018, (77).
- [5] CASCÓN, Itxaso. *Tailored Chip Breaker Development for Polycrystalline Diamond Inserts: FEM-Based Design and Validation*. 2019, . Dostupné z: doi:doi:10.3390/app9194117
- [6] MILLER, Philip, Ravi AGGARWAL a ET AL. *Laser Micromachining for Biomedical Applications*. 2009, .
- [7] JUDY, Jack. *Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications*. *Smart Materials and Structures*. IOP Publishing, 2001, **2001**(10), 1115-1134.
- [8] KEIM, Robert. *Introduction to MEMS. All About Circuits* [online]. 2018 [cit. 2020]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-mems-microelectromechanical-systems/>
- [9] HUSÁK, Miroslav. *Užití MEMS v průmyslu*. *AUTOMA*. 2008, **2008**(12).
- [10] OXFORD LASERS. *Laser micro cutting*. *Oxford Lasers* [online]. 2019 [cit. 2020]. Dostupné z: <https://www.oxfordlasers.com/laser-micromachining/laser-micro-cutting>
- [11] Technologie. *Rotana* [online]. 2020 [cit. 2020]. Dostupné z: <https://www.rotana.cz/12-technologie.html>

- [12] Applications. *Hofmeister Innovation* [online]. 2020 [cit. 2020]. Dostupné z: <http://hofmeister-innovation.eu/>
- [13] 3D-MICROMAC AG. *Customized Laser Micromachining Systems* [online]. Chemnitz: 3D-Micromac AG, 2015 [cit. 2020]. Dostupné z: https://3d-micromac.com/wp-content/uploads/2018/12/microSTRUCT-C_20150330_public_3D-Micromac.pdf
- [14] PULSAR PHOTONICS GMBH. *Laser machine - RDX 1000* [online]. Herzogenrath: Pulsar Photonics GmbH [cit. 2020]. Dostupné z: <https://www.pulsar-photonics.de/en/machine-technology/rdx-1000/>
- [15] DMG MORI. *LASERTEC 20 PrecisionTool* [online]. 2020 [cit. 2020]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/lasertec/lasertec-precisiontool/lasertec-20-precisiontool>
- [16] EWAG AG. *Laser Line Precision* [online]. Etziken: Ewag AG, 2018 [cit. 2020]. Dostupné z: <https://www.ewag.com/en/tool-processing-machines/detail-view/product/laser-line-precision/>
- [17] Microlution ML-5. *GF Machine Solutions* [online]. [cit. 2020]. Dostupné z: <https://www.gfms.com/content/dam/gfac/proddb/advanced-manufacturing/en/ml-5-leaflet-en.pdf>
- [18] SUGIOKA, Koji a Ya CHENG. *Ultrafast Laser Processing: From Micro- to Nanoscale*. Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
- [19] SUGIOKA, Koji a Ya CHENG. *Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing*. Light: Science & Applications, 2014, (3).
- [20] BUCHFINK, Gabriela. *The Laser as a Tool*. Wutzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 2007.
- [21] VRBOVÁ, Miroslava a Helena JELÍNKOVÁ. *Úvod do laserové techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998.
- [22] HAMAD, Abubaker. Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution. *High*

Energy and Short Pulse Lasers [online]. InTech, 2016 [cit. 2020-05-14]. ISBN 978-953-51-2606-5. Dostupné z: doi:10.5772/63892

- [23] LUCAS, Lonnie a Jim ZHANG. Femtosecond laser micromachining: A back-to-basics primer. *Industrial Laser Solutions for Manufacturing* [online]. 2012 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/micromachining/article/16485321/femtosecond-laser-micromachining-a-backto-basics-primer>
- [24] FINGER, J., C. KALUPKA a M. REININGHAUS. *High power ultra-short pulse laser ablation of IN718 using high repetition rates*. Journal of Materials Processing Technology, 2015, , s. 221-227. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.07.014
- [25] ANDREAS BRENNER, Benedikt BORNSCHLEGEL a Johannes FINGER. *Increasing Productivity of Ultrashort Pulsed Laser Ablation in Advance for a Combination Process with ns-laser*. JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2019, **14**(1).
- [26] RESEARCH, KBV. Global Ultrafast Lasers Market Size, Share & Industry Trends Analysis Report. <https://www.kbvresearch.com/ultrafast-lasers-market/>. 2022.
- [27] CHEN, Lan, Brodan RICHTER, Xinzhou ZHANG, Kaila B. BERTSCH, Dan J. THOMA a Frank E. PFEFFERKORN. Effect of laser polishing on the microstructure and mechanical properties of stainless steel 316L fabricated by laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*. 2021, **802**(-), 140579. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2020.140579

10 Publikace související s tématem disertace

- [28] PRIMUS, Tomáš, Pavel ZEMAN, František HOLEŠOVSKÝ a Martin NOVÁK. Femtosecond Laser Processing of Advanced Technical Materials. . Acta Polytechnica. 2023, 631, 36-49. Dostupné z: doi:10.14311/AP.2023.63.0036. ISSN 1210-2709.
- [29] PRIMUS, Tomáš, Josef HLAVINKA, Pavel ZEMAN a Pavel KOŽMÍN. Experimental Investigation of a Method for Selective and Precise Laser De-Coating. Lasers in Manufacturing and Materials Processing. Springer, 2022, (10), 205–224. Dostupné z: doi:10.1007/s40516-023-00202-z
- [30] PRIMUS, Tomáš, Josef HLAVINKA, Pavel ZEMAN a Pavel KOŽMÍN. Investigation of Multiparameter Laser Stripping of AlTiN and DLC C Coatings. Materials. MDPI, 2021, (144, 1-16. Dostupné z: doi:10.3390/ma14040951
- [31] PRIMUS, Tomáš, Pavel ZEMAN, Radka BIČIŠŤOVÁ a František HOLEŠOVSKÝ. Productive Laser Machining of Sintered Carbide Using a Combination of Nanosecond and Femtosecond Laser Ablation. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. Springer, 2023, (10), 296–311. Dostupné z: doi:10.1007/s40516-023-00207-8

