

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Disertační práce

Efektivní obrábění nástrojových materiálů laserem

Autor:

Ing. Tomáš Primus

Školitel:

prof. Dr. Ing. František Holešovský

Školitel specialista:

doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

2023

Přehled disertační práce:

Vysoká škola:	České vysoké učení technické v Praze
	Fakulta strojní
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Téma disertační práce:	Efektivní obrábění nástrojových materiálů laserem
Akademický rok:	2022/2023
Autor:	Ing. Tomáš Primus
Školitel:	prof. Dr. Ing. František Holešovský
Školitel specialista:	doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Klíčová slova:	Laserové mikroobrábění, slinutý karbid, komplexní přístup, zvyšování efektivity, tepelné ovlivnění

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	142
Počet obrázků:	109
Počet tabulek:	30
Počet příloh:	3

Dissertation Thesis Overview

University:	Czech Technical University in Prague Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Machining, Process Planning and Metrology
Head of the Department	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Dissertation Topic	Effective laser machining of the materials for the cutting tools
Academic Year:	2022/2023
Author:	Ing. Tomáš Primus
Supervisor:	prof. Dr. Ing. František Holešovský
Supervisor Specialist:	doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Key words:	Laser micromachining, sintered carbide, complex approach, increased in effectivity, heat affection

Scope of Dissertation Thesis:

Number of pages:	142
Number of pictures:	109
Number of tables:	30
Number of attachments:	3

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Dr. Ing. Františka Holešovského a doc. Ing. Pavla Zemana, Ph.D. Dále prohlašuji, že jsem použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu prof. Dr. Ing. Františku Holešovskému a doc. Ing. Pavlovi Zemanovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost během doktorského studia. Stejně tak bych jim chtěl poděkovat za připomínky a konzultace při vypracování této práce. Dále děkuji kolegům z Ústavu výrobních strojů a zařízení, kteří mi pomáhali s experimenty a jejich vyhodnocením, zejména pak Ing. Janu Malému za pomoc s testy obrábění. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi, Ph.D. a Ing. Petru Hauschwitzovi, Ph.D. za pomoc s metalografickou analýzou, výbrusy a SEM mikroskopií. Zvláštní poděkování patří mé rodině a mé manželce za trpělivost a všestrannou podporu v mém snažení práci vytvořit a zejména jí dokončit. Dokončení této práce totiž znamenalo využití nemalého počtu večerů, stejně tak jako celých dnů o víkendech a dovolené.

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 obrobené 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.

Klíčová slova

Laserové mikroobrábění, slinutý karbid, komplexní přístup, zvyšování efektivity, tepelné ovlivnění

Abstract

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.

Keywords

Laser micromachining, sintered carbide, complex approach, increased in effectivity, heat affection

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Název
F_{th}	[J/cm ²]	Prahová hodnota intenzity energie
F	[J/cm ²]	Intenzita energie
F_0	[J/cm ²]	špičková hodnota intenzity energie
F_{opt}	[J/cm ²]	Optimální hodnota intenzity energie
E_p	[J]	Energie v pulsu
v	[mm/s]	Skenovací rychlost
f	[Hz]	Opakovací frekvence
λ	[nm]	Vlnová délka
ΔV	[mm ³ /min]	Intenzita ablace
V_{abl}	[mm ³ /min/W]	Efektivita ablace
ω_0	[mm]	poloměr svazku v ohnisku
D	[mm]	průměr ablovaného bodu při testování ablačního prahu
P	[W]	Průměrný výkon
δ	[nm]	penetrační hloubka
V	[mm ³]	objem odebraného materiálu
H_y	[%]	Překrytí šraf
S_x	[%]	Překrytí pulsů ve směru pohybu laserového paprsku
ϕ	[°]	Natočení šraf
PD	[μm]	Vzdálenost pulsů
TD	[μm]	Vzdálenost šraf
h_{faz}	[μm]	Hloubka čelní fazety oproti rovině čela
Δh_{fin}	[μm]	Velikost přídávku pro dokončování
dh_{hrub}	[μm]	hloubku úběru na jednu vrstvu
ΔV_{hrub}	[mm ³ /min]	Intenzita ablace u hrubování
V_{celk}	[mm ³]	Celkový objem obráběné entity

h_{\max}	$[\mu\text{m}]$	maximální hloubka obráběné entity
Δh_{hrub}	$[\mu\text{m}]$	hloubka hrubování
n_{hrub}	$[-]$	počet vrstev pro hrubování
V_{hrub}	$[\text{mm}^3]$	poměrný objem hrubování
t_{hrub}	$[\text{s}]$	odhad času hrubovacího procesu
n_{fin}	$[-]$	počet vrstev dokončování
V_{fin}	$[\text{mm}^3]$	poměrný objem dokončování
t_{fin}	$[\text{s}]$	odhad času dokončování
dh_{fin}	$[\mu\text{m}]$	hloubku úběru na jednu vrstvu
IH, IIH, IIIH		První, druhá a třetí harmonická frekvence - vlnová délka 1030 nm, 515 nm, 343 nm
PKD		Polykrystalický diamant
KNB		Kubický nitrid bóru
SK		Slinutý karbid
TH10		Slinutý karbid, označení od výrobce Tungaloy
TOO		Tepelně ovlivněná oblast
Ns, ps, fs		Nanosekundy, pikosekundy, femtosekundy
N	-	Počet pulsů v burstu
wf		Křivka průběhu pulsu (Waveform)
Ra	μm	Střední aritmetická odchylka profilu
Rz	μm	Výška nerovnosti profilu z 10 bodů
Sa	μm	Střední aritmetická odchylka výšek v ploše
Sz	μm	Maximální výška nerovnosti v ploše

Obsah

1	Úvod	13
2	Současný stav problematiky	14
2.1	Řezné materiály a jejich vývoj	14
2.2	Laserové mikroobrábění.....	15
2.2.1	Interakce paprsku laseru s materiálem	16
2.2.2	Absorpce laserového paprsku nástrojovými materiály.....	16
2.2.3	Vliv délky pulsu	17
2.2.4	Laserové systémy pro mikroobrábění laserem	18
2.3	Úprava geometrie řezných nástrojů laserem	21
2.3.1	Úprava mikrogeometrie	21
2.3.2	Úprava makrogeometrie	22
2.4	Efektivita mikroobrábění laserem	26
2.5	Zvyšování efektivity mikroobrábění laserem	33
2.5.1	Metoda zvyšování opakovací frekvence.....	33
2.5.2	Burst-mód.....	34
2.5.3	Komplexní přístup laserového obrábění	36
2.5.4	Hybridní přístup laserového obrábění a broušení.....	38
2.6	Shrnutí současného stavu problematiky	39
3	Cíle disertační práce	40
4	Návrh a zpracování metodiky efektivního laserového mikroobrábění	41
4.1	Komplexní přístup	42
4.2	Metody pro určení optimálních procesních parametrů laserového mikroobrábění	43
4.2.1	Stanovení ablačního prahu.....	43
4.2.2	Efektivita ablace	44
4.3	Metody pro stanovení strategie laserového obrábění.....	46
4.3.1	Radiální a tangenciální způsob laserového mikroobrábění.....	46
4.3.2	Šrafování.....	47
4.3.3	Překryv.....	48
4.3.4	Natočení šraf	48
4.3.5	Kompenzační strategie rozmítání.....	49
5	Testy interakce laseru s materiálem	50
5.1	Volba řezného materiálu	50
5.2	Použitá laserová zařízení	51

5.3	Stanovení strategie mikroobrábění.....	53
5.3.1	Experiment k určení optimálního natočení šrafování.....	53
5.3.2	Experiment k určení kompenzačních strategií.....	54
5.4	Stanovení procesních parametrů.....	55
5.4.1	Nanosekundové laserové hrubování.....	55
5.4.2	Femtosekundové laserové dokončování.....	64
5.5	Možnosti dokončení povrchu po hrubování.....	72
5.6	Stanovení optimálního přídatku pro dokončování.....	74
5.7	Prediktivní empirický model pro stanovení optimálního přídatku pro dokončování a dalších technologických parametrů.....	75
5.8	Dílčí shrnutí.....	77
6	Ověření navržené metodiky.....	78
6.1	Návrh experimentu.....	79
6.2	Analýza konvenčně vyráběného nástroje.....	79
6.3	Výroba utvařečů třísek laserem.....	80
6.3.1	Výroba utvařeče – pouze femtosekundový laser.....	80
6.3.2	Výroba utvařeče – pouze nanosekundový laser.....	82
6.3.3	Výroba utvařeče – komplexní přístup.....	84
6.4	Porovnání konvenčního a laserem vytvořených utvařečů třísek.....	89
6.4.1	Porovnání kvality a geometrie konvenčního a laserem vytvořených utvařečů třísek ..	90
6.4.2	Metalografická analýza tepelně ovlivněné oblasti.....	94
6.5	Testy řezivosti nástrojů.....	96
6.5.1	Popis experimentálních testů a metodiky vyhodnocování.....	97
6.5.2	Vyhodnocení opotřebení a trvanlivosti břitu.....	98
6.5.3	Vyhodnocení řezných sil.....	99
6.5.4	Vyhodnocení drsnosti povrchu.....	99
6.5.5	Vyhodnocení třísek.....	101
6.6	Dílčí shrnutí.....	103
7	Ekonomické zhodnocení komplexního přístupu.....	104
7.1	Náklady na pořízení a provoz zařízení.....	105
7.2	Porovnání nákladů na výrobu utvařeče třísek.....	106
7.3	Náklady vzhledem k objemu vytvářené entity.....	107
7.4	Návratnost investice.....	108
7.5	Dílčí shrnutí.....	110

8	Celkové shrnutí výsledků	111
9	Důsledky pro vědu a průmyslovou praxi	114
10	Doporučení pro další výzkum	115
11	Závěr	116
12	Splnění cílů práce.....	117
13	Citovaná literatura.....	119
14	Publikace autora.....	128
14.1	Publikace přímo související s disertační prací	128
14.2	Vědecké články	128
14.3	Výzkumné zprávy.....	128
14.4	Patenty a užité vzory	129
14.5	Ostatní publikace.....	129
	Seznam obrázků	131
	Seznam tabulek	134
	Přílohy.....	136
	Příloha 1 – Foto nástrojů před experimentem obrábění	136
	Příloha 2 – Jednotlivé složky řezné síly při obrábění:	137
	Příloha 3 – Foto opotřebených nástrojů v měřených intervalech	138

1 Úvod

Slinutý karbid, konkrétně směs wolfram-karbidu (WC) a kobaltu (Co), se používá jako řezný materiál již více než 70 let. Za tu dobu vyrostl trh s těmito řeznými nástroji k celoročním obrátům až 9,5 miliardy dolarů, což je téměř 50 % z celkového objemu prodaných řezných materiálů [1]. Spolu s vývojem techniky slinování, různorodostí poměru obou složek nebo přiměšováním dalších prvků se rozvíjí i úprava samotné geometrie těchto nástrojů. Většina v dnešní době vyráběných nástrojů má speciální geometrii utvařeče třísek včetně povrchové úpravy, nejčastěji formou povlaku. Výroba utvařeče třísek může probíhat buďto přímo v průběhu slinování, a to úpravou lisovací formy. Dalším způsobem je vytvoření utvařeče přímo při výrobě samotného nástroje, například broušením. Nicméně ne všechny tvary jsou například broušením proveditelné, a zároveň ne všichni výrobci nástrojů mají vlastní slinovací pece a lisy. Alternativou k těmto technologiím může být laserové mikroobrábění. Využití laserů v kombinaci s řeznými nástroji začíná mít v průmyslu své místo. I přesto ale produktivita laserové technologie spolu s pořizovacími náklady brání většímu rozvoji. Z tohoto důvodu je snahou výrobců laserových zdrojů snižovat ceny svých produktů, aby byly více dostupnější, a zároveň snahou technologů nalézt takové kombinace technologických parametrů, které proces udělají efektivní a konkurenceschopnější.

Optimalizováním a zefektivňováním procesu laserového mikroobrábění se zabývá i tato práce. K naplnění tohoto cíle byl navržen postup, kdy se místo jednoho laserového zařízení používají dvě různá s navzájem se doplňujícími vlastnostmi. Prvním z nich je laserové zařízení pracující s délkou pulsu v řádech femtosekund s velmi vysokým špičkovým výkonem. Tato zařízení jsou vhodná pro velmi přesný úběr materiálu procesem laserové ablace, avšak produktivita mikroobrábění je nízká a pořizovací cena zařízení zatím stále velmi vysoká. Druhým zařízením je vláknový laser s nanosekundovými pulsy. Tato zařízení dokáží odebírat velké množství materiálu v čase a svojí produktivitou a pořizovacími náklady se začínají přibližovat konvenčním metodám. Nevýhodou těchto laserů je horší kvalita povrchu po mikroobrábění, která může vést ke snížení životnosti výrobků, mezi které patří i řezné nástroje. Zkombinování obou laserových zařízení do jedné výrobní operace rozdělené na proces hrubování nanosekundovým laserem a dokončování femtosekundovým laserem je novým přístupem, který ještě nebyl pro úpravu geometrie řezných nástrojů použit.

Tato disertační práce s názvem „Efektivní obrábění nástrojových materiálů laserem“ řeší otázku zefektivňování procesů laserového mikroobrábění od nastavení dílčích parametrů až po jejich kombinaci v tzv. komplexním přístupu. V první části práce jsou teoreticky rozebrány jednotlivé technologické parametry a přístupy laserového mikroobrábění a jejich vliv na kvalitu a produktivitu výroby. Zároveň jsou zde popsány i nové přístupy generace laserových pulsů, například burst-mód, které mohou být přelomem ke zvyšování efektivity procesu na femtosekundových laserech.

Ve vlastním řešení problematiky byl navržen komplexní přístup, který kombinuje již zmíněná laserová zařízení a zároveň i definuje moment, kdy dochází k přechodu od jednoho zařízení k druhému. Následně byly do detailu provedeny testy efektivity ablace na obou zařízeních, tak aby bylo možné vybrat co nejlepší technologické parametry, které vedou k efektivnímu procesu při zachování kvality obráběného povrchu. Pro ověření funkčnosti nástroje vytvořeného technikou komplexního přístupu laserem byly provedeny řezné testy. Na závěr práce byl vytvořen ekonomický model, který uvažovanou techniku porovnává s přístupem pouze jednoho laserového zařízení.

2 Současný stav problematiky

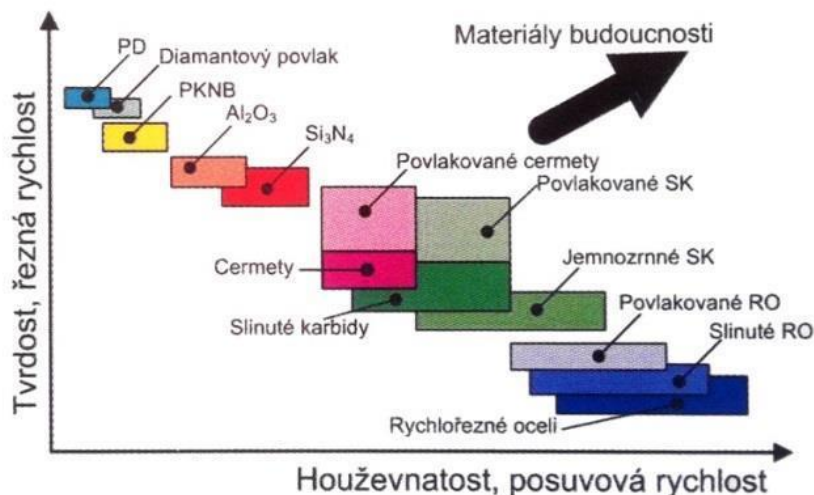
V kombinaci řezného nástroje a laseru bylo provedeno již velké množství vědecké práce a tyto poznatky byly přeneseny do průmyslové výroby. Zároveň však nebyly odstraněny všechny nedostatky laserového mikroobrábění, kterými jsou zejména nízká produktivita výroby a s tím související vysoká ekonomická náročnost při výrobě nástrojů. Proto je téma zvyšování efektivity obrábění materiálů pro řezné nástroje laserem aktuální a je zde prostor pro zcela nová řešení a techniky laserového zpracování.

Kapitola zabývající se současným stavem problematiky popisuje vývoj řezných nástrojů, technologii laserového mikroobrábění a využití této technologie pro úpravu řezných nástrojů. Na závěr této kapitoly jsou popsány možnosti zvyšování efektivity laserového mikroobrábění.

2.1 Řezné materiály a jejich vývoj

Trend vývoje nástrojových materiálů kopíruje trend vývoje materiálů obrobků, protože výběr vhodného nástrojového materiálu je faktorem pro efektivní obrábění. Snahou je proto zvyšovat u nástrojových materiálů jejich tvrdost spolu s houževnatostí, viz Obr. 1. [2]

Vývoj nástrojových materiálů sleduje vývojové větve, kterými jsou: vývoj nástrojových materiálů, vývoj povlaků a jejich nanášení, konstrukce moderních nástrojů, úprava jejich geometrie, břítu a výroba nástrojů aditivními technologiemi umožňující nové metody chlazení například s minimálním mazáním (MQL). [2]



Obr. 1: Rozdělení nástrojových materiálů podle jejich tvrdosti a houževnatosti [112]

jeho potřeba pro průmysl je těžko zastupitelná a většina nalezišť leží v politicky nestabilním Kongu [3]. I přes to je ale objem karbidových řezných nástrojů založených na wolfram karbidu majoritní a stále pokrývá okolo 40 % objemu všech řezných nástrojů.

Spolu s vývojem nástrojových materiálů a povlaků se tenčí možnosti jejich úpravy klasickými metodami – broušením a elektro erozí. Při úpravě těchto tvrdých nástrojových materiálů laserem není důležitá jejich tvrdost nebo elektrická vodivost, ale fyzikálně-mechanické vlastnosti, zejména pak jejich absorpce a tepelná vodivost. Proto je možné laserem obrábět všechny nástrojové materiály a vytvářet na nich mikro i makrogeometrické útvary. [2]

V trendu vývoje nástrojových materiálů jsou zajímavé studie od R. M. Gengy [3], který se zabývá nahrazením WC jinými prvky jako je např. NbC, Co a Ni. Motivací pro tento vývoj je fakt, že 70% nástrojů, které se používají pro obrábění, jsou založeny na wolfram-karbidu a právě wolfram byl v roce 2015 prohlášen Evropskou unií za jeden z patnácti nejvíce ohrožených surových materiálů. Bylo to proto, že

2.2 Laserové mikroobrábění

Jedná se o skupinu technologií, které využívají laser pro výrobu velmi malých prvků, typicky v rozměrech ve stovkách mikrometrů nebo menších [4]. Mezi hlavní technologie laserového mikroobrábění patří úběr materiálu, řezání [5] [6], vrtání [7], a strukturování [8]. Používají se výhradně pulsní lasery s délkou pulsu v řádech nanosekund, častěji ale ultrakrátkopulsní lasery s délkou pulsu 10 ps a méně [7]. Příkladem aplikace může být například vyřezávání mikro-elektromechanických komponentů (MEMS), jak je ukázáno na Obr. 2. Důvodem použití těchto laserů je dosažení vysoké špičkové hodnoty intenzity energie, která z povrchu materiálu jevem atermální ablace odpařuje materiál. Výsledkem obrábění je velmi jakostní povrch s velmi malou tepelně ovlivněnou oblastí (TOO). Mikroobrábění nachází uplatnění zejména v automobilovém průmyslu, elektronice, letectví, ve výrobě

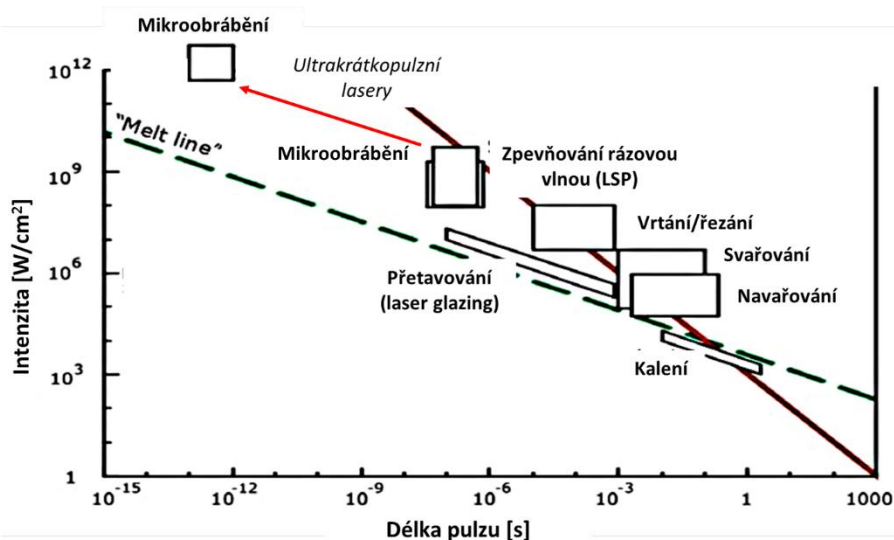


Obr. 2: Mikroobrábění laserem – řezání pro mikroelektronické komponenty (MEMS) [11]

forem a v medicíně. Laserové mikroobrábění lze využít i při výrobě řezných nástrojů a při úpravě jejich mikro a makrogeometrie. Výsledkem jsou změny vedoucí ke zlepšení funkcí nástroje, zejména jeho řezivosti [8] [9] [10] [11] [12].

V oblasti laserového mikroobrábění byl významným milníkem rok 2000, kdy začaly být komerčně dostupné Ti-safírové pevnolátkové femtosekundové lasery s délkou pulsu dosahujících až pěti femtosekund [13]. Podstatný je i vývoj směrem ke zvyšování průměrného výkonu a účinnosti laserových zdrojů, kde se již pro některé vláknové lasery

podařilo dosáhnout účinnosti přes 50 procent [14]. Na Obr. 3 je graf porovnávající jednotlivé laserové technologie vzhledem k používané délce pulsu a intenzitě výkonu. Je zde také naznačený zmíněný



Obr. 3: Graf závislosti intenzity výkonu na délce pulsu pro výběr laserových technologických operací (upraveno) [14]

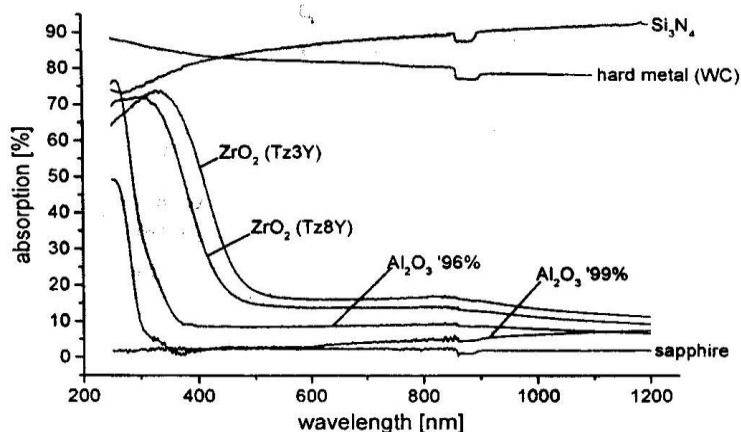
trend laserového mikroobrábění vedoucí ke zvyšující se intenzitě a zkracující se délce pulsu. Neméně důležitý je i vývoj optiky, vedení laserového paprsku a zdokonalování komponent laserových zdrojů. Tento nepřetržitý vývoj vede k přesnějším a jakostnějším mikroobráběním povrchů s rostoucí produktivitou výroby. [13] [14] [15]

2.2.1 Interakce paprsku laseru s materiálem

Interakce laserového paprsku s materiálem je ojedinělá pro jakoukoliv kombinaci laseru a materiálu, nicméně podobná při zachování některých technologických parametrů. Hlavním parametrem ovlivňujícím podobu interakce na straně materiálu je jeho absorptivita. Jedná se o parametr, který určuje, jak velké množství dopadajícího záření bude pohlceno materiálem. Pokud je vlnová délka vhodně absorbována materiálem, jsou rozhodující další dva parametry, a to intenzita výkonu (výkon na plochu) a režim laseru (pulsní, kontinuální). [15] [7]

2.2.2 Absorpce laserového paprsku nástrojovými materiály

Koeficient absorpce materiálu, je definován jako množství dopadajícího laserového záření, které je materiálem pohlceno (absorbováno) tj. že nedochází k jeho průchodu (transmisi) ani odrazu (reflexi) [7]. Faktory ovlivňující absorpci z hlediska dopadajícího laserového paprsku jsou vlnová délka a směr dopadajícího záření. Z hlediska materiálu je důležitá drsnost a barva povrchu, uspořádání krystalové mřížky a chemické složení. Jelikož absorpce záření není stejná pro celý rozsah vlnových délek, je důležité najít optimální vlnovou délku λ dopadajícího světla, pro které bude absorpce největší. S rostoucí absorpcí laserového paprsku roste i efektivita procesu mikroobrábění. Dalším způsobem, jak zvýšit absorpci materiálu, je modifikace povrchu vedoucí ke snížení odrazivosti [16] [17].

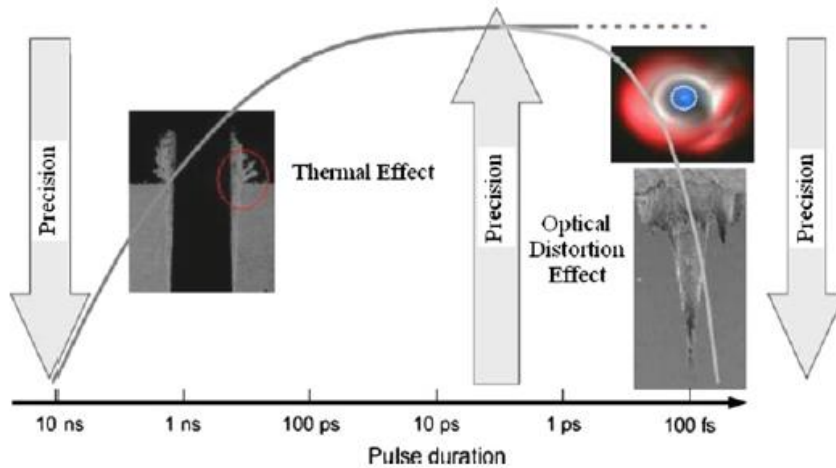


Obr. 4: Graf absorpce nástrojových materiálů [16]

Z grafu absorpce na Obr. 4 vyplývá, že pro obrábění nástrojových materiálů je obecně vhodnější používat kratší vlnové délky laseru, s rozdílem obrábění nitridové keramiky. Vysokou absorpci mají také karbidy na bázi WC, u kterých je absorpce vysoká i pro delší vlnové délky na rozdíl od oxidické a zirkonové keramiky.

2.2.3 Vliv délky pulsu

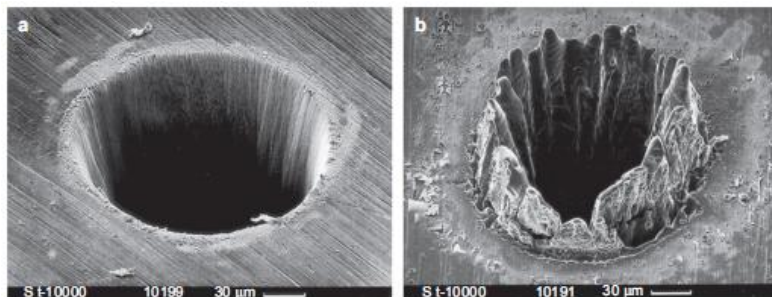
Pokud je doba interakce, tj. doba trvání laserového pulsu v řádech mikrosekund a nanosekund, jedná se o termální procesy a je zde majoritní přenos tepla do materiálu, jeho ohřev a následné odpařování vlivem nárůstu teploty. Toho se s výhodou využívá při procesech, kdy je zapotřebí velmi vysokých úběru materiálu a kdy není důležité hledět na tepelné ovlivnění nebo drsnost povrchu. Proto jsou tyto lasery vhodné používat pro tzv. hrubování. Pro dobu interakce v řádech pikosekund a femtosekund



Obr. 6: Schéma závislosti kvality obrobeného povrchu na délce pulsu pro kovy [22]

nedochází téměř k přenosu tepla, dochází k extrémnímu nárůstu teploty a nastává ablace materiálu. Tyto procesy jsou nazývány jako atermální a u kovových materiálů nastávají při použití ultrakrátkých pulsů kratších než 10 ps, což je doba potřebná pro přenesení energie dále do krystalové mřížky, označováno také jako doba potřebná pro vytvoření páru elektron-foton [18].

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. Výsledkem je velmi malá tepelně ovlivněná oblast (TOO) [18] [19]. Teorie atermálního úběru materiálu



Obr. 5: Laserové mikroobrábění ultrakrátkými a krátkými pulsy, a) délka pulsu 200 fs, $F = 0,5 \text{ J/cm}^2$; b) délka pulsu 3,3 ns, $F = 4,2 \text{ J/cm}^2$ [18]

může být dobře demonstrována na příkladu, viz Obr. 5, kde je porovnáno laserové mikrovtání ultrakrátkými femtosekundovými pulsy (Obr. 5-a) a krátkými, nanosekundovými pulsy (Obr. 5-b) [19]. Z obrázku je patrné, že při použití nanosekundového laseru dochází k významnému tepelnému ovlivnění a vyvěrání nataveného materiálu nad povrchu. Naopak, při použití femtosekundového laseru s malou intenzitou energie blízkou ablačnímu prahu je velikost TOO v řádech nanometrů [18] [19]. S výhodou lze tedy tyto lasery využít pro velmi jemné mikro-obrábění bez negativních změn v materiálu. [15] [7] [20] [21] [22]

Kvalita obrobeného povrchu v závislosti na délce pulsu a teplotních vlivech může být dána do jednoduché závislosti podle Obr. 6 [23]. Zlom nastává v oblasti kolem délky pulsu 100 fs, kdy může docházet ke zhoršující se kvalitě povrchu vlivem tzv. optického zkreslení [23]. Jako ideální z hlediska kvality laserového mikroobrábění se jeví oblast délky pulsu od 10 ps do 100 fs.

2.2.4 Laserové systémy pro mikroobrábění laserem

V průmyslu a ve vědeckých aplikacích se pro úpravu mikro/makro geometrie řezného nástroje používají zejména ultrakrátkopulsní lasery (pracující s délkou pulsu v řádech pikosekund a femtosekund), pevnolátkové a vláknové lasery s aktivním prostředím Ti:Safír nebo Yb:YAG. V Tab. 1 byli vybráni někteří výrobci laserových zdrojů pro průmyslové použití s režimem generace ultrakrátkých pulsů [24]. Většina z těchto laserových zdrojů byla použita i v předchozích zmíněných studiích. V některých se objevovali i starší, stále v průmyslu zastoupené lasery s krátkou délkou pulsu s pulsy v řádech nanosekund. Tyto lasery stále nacházejí uplatnění zejména pro gravírování, popisování, řezání a vrtání [23] [7]. Nevýhoda použití těchto laserů je v generování velké tepelně ovlivněné oblasti, která může negativně ovlivnit obráběný nástrojový materiál.

Výrobce	Název produktu (produktové řady)	Nastavitelná délka pulsu		Průměrný výkon	Energie v pulsu	Opakovací frekvence
Light Conversion	Carbide	290 fs	10 ps	80 W	800 μ J	60 kHz - 2 MHz
	Pharos	190 fs	20 ps	20 W	2 mJ	1 kHz- 1 MHz
Laser Quantum	řada Taccor	30 fs		1,6 W	1,8 nJ	1 GHz
NKT Photonics	AEROPULSE	0,5 ps	3 ps	20 W	20 μ J	50 MHz
Trumpf	TruMicro	400 fs	20 ps	20 W	20 μ J	2 MHz
IPG	YLPP	250 fs	500 fs	50 W	50 μ J	3 MHz
	YLPP	0,75 ps	5 ps	200 W	200 μ J	50 kHz - 2MHz
Spectra-physics	Spirit	400 fs	10 ps	30 W	120 μ J	250 kHz
	Solstice Ace	35 fs	120 fs	7 W	0,7 mJ	10 kHz
Coherent	Axon	150 fs		1 W		80 MHz
	Monaco	350 fs	10 ps	60 W	80 μ J	50 MHz
RPMC	Diadem	400 fs		30 W	30 μ J	40 MHz
	Alcor	140 fs		4 W	50 nJ	80 MHz

Tab. 1: Tabulka výrobců femtosekundových laserů včetně bližších specifikací jejich zařízení (29)

Většina výrobců dodává laserové zdroje plně zakrytované, pouze s výstupem pro laserový paprsek [24]. Příkladem je i pikosekundový zdroj od firmy IPG (Obr. 7) nebo laditelný femtosekundový laserový zdroj Carbide od společnosti Light Conversion (Obr. 8) [25].

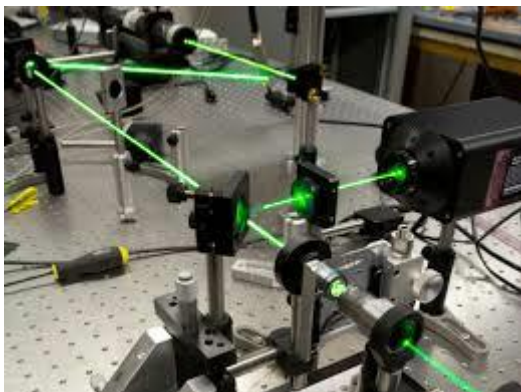


Obr. 8: Laserový zdroj Carbide, výrobce Light Conversion [24]



Obr. 7: Pikosekundový laserový zdroj (IPG) a vedení paprsku optickým vláknem [13]

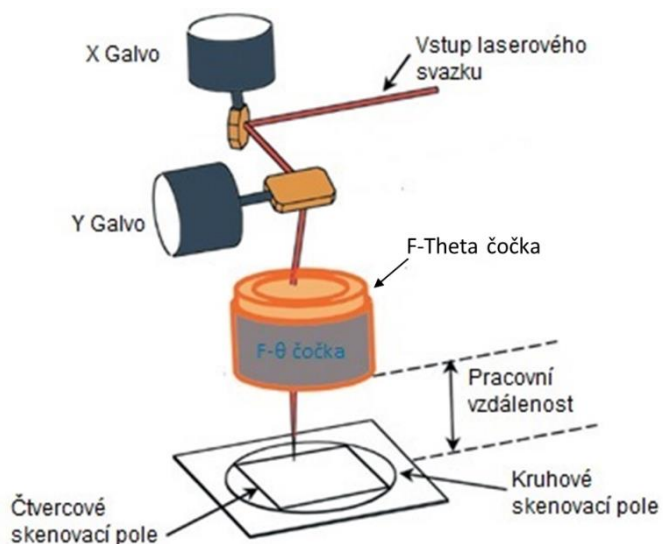
Vedení paprsku ze zdroje do procesní hlavy je provedeno buďto optickým vláknem Obr. 7 nebo soustavou zrcátek a čoček Obr. 9. [24]



Obr. 9: Vedení paprsku soustavou zrcátek a čoček na optickém stole [87]

Při vedení paprsku otevřenou sestavou optickém stole se na optický stůl umísťují nejčastěji zrcátka pro vedení paprsku, čočky pro jeho fokusaci, dále pak polarizátory, hranoly pro dělení paprsku, expandéry a prvky pro diagnostiku svazku. [26] [27] [28]

Na konci optické cesty je procesní optika. Pro mikroobrábění jsou to nejčastěji skenovací galvo hlavy a polygonální scannery. [29] Možná je také koncepce se statickým výstupem paprsku a pohybovými osami. Většinou se ale přistupuje ke kombinaci procesní optiky a pohybových os pro větší polohovací variabilitu. V galvo



Obr. 10: Schéma skenovací galvo hlavy s F-Theta čočkou a skenovacím polem

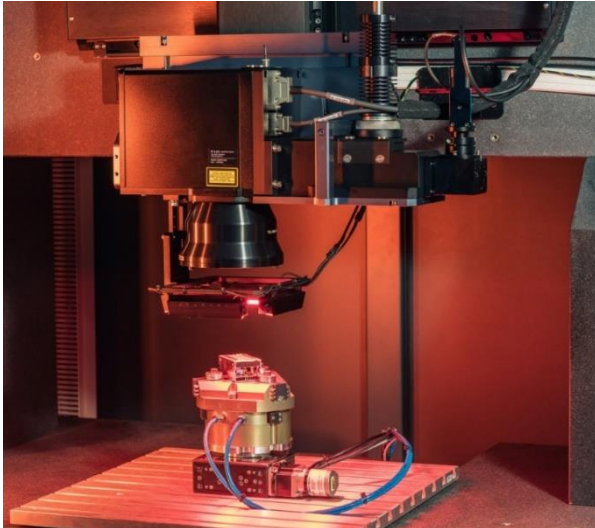
hlavě se nachází dvě plně odrazivá zrcátka, která polohují paprsek v ose X a Y. Paprsek je následně fokusován, nejčastěji F-Theta čočkou na pracovní rovinu (Obr. 10). Rozměr pracovní plochy bývá nejčastěji 100x100 mm nebo 50 x 50 mm. Polohovací rychlost fokusovaného svazku je do 10 m/s. Pro rychlejší polohování se používají polygonální scannery, jejichž rychlost polohování dosahuje až 100 m/s. Použití nacházejí spíše ve vytváření pravidelných vzorů a textur [30].

Koncepce strojů pro laserové mikroobrábění je podobná strojům pro frézování, s tím rozdílem, že místo frézovacího vřetene je umístěna laserová

procesní optika. Kromě dvou optických os v galvo hlavě mají stroje pro mikroobrábění další tři nebo pět os mechanických. Pětiosé stroje se vyrábí s koncepcí otočně sklopného stolu, nebo s otočným stolem a otočnou galvo hlavou. Výrobci strojů s pěti-osou kinematikou jsou např. DMG MORI, GF Machine Solutions nebo Ewag. Porovnání základních parametrů jejich laserových obráběcích center je v Tab. 2 [31] [32] [33].

	DMG MORI- Lasertec 20 PrecisionTool	Ewag- Laser Line Precision	GF Machining Solutions – ML-5
Max. pojezd v ose X [mm]	200	440	280
Max. pojezd v ose Y [mm]	400	140	350
Max. pojezd v ose Z [mm]	280	170	300
Průměr stolu [mm]	200	200	-
Max. výška obrobku [mm]	200	250	-
Hmotnost obrobku [kg]	10	5	-

Tab. 2: Základní parametry strojů pro laserové mikroobrábění řezných nástrojů [31] [32] [33]

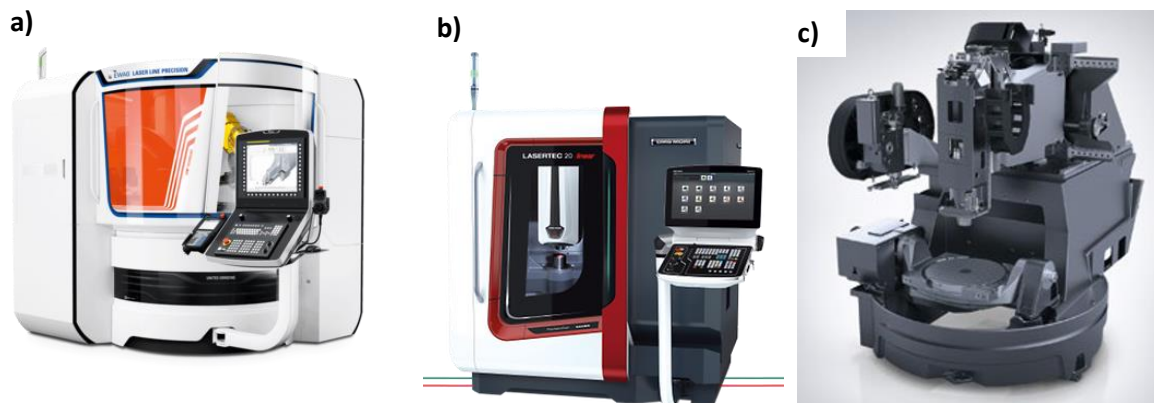


Obr. 11: Pohled do pracovního prostoru stroje RDX1000 od Pulsar Photonics [34]

Třiosé stroje se vyrábí jako stroje s příčnicí, na kterém je umístěno vedení osy Z s procesní optikou. Pohyb v ose X a Y je zajištěn křížovým stolem, často z lineárních motorů nebo s kuličkovým šroubem, protože je zde kladen velký důraz na rychlost a zrychlení a není potřeba nést velké zatížení. Výrobci tříosých strojů pro mikroobrábění jsou například firmy 3D-Micromac nebo Pulsar Photonics. Na Obr. 11 je pohled do pracovního prostoru stroje RDX1000 od Pulsar Photonics, ze kterého byly osy X a Y vyjmuty a byla přidána menší rotační osa [34] [35].

Vysoké požadavky jsou kladeny na tuhost strojů a potlačení okolních vibrací, proto se rámy strojů vyrábí z granitu nebo z polymerního betonu. Na

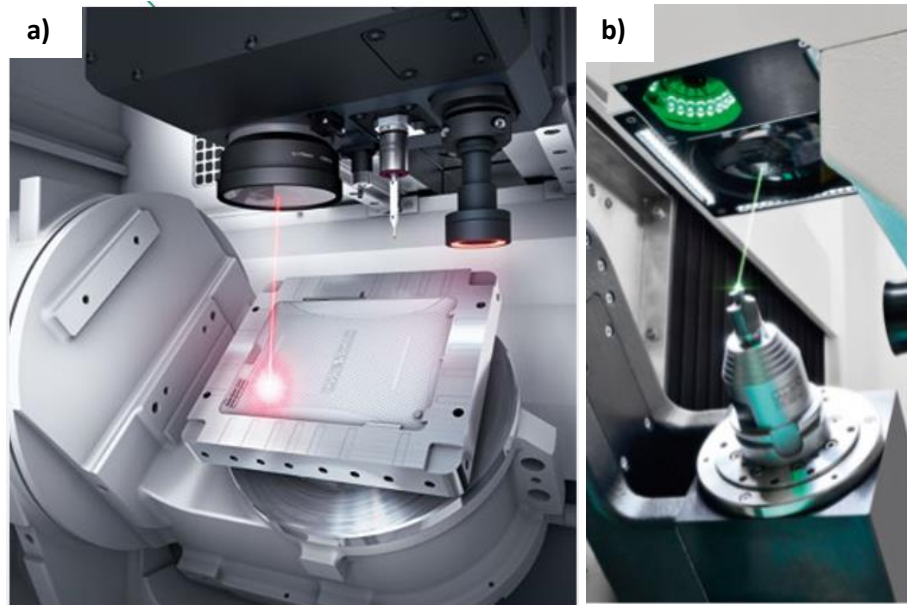
trhu lze koupit stroj z produktové řady, nebo si navrhnout vlastní řešení. Výrobci strojů pro přesné laserové mikroobrábění, se zavedenou produktovou řadou, jsou například Ewag, DMG Mori, 3D Micromac nebo Pulsar Photonics. Stroje na zakázku vyrábí například firma ELAS [31] [32] [34] [35] [36]. Ukázky takovýchto strojů včetně vnitřního uspořádání s podobností k frézce jsou na Obr. 12.



Obr. 12: Stroje pro laserové mikroobrábění: a) Stroj LaserLine Precision od firmy Ewag [32]; b,c)- Stroj LaserTec 20 PrecisionTool od firmy DMG MORI [31]

Požadavkem na univerzálnost mikroobráběcího laserového centra z hlediska laserového zařízení je zejména možnost volby vlnové délky záření. Proto výrobci nabízejí zařízení spolu s procesní optikou pro generaci základní a druhé harmonické frekvence. Dále je to požadavek na nastavitelnost délky pulsu, ideálně od jednotek pikosekund do několika stovek femtosekund. Důležitým parametrem je i průměrný výkon laseru, dosahovaná opakovací frekvence pulsů, rychlost rozmítání paprsku a jeho průměr v ohnisku [34] [35] [31] [32] [33].

Stejně jako u obráběcích strojů jsou požadavky na upínání v laserových zařízeních: přesnost a opakovatelnost upnutí. Tuhost upnutí není zásadní, jelikož nedochází ke vzniku silového zatížení od laserového procesu. Pro upínání rovinných obrobků jsou často využívány upínky, podtlakové či magnetické upínače (Obr. 13-a). Pro rotační obrobky se používají sklíčidla nebo kleštiny, dále jsou také používány rozhraní pro nástrojové držáky (např. HSK nebo ISO), jako u stroje na Obr. 13-b. [32]. [31]



Obr. 13: a) Pohled do pracovního prostoru stroje Lasertec od DMG Mori – otočně sklopný stůl a procesní optika ve formě galvo hlavy [31]; b) Pohled do vnitřního prostoru stroje od Ewag- pětiosá mechanická kinematika plus dvě osy optické [32]

2.3 Úprava geometrie řezných nástrojů laserem

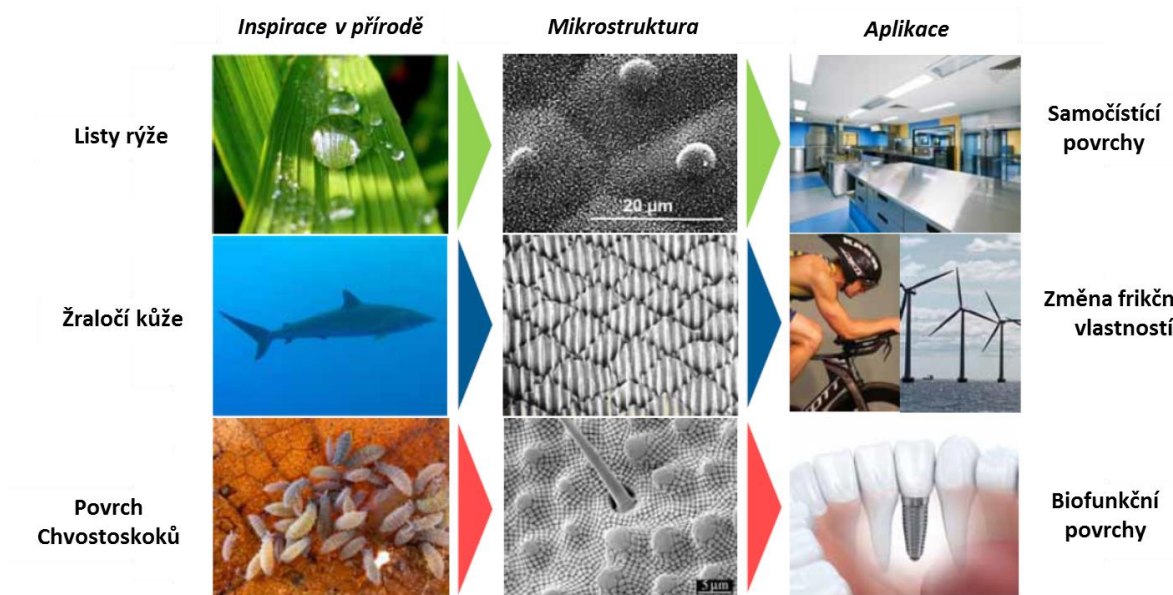
Geometrií řezného nástroje je definována jeho použitelnost pro různé operace, materiály a podmínky obrábění. Podmnožinou geometrie nástroje je soubor geometrických prvků, který lze rozdělit, podle své velikosti a vzdálenosti od ostří, na prvky makrogeometrie a mikrogeometrie řezného nástroje, kde:

Makrogeometrie řezného nástroje je chápána jako soubor prvků, geometricky popisujících řeznou hranu, čelo a hřbet nástroje včetně vzdálenějších prvků od ostří, například utvařeče třísek atd.

Mikrogeometrií řezného nástroje se rozumí tvar a topografie nástroje v bezprostřední blízkosti ostří, například velikost fazety, poloměr ostří, drsnost povrchu řezné hrany, čela a hřbetu.

2.3.1 Úprava mikrogeometrie

Velmi studovaným tématem v oblasti laserového mikroobrábění je úprava povrchové mikrogeometrie strukturováním. Laserem vytvořené struktury mají ovlivnit funkční vlastnosti povrchu materiálu, zejména smáčivost, frikci a adhezi. V mnohých případech vychází podoba funkční struktury z přírody. Příklady funkčních povrchů a jejich přírodní inspirace jsou na Obr. 14. [37]

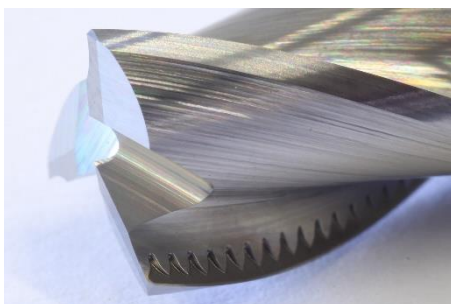


Obr. 14: Funkční povrchy a jejich inspirace v přírodě (upraveno) [37]

Klíčem k výběru vhodného povrchu v přírodě je nejčastěji jeho smáčivost. Povrchy mohou být hydrofilní, hydrofobní, a to podle toho, jestli vodu přitahují nebo odpuzují. Hydrofobní povrchy jsou např. lotosové listy, okvětní lístky růže, komáří oči, žraločí kůže, záda pouštních brouků nebo motýlí křídla. Hydrofobní povrchy jsou vhodné pro regulaci pohybu kapaliny po povrchu, mohou mít samočistící vlastnosti, být odolné proti bakteriím a také odolné proti námraze. Hydrofilní povrchy mohou dále snižovat tření a odolnost proti opotřebení. Ve studii [38] bylo použito laserové strukturování pístních kroužků ve válci motoru, aby došlo ke snížení třecí síly, a s tím související snížení provozních nákladů. Spolu s topografií je velmi důležité při vytváření funkčních povrchů studovat i fyzikálně-chemický stav povrchu. [39] [40] [41] [42]. Zmíněných vlastností je možno využít i u řezných nástrojů, a to s ohledem na změnu tření a mechanismu utváření třísky. Struktura podporující tření může vést ke snížení tření mezi nástrojem a obrobkem za zvýšení trvanlivosti. Stejně tak může vhodná struktura podpořit dělení třísky. [43] [44]

2.3.2 Úprava makrogeometrie

Úprava makrogeometrie řezných nástrojů pomocí laseru je již v průmyslu zastoupena. V České republice se touto problematikou zabývají firmy Hofmeister, s.r.o. a Rotana, a.s.. Ve firmě Hofmeister mají k dispozici laserové mikroobráběcí centrum s polohováním v pěti osách od firmy Elas. Stroj je vybaven laserem s délkou pulsu >13 ps, průměrným výkonem 20 W a optickou cestou pro vlnové délky 1064 a 532 nm. Na Obr. 15 je úprava řezné hrany z PCD, na které byl ve firmě Hofmeister vytvořen utvařecí třísky. Výroba tohoto komplexního tvaru spočívá ve vzájemné interpolaci pohybových a optických os galvo skeneru. Pro správné umístění utvařeče třísek na vzorek bylo použito kamerové zaměrování a rozeznávací rozhraní [45] [46].

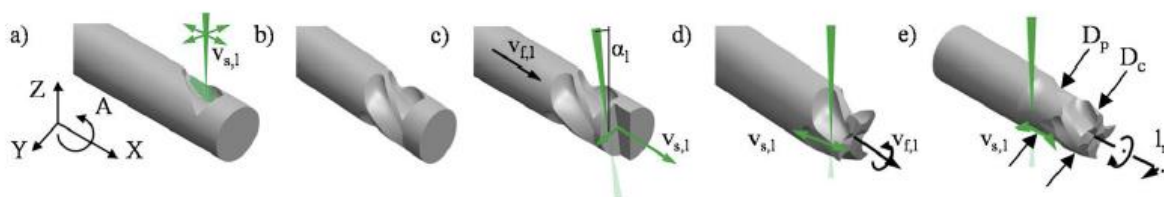


Obr. 15: Úprava makrogeometrie řezné hrany laserovým obráběním - firma Hofmeister [51]

Ve firmě Rotana a.s. používají k úpravě mikrogeometrie nástrojů stroj LaserLine od firmy EWAG, disponující pikosekundovým laserovým zdrojem pracujícím na

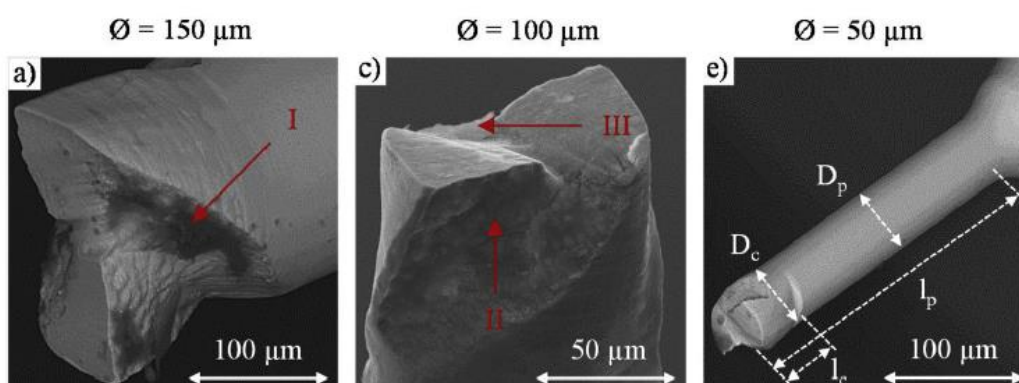
vlnové délce 1064 nm. V Rotaně na tomto zařízení vytváří hlavní makrogeometrické prvky řezných nástrojů z polykrystalického diamantu (PKD), CVD diamantu a kubického nitridu bóru (CBN), které jsou jinými technologiemi těžko vyrobitelné [45].

V literatuře lze také nalézt několik studií s touto tematikou, například v článku *Innovative micro-tool manufacturing using ultra-short pulse laser ablation* od H. Büttnera [47], se zabývali výrobou nástrojů z WC o průměru 150, 100 a 50 μm laserem. Pro výrobu mikrofrézičky byly použity dvě strategie laserového mikroobrábění – radiální a tangenciální (Obr. 16). Nástroje byly vyrobeny postupným polohováním ve čtyřech mechanických osách a dvou osách optických.



Obr. 16: Schéma výrobního postupu frézy: a) radiální obrábění, c) e) tangenciální obrábění [47]

Obrázek výsledného nástroje je na Obr. 17. Kvalitu laserem zpracovaného povrchu ovlivňují zejména: délka pulsu, skenovací rychlost, energie v pulsu a rozteč jednotlivých drah laserového paprsku.



Obr. 17: Laserem vytvořená makrogeometrie na nástroji a) průměr 150 μm , b) průměr 100 μm , c) průměr 50 μm [47]

V práci byly použity následující parametry laseru, viz Tab. 3.

Vlnová délka	515 nm
Délka pulsu	1 ps
Frekvence	400 kHz
Výkon	0.03 W
Skenovací rychlost	200 m/s
Rozteč drah	1 μm
Energie v pulsu	0,075 μJ
Překryv drah	87,5 %
Překryv pulsů	93,75 %

Tab. 3: Procesní parametry použité ve studii [47] pro výrobu mikrofréziček

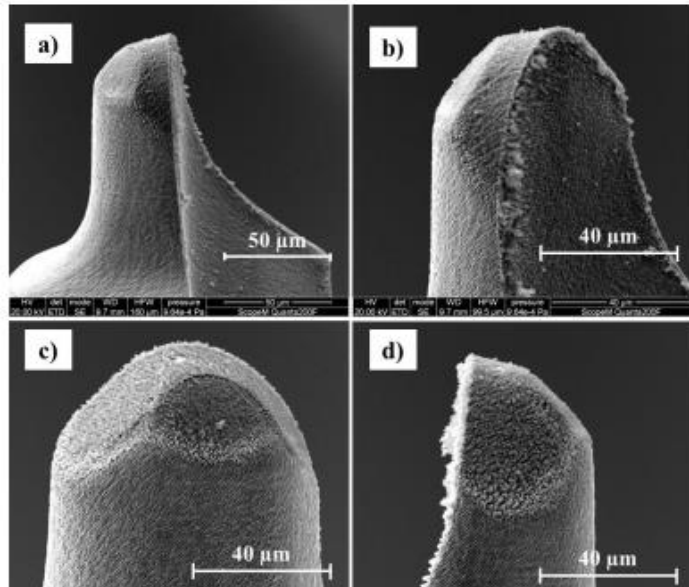
Geometrie nástroje není tak přesná, jak by mohla být při použití pětiosého polohování s kombinací dvou optických os. Na povrchu jsou viditelné určité nepřesnosti a na řezné hraně jsou známky vylomení břitu (Obr. 17). V závěru práce byly nástroje testovány při konvenčním frézování mědi a WCu.

Laserové zařízení Laser Line od firmy EWAG [32] bylo použito v několika studiích, z toho velmi zajímavá je studie od Hajri, M. s názvem *Fabrication of a ball end nose micro milling tool by tangential laser ablation* [48]. V této studii byla vytvořena kulová fréza z PCD o průměru 100 μm viz Obr. 18. Vytvořený nástroj byl nasnímán na mikroskopu a následně testován při obrábění mědi. Kvalita takto vytvořeného nástroje by se dala dále zlepšovat např. zmenšením laserového spotu, což by mělo za následek větší přesnost a rozlišení [48].

Dalším nástrojem vytvořeným na zařízení Laser line od firmy EWAG je fréza na Obr. 20 vytvořená z PCD s průměrem 1,8 mm. K výrobě nástroje byl použit tangenciální přístup obrábění. Jeho výhodou je velmi přesné obrobení řezné hrany. Celkovým cílem této studie bylo laserem vytvořeným nástrojem obrábět slitinu ZrO_2 . [48].

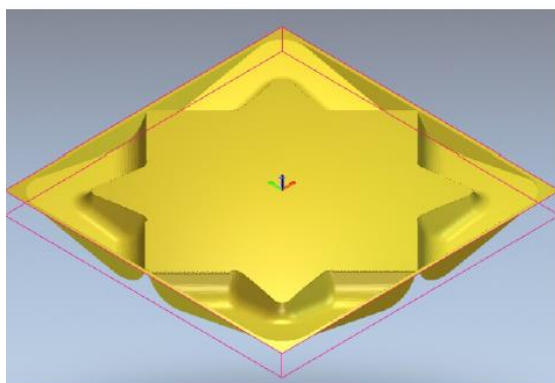


Obr. 20: Laserem vytvořená geometrie na fréze z PCD o průměru 1,8 mm [53]



Obr. 18: Obrázek ze SEM kulové frézy z PCD

Výzkumem laserové modifikace řezných nástrojů se zabývala i výzkumná zpráva Výzkumného centra pro strojírenskou a výrobní techniku – nyní ústavu 12135 na ČVUT v Praze. Název zprávy je *Výzkum využití 3D gravírování laserem pro výrobu zkušebních utvařečů třísky na vyměnitelných břitových destičkách* a jejím autorem je R. Bičíšková [49]. Tento výzkum se



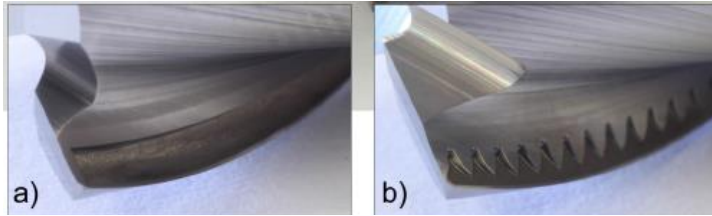
Obr. 19: Utvařeč č. 40 s nejlepším výsledkem (model v programu Artcam)

zabýval gravírováním různých tvarů do keramických vyměnitelných břitových destiček s cílem vytvořit tvar, který bude nejlépe při soustružení dělit třísku. Použitým zařízením byl 50 wattový pevnolátkový nanosekundový laser. Destičky s vygravírovanými utvařeči třísek byly následně testovány při obrábění na konvenčním soustruhu SU18. Obráběným materiálem byla vyžíhaná nástrojová ocel ČSN 19 550. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u utvařeče s označením 40 s hvězdicovitou geometrií (Obr. 19).