11 Ostatní publikace

- [32] PRIMUS, T. et al. An Experimental Investigation of Controlled Changes in Wettability of Laser-Treated Surfaces after Various Post Treatment Methods. *Materials*. 2021, **14**(9), 1-18. ISSN 1996-1944. DOI [10.3390/ma14092228](https://doi.org/10.3390/ma14092228).
- [33] PRIMUS, T. et al. Enhanced tribological performance and nanostructuring speed on AlTiN by beamshaping technology. *Surface Engineering*. 2022, **38**(10-12), 939-947. ISSN 0267-0844. DOI [10.1080/02670844.2023.2180855](https://doi.org/10.1080/02670844.2023.2180855).
- [34] PRIMUS, T. et al. Laser polishing of additively manufactured 316L stainless steel with different construction angles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022, **121**(5-6), 3215-3228. ISSN 0268-3768. DOI [10.1007/s00170-022-09514-4](https://doi.org/10.1007/s00170-022-09514-4).

- [35] ČERMÁK, A. et al. Segmental Laser Stripping of Thin Coatings on Monolithic Cutting Tools. *MM Science Journal*. 2022, **2022** 6007-6013. ISSN 1803-1269. DOI [10.17973/MMSJ.2022_11_2022126](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2022_11_2022126).

11.1 Výzkumné zprávy

- [36] ZEMAN, P. et al. *Zpráva o průběhu řešení VZ7 v letech 2019-2022*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-047.
- [37] ZEMAN, P. et al. *VZ7-Energeticky a nákladově efektivní výrobní technologie*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-063.
- [38] ZEMAN, P. et al. *Dílčí výzkumná zpráva o řešení projektu FV40324 „Nová generace obráběcích nástrojů z pokročilých materiálů s využitím laserové technologie při jejich výrobě“ za rok 2022*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-041.
- [39] ZEMAN, P. et al. *Zpráva o průběhu řešení VZ7 v letech 2019-2021*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-21-050.
- [40] ZEMAN, P. et al. *Dílčí výzkumná zpráva o řešení projektu FV40324 „Nová generace obráběcích nástrojů z pokročilých materiálů s využitím laserové technologie při jejich výrobě“ za rok 2021*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2021. Zpráva č. V-21-004.
- [41] ZEMAN, P. et al. *DV 2 – Výzkum a vývoj technologie tvorby 3D mikrostruktur laserem za účastníka projektu ČVUT v Praze*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2021. Zpráva č. V-21-040.

- [42] ZEMAN, P. et al. *Zpráva o průběhu řešení VZ7 v letech 2019-2020*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2021. Zpráva č. V-20-064.
- [43] ZEMAN, P., T. PRIMUS a J. BRAJER. *DV4 – Výzkum a vývoj technologie tvorby 3D mikrostruktur laserem za účastníka projektu ČVUT v Praze*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020. Zpráva č. V-20-049.

11.2 Patenty a užité vzory

- [44] České vysoké učení technické v Praze, Praha 6, Dejvice, CZ; ROTANA a.s., Velké Meziříčí, CZ. *Nástroj ze supertvrdeho materiálu*. Původci: P. VÍTEK et al. Česko. Užité vzor CZ 36528. 2022-11-07. Dostupné z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0036/uv036528.pdf>
- [45] ZEMAN, P. et al. *Prototyp nástroje z PKNB s optimalizovanou geometrií bříty*. [Prototyp] 2022.
- [46] Kožmín, P.; Čermák, A.; Šorm, M.; Syrovátka, Š.; Syrovátka, J.; Zeman, P.; Primus, T. *Method of Surface Layer Removal from the Surface of Geometrically Complex Edges of Cutting Tools using Laser Stripping Method*, European Patent Office. Patent Application. 2022-09-29. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/078821007/publication/WO2022199725A1?q=pn%3DWO2022199725A1>

11.3 Ostatní publikace

- [47] PRIMUS, T., P. ZEMAN a F. HOLEŠOVSKÝ. *Femtosecond laser ablation of ultra-hard materials for cutting tools*. [Vyzvaná nepublikovaná odborná přednáška] Praha: THE XXIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH-POWER LASER SYSTEMS AND APPLICATIONS, Fyzikální institut Akademie věd ČR. 2022-06-13.

- [48] ZEMAN, P. a T. PRIMUS. Efektivní laserové technologie pro změnu podoby a vlastností povrchu součástí. *TECHMAGAZÍN*. 2021,(09), 8-10. ISSN 1804-5413.
- [49] PRIMUS, T. et al. Výzkum laserových technologií na Fakultě strojní ČVUT v Praze. In: RŮŽIČKA, B., ed. *Sborník příspěvků multioborové konference Laser 61*. Laser 61, Hotel Galant, Lednice, 2021-10-21/2021-10-22. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., 2021. s. 71. 1. sv. 1. ISBN 978-80-87441-28-2.