Z této studie lze vycházet, co se týče tvarů a některých podmínek laserového procesu. V současné době je však 2D geometrie často nedostatečná a je třeba vytvářet tvary pomocí víceosého laserového obrábění. Zároveň je třeba myslet nejen na produktivitu procesu, ale i kvalitu vytvořeného povrchu. V tomto výzkumu byl použit nanosekundový laser, který je vhodný pro gravírování, avšak použití laseru

s dlouhými pulsy může významně ovlivnit vzniklý povrch. Proto je v současné době zkoumáno použití spíše piko a femtosekundových laserů viz kapitola 2.2.4.

Výrobou utvařečů na nástroji a celkově procesem jejich výroby včetně odladění interpolace os při obrábění se zabývala disertační práce od A. Čermáka ze Západočeské univerzity [50]. Hlavním přínosem

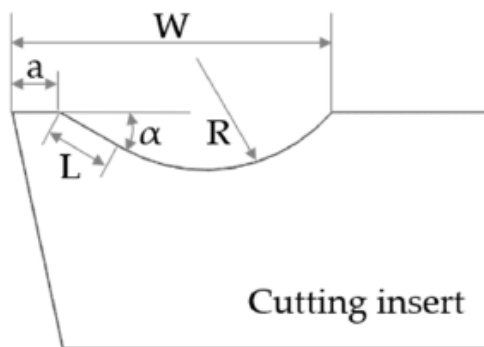


Obr. 21: Utvařeče na nástrojích vytvořené laserovou ablací

této práce je metodika zaměření hrany nástroje ve stroji pro přesné umístění utvařeče na hranu nástroje a vzájemná interpolace os pro zajištění konstantní fokusační vzdálenosti a kolmosti laserového paprsku na obráběný povrch. Dále je to odladění ablačního

procesu a potřeba znalosti ablační charakteristiky obráběného materiálu. Výsledné utvařeče třísek jsou na Obr. 21. V této práci lze nalézt inspiraci zejména v přístupu k problematice a posloupnosti činností vedoucí k výrobě určité mikro/makro geometrie na nástroji.

Studie *Tailored Chip Breaker Development for Polycrystalline Diamond Inserts: FEM-Based Design and Validation* od autorky Itxaso Cascón [51], je



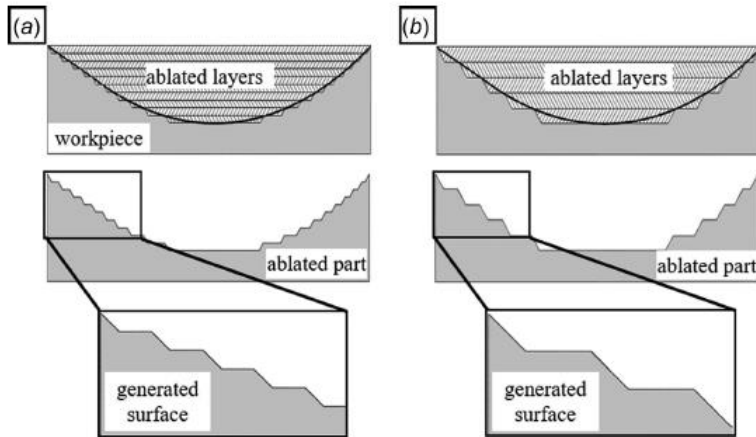
Obr. 22: Geometrické parametry utvařeče třísek [50]

zaměřena na optimalizaci tvaru utvařeče pomocí simulací a následně jeho vytvoření a testování na při obrábění. Utvařeč byl vygravírován nanosekundovým pevnolátkovým laserem o maximálním výkonu 40 W. Obráběným materiálem byl polykrystalický diamant. Hodnoceno bylo utváření třísky a také kvalita obroběného povrchu. Z experimentu vyplynulo, že parametry geometrie utvařeče jsou pro tvorbu třísky zásadní. Tyto parametry jsou: úhel čela utvařeče α , vzdálenost utvařeče od čela a , vzdálenost L , rádius utvařeče R (Obr. 22). Vyšší úhel α vedl ke zmenšení

řezných sil, ale zároveň vedl ke zvětšení křehkosti celého utvařeče. Optimální byl úhel α s hodnotou okolo 17° , kdy došlo ke snížení řezné síly, k dobrému tvoření třísky a také k dobré trvanlivosti nástroje. Dalším parametrem, který byl optimalizován byla vzdálenost utvařeče od řezné hrany. Optimum bylo stanoveno pro hodnotu rovnou polovině nastavené posuvové rychlosti f . Poloměr utvařeče R byl pro optimální utváření třísky stanoven na 1,4 mm. Tato studie prokázala, že utvařeč na nástroji vede k lepší tvorbě třísek a lepší kvalitě obroběného povrchu.

Zajímavé jsou poznatky z geometrie utvařeče, ze kterých by se dalo při jeho výrobě vycházet a jejich účinek na utváření třísky. Ve studii chybí informace o drsnosti povrchu utvařeče, protože drsnost povrchu po laserovém opracování může výrazně ovlivnit trvanlivost nástroje a také kvalitu obroběného povrchu.

Další část této studie podrobněji rozebírá strategii laserového mikroobrábění utvařečů. Byla použita strategie 2,5D gravírování, která je založena na odebrání určitého počtu vrstev, v tomto případě pěti,

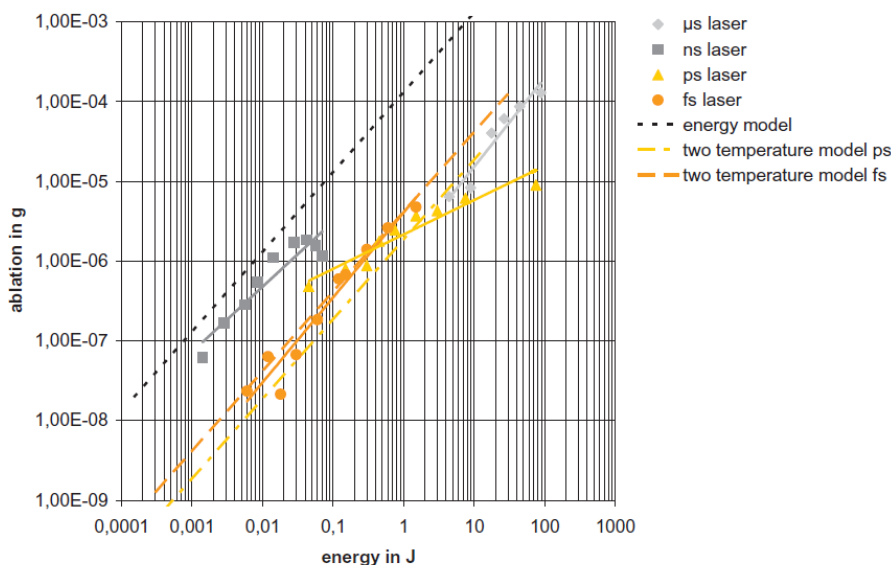


Obr. 23: Schéma vlivu tloušťky odebrané vrstvy na drsnost povrchu [50]

mikroobrábění povrchu. Některé problémy by mohly být odstraněny změnou strategie, například jiným natáčením šrafování.

2.4 Efektivita mikroobrábění laserem

Efektivita procesu laserového mikroobrábění s využitím pulsních laserů závisí zejména na dvou



Obr. 24: Graf efektivitu ablace v závislosti na intenzitě pro různé délky pulsu laseru [57]

s délkou pulsu pikosekund a femtosekund. V literatuře [52] je tento jev vysvětlen tak, že pro nanosekundové pulsy je veškerá energie využita na odpařování odebíraného materiálu. Zatímco pro pikosekundové pulsy, při vyšších opakovacích frekvencích, může docházet k tzv. stínění, kdy vznikající plazma nad materiálem brání prostupu dalších pulsů a tím se efektivita snižuje [52]. Zároveň je nutné pro efektivní laserové mikroobrábění najít kompromis mezi kvalitou a procesním časem a podle toho volit vhodný laserový zdroj s odpovídající délkou pulsu, popř. jejich kombinaci.

a poté posunutí v Z-ose pro znovu nastavení ideální fokusační vzdálenosti. Navíc pro každou odebíranou vrstvu byl směr šrafování natočen o 90° pro lepší kvalitu výsledného povrchu. Také bylo ze simulace zjištěno, že menší odebrané vrstvy povedou k nižší drsnosti povrchu, a to díky větší eliminaci tzv. schodového efektu na krajích obráběného tvaru viz Obr. 23. Z této studie jsou zajímavé poznatky ohledně strategie laserového

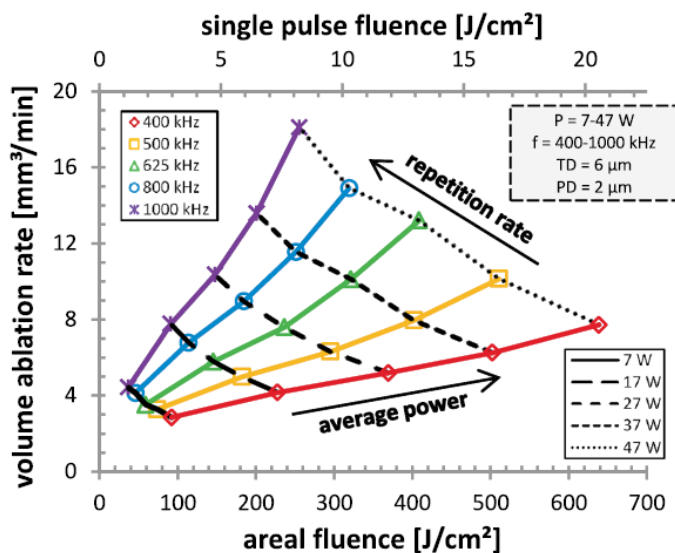
faktorech, kterými jsou intenzita laserového paprsku a délka pulsu. Na Obr. 24 je efektivita ablace, udaná v gramech v závislosti na energii (J) pro různé délky pulsu. Z tohoto grafu vyplývá, že pro menší použitou energii dokáže nanosekundový laser odebrat větší množství materiálu oproti laserům

$\Delta\tau$ / ps	#slices	ϕ_{th} / J/cm ²	δ / nm	$\Delta V_{max}/\Delta t$ / mm ³ /min/W
10	5x18	0.055	5.17	0.152
10	5x 36	0.049	4.46	0.147
50	5x 18	0.227	3.81	0.027
50	5x 36	0.189	3.06	0.026
540	5x 18	0.66	8.3	0.020
540	5x 36	0.67	7.2	0.017
1400	5x 18	0.69	13.8	0.033
1400	5x 36	0.91	14.1	0.025

Obr. 25: Tabulka efektivity ablace pro různé režimy laseru

laserového obrábění materiálů. Konkrétně v této studii je to obrábění mědi a oceli 1.4301. Ve studii bylo použito několik laserových zdrojů s délkami pulsu 10 ps, 50 ps, 540 ps a 1,4 ns. Testovací pole měla velikost 1x1 mm a počet vyšrafovaní celého pole byl nastaven na 4 pro měď a na 5 pro ocel. Z tabulky (Obr. 25) pro efektivitu ablace nástrojové oceli vyplývá, že největší produktivity bylo dosaženo při použití 10 ps pulsu. K popsání produktivity ablace byl použit termín efektivita ablace ($\Delta V/\Delta t$) definovaný jako odebraný objem materiálu v čase v přepočtu na jednotku výkonu (mm³/min/W).

Studie *Picosecond laser processing of polycrystalline cubic boron nitride — A method to examine the ablation behavior of a high cubic boron nitride content grade material* [54] od Christiana Daniel a spoluautorů se zabývala laserovým obráběním polykrystalického nitridu bóru (PKNB). Použitým laserovým zařízením byl pevnolátkový pulsní laser s délkou pulsu 10 ps a maximálním průměrným výkonem 50 W.



Obr. 26: Množství odebraného materiálu za jednotku času pro různé hodnoty průměrného výkonu a opakovací frekvence [59]

Studie *From fs to sub-ns: Dependence of the material removal rate on the pulse duration for metals* [53] od B. Neuenschwandera z Bernské univerzity je jedna z prvních, která se zabývá definováním termínů v oblasti produktivity

Hned na začátku studie jsou nadefinovány parametry TD a PD, které vyjadřují vzdálenost středů jednotlivých pulsu ve směru posuvu paprsku (PD) a jednotlivých drah vedle sebe (TD). To je rozdíl oproti [55], kde jsou tyto hodnoty vyjádřeny procenty, jako závislost rychlosti, průměru svazku a opakovací frekvence, což je asi vhodnější vzhledem k zadávání parametrů přímo ve stroji.

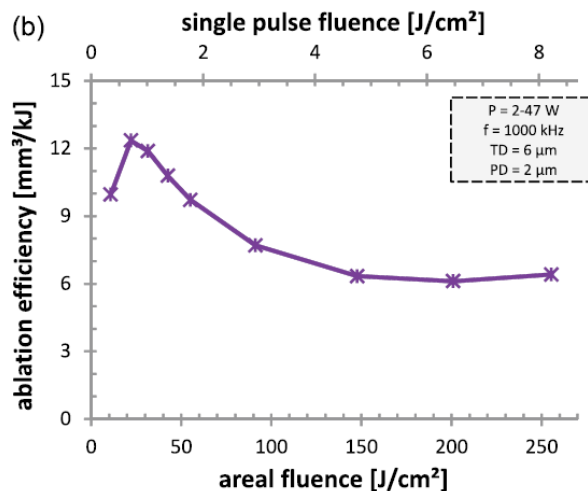
Hodnoty efektivity ablace byly experimentálně testovány pro celý rozsah výkonu a opakovací frekvence zařízení. Hodnotícím parametrem byl parametr intenzity ablace, tj. objem odebraného materiálu v čase - ΔV [mm³/min]. Z grafu na Obr. 26, který byl jedním z hlavních výsledků studie, je nejvyšší efektivita ablačního procesu pro maximální nastavený výkon (47 W) a maximální opakovací frekvenci (1 MHz). Množství odebraného materiálu je 18 mm³/min.

Stejně jako u studie [55], i zde byla stanovena efektivita celého procesu. Hodnoceno bylo množství odebraného materiálu v závislosti na vstupní energii. Tento graf má své maximum a dále z něj vyplývá, že nejvyšší efektivita celého procesu není úměrná vstupní intenzitě laserového paprsku, nýbrž nabývá své maximum a následně klesá. Závěrem této studie je, že maximální objem odebraného materiálu významně ovlivňuje kvalitu povrchu a že je vhodný spíše pro hrubovací operace. Přijatelný odebraný objem vzhledem ke kvalitě povrchu byl stanoven pro $\Delta V = 10$ mm³/min pro použitou intenzitu 2,93 J/cm².

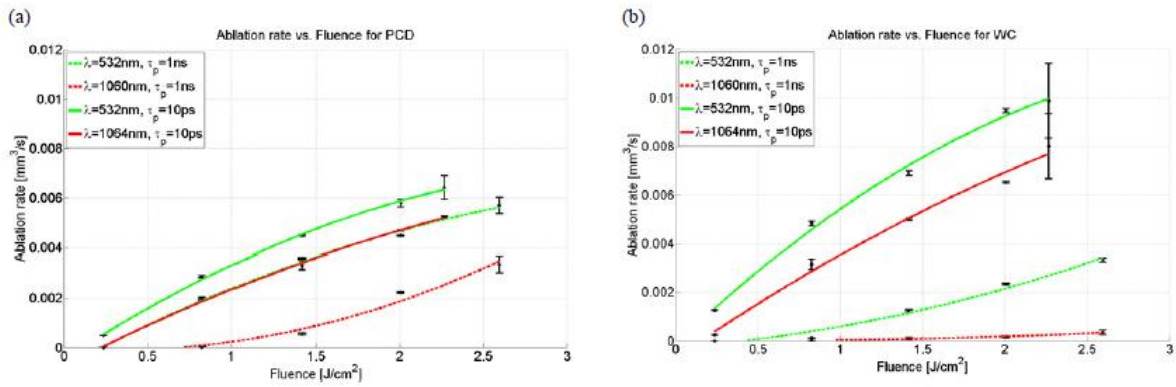
V literatuře *Ablation study of WC and PCD composites using 10 picosecond and 1 nanosecond pulse durations at green and infrared wavelengths*, [56] publikované autory Eberlem a Wegenerem v roce 2014 byla zkoumána obrobitelnost nástrojových materiálů, konkrétně diamantu a slinutého karbidu, pro různé délky pulsu v kombinaci s různou vlnovou délkou. První část experimentu se opírá o předchozí měření, kde byly změřeny ablační prahy pro diamant a WC. Pro diamant byla stanovena hodnota $F_{th} = 0,4$ J/cm², pro WC byla hodnota $F_{th} = 0,1 - 0,2$ J/cm² v závislosti na obsahu Co. S vyšším obsahem kobaltového pojiva klesá hodnota ablačního prahu a naopak. S ohledem na hodnoty ablačního prahu byl proveden experiment pro zjištění rychlosti ablace. Míra ablace (ablation rate) Q , byla vypočtena podle:

$$Q = \frac{V \cdot v}{P_{Nr}}, \quad (1)$$

kde V je odebraný objem materiálu, v je skenovací rychlost a P_N je počet přejezdů laserového paprsku po povrchu obrobku. Výsledkem byly grafické závislosti míry ablace na použité intenzitě. Z grafů (Obr. 28) vyplývá, že nejefektivnější ablace je možné dosáhnout při použití vlnové délky 532 nm a délky pulsu 10 ps, jak pro obrábění diamantu, tak pro obrábění karbidu.

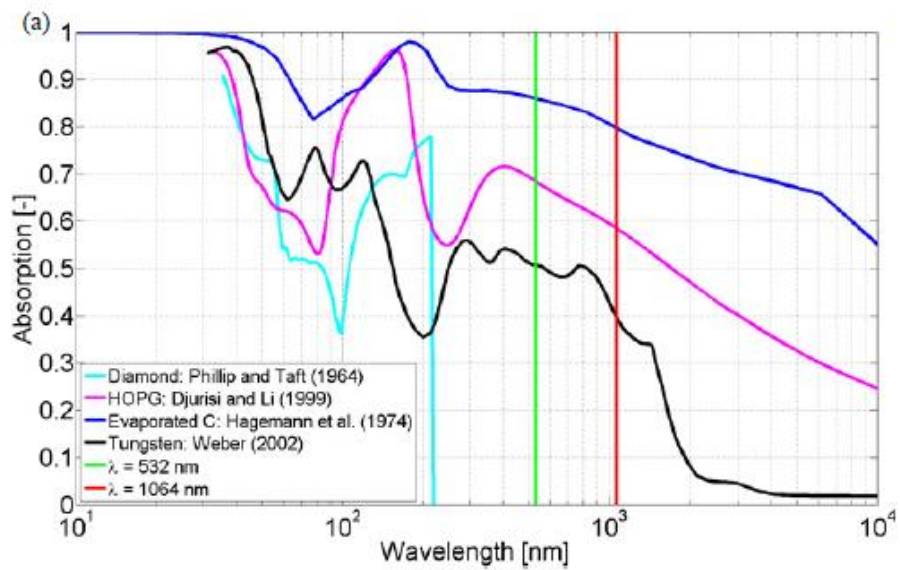


Obr. 27: Efektivita ablace v závislosti na intenzitě [59]



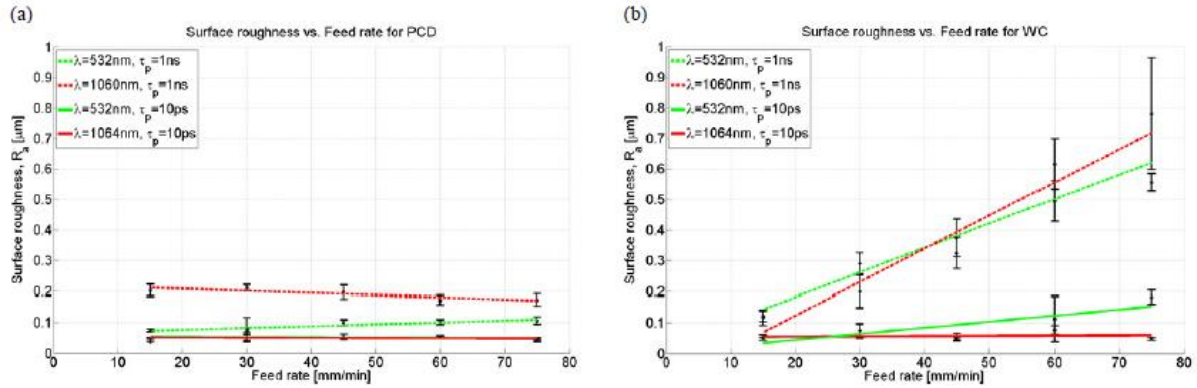
Obr. 28: Intenzita ablace pro a) PCD a b) WC [56]

Vysvětlení výsledků prezentovaných na grafech na Obr. 28, respektive největší intenzitu ablace pro 2. harmonickou frekvenci pro WC může být právě v absorpci wolframu. Na Obr. 29 je graf závislosti absorpce nástrojových materiálů na vlnové délce, který ukazuje, že absorpce wolfram-karbidu je vyšší pro druhou harmonickou frekvenci tedy v oblasti zeleného světla.



Obr. 29: Graf absorpce vybraných nástrojových materiálů [55]

V druhé části studie byla zkoumána kvalita obrobeneho povrchu, vyjádřena parametrem drsnosti povrchu Ra. Opět jsou zde porovnány úběry materiálů pro čtyři nastavené parametry, tedy pro vlnovou délku 532 nm a 1064 nm, a pro délku pulsu 1 ns a 10 ps. Z grafů na Obr. 30 jednoznačně vyplývá, že pro přesné obrábění karbidů s malou drsností povrchu Ra je vhodné použít vlnovou délku v řádech pikosekund. Pro diamant tato závislost není tak rozdílná a použití delších pulsů nevede k příliš velkému nárůstu drsnosti povrchu.



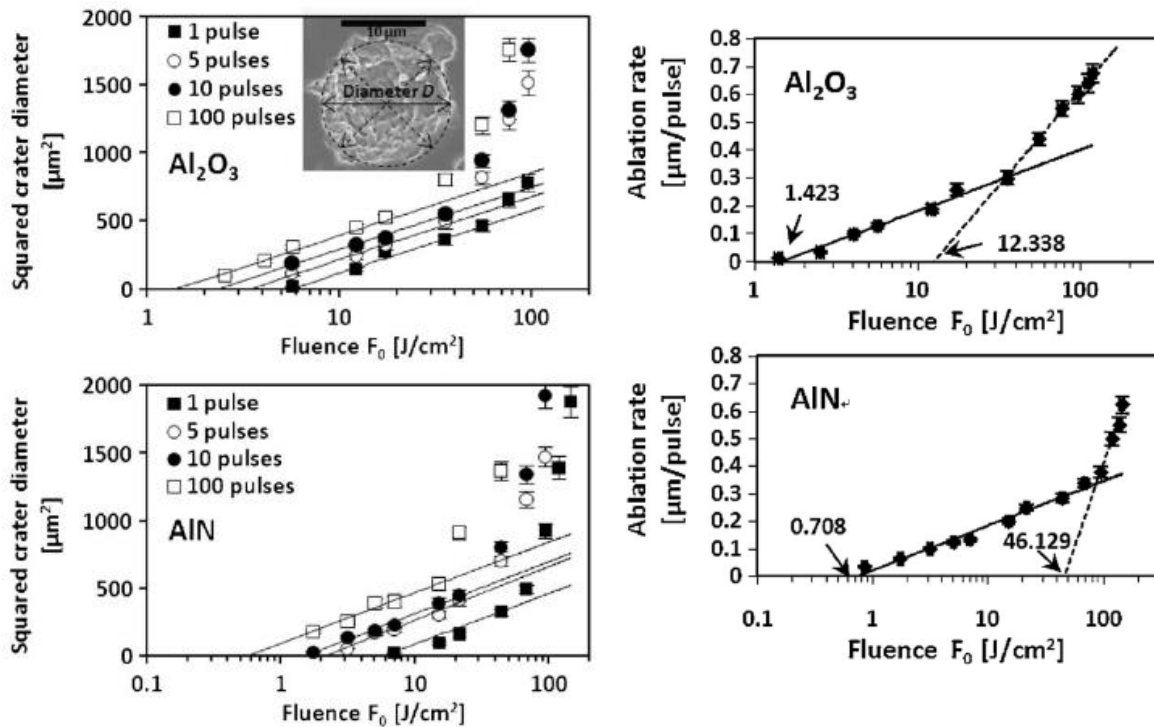
Obr. 30: Efektivita ablace pro a) PCD a b) WC pro různé režimy laseru

Poslední měření bylo provedeno na Ramanovském spektrometru, který umožňuje určit chemické složení na povrchu, zejména alotropní modifikace uhlíku. Bylo zjištěno, že na povrchu diamantu při obrábění pulsy s délkou 1 ns došlo k výraznému tepelnému ovlivnění a grafitizaci. Tento nežádoucí jev způsobuje degradaci diamantového nástroje, což vede ke značným omezením při jejich použití pro konvenční obrábění. Nicméně pro povrch vytvořený laserem s pulsy s délkou 10 ps se grafitická vrstva neobjevila.

Co v této studii není zmíněno, tak je složení použitého karbidu. Složení významně ovlivňuje jeho obrábělnost laserem, zejména co se týče obsahu kobaltového pojiva. Dále v článku také chybí informace o použité intenzitě, která ale pravděpodobně bude těsně nad ablačním prahem obou materiálů. To sice zaručí kvalitní povrch, avšak za menší produktivity.

Studie zaměřená na obrábělnost řezné keramiky je *Ablation characteristics of aluminum oxide and nitride ceramics during femtosecond laser micromachining* od autorů Kima a Sohna [57]. Laserem obráběným materiálem jsou často používané řezné keramiky, oxidická Al_2O_3 a neoxidická AlN . Použitým zařízením byl femtosekundový Ti:safírový laser ($\lambda=785$ nm, $\tau_p = 185$ fs). První studovanou vlastností obou keramik byl ablační práh pro 1, 5, 10 a 100 pulsů. Pro jeden puls a materiál Al_2O_3 byla hodnota ablačního prahu, $F_{th} = 5,62$ J/cm², pro AlN a stejný počet pulsů byla hodnota $F_{th} = 5,9$ J/cm². Z grafu na Obr. 31 je patrné, že s rostoucím počtem pulsů klesá i hodnota ablačního prahu. Tento jev je pojmenován jako inkubační efekt. Podle vzorce v rovnici (2) lze vypočítat ablační práh během tzv. kumulativní ablace ($F_{th, N}$ – počet pulsů do jednoho místa), tedy kdy je použito více pulsů.

$$F_{th, N} = F_{th, 1} N^{S-1} \quad (2)$$

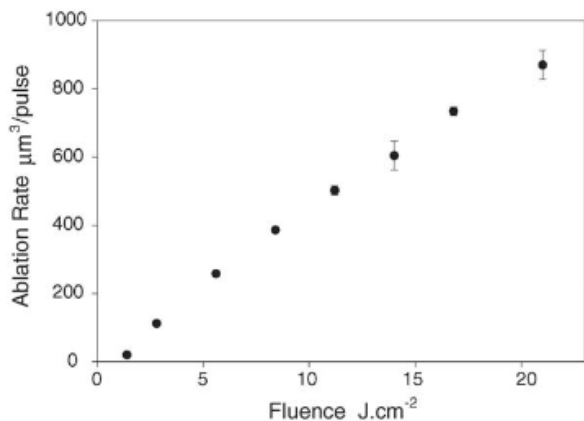


Obr. 31: Grafické závislosti průměru naměřeného laserem vytvořeného bodu v závislosti na hustotě energie pro Al_2O_3 a AlN při testování ablačního prahu a grafické závislosti míry ablace na intenzitě pro testované řezné keramiky [58]

Exponent S v rovnici (4) charakterizuje odpověď materiálu na kumulativní ablací. Pro hodnotu exponentu $S < 1$, existuje inkubační efekt, pro $S = 1$ je ablační práh nezávislý na počtu pulsů a pro hodnoty $S > 1$ je materiál zpevňován v průběhu kumulativní ablace.

Dalším experimentem bylo zjištění efektivity ablace pro různé hodnoty intenzity ablace (ablation rate [$\mu\text{m}/\text{pulse}$]). Obě nástrojové keramiky vykázaly stejný trend, a to pomalý nárůst při menších hodnotách intenzity a skokový nárůst při vyšších hodnotách, viz Obr. 31-vpravo. Závěrem této studie je zhodnocení, že při obrábění oxidické keramiky femtosekundovými pulsy dochází k intenzivnímu tepelnému zatížení, které vede k vysokým teplotám na povrchu a malému tavení. Naopak při obrábění nitridové keramiky bylo dominantním efektem tavení a následné tuhnutí.

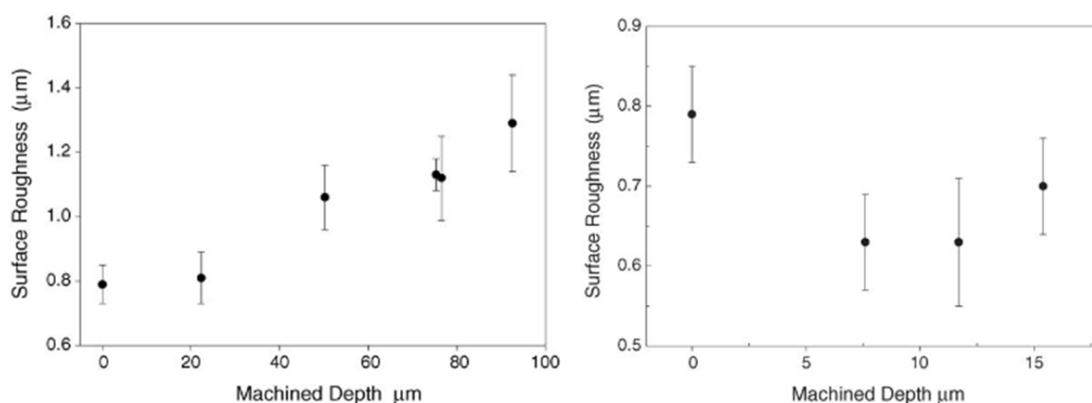
Pro porovnání s [57] byl vybrán článek od W. Perria a kol. s názvem *Femtosecond laser microstructuring of alumina ceramic* [58]. Obráběný materiál v této studii byla oxidická řezná keramika Al_2O_3 a použitým zařízením byl fs laser ($\lambda=775 \text{ nm}$, $\tau_p = 180 \text{ fs}$). Nejprve byla stanovena hodnota ablačního prahu. V této studii byla změřena a vypočtena $F_{\text{th}} = 1,1 \text{ J}/\text{cm}^2$, což je méně než ve studii [57] pro téměř totožné laserové zařízení.



Obr. 32: Graf závislosti míry ablace na intenzitě pro oxidickou keramiku [64]

Následně byla studována míra ablace pro rostoucí počet pulsů a intenzitu. Graf této závislosti je na Obr. 32. Graf má téměř lineární stoupající tendenci. Další téměř lineární trend byl naměřen v závislosti drsnosti povrchu na obrobené hloubce (Obr. 33). Tento experiment byl proveden intenzitou $F = 2,8 J/cm^2$

Zajímavou oblastí zájmu je i obrábění nástrojového materiálu PCD (polykrystalický diamant), zejména broušení hran a výroba různých geometrií popř. výroba samotných mikronástrojů z PCD.

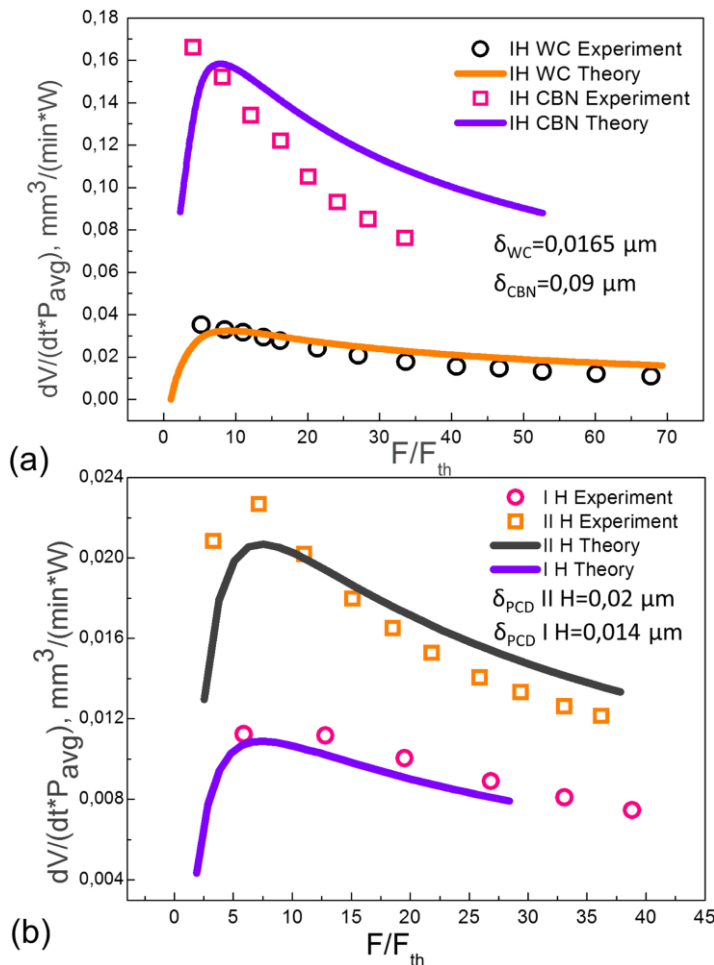


Obr. 33: Závislost drsnosti povrchu na odebrané hloubce [58]

V literatuře *Processing of ultra-hard materials with picosecond pulses: From research work to industrial applications* [55] od V. Stankeviče a A. Čermáka jsou pikosekundovým laserem obráběny nástrojové materiály. Konkrétně wolfram karbid, keramika, CERMET a polykrystalický diamant. Použitým zařízením je pevnolátkový ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) pikosekundový laser (12ps) s maximálním průměrným výstupním výkonem 80 W. V první části této studie jsou měřeny ablační prahy (F_{th}) vybraných materiálů. Pro každý materiál byl změřen ablační práh pro deset pulsů. Naměřené hodnoty jsou v Tab. 4.

Materiál	$F_{th} [J/cm^2]$
WC	0,13
CERMET	0,44
PCD	0,35
CBN	0,14

Tab. 4: Ablační prahy testovaných nástrojových materiálů [55]



Obr. 34: Graf efektivity ablace pro a) WC a CBN, b) PCD pro 1. a 2. harmonickou frekvenci [60]

odpařených částic materiálu.

Dále byl v článku studován vliv nastavení fokusační vzdálenosti na kvalitu povrchu a efektivitu procesu. Bylo zjištěno, že správně nastavená poloha ohniska má významný vliv na ablační odebraný objem materiálu a zároveň i ovlivňuje kvalitu povrchu. Kvalita povrchu byla dále zlepšena při použití ochrany tlakovým vzduchem, a to až trojnásobně.

Uvedená studie je z hlediska této práce velmi významná. Za prvé jsou zde informace o ablačním prahu slinutého karbidu. Tato hodnota je klíčová pro počáteční nastavení celého procesu, aby došlo k přesnému obrábění bez teplotního ovlivnění. Za druhé je velmi důležité stanovení optimálních hodnot intenzity energie pro efektivní ablači. Tyto hodnoty jsou opět klíčové k nastavení procesu tak, aby byl efektivní a zároveň využíval všechny výhody obrábění ultrakrátkými pulsy. Co je dále zajímavé v této studii, tak je to použití vzduchu jako ochranné atmosféry, zejména k vyfouknutí

2.5 Zvyšování efektivity mikroobrábění laserem

Velmi řešeným tématem jak výzkumnými skupinami tak průmyslovými výrobci, je efektivita ablace respektive produktivita procesu úběru materiálu v čase. Na základě literární rešerše bylo vytipováno několik přístupů, které mohou vést ke zvýšení efektivity odebírání materiálu. Z hlediska zvyšování efektivity ablace existuje několik přístupů, mezi které se řadí využívání vysokých opakovacích frekvencí spolu s vysokými rychlostmi skenování, použití burst-módu pro změnu generace pulsů nebo komplexní přístup laserového obrábění, který je hlavním tématem této práce. Mezi nalezenými způsoby jsou také různé hybridní přístupy kombinující konvenční technologie a laserové obrábění.

2.5.1 Metoda zvyšování opakovací frekvence

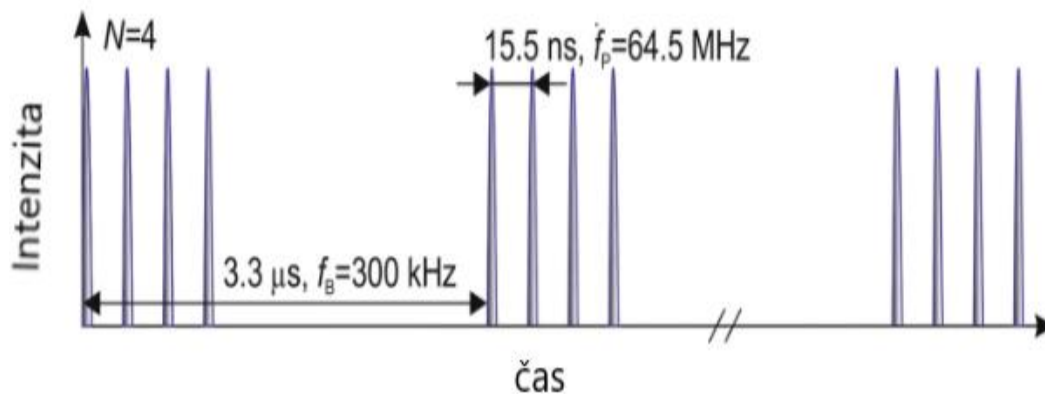
Použitelnost této metody je zejména pro lasery pracující s ultrakrátkými pulsy (ps, fs), jelikož pro delší pulsy dochází k větší tepelné akumulaci a větší rychlost skenování vede k většímu tavení a nárůstu drsnosti povrchu. K této tepelné akumulaci může dojít i pro krátké pulsy, nicméně tento jev není tak výrazný. Metoda zvyšování opakovací frekvence vychází ze snahy výrobců laserových zařízení zvyšovat

průměrný výkon laserů a zároveň i opakovací frekvenci pulsů. Při vysokém průměrném výkonu laseru je pak pro větší frekvence dostatečná energie jednotlivých pulsů, které vedou ke zvýšení efektivity ablace. Podstatou je také ideální zachování překryvů jednotlivých pulsů. Při překryvech přes 95 % dochází k akumulaci tepla v místě obrábění, snižování efektivity a zvyšování drsnosti povrchu. Ideální si proto jeví zachování překryvu pulsů do 90 % při dodržení ideální energie jednotlivých pulsů. [59]

2.5.2 Burst-mód

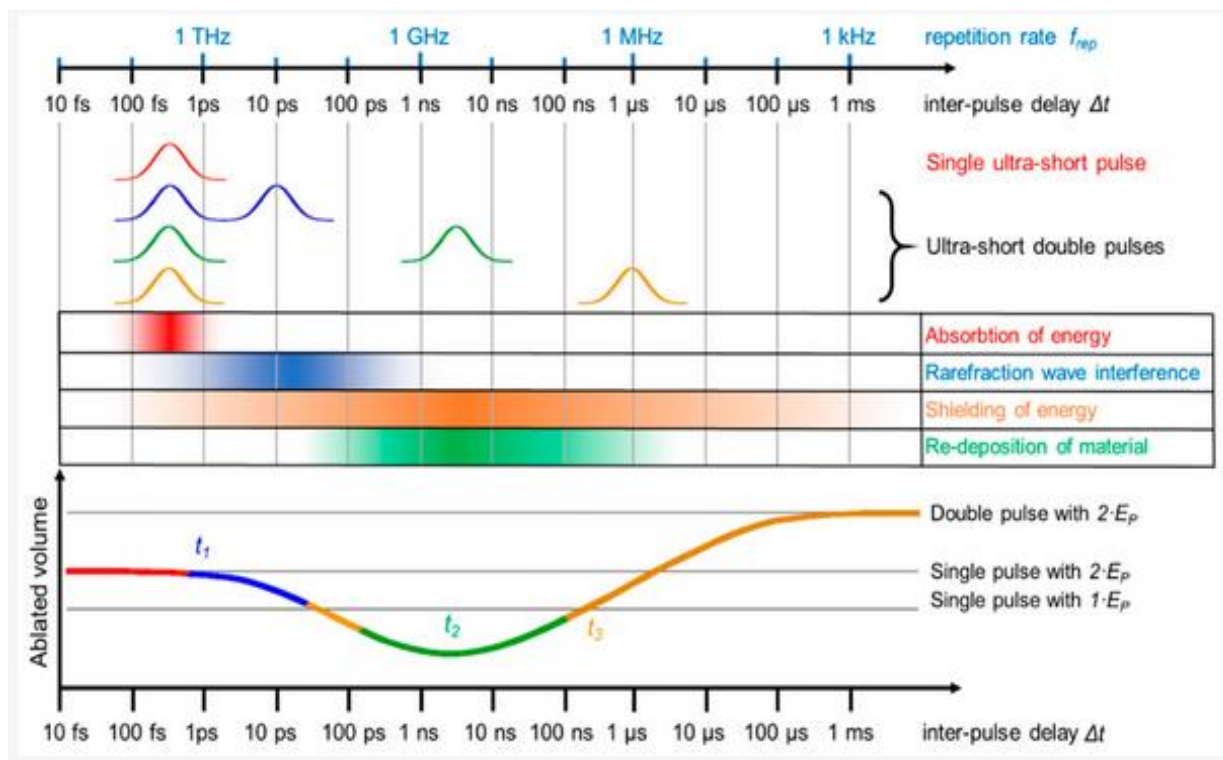
Burst mód je metoda generování laserových pulsů, která byla vyvinuta v posledních letech s cílem zvýšení efektivity úběru materiálu [60]. V běžných pulsních laserech je perioda mezi jednotlivými pulsy (T) dána převrácenou hodnotou opakovací frekvence (f). Při generování pulsů v tzv. burstech (výstřelech), neboli dávkách pulsů, je perioda pulsů v rámci jedné dávky kratší, než je perioda při klasickém způsobu generace. Každá dávka se poté skládá z minimálně dvou pulsů, existují ale i systémy schopné generovat desítky pulsů [61]. Jednotlivé pulsy se uvnitř dávky opakují s vnitřní opakovací frekvencí f_p (intra-burst repetition rate). Hodnota f_p je poté až o tři řády vyšší, než je opakovací frekvence jednotlivých burstů f_b (inter-burst repetition rate) viz Obr. 35. Energie v pulsu v rámci jednoho burstu $E_{p(N)}$ je pak dána poměrem celkové energie vzhledem k počtu pulsů v jednom burstu (N). Dochází tedy k poklesu energie použitelné pro ablaci materiálu. I přes tento limit je možné nastavení podmínek laserového mikroobrábění s využitím burst-módu efektivní. [62] [63] [64]

[41] [42] [43] [46] [50]



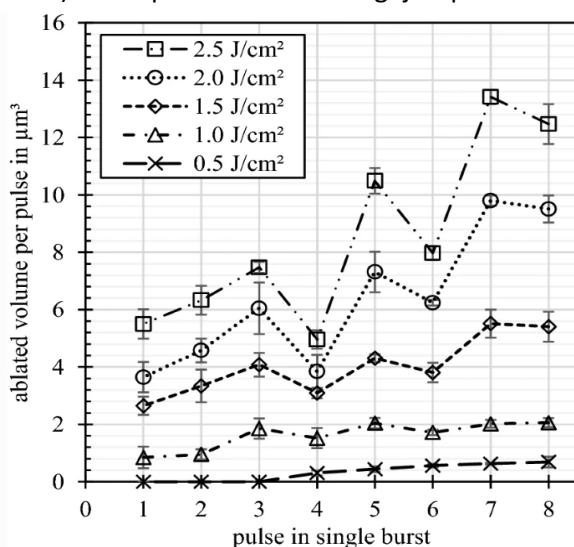
Obr. 35 Příklad burst módu obsahující čtyři pulsy v jednom burstu (upraveno) [64]

Princip ablace materiálu spočívá ve využití velmi vysoké opakovací frekvence pro ovlivnění ještě nezrelaxovaného materiálu po prvním z dávky pulsů. Aby tento efekt mohl nastat, je klíčové nastavení počtu pulsů a jejich frekvence v rámci jedné dávky. Pokud je použit režim generace s časovou prodlevou mezi pulsy v rozsahu do 1 ps ($f_p \approx \text{Thz}$) je objem ablovaného objemu jedním burstem roven objemu ablovaného jedním pulsem s dvojnásobnou energií v pulsu viz Obr. 36. Dominantním jevem je absorpce energie právě nezrelaxovaným materiálem. Doba relaxace u kovů, tj. doba která je nutná pro předání energie krystalickou mřížkou je přibližně 10 ps. [64] [65]



Obr. 36 Interakce materiálu s laserovým pulsem při použití jednoho pulsu a busty N=2 [65]

Při snižování $f_p \approx \text{MHz}$, se prodleva mezi pulsy prodlužuje a začne docházet k jiným fyzikálním jevům. Pokud je prodleva mezi pulsy v dávce v rozsahu od 10 ps do 100 ps dochází k interakci rázové vlny vytvořené prvním pulsem. Rázová vlna částečně odstíní druhý puls, což vede ke snížení energie druhého pulsu na hodnotu $1 \cdot E_p$ ale i menší, čímž i zpravidla klesá odebraný objem materiálu. Je-li prodleva mezi pulsy v dávce od 100 ps do 100 ns dochází k tzv. plazmatickému stínění (plazma shielding effect). První puls v dávce interaguje s povrchem materiálu, nastává ablace a vznik oblaku plazmy nad



Obr. 37: Graf znázorňující objem ablovaného slinutého karbidu wolframu na jeden burst při použití více pulsů v burstu [65]

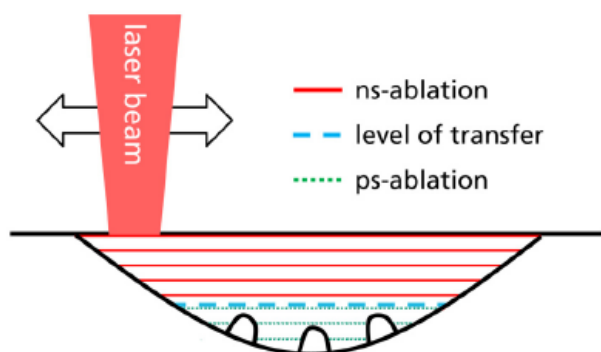
materiálem. Jelikož je časová prodleva mezi pulsy příliš krátká oblak plazmy se nestihne rozptýlit. Druhý puls v dávce proto interaguje pouze s oblakem plazmy a může tak být z části, nebo úplně pohlcen ještě nad obráběným materiálem. Dochází tedy k významnému snížení energie druhého pulsu, což také snižuje objem ablovaného materiálu. Pokud je prodleva mezi pulsy v dávce v rámci jednotek či desítek ns, je přidruženým jevem k plazmatickému stínění také redepozice materiálu. Vliv obou efektů se snižuje s rostoucím zpožděním mezi pulsy. Snižování těchto dvou jevů je způsobeno částečným nebo úplným rozplynutím oblaku plazmy nad materiálem. Při dalším prodlužování zpoždění pulsů je již způsob ovlivnění stejný jako u klasického způsobu generace pulsů. [64] [65] [66]

Intenzita ablace slinutého karbidu při použití pulsů s délkou 10 ps a prodlevou mezi jednotlivými pulsy 12 ns je znázorněn na Obr. 37. Odebraný objem konstantně narůstá s výchyly pro sudé a liché počty pulsů. V materiálu tedy nastávají stejné jevy jako výše popsané pro jiné materiály. Efekt burst-módu roste pro narůstající počet pulsů v dávce a také pro použitou intenzitu energie [66]. Kromě navýšení objemu ablovaného materiálu, může použití burst-módu ještě více snížit nežádoucí efekt akumulace tepla v místě interakce a zmenšit velikost tepelně ovlivněné oblasti.

2.5.3 Komplexní přístup laserového obrábění

Výzkumná skupina kolem A. Brennera. se zabývala problematikou hybridního laserového obrábění – komplexního přístupu, které kombinuje použití nanosekundového a ultrakrátkopulsního laseru v několika studiích. Tou první je studie z roku 2018 s názvem *Combination of short and ultrashort pulse laser processing for productive large scale structuring of 3D plastic mould steel* [67], kde hlavním cílem bylo produktivně strukturovat nástrojovou ocel pro výrobu forem pro vstřikování plastů. Pokračující studie od stejného autora má název *Combination of short and ultrashort pulse laser processing for productive large scale structuring of 3D plastic mould steel* [68].

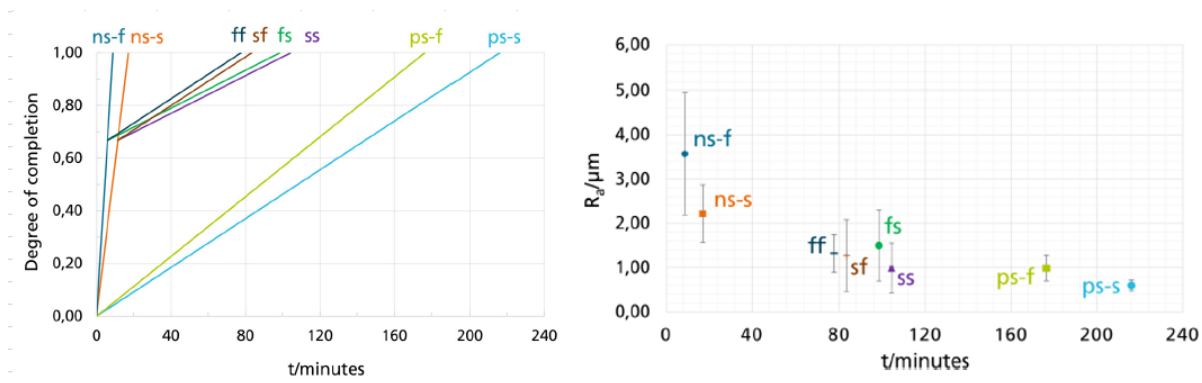
Hlavním cílem obou zmíněných studií bylo zvýšit efektivitu ablačního procesu při obrábění oceli, a to při využití kombinace krátkopulsních a ultrakrátkopulsních laserů. Použitými zařízeními byly nanosekundový laser od firmy IPG Photonics (1064 nm, 400 ns, 100 W) a pikosekundový Time-Bandwidth Duetto laser (1064 nm, 10 ps, 12 W). Použitou procesní optikou byl galvanometrický scanner intelliSCAN14 od firmy SCANLAB, který umožňuje velmi přesné a rychlé rozmítání paprsku.



Obr. 38: Schéma kombinovaného úběru nanosekundovým a pikosekundovým laserem [66]

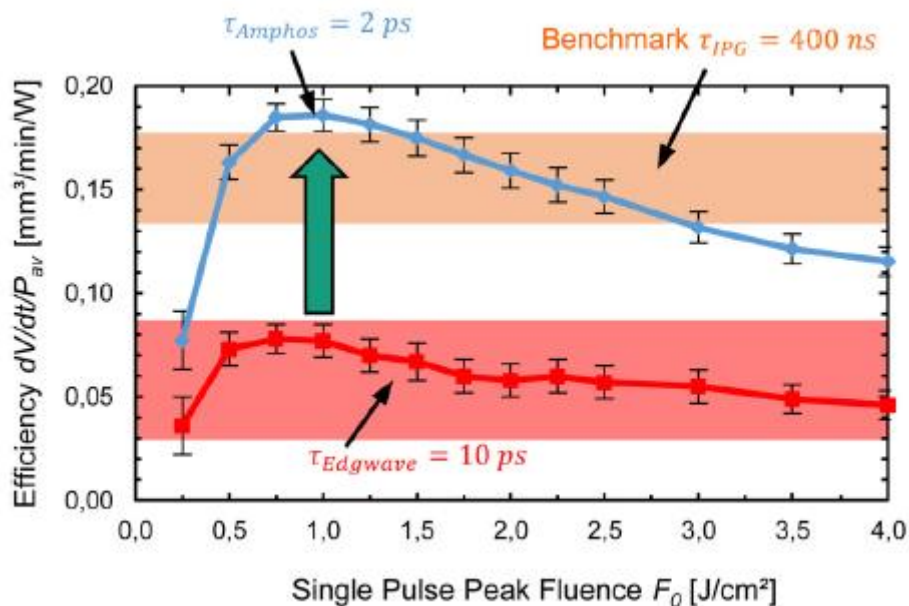
Zvolená strategie obrábění spočívala v největším úběru materiálu za použití nanosekundového laseru a dokončení povrchu pikosekundovým laserem. Schématická ukázka této strategie je na Obr. 38. Laserová ablace nanosekundovými pulsy je limitující zejména kvůli podstatě interakce paprsku s materiálem, která je založena na tavení materiálu. Tento proces vede k horší kvalitě povrchu. Naopak použití ps pulsů vede k produkci téměř hladkého povrchu. Nevýhodou je zde však dlouhý procesní čas.

Cílem této studie bylo zkombinovat výhody obou technologií a snažit se potlačit jejich nevýhody, s dosažením co nejvyšší produktivity a jakosti povrchu. Na Obr. 39 jsou grafy ukazující na experimentální testování výhod kombinace obou procesů, resp. v jaký čas je vhodné změnit nanosekundový laserový zdroj za pikosekundový. V grafech ns a ps popisují režim laseru (nanosekundové pulsy, pikosekundové pulsy) a další písmena označují, jestli je jedná o rychlý proces – f (fast) nebo pomalý proces – (slow). Z grafů je patrné, že pomalý proces vede k lepší kvalitě povrchu. Zároveň platí, že pikosekundový laserový proces vede k daleko lepší kvalitě povrchu než nanosekundový. Kombinací obou procesů je možné výrazně zkrátit procesní čas s dosažením požadované kvality. Nicméně tato studie se nezabývá tepelným ovlivněním oceli po procesu hrubování a dokončování.



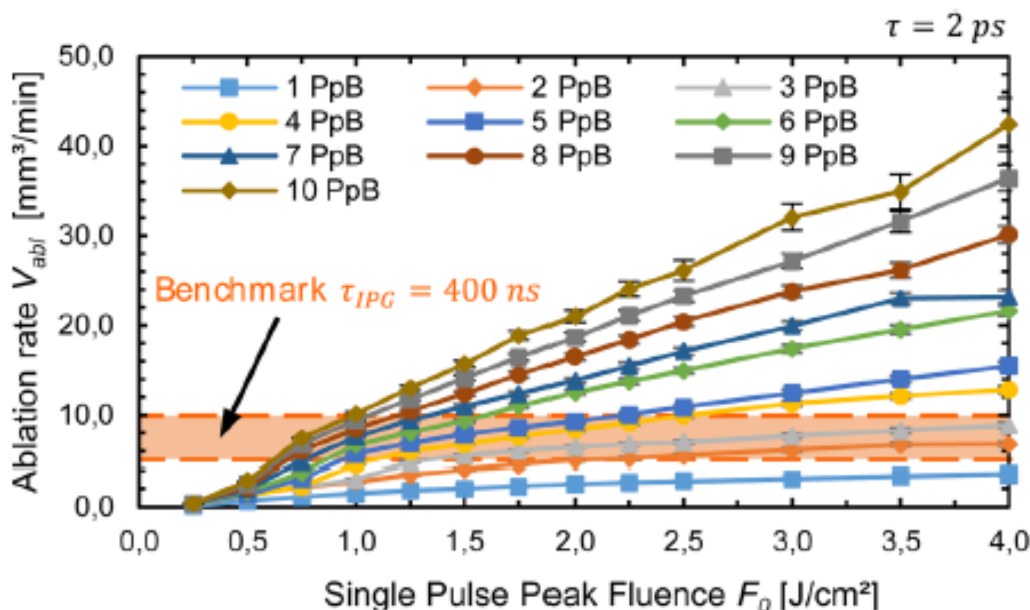
Obr. 39: Vlevo-Stupeň dokončení procesu v závislosti na procesním čase, vpravo - drsnost povrchu R_a v závislosti na procesním čase pro jednotlivé lasery a režimy [68]

Další studie od autora A. Brennera a kol., s názvem *Efficient production of design textures on large-format 3D mold tools* [69], navazuje na výsledky z [67]. Použitým laserovým zdrojem byl pikosekundový laser s označením AMPHOS (1030 nm, 2-20 ps, 400 W). Pro porovnání produktivity úběru materiálu byly do testu zahrnuty ještě nanosekundový laser IPG (stejný jak v [67]) a ps zdroj od EDGEWAVE (10 ps). Na Obr. 40 je porovnání produktivity úběru pro různé laserové zdroje, zejména pro jejich délky pulsu. Obrábění s délkou pulsu 2 ps, vedlo ke dvakrát větší produktivitě než obrábění 10 ps pulsy při stejné intenzitě a zároveň k velmi podobné produktivitě jako pro obrábění 400 ns pulsy.



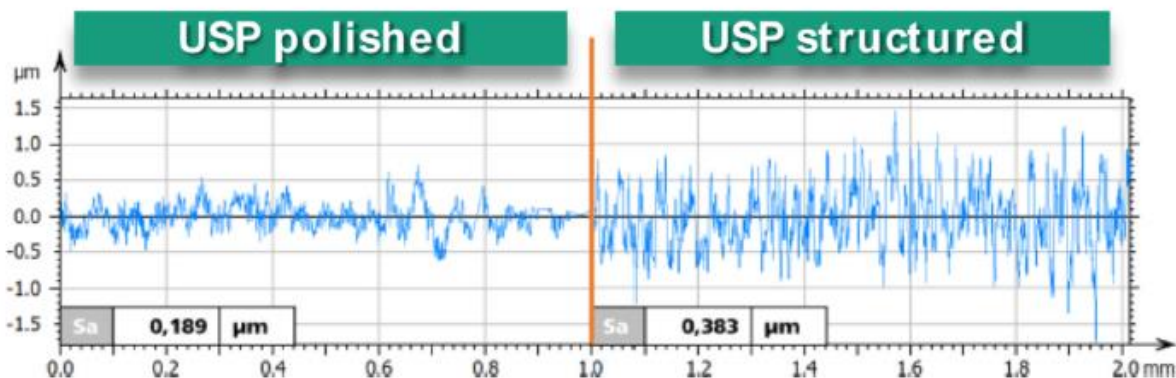
Obr. 40: Porovnání produktivity úběru materiálu pro různé laserové zdroje a jejich režimy [69]

Další graf demonstruje efektivní použití burst-módu oproti jednotlivým pulsům. Při použití jednotlivých pulsů se špičkovou intenzitou 1 J/cm^2 byla efektivita ablace 1,49 mm^3/min a při použití 10 PpB (10 pulsů pro jednu dávku) byla efektivita ablace 10,15 mm^3/min . Avšak s rostoucí intenzitou pro jeden puls byl rozdíl významnější např. při intenzitě 4 J/cm^2 v jednom pulsu byla dosažena efektivita ablace 3,57 mm^3/min tak pro 10 pulsů v burstu byla efektivita ablace 42,43 mm^3/min .



Obr. 41: Porovnání efektivy ablace pro jednotlivé pulsy a pro jejich spojení do tzv. burst módu [69]

Pro největší úběr materiálu v čase nebyla vytvořena nejlepší drsnost povrchu ($Sa \geq 0,5$), a proto byl povrch po ablací laserem vyčištěn. K tomu byl opět použit burst mód laseru, který díky vysoké opakovací frekvenci pulsů vedl k natavení vrcholků nerovností a jejich vyhlazení. Porovnání drsnosti povrchu před a po laserovém leštění je na Obr. 42.



Obr. 42: Porovnání drsnosti povrchu po (vlevo) a před (vpravo) laserovém leštění ultrakrátkými pulsy (USP) [69]

2.5.4 Hybridní přístup laserového obrábění a broušení

Výzkum od Brechera et. Al. [70] s názvem *Laser roughing of PCD* prezentuje hybridní metodu obrábění diamantových nástrojů, a to kombinací laserové ablace a broušení. Motivací pro tento výzkum byla potřeba rychle a efektivně připravovat břity z PKD, na které je kladen vysoký požadavek na kvalitu řezné hrany. Proces výroby nástrojů z PKD spočívá ve výrobě disků slinování jednotlivých zrn diamantu s pojivem ve formě kobaltové matrice. Následuje proces dělení disků na malé segmenty (EDM nebo laser), které jsou následně připájeny na nástrojový držák, nejčastěji z wolfram-karbidu. Posledním krokem je broušení řezné hrany pro dosažení požadované kvality. Právě poslední krok je velmi zdoluhavý, málo efektivní a finančně náročný. Proto výzkumníci okolo Ch. Brechera přišli s technikou, která kombinuje laserovou ablací a broušením, jako dokončení. Ve studii byl použit

nanosekundový laser, který byl použit pro odstranění přídavků při vyřezávání segmentu z PKD disku. Zároveň byl však ponechán přídavek pro broušení. Nevýhoda použití nanosekundového laseru spočívá v teplotně ovlivněné oblasti a horší kvalitě povrchu, a právě proto bylo třeba břit dokončit broušením. Laserem odebraná vrstva byla 170 μm a pro broušení zbyla tloušťka 20 μm . Výsledné ušetření pracovního času bylo kolem 50 %.

2.6 Shrnutí současného stavu 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 nebo naopak makroentitty jako jsou utvařeče třísek pro změnu jeho funkčních vlastností, zejména zlepšení tvorby a odchodu třísky z místa řezu. Utvařeče třísek vytvořené laserem mohou být prototypem před sériovou výrobou nebo se může jednat o unikátní nástroje.

Úprava makrogeometrie řezných nástrojů laserem je již částečně v literatuře popsána, a i v průmyslu se tímto tématem několik firem zabývá. 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. 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 lépe absorbovatelná nástrojovými materiály než např. základní vlnová délka 1030 nm. I přes to se ale některé studie zabývají použitím jiných vlnových délek se zajímavými výsledky. 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. Obrábění nanosekundovým laserem je velmi produktivní, cena zařízení je nižší, vede ale k teplotně ovlivněné oblasti (TOO) a k horší kvalitě povrchu. Vedle toho obrábění femtosekundovými a pikosekundovými lasery je méně produktivní s dobrou výslednou kvalitou povrchu. Možným zefektivněním celého ablačního procesu může být zvýšení opakovací frekvence, použití více svazků nebo hybridní přístup tzv. komplexní laserové mikroobrábění, které kombinuje nanosekundovou a pikosekundovou (popř. femtosekundovou) laserovou ablaci, kde může vhodně kombinovat rychlý úběr materiálu v procesu hrubování a velmi precizní odebrání posledních vrstev v procesu dokončení. 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.

3 Cíle disertační práce

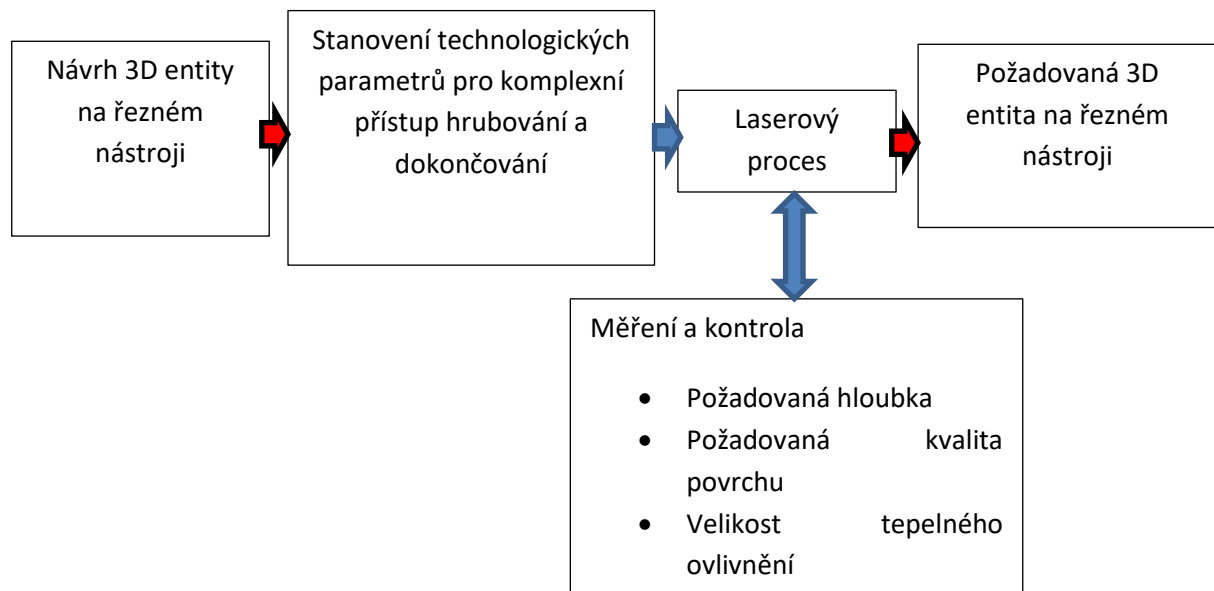
Cílem disertační práce je vytvoření a následně ověření metodiky laserového obrábění slinutého karbidu pro vyšší produktivitu procesu při zachování požadované kvality povrchu a řezivosti nástroje. Klíčovým aspektem řešení je návrh a ověření inovativního přístupu k mikroobrábění slinutého karbidu laserem,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

Díličními 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.

4 Návrh a zpracování metodiky efektivního laserového mikroobrábění

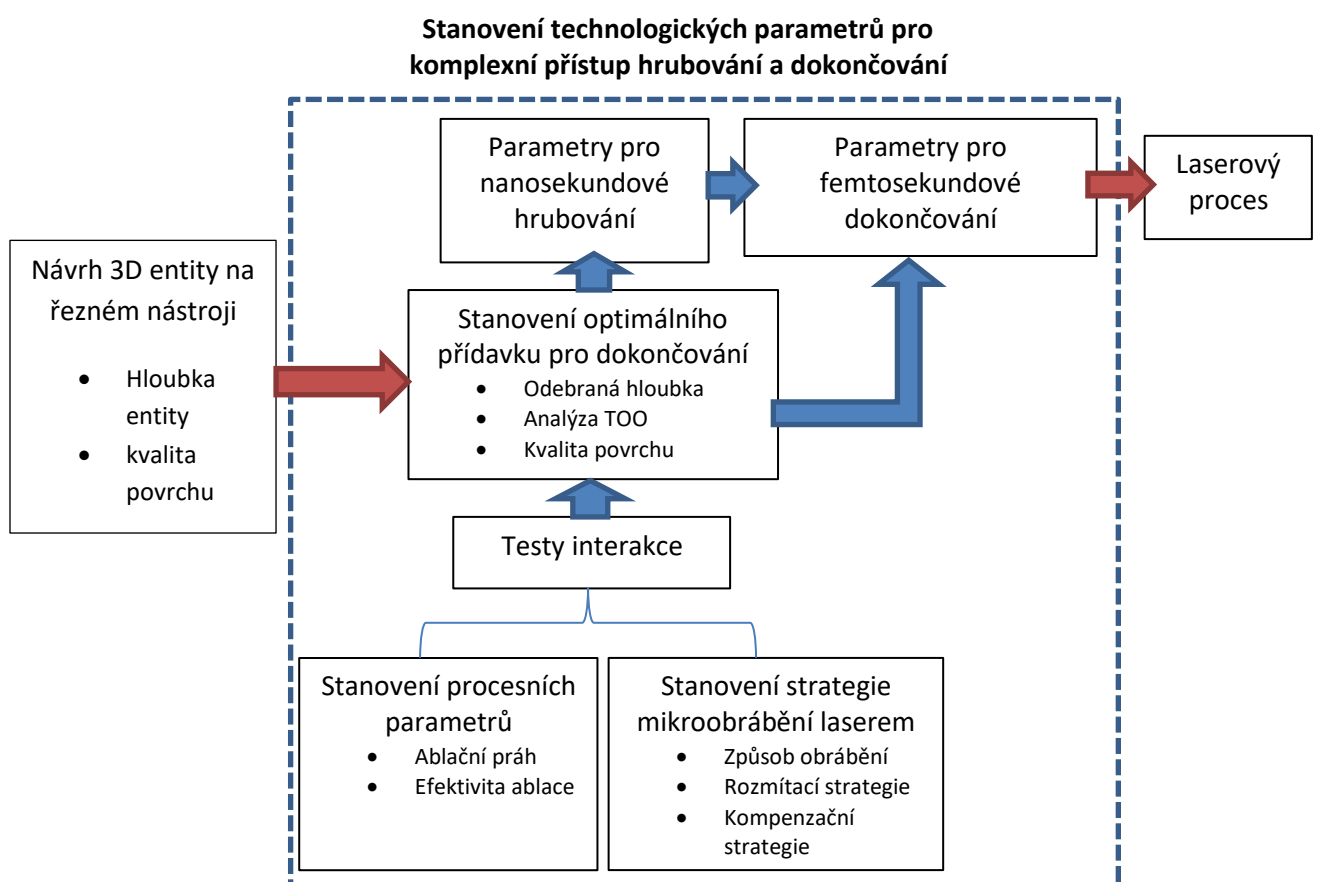
Pro zvýšení efektivity ablace nástrojových materiálů byla navržena nová metodika zpracování, která je založena na použití dvou laserových zařízení – nanosekundového pro hrubovací proces, a femtosekundového pro dokončovací operaci. Zpracování řezných nástrojů laserem pro vytvoření určité 3D entity, např. utvařeče třísek lze popsat podle následujícího schématu - Obr. 43. 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. 43: Schematické znázornění navržené metodiky efektivního mikroobrábění nástrojových materiálů laserem

4.1 Komplexní přístup

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. 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 přídávku 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 přídávku 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. 44.



Obr. 44: Schematicky znázorněný postup pro stanovení technologických parametrů komplexního přístupu včetně požadovaného vstupu a výstupu

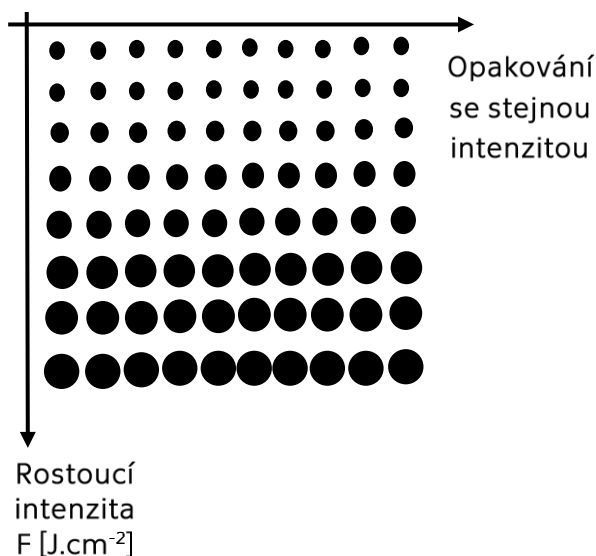
4.2 Metody pro určení optimálních procesních parametrů laserového mikroobrábění

Mezi metody vedoucí k určení optimálních procesních parametrů laserového mikroobrábění, zejména pro dokončování, patří výběr vhodné vlnové délky a stanovení ablačního prahu materiálu. Následně jsou s využitím této hodnoty určeny parametry vedoucí k efektivní ablací materiálu. U hrubování nanosekundovým laserem je klíčové nalezení optimálního průběhu pulsu (tzv. waveformy) a jeho energie.

4.2.1 Stanovení ablačního prahu

Ablační práh (tzv. *Ablation threshold*) je minimální množství energie, při kterém začne být z povrchu odstraňován materiál. Je to tedy energie, kterou se odstraní alespoň jeden atom materiálu. Tato prahová intenzita energie F_{th} , musí být dostatečně velká, aby překonala vazebné síly mezi atomy v mřížce a došlo k procesu ablaci [71]. Jelikož z definice vyplývá, že je podstatou interakce proces ablaci, tj. okamžité vypařování bez fáze taveniny, je nalezení ablačního prahu smysluplné zejména pro lasery pracující s ultrakrátkými pulsy. V případě této práce se jedná pouze o femtosekundový laser. Práh ablaci startuje ablací materiálu a je jedním z klíčových parametrů pro porozumění fyzikálních mechanismů interakce laserového záření s materiálem. Hodnota začátku ablaci závisí na materiálu, délce pulsu a vlnové délce použitého zařízení. Určení prahové hodnoty je dobré pro první nastavení procesu, a navození takových procesních parametrů, které povedou k ablací materiálu energií blízkou její minimální potřebné hodnotě. Tyto procesní parametry povedou k úběru materiálu s minimálním možným ovlivněním okolí po procesu ablaci. Porozumění ablačnímu prahu je dobré pro pochopení reakce mezi materiálem a dopadajícím laserovým zářením. V běžné praxi se však neobrábí nad ablačním prahem z důvodu malého úběru, a proto se používají hodnoty několikanásobně vyšší vedoucí k rychlejšímu obrábění s tím, že tyto podmínky nemusí vést ke špatné kvalitě povrchu [71] [72] [73] [74].

Výpočet z naměřených dat



Obr. 45: Schématická podoba testovací matice pro stanovení ablačního prahu materiálu

Ke stanovení ablačního prahu se často přistupuje experimentálně. Nejčastěji používaný způsob je založen na měření postupně zvětšujícího se průměru svazku se vzrůstající energií v pulsu. Pro ověření hodnoty průměru bodu se vytváří řada bodů se stejným výkonem. Výsledkem je matice bodů, kde na ose x je opakování se stejným výkonem a na ose y je postupně rostoucí výkon, který se dle rovnice (4) a (5) přepočítá na intenzitu. Následně se změří průměr ablovaných bodů, který je s rostoucí intenzitou rostoucí. Hodnoty nastavovaného výkonu se přepočítají dle reálného výkonu pro danou frekvenci. Dopočte se energie v pulsu. Následně se

provede lineární regrese bodů z grafické závislosti průměru bodů a logaritmu energie v pulsu [71] [72] [73] [74].

Minimální intenzita energie se pak dopočte dle následujících vzorců:

$$F(r) = F_0 e^{\frac{2r^2}{\omega_0^2}} \quad (3)$$

Kde:

ω_0 – poloměr svazku v ohnisku [mm]

F_0 – špičková plošná intenzita energie [J/cm²]

F_0^{th} - prahová hodnota špičkové plošné hustoty energie pro ablaci

Špičková plošná intenzita energie se vypočte podle:

$$F_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2} \quad (4)$$

Kde:

E_p – energie v pulsu [J]

$$E_p = \frac{P_{avg}}{f} \quad (5)$$

Kde:

P_{avg} – průměrný výkon [W]

f – opakovací frekvence [Hz]

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{F_0}{F_0^{th}}\right) \quad (6)$$

Kde:

D – průměr ablovaného bodu [mm]

Na základě měření průměru svazku pro různé hustoty energie je vynesena grafická závislost D^2 a $\ln(E_p)$ s následnou lineární regresí podle rovnice (6). Pro snižující se hodnotu hustoty energie (J/cm²) se zmenšuje průměr svazku se schopností ablace a ablační práh se posouvá více k vrcholu Gaussovského rozložení hustoty energie. [75] [72] [73] [74] [71] [76]

4.2.2 Efektivita ablace

Pro stanovení největší efektivity ablace je třeba najít takové parametry laserového procesu, aby došlo k největšímu úběru materiálu v čase na jednotku výkonu. [76] Ke zjištění této hodnoty se přistupuje

jak výpočtem, tak experimentálně. Podle literatury [53], je velikost optimální intenzity F_{opt} pro maximální produktivitu vyjádřena podle:

$$F_{opt} = \frac{e^2}{2} F_{th}, \quad (7)$$

kde F_{th} je prahová hodnota intenzity. Výsledná funkce reprezentující maximální efektivitu procesu ablace pro různé hodnoty průměrného výkonu je vyjádřena rovnicí:

$$\frac{\dot{V}}{P_{av}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\delta}{F_{th}} \cdot \ln^2\left(2 \cdot \frac{F}{F_{th}}\right) \quad (8)$$

kde V je objem odebraného materiálu podělený časem (produktivita úběru), δ je penetrační hloubka a P_{av} je průměrný výkon. Pro nalezení maximální efektivity lze použít zjednodušenou rovnici:

$$\frac{\dot{V}_{max}}{P_{av_{max}}} = \frac{2}{e^2} \frac{\delta}{F_{th}} \quad (9)$$

Pro definování podmínek optimálního laserového mikroobrábění jsou v práci použity parametry intenzita ablace (ΔV) a efektivita ablace (V_{abl}). Tyto parametry lze definovat dle následujících rovnic.

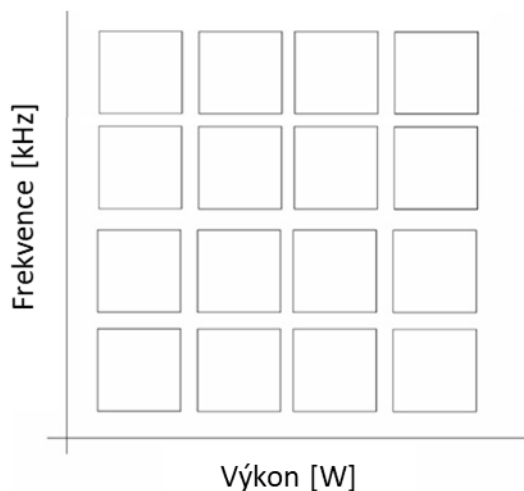
$$\Delta V = \frac{V}{t} \text{ [mm}^3/\text{min]} \quad (10)$$

$$V_{abl} = \frac{I_{abl}}{P_{avg}} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} / W \right] \quad (11)$$

Dle definice obou proměnných je patrné, že parametr intenzity ablace je vhodnější použít pro popsání hrubovacího procesu, kde je cílem zejména maximalizovat úběr materiálu v čase, a naopak parametr efektivity ablace pro dokončovací operaci. U obou procesů je zároveň nutné sledovat kvalitu povrchu. V této práci jsou použity parametry plošné drsnosti povrchu – S_a (průměrná výška vybrané plochy) a parametr S_z (maximální výška vybrané plochy). Oba parametry jsou alternativou k parametrům čárové drsnosti R_a a R_z , nicméně díky využití optické analýzy povrchu je možné měřit plošné parametry drsnosti povrchu, které dávají konkrétnější informaci o podobě povrchu.

Výpočet z naměřených dat

Pro stanovení efektivity ablace, byl navržen experiment, který je založen na vytvoření polí procesem laserového mikroobrábění a jejich následné analýzy. Pro definované parametry laserového paprsku



Obr. 46: Podoba testovací matice složené ze čtvercových polí pro experimentální stanovení nejvyšší efektivity ablace

(výkon, frekvence) se vytvoří čtvercová pole o určité velikosti s definovaným počtem odebíraných vrstev a s daným překryvem pulsů. Příkladem, jak takové testování může vypadat, je komplexní matice na Obr. 46, kde jsou na ose x měněny hodnoty výkonu a na ose y měněny hodnoty frekvence.

Po následném změření odebrané hloubky a dopočtení odpovídajícího odebraného objemu mikroobrobených čtvercových polí lze podle rovnice (10) stanovit intenzitu ablace [mm^3/min] a dle rovnice (11) efektivitu ablace [$\text{mm}^3/\text{min}/\text{W}$] pro použitou intenzitu laserového paprsku nebo podílu intenzity vůči prahové hodnotě.

Ablační charakteristika bývá následně vynesena v závislosti efektivity ablace [$\text{mm}^3/\text{min}/\text{W}$] na poměru

intenzity energie vůči prahové hodnotě pro daný materiál [F/F_{th}].

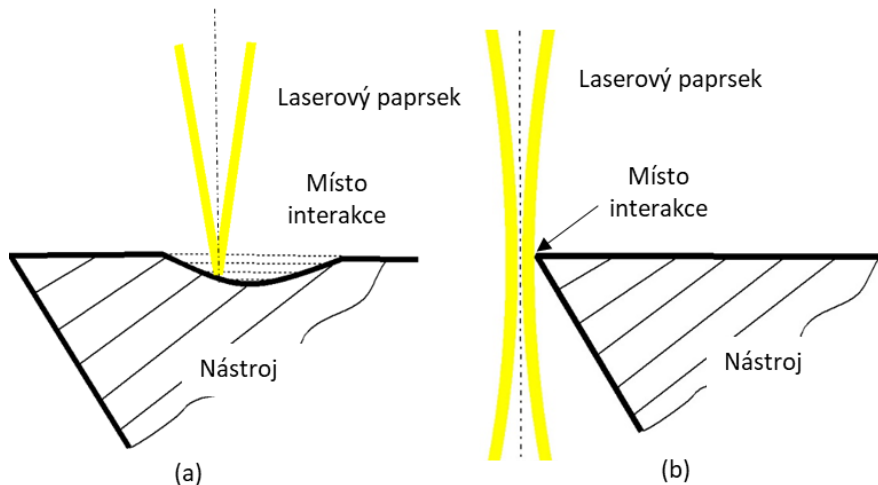
4.3 Metody pro stanovení strategie laserového obrábění

V technologiích laserového mikroobrábění se s výhodou využívají laserové systémy se skenovacími hlavami (galvoskenery) viz kapitola 2.2.4. Výhodou skenovacích hlav je dosažení vysokých posuvových rychlostí laserového paprsku v pracovní rovině, v běžných systémech až 10 m/s. Tato výhoda může být i zároveň nevýhodou, a to zejména díky velké dynamice skenovacích zrcátek, jejich zrychlování a zpomalování, které může způsobovat nežádoucí ovlivnění obráběného materiálu. Tyto aspekty je důležité vhodně kompenzovat, a to například s využitím pokročilých funkcí laserových systémů. Pro vytváření 3D entit na nástrojích je potřeba zvolit vhodný způsob mikroobrábění, typ šrafování a překrytí pulsů. [77]

4.3.1 Radiální a tangenciální způsob laserového mikroobrábění

Technologie laserového mikroobrábění se ve své podobě příliš neliší od technologií konvenčního třískového obrábění, zejména frézování. Obdobou frézování čelem nástroje je radiální způsob laserového mikroobrábění a obdobou frézování bokem nástroje je tangenciální způsob obrábění paprskem laseru. Existuje i obecný způsob laserového mikroobrábění, který kombinuje oba zmíněné způsoby. Při radiálním obrábění (Obr. 47 – a) je laserový paprsek kolmý na obráběný povrch a k obrábění dochází v místě přímé interakce s materiálem. Touto technikou je možné vytvářet zejména tvarové entity do nástrojů, např. utvařeče třísek. Tuto techniku lze také označit jako 2,5D laserové obrábění. Jedná se o způsob obrábění, kdy se vytvoří požadovaný tvar ve 2D, tedy v rovině XY a následně se laserový paprsek posune do jiné roviny posuvem v ose Z. Na rozdíl od frézování, kde je úběr v ose Z daný posuvem stroje, u laserového mikroobrábění je úběr v ose Z dán celkovou interakcí paprsku laseru s obráběným materiálem.

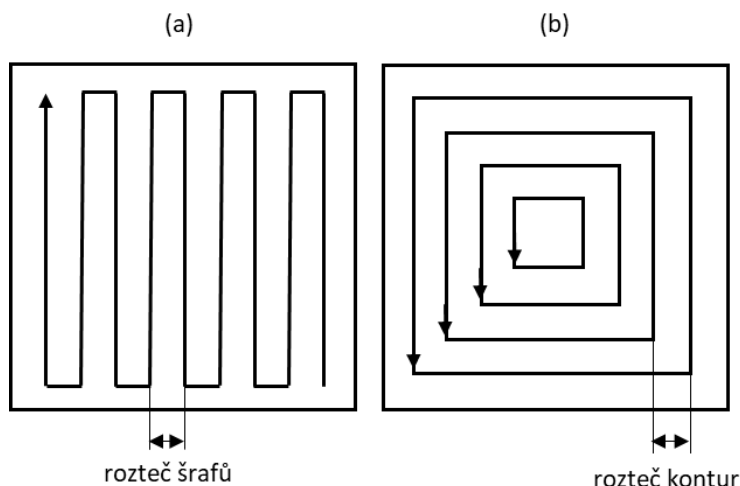
Druhým způsobem je tangenciální obrábění (Obr. 47 – b), kdy dochází k interakci mezi nástrojem a bokem laserového paprsku v místě jeho fokusu. Laserový paprsek je kolmý na obráběný materiál nebo je mírně odkloněný, tak aby byl kompenzován jeho Gaussovský průběh. Tento způsob je vhodný k úpravě např. řezné hrany nástrojů. Tato technika je velmi přesná a je možné s ní vytvořit velmi jakostní řeznou hranu s kvalitou povrchu srovnatelnou po broušení [50]. Posledním možným způsobem laserového mikroobrábění je obecný způsob. Při této technice je způsob obrábění podobný radiálnímu, s tím rozdílem, že úhel mezi paprskem laseru a nástrojem je jiný než 90° [78], [79], [80].



Obr. 47: Schéma laserového mikroobrábění používaného pro úpravu geometrie řezných nástrojů-, (a) radiální obrábění, (b) tangenciální obrábění – inspirováno [78], [79], [50]

4.3.2 Šrafovaní

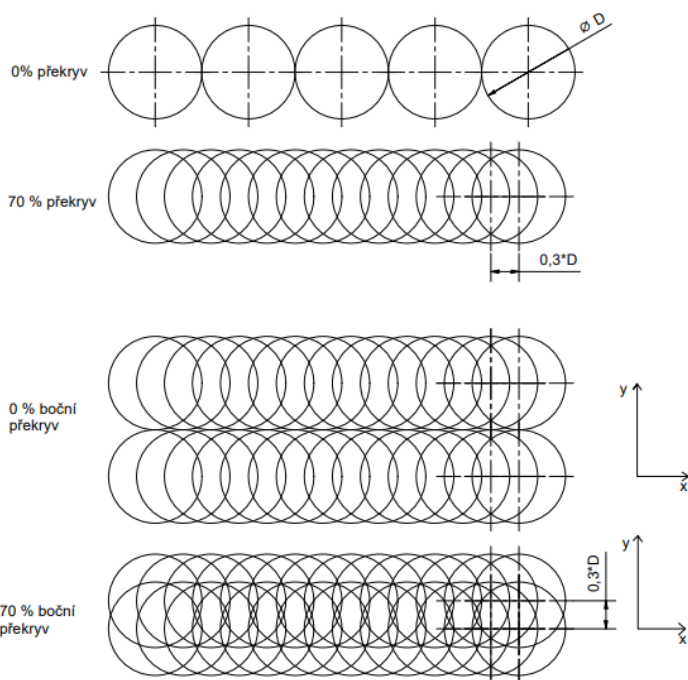
Při vytváření tvarových entit do nástrojových materiálů, se při radiálním, popř. tangenciálním obrábění používá šrafovaní. Strategie šrafovaní se navrhuje tak, aby byla dosažena požadovaná hloubka a kvalita povrchu. Při vytváření tvarových entit se nejčastěji využívají dva typy šrafovaní, konturové a liniové (Obr. 48). Dold [81] ve své práci prezentuje i další typy šrafovaní, jakou jsou Archimédova spirála nebo Hilbertova křivka. Konturové šrafovaní je založeno na opakování tvaru kontury vytvářené entity. Liniové šrafovaní je založeno na vyplnění požadovaného tvaru liniemi v definované rozteči



Obr. 48: Schematické znázornění (a) liniového a (b) konturového šrafování – inspirováno [81]

4.3.3 Překryv

Každá ze šrafovacích strategií se skládá z linií, které jsou tvořeny jednotlivými pulsy v definovaném překryvu. V literatuře [82] je překryv ve směru pohybu laserového paprsku označen jako PD – pulse



Obr. 49: Schéma překryvů jednotlivých laserových pulsů [83]

distance, tedy vzdálenost pulsů. Druhým parametrem je zde TD – track distance, tedy rozteč šraf. Rozteč šraf je také často označována jako H_y (boční překryv) a může být udána jako číselná hodnota nebo procentuální překrytí pulsů v jednotlivých liniích. Schematické znázornění překryvu pulsů v obou směrech je na Obr. 49. [83] Hodnota rozteče šraf se nastavuje v řídicím systému stroje. V této práci bude překryv pulsů ve směru pohybu laserového paprsku označen jako podélný překryv (S_x) a je funkcí skenovací rychlosti (v), frekvence (f) a průměru laserového spotu ($D = 2\omega_0$), podle [50]:

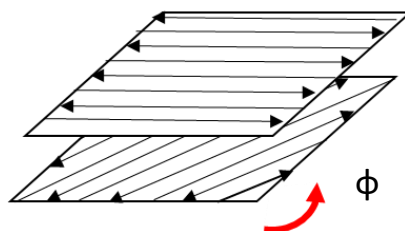
$$S_x = \left(1 - \frac{v}{Df}\right) \tag{12}$$

Tento způsob označení a výpočtu překryvů bude použit i v této disertační práci.

4.3.4 Natočení šraf

Při vytváření 3D entit, kdy je potřeba odstranit více vrstev materiálu je vhodné jednotlivé šrafy natočit o definovaný úhel (ϕ) dle Obr. 50. Vlivem nastavení šrafování se zabývala i studie od Ch. Daniela et. al.

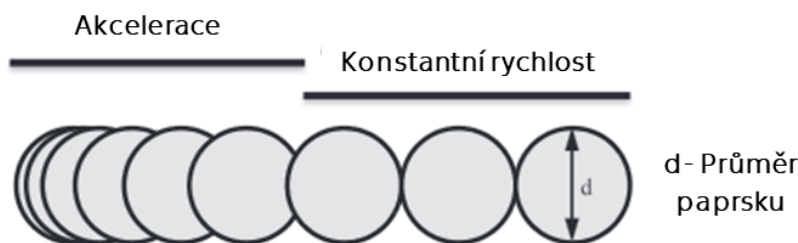
[84], které uvádí, že správné nastavení úhlu natočení šrafování má významný vliv na kvalitu obrobeného povrchu.



Obr. 50: Schématické znázornění natáčení šrafování o daný úhel v jednotlivých ablovaných vrstvách – inspirováno [84]

4.3.5 Kompenzační strategie rozmítání

Způsob rozmítání laserového paprsku po povrchu vzorku s využitím galvoskenneru má i nevýhody. Problém nastává v místech začátku a konce skenované linky. V první řadě je potřeba synchronizovat zpoždění zrcátek skeneru, tak aby se začala pohybovat právě v momentě, kdy laserový paprsek dorazí ze zdroje optickou cestou do skenovací hlavy. Toto zpoždění se běžně pohybuje v desítkách až stovkách



Obr. 51: Laserové pulsy při akceleraci paprsku

milisekund a v laserových systémech je označováno jako laser on a laser off delay (zpoždění zapnutí a vypnutí laseru), jump, poly (zpoždění při otáčení paprsku při vytváření křivek). Na Obr. 52 je ukázka nastavení těchto zpoždění v řídicím SW DMC

(Direct Machining Control) se skenovací hlavou od firmy ScanLab. I tak ale může dojít na začátku a na konci skenované linky k vypálení více pulsů do jednoho místa. To může vést k větší odebrané hloubce, než je požadováno.

- Delays		Jednou z možností, jak se tomuto jevu vyhnout je použití generování pulsů na základě polohy. V řídicím systému se nastaví rozteč pulsů a SW pak na základě toho vypíná a zapíná laser (Obr.
<input checked="" type="checkbox"/> Use Custom Delays		
<input checked="" type="checkbox"/> Laser On (μs)	100	
<input checked="" type="checkbox"/> Laser Off (μs)	200	
<input checked="" type="checkbox"/> Jump (μs)	250	
<input checked="" type="checkbox"/> Mark (μs)	500	
<input type="checkbox"/> Polygon (μs)	0	
		- Laser triggering
		Laser Triggering Mode
		Position Based (Pulse Pitch)
		Pulse Pitch (mm)
		0.04

Obr. 52: Nastavení zpoždění scanneru v SW DMC

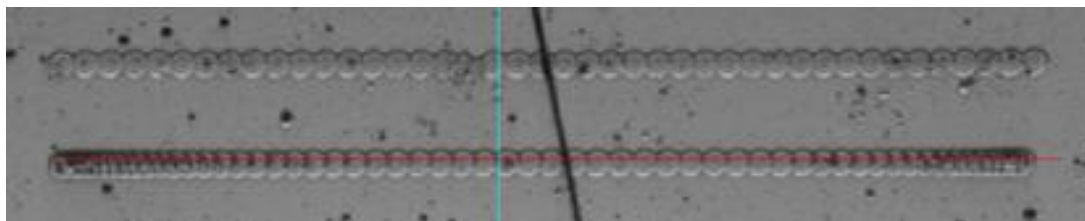
53). Tato aplikace funguje pouze pro laserové zdroje, které umožňují generovat určitý počet pulsů, se skenovací hlavou a mechanickými osami. Celý proces je ale velmi pomalý, a proto se používají kompenzační strategie přímo od výrobců skenovacích hlav. Tou nejznámější je technologie *skywriting*. Tato

- Speed	
Jump Speed X (mm/s)	10
Jump Speed Y (mm/s)	1
Jump Speed Z (mm/s)	1
Mark Speed (mm/s)	15

Constant Velocity Between Segments

Obr. 53: Nastavení generování pulsů na základě polohy v SW DMC

funkce používá dopředné řízení k tomu, aby kompenzovala začátek např. vytvářené linie tak, aby bylo zrychlení skeneru ještě před tím, než dorazí první puls z laserového zdroje. V momentě skutečného začátku vytvářené linie jsou zrcátka již v plném pohybu a překrytí pulsů je tak konstantní. Při nastavení vhodného zpoždění je možné vytvořit linku tak, že každý z pulsů má definovanou rozteč danou podle skenovací rychlosti a opakovací frekvence bez viditelného zrychlování a zpomalování laserového paprsku, které může způsobit nežádoucí prohlubně v mikroobráběném materiálu (Obr. 54).



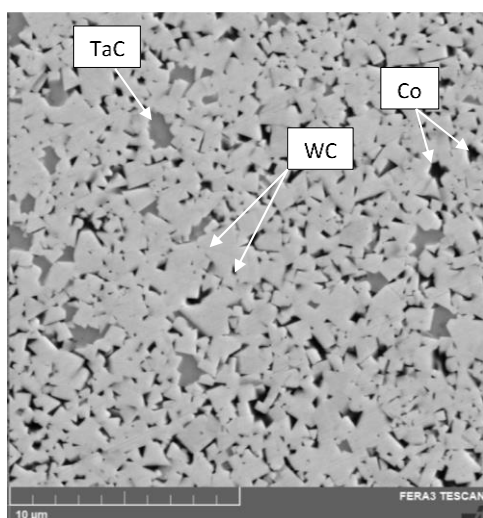
Obr. 54: Srovnání výroby linky s funkcí skywriting (nahore) a s běžným nastavením (dole)

5 Testy interakce laseru s materiálem

Dle navržených metod pro stanovení podmínek interakce laseru s materiálem a dle literární rešerše bylo navrženo několik experimentů pro její popsání na použitých zařízeních. Cílem těchto dílčích experimentů bylo stanovení optimálních procesních parametrů a strategií pro laserové mikroobrábění s maximální produktivitou procesu. Experimenty byly provedeny pro oba uvažované laserové systémy jak s nanosekundovou délkou pulsu, tak s femtosekundovými pulsy.

5.1 Volba řezného materiálu

Vzhledem k rozsáhlosti řezných materiálů byl vybrán ten, který je na trhu nejpoužívanější a navržená metodika na něm může být dobře demonstrována. Z tohoto důvodu byl testovaným řezným materiálem vybrán nepovlakovaný slinutý karbid typu K. Pro testy interakce byly využity čtvercové vyměnitelné břitové destičky geometrie SNMN s délkou hrany 12,7 mm a poloměrem řezné hrany 0,8



Obr. 55: SEM analýza příčného řezu slinutým karbidem s označením TH10 s vyznačením jednotlivých obsažených chemických prvků (provedeno na zařízení Tescan na Hilase AV ČR)

mm. Tento typ geometrie byl zvolen zejména z důvodu velké plochy, která mohla být laserem při testech ovlivněna. Označení nástrojového materiálu je dle výrobce (Tungaloy Corporation) TH10. Prvkové složení materiálu je uvedeno v Tab. 5. Kromě tvrdé matrice karbidu wolframu (WC) a pojivového kobaltu (Co) jsou v materiálu obsaženy i další karbidy (TaC, NbC).

Chemický prvek/sloučenina	Procentuální zastoupení [%]
WC	92
TaC, NbC	2
Co	6

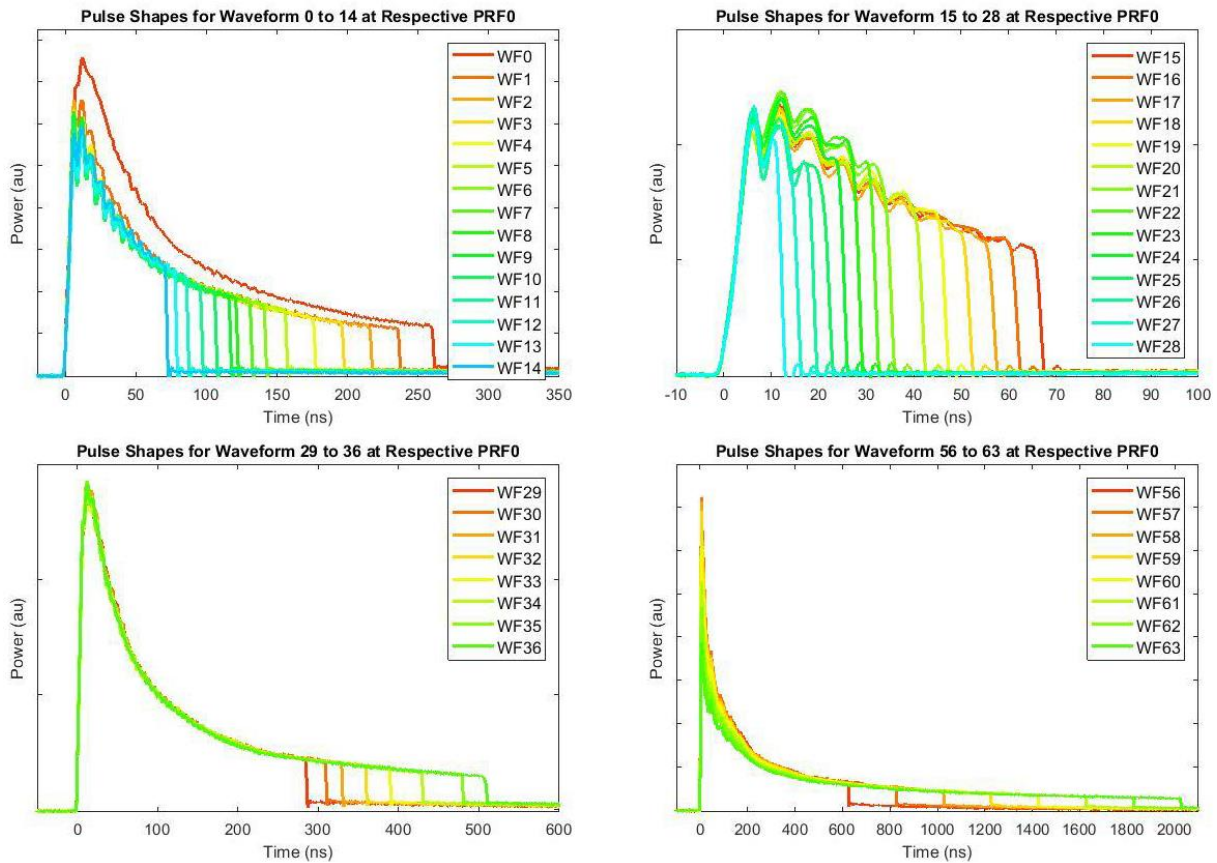
Tab. 5: Chemické složení slinutého karbidu s označením TH10 z materiálového listu

Chemické složení materiálu bylo potvrzeno také vlastní prvkovou SEM/EDX analýzou. Analyzovaný vzorek příčného výbrusu včetně vyznačení jednotlivých prvků je na Obr. 55.

5.2 Použitá laserová zařízení

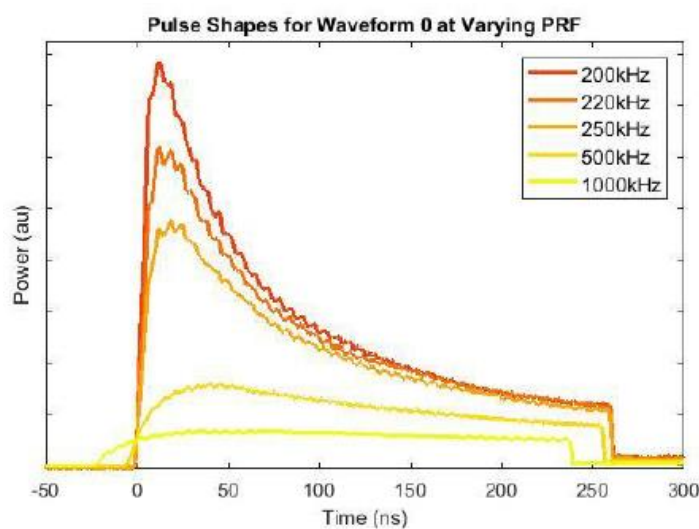
Použitým laserovým zařízením byl upravený stroj pro laserové mikroobrábění Master1 od firmy Elas. Tento stroj je vybaven dvěma laserovými zdroji, femtosekundovým laserovým zdrojem CARBIDE od firmy LightConversion a nanosekundovým laserovým zdrojem SP-200P-A-EP-Z-L-Y od firmy SPI (nyní Trumpf). CARBIDE je možné modulovat z hlediska délky pulsu od 260 fs až po jednotky ps. Zároveň je možná generace tří harmonických frekvencí (IH \approx 1030 nm, IIH \approx 515 nm, IIIH \approx 343 nm) a jejich vedení přes optické cesty (IH+IIH a IIIH) až do skenovací hlavy s F-theta čočkou. Každá z optických cest umožňuje změnu polarizace, zapnutí kruhové polarizace, změnu výkonu pomocí atenuátorů ($\lambda/2$ destičky které při natočení mění polarizaci laserového paprsku a tím tak ovlivňují intenzitu světelného toku), měření výkonu a změnu velikosti paprsku před vstupem do skenovací hlavy pomocí expandéru. Maximální dosahovaný průměrný výkon je pro první harmonickou 40 W, pro druhou 20 W a pro třetí 11 W. Opakovací frekvenci pulsů je možné nastavit od 100 kHz do 1 MHz. Zdroj dále umožňuje generování pulsů v burstech, a to v rozsahu od $N = 1 - 10$.

Laserový zdroj od SPI je vláknový laser s průměrným maximálním výkonem 200 W a vlnovou délkou 1063 ± 2 nm. Jedná se o pulsní laser s nanosekundovými pulsy a opakovací frekvencí PRFO od 100 do 4160 kHz. Laserový paprsek je veden optickým vláknem do stejné skenovací hlavy jako pro IH a IIH fs laseru. Nastavení konkrétních laserových parametrů je řízeno pomocí tzv. křivek (waveform - wf), které udávají časový průběh neboli tvar laserového pulsu spolu s jeho intenzitou. Celkem je těchto křivek v laserovém zdroji definováno 63 a jejich průběh se různí viz. Obr. 56. Volbou různých křivek je docíleno různého rozložení intenzity pulsu, jako je jeho maximum, průběh a délka, včetně definování opakovací frekvence s maximálním špičkovým výkonem. Průměrný výkon laseru je modulován napětím na zdroji, a to v rozsahu od 1 do 10 V. Například při použití křivky 0 (dále wf 0) je při 10 V a opakovací frekvenci 200 kHz, možné dosáhnout maximálního průměrného výkonu 200 W s energií v pulsu 1,03 mJ.



Obr. 56: Tvary pulsů pro jednotlivé křivky (waveform)

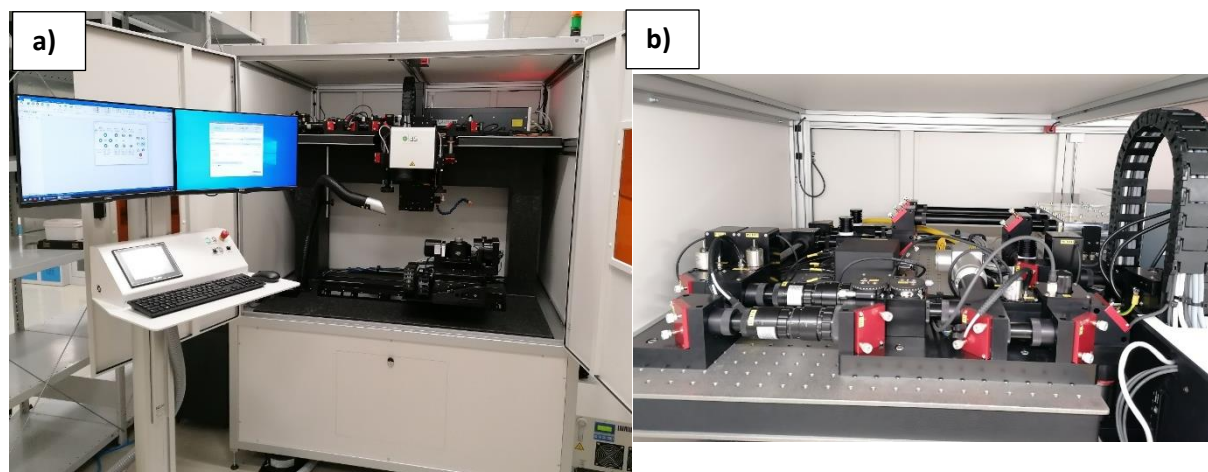
Při zvýšení opakovací frekvence v rámci jedné wf průměrný výkon nelineárně klesá, jak je vidět na Obr. 57 pro wf 0.



Obr. 57: Tvary pulsů pro zvyšující se opakovací frekvenci pro wf0

Stroj je dále vybaven třemi pohybovými osami – X,Y a Z a dvěma osami rotačními v kombinaci s otočně sklopným stolem – osy A, C. Pro ustavení správné polohy obrobku jsou ve stroji dvě kamery s odlišným rozlišením. Stroj je programován a řízen pomocí SW DMC (Direct Machining Control), řídicího systému pohybových os Polaris a řízení skenerů přes RTC kartu.

Na Obr. 58 je pohled do pracovního prostoru stroje včetně ovládacího panelu a dvou monitorů. je pohled na optickou cestu pro vedení první a druhé harmonické frekvence.



Obr. 58: a) Foto pracovního prostoru stroje pro laserové mikroobrábění Master1 b) Optická cestu pro vedení první a druhé harmonické frekvence

5.3 Stanovení strategie mikroobrábění

V provedených experimentech byla použita strategie radiálního obrábění. Mikroobráběná entita byla importována ve formě CAD modelu (.stl, .dxf) nebo byla vytvořena přímo v uživatelském rozhraní v softwaru DMC. Entity byly vyplněny šrafováním, buďto lineárním nebo konturovým. Z tohoto důvodu byly experimentálně stanoveny hodnoty optimálního natočení šrafování a také zvoleny vhodné kompenzační strategie.

5.3.1 Experiment k určení optimálního natočení šrafování

Na základě této studie byl navržen vlastní experiment s cílem stanovení ideálního úhlu natočení šraf (ϕ) pro dosažení co nejmenší drsnosti povrchu. Experiment byl realizován na laserovém zařízení s femtosekundovou délkou pulsu pro simulování podmínek dokončování, kde je výsledná kvalita povrchu zásadní. Obráběným materiálem byl slinutý karbid TH10, do kterého byly vytvořeny čtverečky o rozměrech 5x5 mm. Každý ze čtverečků byl složen ze 120 odebíraných vrstev, nastavených jako počet

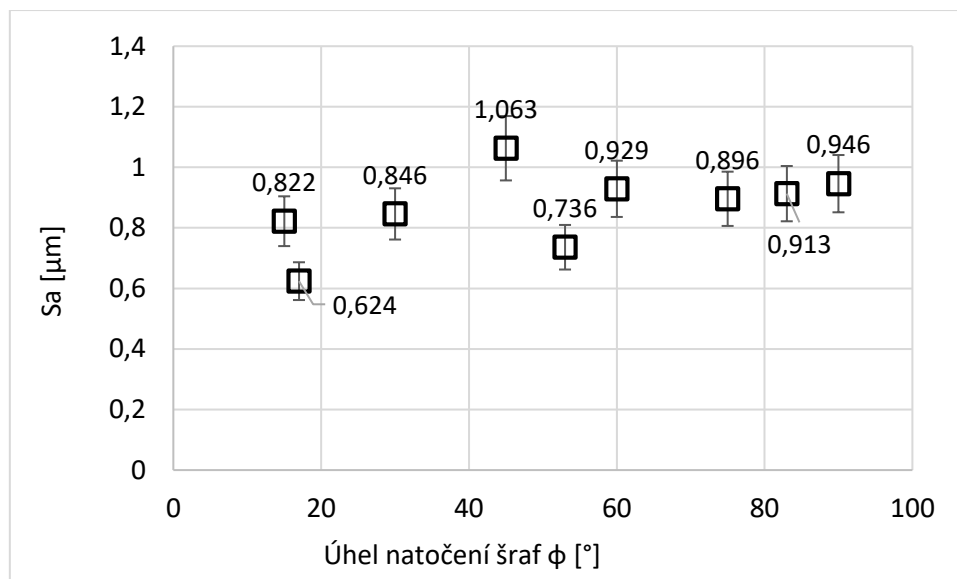
Počet přejezdů [-]	120
Velikost čtverečku [mm]	5x5
Opakovací frekvence [kHz]	200
Průměrný výkon laseru [W]	3
Překrytí pulsů (S_x, H_y) [%]	80
Vlnová délka [nm]	1030
Nastavené úhly šrafování ϕ [°]	15
	17
	30
	45
	53
	60
	75
	83
90	

přejezdů. Pro zachování správné fokusační vzdálenosti se skenovací hlava posunula v ose Z po každém přejezdu. Proměnným parametrem byl úhel natočení šrafování. Tyto hodnoty jsou spolu s konstantními laserovými parametry uvedeny v Tab. 6.

Po vytvoření čtverečků byla změřena jejich drsnost povrchu na mikroskopu Infinite Focus G5 (Bruker Alicona). Pro popsání výsledků byl použit parametr plošné drsnosti povrchu S_a [μm], udávající průměrnou výšku nerovností na vybrané ploše. Jedná se o rozšiřující parametr k parametru R_a . Z grafu na Obr. 59 je zřejmé, že nejmenší drsnost povrchu S_a byla naměřena pro úhel

Tab. 6: Procesní a technologické parametry zvolené pro realizaci experimentu k ověření ideálního úhlu natočení šraf

natočení šraf 17°. Tento úhel je proto vhodné použít i v dalších experimentech, zejména u stanovení efektivní ablace při dokončování povrchu 3D entity na řezném nástroji. [76]



Obr. 59: Graf závislosti drsnosti povrchu Sa na úhlu natočení šraf

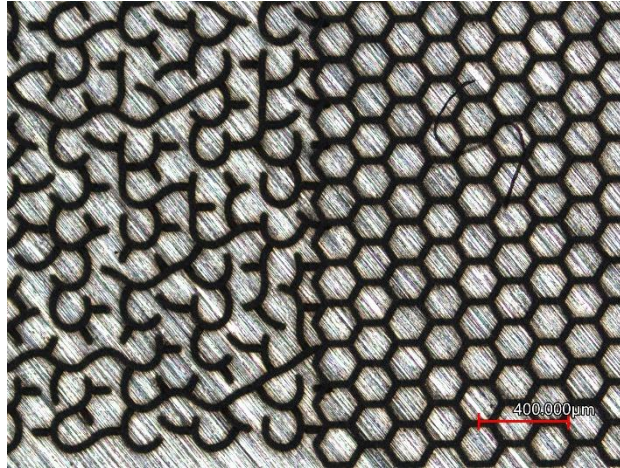
5.3.2 Experiment k určení kompenzačních strategií

V použitém zařízení se skenovací hlavou InteliScan14 od firmy Scanlab a řídicím SW DMC je možné zvolit jednu ze tří možností nastavení funkce skywriting. V první variantě se nastavuje pouze časové zpoždění (timelag) a časový posun zapnutí laseru (laser on shift), ve druhém je možné nastavit zrychlení (acceleration, deceleration time) a ve třetím hodnotu mezního úhlu pro který je funkce skywriting použita (angular limit). Nastavení těchto parametrů je patrné z Obr. 60. Jejich vhodnost byla ověřena experimenty.

- Sky Writing		- Sky Writing	
Mode	Mode 1	Mode	Mode 3
Timelag (μs)	200	Timelag (μs)	200
Laser On Shift (μs)	-10	Laser On Shift (μs)	-10
		Acceleration Time (μs)	300
		Deceleration Time (μs)	200
		Angular Limit (deg)	0
- Sky Writing			
Mode	Mode 2		
Timelag (μs)	200		
Laser On Shift (μs)	-10		
Acceleration Time (μs)	300		
Deceleration Time (μs)	200		

Obr. 60: Zadávané parametry v jednotlivých variantách funkce skywriting

Správné nastavení zpoždění se daleko více promítá při vytváření komplexnějších tvarů. Tento jev je dobře pozorovatelný z Obr. 61, kde vlevo je výroba mikrostruktury bez zapnutého skywritingu a vpravo se zapnutou funkcí skywriting s dobře nastavenými parametry.



Obr. 61: Vytvořená mikrogeometrie na nástrojovém materiálu: vlevo - bez skywrittingu, vpravo - zapnutý skywritting (mód 1)

5.4 Stanovení procesních parametrů

V této kapitole jsou popsány experimenty vedoucí ke stanovení procesních parametrů pro nanosekundové laserové hrubování a femtosekundové dokončování. Mezi procesní parametry jsou zařazeny zejména opakovací frekvence, vlnová délka a intenzita energie. Cílem je nalezení takových procesních parametrů, které povedou ke kvalitnímu procesu mikroobrábění s maximální produktivitou. Z tohoto důvodu byly provedené experimenty rozsáhlé, tak aby byly ověřeny všechny možnosti, jak na zvolených typech zařízení maximální produktivity procesu dosáhnout.

5.4.1 Nanosekundové laserové hrubování

Stejně jako pro hrubování při klasickém obrábění, platí i pro laserové hrubování, že se jedná o obráběcí proces, jehož hlavním cílem je odebrat co největší množství materiálu v co nejkratším čase. Zároveň je ale potřeba vytvořit takový povrch, který je možno dokončit v požadované kvalitě povrchu a ideálně na co nejmenší počet dokončovacích přejezdů. Proto je potřeba při laserovém hrubování studovat tepelné ovlivnění povrchu a drsnost povrchu, tak aby bylo možné stanovit ideální přídavek pro dokončování. V této práci byl pro hrubování použit 200 W nanosekundový laserový zdroj od SPI, blíže popsáný v kapitole 5.2.

Experimenty pro určení parametrů efektivního hrubování byly navrženy tak, aby co největší měrou postihly všechny možné kombinace laserových parametrů vedoucích k nejefektivnějšímu procesu. V prvním kroku byla posouzena vhodnost jednotlivých křivek průběhů laserových pulsů (wf) pro efektivní úběr. V dalším kroku byly provedeny testy efektivity ablace s proměnnými parametry překrytí pulsů a výkonem. Kritériem hodnocení efektivity ablace materiálu byl parametr intenzity ablace a drsnost povrchu na dně mikroobrobené entity, hodnocenou parametry S_a a S_z . Na závěr byly stanoveny optimální parametry pro laserové hrubování a jejich vliv na tepelné ovlivnění materiálu při nárůstu počtu přejezdů.

5.4.1.1 Experiment k určení vhodné křivky průběhu laserového pulsu

Pro určení optimální křivky průběhu laserového pulsu pro hrubování byly vytvořeny čtverečky o stejné velikosti (2,5 x 2,5 mm) a stejném počtu skenovaných vrstev do karbidových destiček (TH10). Parametry strategie skenování, jako skenovací rychlost, rozteč, počet odebraných vrstev a natočení šraf byly v tomto experimentu zvoleny konstantní a jejich hodnoty jsou uvedeny v Tab. 7. Jelikož byla

zvolena konstantní skenovací rychlost byl čas laserového obrábění všech čtverečků stejný. Druhou možností, jak nastavit experiment by bylo konstantní překrytí pulsů, toho však ale pro vyšší opakovací frekvence není možné dosáhnout z důvodu limitu ve skenovací rychlosti 5 m/s.

Skenovací rychlost [mm/s]	80
Rozteč šraf [mm]	0,0035
Počet vrstev [-]	20
Natočení šraf [°]	17

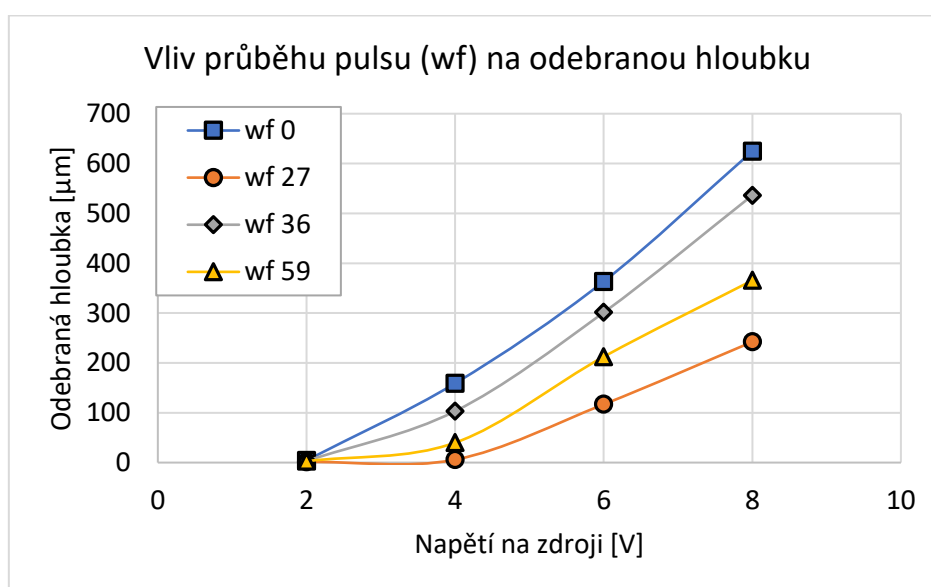
Tab. 7: Konstantní parametry strategie skenování pro stanovení maximální efektivity hrubování

V první fázi experimentu byly zvoleny křivky průběhů pulsů, které jsou nejvíce rozdílné, a to wf 0, wf 27, wf 36 a wf 59. Charakteristiky vybraných křivek jsou uvedeny číselně v Tab. 8. Rozdíl mezi jednotlivými křivkami byl v délce pulsu, energii v pulsu, ideální opakovací frekvence a maximálního špičkového výkonu. Výběr těchto křivek se řídil jejich možnými hodnotami energií v pulsu, a to minimální, maximální a dvě střední hodnoty z celkového počtu 61 variant průběhů pulsů.

Křivka (wf)	Ideální opakovací frekvence (kHz)	Maximální opakovací frekvence (kHz)	Max. energie v pulsu, E _{max} (mJ)	Délka pulsu pro max. energii v pulsu, E _{max} (ns)	Délka pulsu pro 10% (ns)	Špičkový výkon pro E _{max} (kW)
0	200	1000	1,03	58	261	10
27	2170	4160	0,1	13	16	8
36	166	500	1,24	60	508	9
59	135	205	1,52	32	1220	10

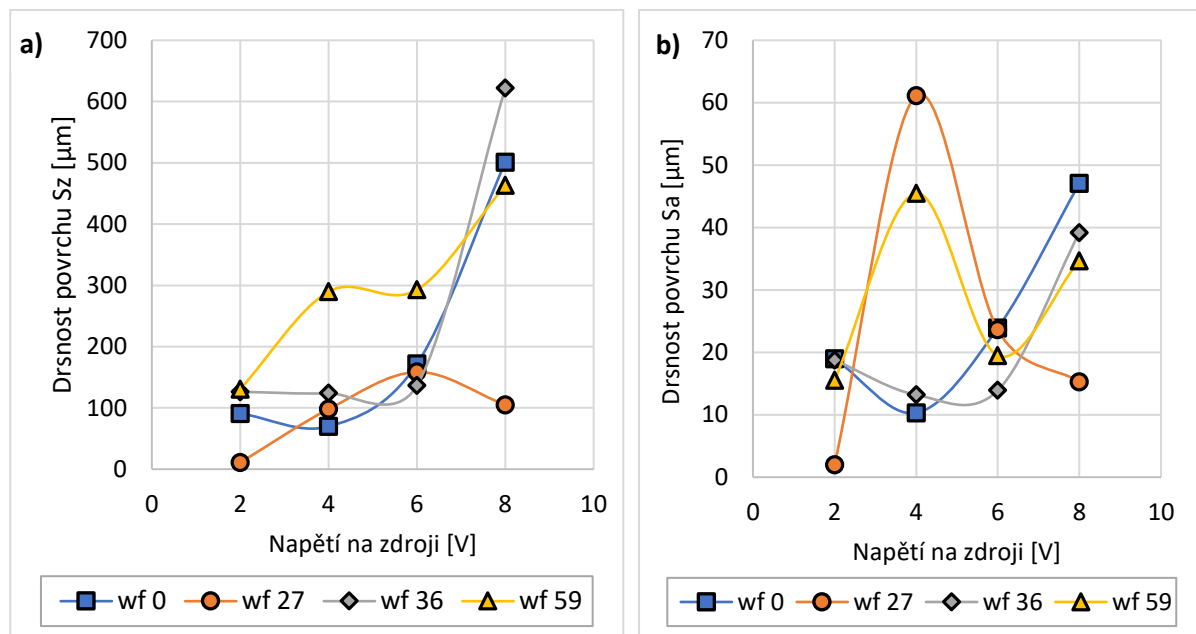
Tab. 8: Charakteristiky křivek (wf) použitých pro stanovení maximální efektivity hrubování

Porovnání jednotlivých wf a jejich vliv na množství odebraného materiálu v závislosti na napětí na zdroji, které je přímo úměrné průměrnému výkonu je na Obr. 62. Z grafu vyplývá, že největší odebrané hloubky bylo dosaženo při použití wf 0. Druhé největší hloubky bylo naměřeno při použití wf 36. Naopak u wf 59, která má největší energii v pulsu z použitých křivek byl úběr až třetí největší. Nejmenší úběr byl naměřen pro wf 27, která má nejmenší energii v pulsu. Zde byl ale předpoklad, že by mohla vést k nejmenší drsnosti povrchu.



Obr. 62: Vliv vybraných křivek průběhů pulsů (wf) na odebranou hloubku

Grafy závislosti drsnosti povrchu S_a a S_z pro vybrané průběhy křivek pulsů jsou na Obr. 63. Z těchto grafů vyplývá, že pro větší napětí na zdroji, než je 6V vede ke skokovému nárůstu drsnosti povrchu, kromě wf 27, která vykazala mnohem menší drsnost povrchu ze všech použitých křivek i pro 8V. Při použití napětí 6 mV mají všechny použité wf podobné S_a i S_z , kromě wf 59, která má hodnotu S_z dvakrát vyšší než ostatní použité wf. Při použití této waveformy došlo k tavení materiálu a jeho následnému tuhnutí bez znatelného úběru, které naopak vedlo k nárůstu drsnosti povrchu.



Obr. 63: Vliv různých křivek průběhů pulsů (waveform) na drsnost povrchu: a) na parametr S_z ; b) na parametr S_a

Z tohoto prvního experimentu tedy vyplývá, že je nevhodnější použití wf 0, popř. wf 36, pro kterou je možné dosáhnout lepší kvality povrchu zejména pro vyšší výkony, ale menšího úběru materiálu.

5.4.1.2 Experiment k určení vhodné energie a překryvu pulsů

S nalezeným vhodným průběhem laserového pulsů byly navrženy experimenty pro určení ideálního překryvu pulsů a oblasti vhodné energie pulsů.

Celkem 50 čtverečků o rozměrech 2,5 x 2,5 mm bylo vytvořeno do zkoumaného materiálu slinitého karbidu laserem s proměnnými parametry překryvu S_x a $H_y = 40\%$, 50% , 60% , 70% , 80% , a intenzity energie $F = 7 - 70 \text{ J/cm}^2$. Proměnné i konstantní parametry jsou shrnuty v Tab. 9.

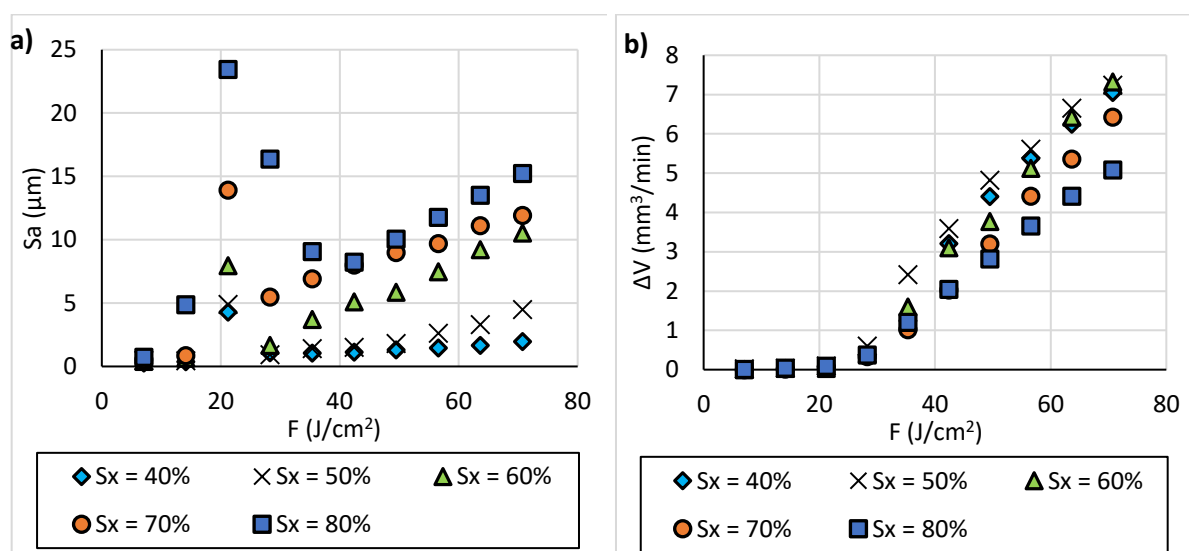
Průběh laserového pulsů, wf (-)	0
Opakovací frekvence, f (kHz)	200
Průměr spotu v ohnisku, D (mm)	0,03
Překryv pulsů, S_x (%)	40 - 80
Překryv šraf, H_y (%)	40 - 80
Skenovací rychlost, v (mm/s)	3600 - 1200
Úhel natočení šraf, ϕ ($^\circ$)	17
Počet přejezdů (-)	20

Tab. 9: Konstantní a proměnné výkonové a skenovací parametry použité v experimentu určení ideálního překryvu a energie pulsů

Po procesu laserového mikroobrábění byla na vzorcích optickou metodou změřena hloubka a drsnost povrchu. Z naměřených hloubek vypočtené hodnoty intenzity ablace jsou zobrazeny v grafu na Obr.

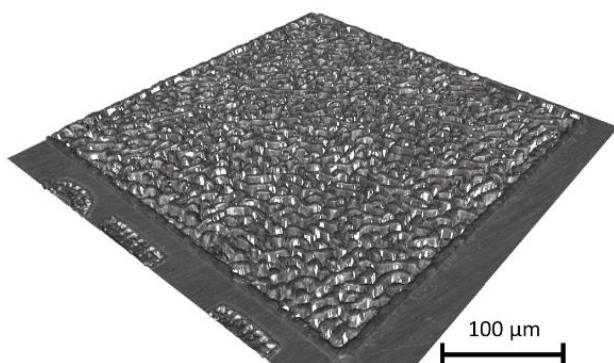
64-a). Od hodnoty $F \approx 25 \text{ J/cm}^2$ nastal téměř konstantní nárůst odebraného množství materiálu v čase, pro všechny testované překryvy pulsů. Nejvýše položené hodnoty jsou pro překryv $S_x = 40 \%$, kromě maximální testované intenzity energie $F = 70 \text{ J/cm}^2$, kde je maximum pro $S_x = 50 \%$ a 60% . Z celkového průběhu je patrné, že pro menší překrytí pulsů je produktivita procesu ablace vyšší, a to i přes to, že energie dodaná na plochu obráběného materiálu je vlivem menšího počtu pulsů menší. Dá se tedy předpokládat že pro překrytí pulsů $S_x = 30 \%$ by hodnoty intenzity ablace dále rostla, nicméně rychlost skenování by se přiblížila limitům použité skenovací hlavy a bylo by obtížné proces cíleně řídit. Pokles produktivity pro vyšší překryvy může být způsoben velkým vstupem tepla do materiálu, který se taví ale nedochází již k jeho odebírání ablací.

Zjištěné hodnoty intenzity ablace jsou mnohem vyšší než hodnoty dosažené např. ve studii [85], kde byl k ablaci podobného materiálu použit pikosekundový laser. Vlastní experiment tedy potvrdil závěry z rešeršní části, a to že je možné použít nanosekundový laser pro produktivní ablaci materiálu. Současně je potřeba studovat i kvalitu povrchu. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu jsou zobrazeny na Obr. 64-b).



Obr. 64: a) Hodnoty intenzity ablace (ΔV) pro různé hodnoty překryvu pulsů (S_x); b) dosažené hodnoty drsnosti povrchu (S_a) pro různé překryvy pulsů (S_x)

V oblasti mezi $F \approx 18 - 25 \text{ J/cm}^2$ došlo k extrémnímu nárůstu drsnosti povrchu pro všechny použité překryvy. Zároveň se tento skokový nárůst snižoval s klesajícím překrytím pulsů. Pro tyto hodnoty také nebyl naměřen téměř žádný úběr. Pro nejvyšší překrytí pulsů dokonce došlo k nárůstu materiálu nad povrch, viz Obr. 65. Z obrázku je patrné značné tavení povrchu a vytváření nehomogenního povrchu. Při těchto parametrech se povrch zahřívá, taví a odpařuje, což je ovlivněno použitými dlouhými nanosekundovými pulsy (230 ns). V tomto případě mají dominantní vliv tepelné vlastnosti materiálu. Nepravidelná ablace povrchu začíná v důsledku rozdílů mezi teplotami tání a varu karbidu wolframu a kobaltu. Teplota tání kobaltu je $1495 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota varu $2927 \text{ }^\circ\text{C}$ [86]. Zatímco teplota tání WC je



Obr. 65: 3D pohled na povrch vzorku vytvořeného parametry $F = 22,2 \text{ J/cm}^2$ a $S_x = 80 \%$

2870 °C a teplota varu je vyšší než 6000 °C [86]. Při teplotě okolo 1280 °C začínají v materiálu vznikat kapalné + β fáze společně s WC [87]. S rostoucí teplotou se odpařuje pojivový kobalt a unikající plyn způsobuje bublání ve WC v kapalném stavu. Následně rychlým ochlazením dochází k narušení morfologie povrchu. Výše popsané chování materiálu zmiňují také autoři studií [88] a [89]. Závislost překryvu pulsů (S_x) na drsnosti povrchu lze také vysvětlit tepelnými procesy, které v materiálu probíhají. S klesající rychlostí skenování se překrytí pulsů zvyšuje a množství tepla do materiálu roste. Zvyšuje se také množství znovu ztuhlého materiálu a výsledkem je zdrsňený povrch. Když je překrytí pulsů příliš malé, energie potřebná k tavení klesá a dochází k lepšímu tavení obou fází. To lze pozorovat pro $S_x = 40\%$ a 50% , kdy oba vzorky vykazovaly podobnou drsnost povrchu. Další snižování překryvu může způsobovat nenatavené oblasti, a to v důsledku vysoké rychlosti skenování a krátké doby interakce laserového paprsku a obráběného materiálu [90]. Pro vyšší intenzity energie drsnost povrchu klesá a začíná docházet k lineárnímu úběru materiálu. Dochází k nárůstu teploty povrchu a rovnoměrnému tavení a odpařování obou fází. Od tohoto momentu byl pozorován lineární nárůst drsnosti povrchu s rostoucí intenzitou energie. Nejnižších hodnot S_a bylo dosaženo pro nejmenší překrytí pulsů a naopak.

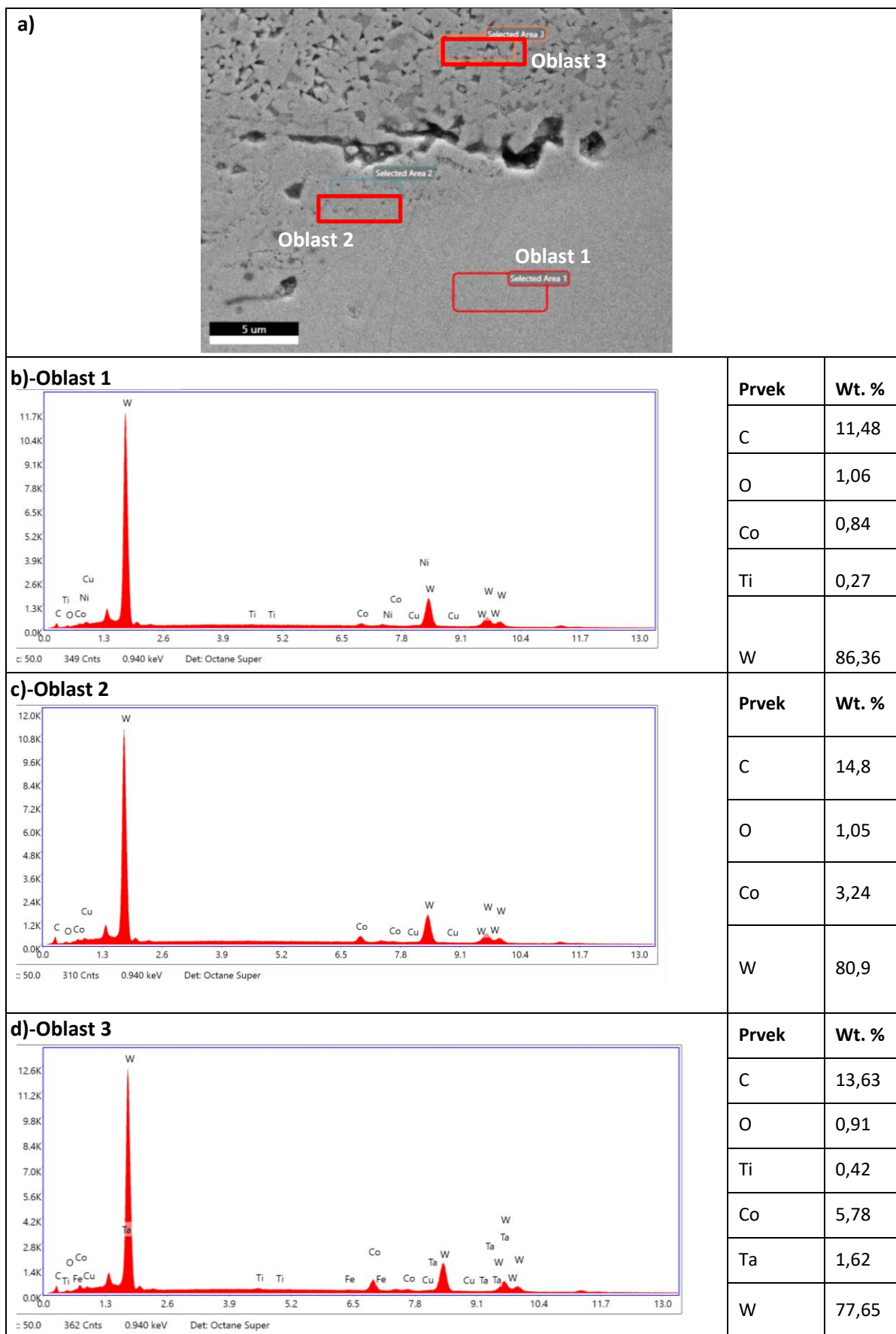
Z výše uvedených výsledků byly stanoveny optimální parametry pro nanosekundové hrubování. Vzhledem k přiblížení se k limitům použité aparatury byl zvolen překryv pulsů $S_x = 50\%$ a intenzita energie v rozmezí od 40 do 60 J/cm², pro které byla drsnost povrchu $S_a < 3 \mu\text{m}$.

5.4.1.3 Experiment k určení vlivu zvolených podmínek hrubování na tepelné ovlivnění

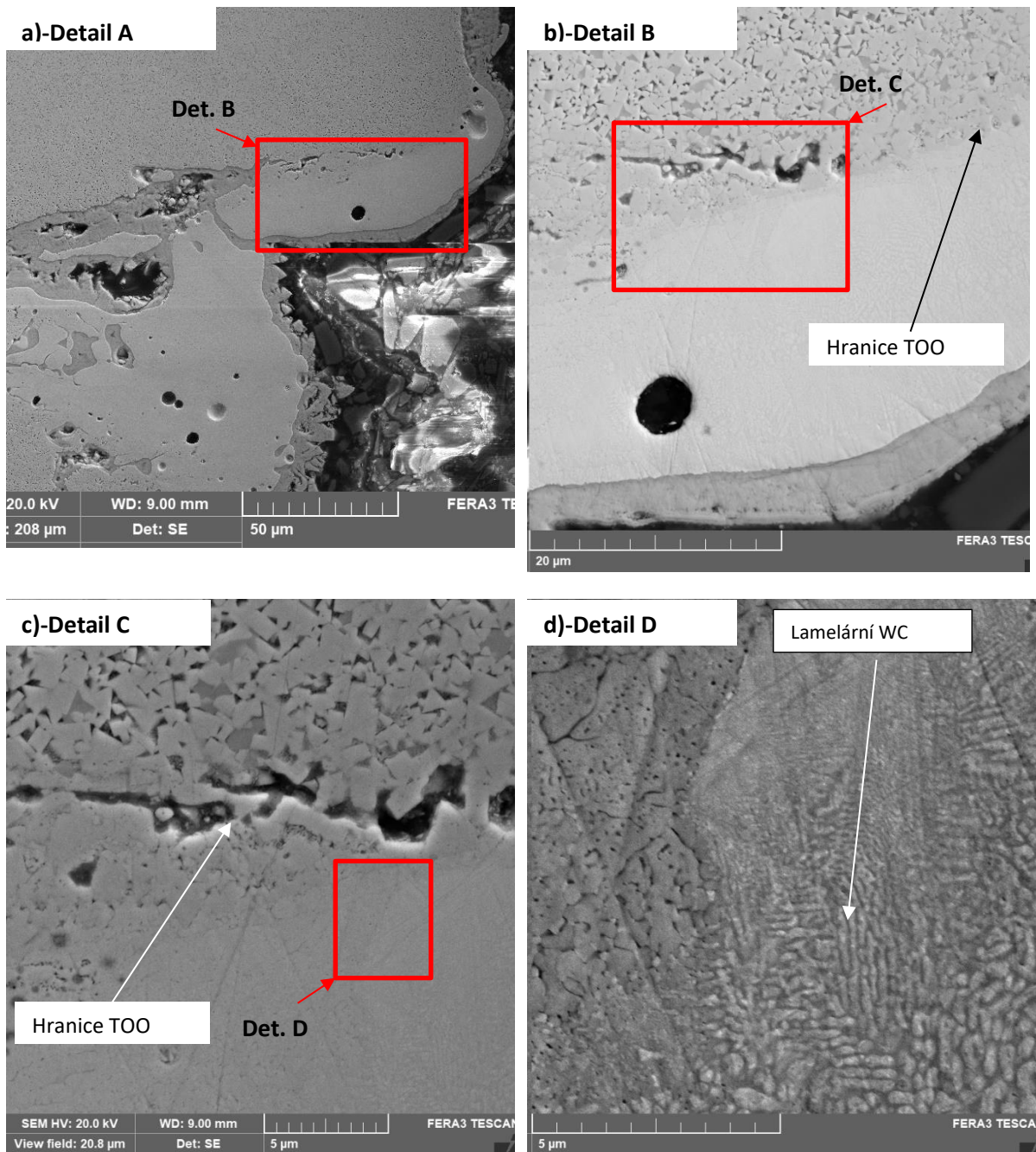
V dalším kroku byl analyzován vliv optimálních nalezených podmínek hrubování, tj. $F = 40 - 60 \text{ J/cm}^2$ a $S_x = 50\%$ na tepelně ovlivněnou oblast (TOO) podpovrchové vrstvy. Zároveň byl studován vliv různého počtu přejezdů laserového paprsku na hloubku TOO, drsnost povrchu a celkovou odebranou hloubku.

Pro definování TOO byla použita SEM/EDX analýza vzorku vytvořeného výkonem 100 W, wf 0 na 4 přejezdy laserového paprsku. Na Obr. 66-a) je 2D pohled ze SEM s vyznačením chemicky analyzovaných oblastí. Obsah kobaltu je v první analyzované oblasti (Obr. 66-b) ve stopovém množství ($\text{Co} \approx 0,85\%$). V této oblasti také dochází ke změně mikrostruktury materiálu, a to zejména díky odpaření pojivového kobaltu a změnou fází tvrdé složky WC. V makroskopickém pohledu se to projeví jako místa, ve kterých chybí černé tečky představující kobalt. V přechodové oblasti mezi TOO a základním materiálem (Obr. 66-c) se množství kobaltu zvětšuje ($\text{Co} \approx 3,2\%$). Mikrostruktura materiálu se zvětšuje a v oblasti jsou patrné malé černé tečky. Poslední analyzovaná oblast (Obr. 66-d) je již v neovlivněném materiálu. Množství kobaltu a ostatních zbytkových prvků v materiálu např. Tantalu roste.

V detailních pohledech na TOO je viditelná absence tmavých částí viz Obr. 67:A-C. Na nejvíce detailním pohledu (D) na mikrostrukturu je patrný lamelární tvar WC, který prošel tavením a následným rychlým ochlazením okolním materiálem.



Obr. 66: SEM/EDX analýza TOO; a) SEM snímek analyzované oblasti b) – d) EDX prvková mapa odpovídající zastoupení jednotlivých přítomných prvků

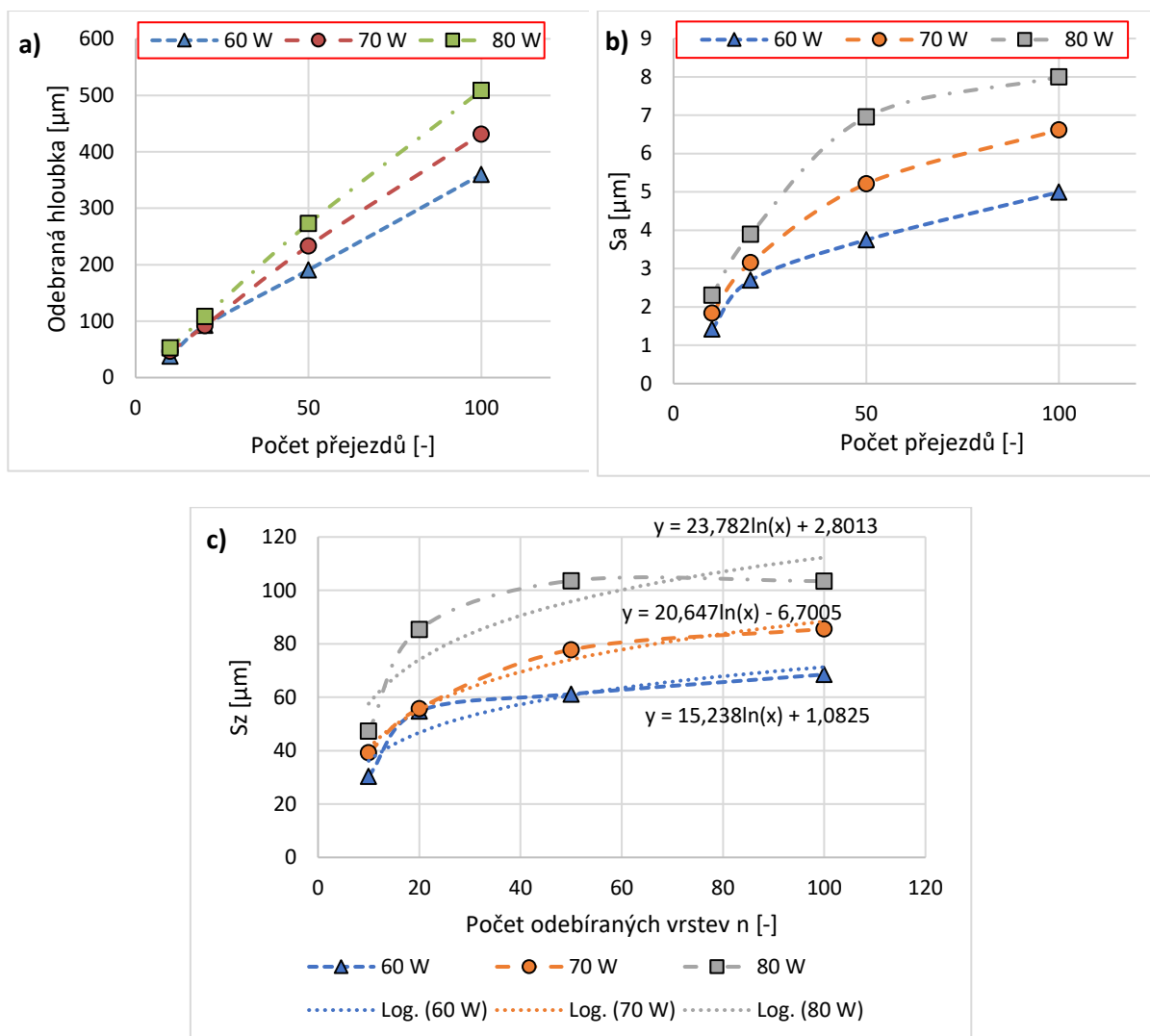


Obr. 67: Detailní 2D pohledy ze SEM na TOO v různých zvětšeních (A-D)

Tepelně ovlivněná oblast je díky absenci měkkého kobaltu také velmi tvrdá. Naměřená tvrdost povrchu (HV₂) slinutého karbidu TH10 bez tepelného ovlivnění byla 1750 ± 50 HV. Oproti tomu laserem ovlivněný povrch výkonem 60 W ($F = 40 \text{ J/cm}^2$) měl na svém povrchu tvrdost 2400 ± 200 HV. Větší rozptyl naměřené tvrdosti byl způsoben drsností povrchu, která mohla částečně měření ovlivnit oproti broušenému referenčnímu povrchu.

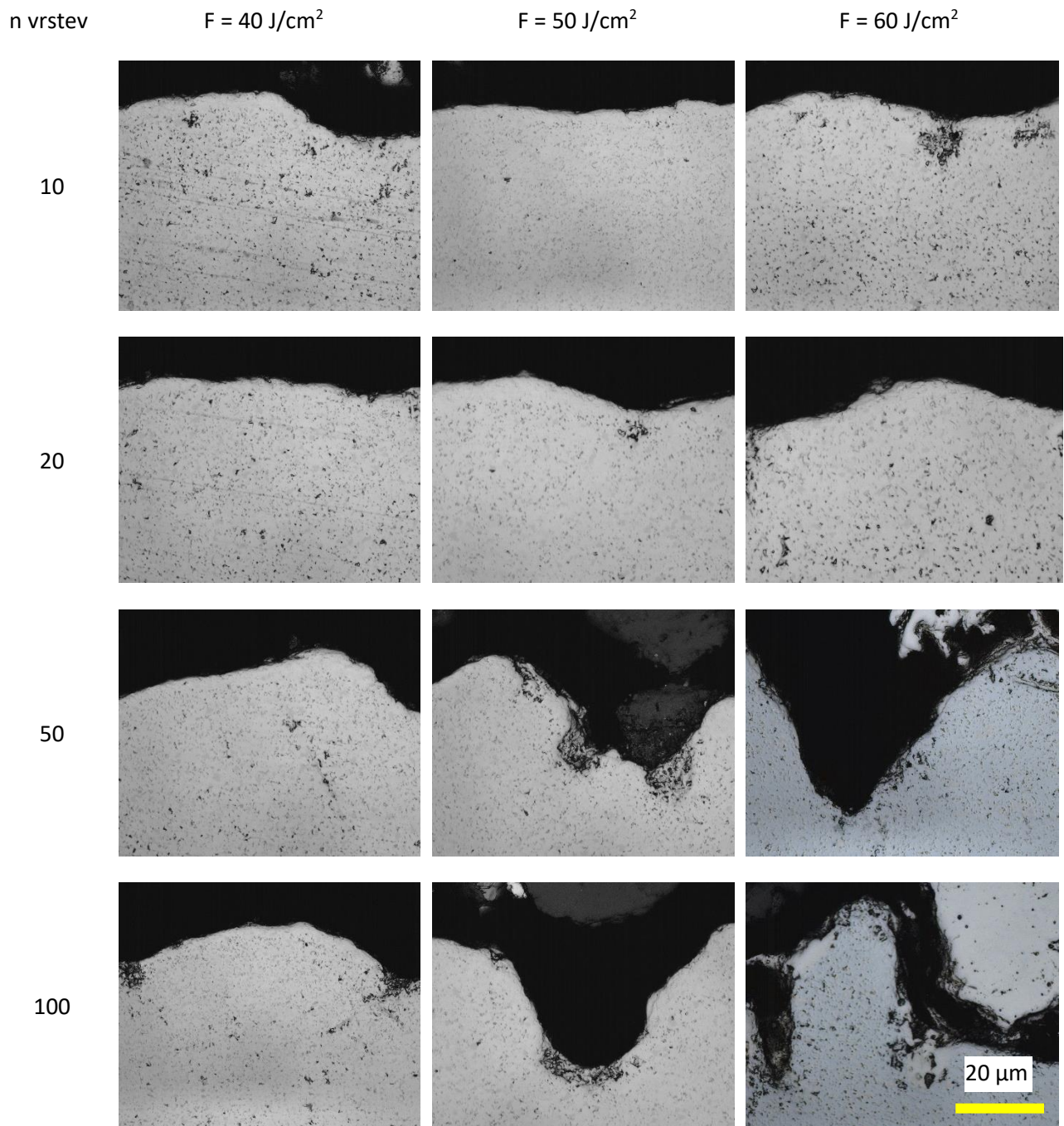
Pro určení vlivu různých hrubovacích parametrů na odebranou hloubku, drsnost povrchu a tepelné ovlivnění byl navržen a realizován experiment. V experimentu byly použity tři různé intenzity energie $F = 40, 50, 60 \text{ J/cm}^2$ a 4 různé počty přejezdů – 10, 20, 50, 100. Počet přejezdů byl volen tak, aby bylo dosaženo hloubky úběru od 10 µm po 500 µm. Ostatní použité parametry byly stejné jako v předchozích experimentech a jsou uvedeny např. v Tab. 9. Z následujících grafů (Obr. 68) je patrné,

že s rostoucím počtem přejezdů roste i odebraná hloubka a to lineárně. Zároveň také platí, že nejmenší úběry byly pro nejmenší intenzitu energie a naopak. Drsnost povrchu s narůstajícím počtem přejezdů také narůstá, nicméně průběh této závislosti je spíše logaritmický s určitou maximální hodnotou S_a , resp. S_z , ke které se tato závislost blíží. Nárůst drsnosti povrchu s narůstajícím počtem přejezdů je problematický zejména s ohledem na stanovení optimálního přířavku pro dokončování dle požadované hloubky a kvality povrchu po laserovém obrábění. Větší drsnost povrchu po hrubování povede k většímu přířavku pro dokončování, aby mohlo dojít k odstranění nerovností.



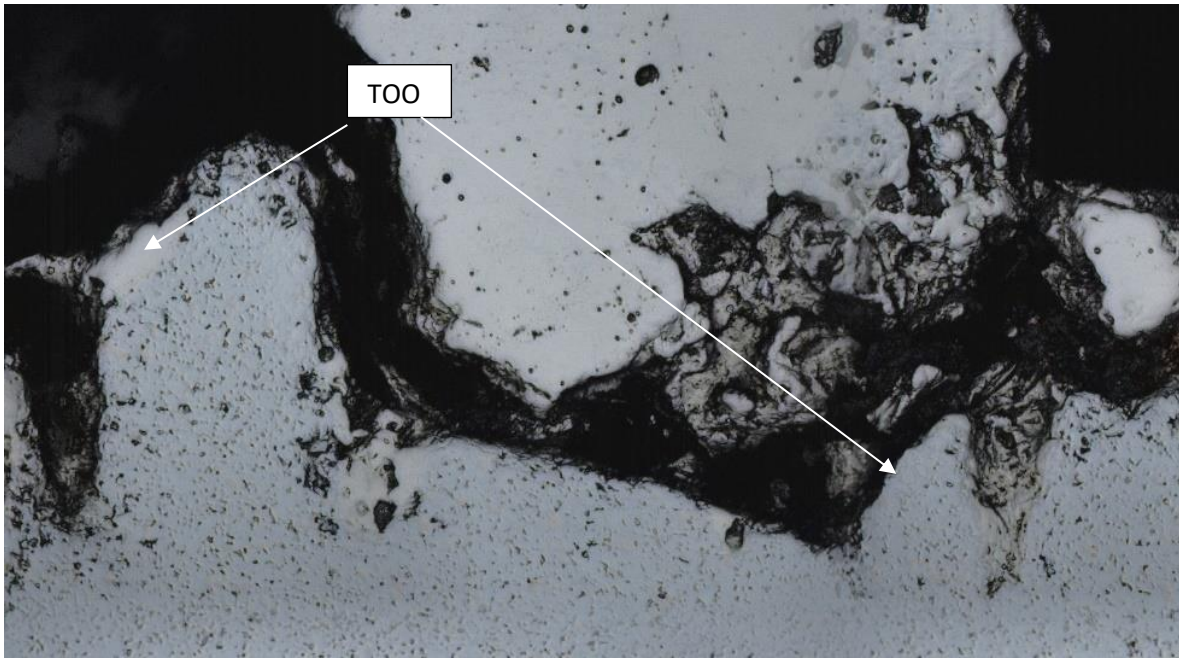
Obr. 68: a) graf závislosti odebrané hloubky materiálu na počtu přejezdů; b) graf závislosti dosažené drsnosti povrchu S_a ; c) S_z , pro různé počty přejezdů

Pro analýzu tepelného ovlivnění byly ze vzorků vytvořeny metalografické výbrusy, které byly analyzovány na konfokálním mikroskopu. K evaluaci TOO byly využity znalosti z předchozí SEM analýzy. TOO je charakterizována jako oblast ve které chybí pojivový kobalt, pod mikroskopem vypadající jako černé tečky.



Obr. 69: Snímky z konfokálního mikroskopu příčného řezu nanosekundovým laserem vytvořenými vzorky pro analýzu TOO (všechny snímky se stejným měřítkem)

Ze snímků vyplývá, že tepelné ovlivnění není příliš velké a je spíše v jednotkách mikrometrů, a to i při větším výkonu a větším počtu přejezdů. Jako hlavní problém se proto zdá drsnost povrchu a vrcholky nerovností, které jsou několikanásobně větší v porovnání s TOO. Pro detailní analýzu byl zvětšen vzorek vytvořený 100 přejezdy s $F = 60 \text{ J/cm}^2$, viz Obr. 70. TOO je nejvíce patrná v místech, kde se koncentrují vrcholky nerovností. Při nastavování přídavku pro dokončování proto bude důležité zohlednit spíše velikost nerovností, a to přes parametr S_z , jelikož TOO je daleko menší a při odstranění špiček nerovností dojde i k jejímu odstranění.



Obr. 70: 2D pohled z konfokálního mikroskopu na vrcholky nerovností s vyznačenou TOO ($F = 60 \text{ J/cm}^2$, 100 přejezdů)

5.4.2 Femtosekundové laserové dokončování

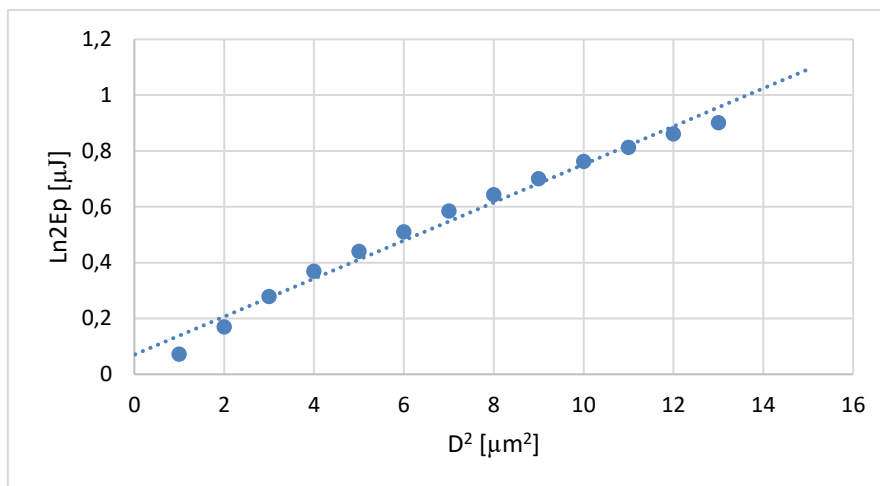
Cílem hledání parametrů pro efektivní proces laserového dokončování povrchu je nalezení takových parametrů, které povedou ke:

- I) Snížení drsnosti povrchu po hrubovacím procesu
- II) Odstranění nežádoucí TOO
- III) Dosažení požadované hloubky vytvářené 3D entity

K dosažení těchto dílčích cílů je potřeba zejména sledovat tloušťku odebraného materiálu a parametry intenzity, popř. efektivity ablace a kvalitu laserem obrobeného povrchu. V prvním kroku byly tyto parametry sledovány pro fundamentální nastavení femtosekundového laserového zařízení, a to vlnovou délkou 1030 nm a opakovací frekvenci 200 kHz. Pro tyto parametry byl stanoven ablační práh obráběného slinutého karbidu a následně efektivita a intenzita ablace. V druhém kroku byly navrženy experimenty se snahou maximalizace produktivity celého procesu, a to zvyšování opakovací frekvence, generování kratších vlnových délek a použití generování pulsů v burst-módu.

5.4.2.1 Stanovení ablačního prahu

Jak již bylo zmíněno, v prvním kroku byl stanoven ablační práh dle rovnic a postupů popsaných v kapitole 4.2.1. Experimenty byly provedeny na slinutém karbidu s označením TH10, s použitím 10 laserových pulsů do jednoho místa. Deset pulsů bylo zvoleno z důvodu následné podobnosti s mikroobráběním s využitím překryvu pulsů. Do materiálu byly vytvořeny jednotlivé body s rostoucí energií v pulsech. Zároveň byl každý z bodů vytvořen desetkrát pro větší opakovatelnost měření. Naměřené hodnoty byly zprůměrovány a byl vytvořen graf závislosti průměru laserem vytvořeného bodu na použité energii pulsů. Tato vytvořená závislost je v grafu na Obr. 71.



Obr. 71: Graf lineární regrese závislosti průměru laserem vytvořeného bodu a použité energie pulsů

Z naměřených a vypočtených dat byla stanovena hodnota ablačního prahu $F_{th} = 0,16 \text{ J/cm}^2$ a poloměru laserového paprsku $\omega_0 = 14,55 \text{ }\mu\text{m}$. Podobná hodnota ($F_{th} = 0,13 \text{ J/cm}^2$) byla stanovena i v literatuře [55].

5.4.2.2 Nalezení optimálních procesních parametrů při fundamentálním nastavení

Fundamentálními procesními parametry u použitého laserového zařízení se rozumí zejména fundamentální vlnová délka (1030 nm) a opakovací frekvence 200 kHz. Pro tyto procesní parametry je dle výrobce zařízení možné dosáhnout optimálních výkonových parametrů, jako například maximální energie v pulsu. Z tohoto důvodu byly tyto parametry zvoleny pro prvotní testy mikrobrábění laserem s femtosekundovými pulsy.

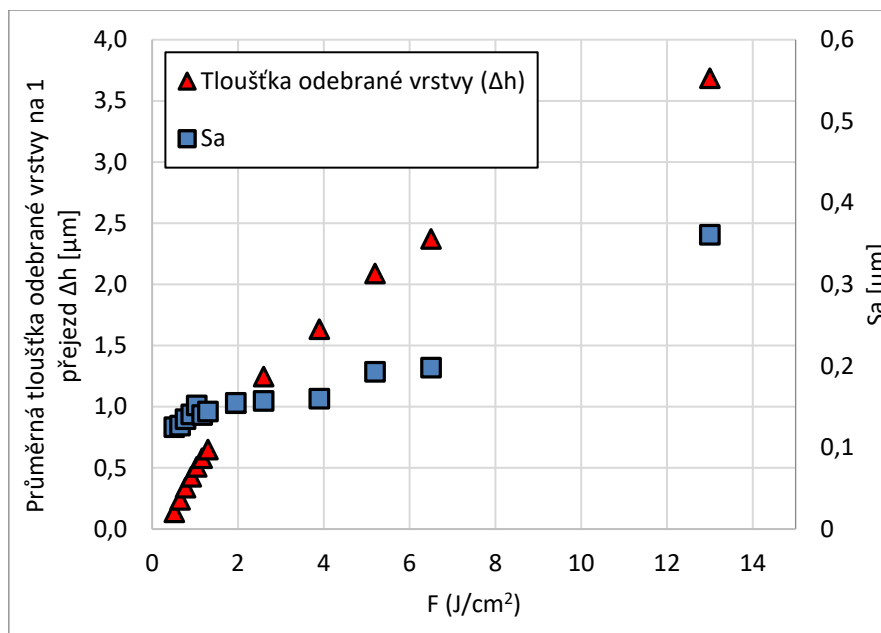
Experiment byl navržen tak, že do slinutého karbidu TH10 byly vytvářeny čtverečky s rostoucí intenzitou energie, odpovídající násobkům ablačního prahu. Velikost čtverečků byla nastavena na 2,5 x 2,5 mm a hloubka dána 50 skenovacími přejezdy. Ostatní použité procesní parametry jsou uvedeny v Tab. 10.

Laserový zdroj	Ligtcon Carbide CB3-40W
Vlnová délka, λ (nm)	1030
Opakovací frekvence, f_p (kHz)	200
Délka pulsu, τ_p (fs)	267
Průměr spotu, D (mm)	0,03
Překrytí pulsů, S_x (%)	80 %
Překrytí šraf, H_y (%)	80 %
Skenovací rychlost, v (mm/s)	1200
Úhel natočení šraf, ϕ ($^\circ$)	17 $^\circ$
Počet přejezdů (-)	50

Tab. 10: Technologické parametry použité při hledání parametrů efektivní ablace při použití fundamentální vlnové délky a opakovací frekvence

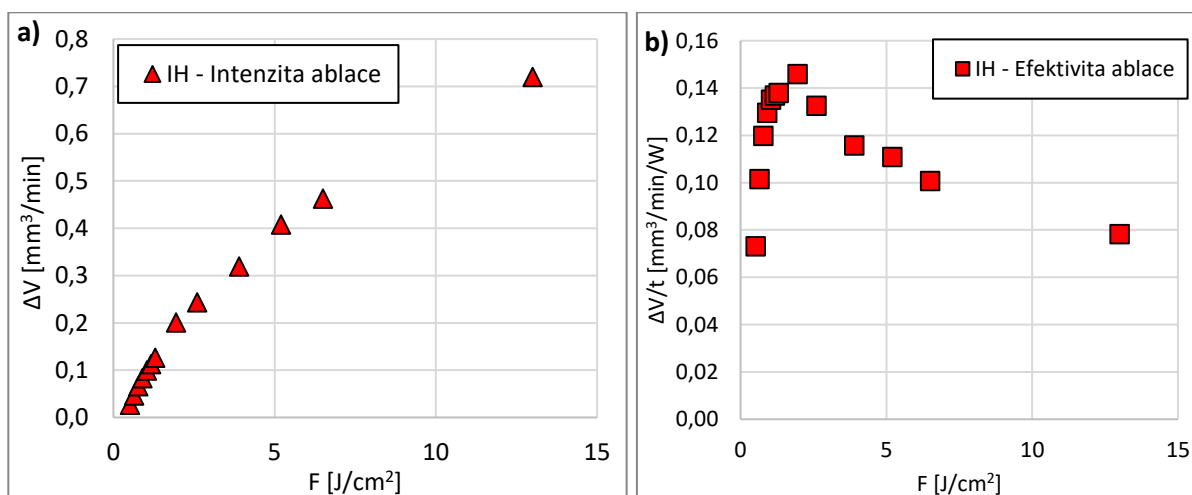
Po vytvoření čtverečků laserem byla opticky změřena jejich hloubka a drsnost povrchu. Celková odebraná hloubka měřena na třech různých místech byla zprůměrována a vydělena počtem přejezdů.

Výsledné hodnoty tloušťek odebraných vrstev a drsnosti povrchu vyjádřené parametrem Sa v závislosti na použité intenzitě energie jsou zobrazeny v grafu na Obr. 72.



Obr. 72: Průměrná tloušťka odebrané vrstvy na 1 přejezd a dosažená drsnost povrchu po laserovém procesu v závislosti na použité intenzitě energie (F)

Tloušťka odebrané vrstvy roste téměř lineárně s rostoucí intenzitou energie. Naopak drsnost povrchu je konstantní pro nižší F a následně roste téměř exponenciálně. Znalost hodnoty Δh je klíčová pro dopočetění potřebného počtu přejezdů při stanovování přídavku pro dokončování. Z hlediska volby parametrů vzhledem k efektivitě (Obr. 73-a), resp. intenzitě ablace (Obr. 73-b) jsou podstatné následující grafy.



Obr. 73: a) Intenzita ablace; b) efektivita ablace pro fundamentální vlnovou délku v závislosti na intenzitě energie

Intenzita ablace téměř lineárně roste s rostoucí intenzitou energie, jelikož se jedná o stejnou závislost jako z hlediska tloušťky odebrané vrstvy. Pro efektivitu ablace je průběh odlišný, odpovídající průběhům nalezených v literatuře, např. v [53]. Svého maxima nabývá křivka pro $F = 1,95 \text{ J}/\text{cm}^2$, pro které je efektivita úběru $\Delta V/t = 0,15 \text{ mm}^3/\text{min}/\text{W}$. Tato hodnota je asi 3x větší, než byla naměřena ve

studii [55] pro stejnou vlnovou délku. Naopak intenzita ablace byla ve studii [56] naměřena podobná, nicméně pro menší hodnoty intenzity energie.

5.4.2.3 Zvyšování opakovací frekvence

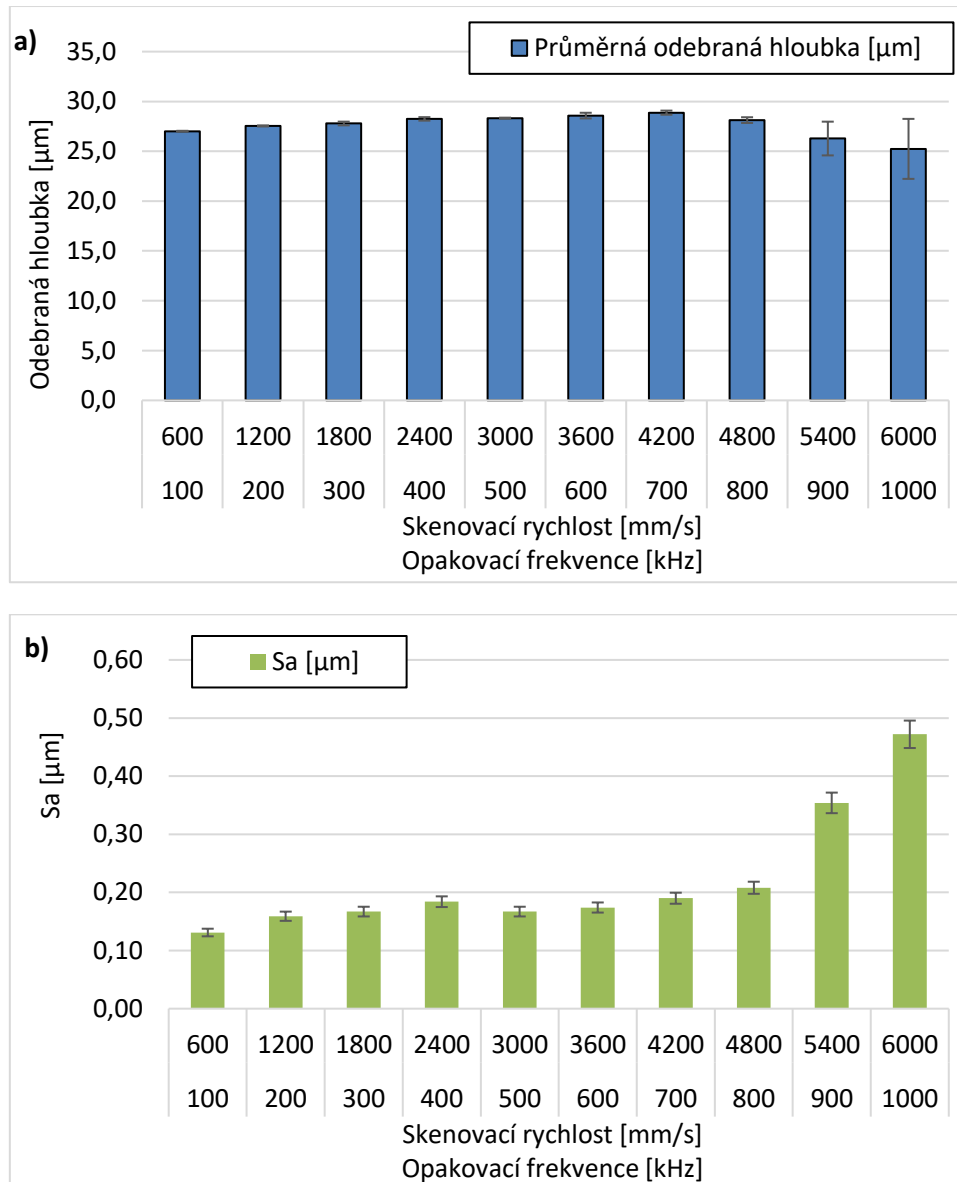
Jednou z metod, které se v literatuře zmiňují pro zvýšení produktivity mikroobrábění laserem je využití vyšších opakovacích frekvencí ($f = Hz$). [76] Pokud zůstane zachován překryv laserových pulsů, zvýší se úměrně i rychlost skenování, což má za následek zrychlení procesu obrábění. Současně s nárůstem opakovací frekvence klesá i energie v pulsu, proto je potřeba úměrně zvýšit průměrný výkon. To je často limitující pro lasery, které umí generovat opakovací frekvence v řádech megahertz, avšak mají nedostatečný výkon a nedochází tak k výraznému zvýšení efektivity procesu. Použitý laserový zdroj Carbide má maximální opakovací frekvenci 1 MHz a průměrný výkon 40 W na první harmonické. Díky tomu je možné dostat do procesu požadovanou energii i pro maximální opakovací frekvenci. K ověření teoretického předpokladu byl navržen experiment. Cílem bylo zvyšování opakovací frekvence a skenovací rychlosti při zachování intenzity energie a překryvu pulsů. Technologické parametry navrženého experimentu jsou v Tab. 11.

Intenzita energie [J/cm ²]	energie v pulsu [μJ]	Překrytí pulsů [%]	Opakovací frekvence [kHz]	Skenovací rychlost [mm/s]	Průměrný výkon [W]
1,95	13,78	80	100	600	0,68
			200	1200	1,37
			300	1800	2,06
			400	2400	2,75
			500	3000	3,44
			600	3600	4,13
			700	4200	4,82
			800	4800	5,51
			900	5400	6,2
			1000	6000	6,89

Tab. 11: Technologické parametry navrženého experimentu k ověření efektivity ablace při zvyšující se opakovací frekvenci pulsů

Experiment byl realizován na stejných vzorcích slinutého karbidu TH10. Laserem bylo vytvořeno celkem 10 čtverečků o délce strany 2,5 mm, s celkovým počtem 50 skenovacích přejezdů a s natočením šraf o 17°. Následně byla změřena jejich hloubka na optickém mikroskopu. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v grafu na Obr. 74. Z grafu je patrné, že se velikosti úběru materiálu pro různé opakovací frekvence významně neliší. Větší směrodatná odchylka od průměrné hodnoty úběru byla pozorována pro skenovací rychlosti nad 5000 mm/s. Takto vysoké skenovací rychlosti jsou již na limitu použité skenovací hlavy, pro kterou výrobce udává dosažitelnou rychlost s požadovanou přesností 5 m/s.

Problémy se projevují zejména na začátcích a koncích skenovaných drah, kde je vysoká dynamika zrychlování a zpomalování rotačního pohybu zrcátka která nestihá být kompenzována. Podobně se tato chyba projevuje i na dosažené drsnosti povrchu, kde pro větší skenovací rychlosti hodnoty S_a rostou. Jako optimální se jeví opakovací frekvence 800 kHz, respektive 700 kHz, pro které je skenovací rychlost 4200, respektive 4800 mm/s. Oproti referenční frekvenci 200 kHz, je zde nárůst v produktivitě až čtyřnásobný. Z hlediska drsnosti povrchu by bylo lepší ještě skenovací rychlost snížit na hodnotu 3600 mm/s.



Obr. 74: a) Průměrná odebraná hloubka; b) drsnost povrchu S_a , pro různé opakovací frekvence a ekvivalentní skenovací rychlosti

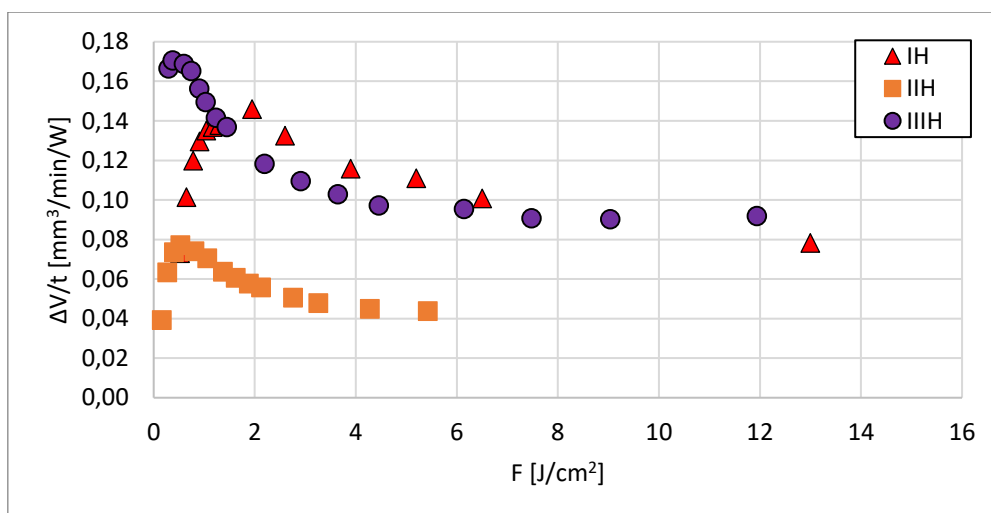
Tento experiment potvrdil, že je možné použít vyšší opakovací frekvence pro zvýšení produktivity laserového procesu, pokud je konstantní energie v pulsu a překryv laserových pulsů. Jako optimální pro další experimenty se jeví opakovací frekvence 600 kHz a skenovací rychlost 3600 mm/s, pro které je trojnásobný nárůst v produktivitě procesu a pouze malý nárůst v drsnosti povrchu. Zároveň u této skenovací rychlosti nebyly pozorovány nepřesnosti v začátcích a koncích skenovaných drah. Tyto výsledky byly také publikovány v [91].

5.4.2.4 Generace harmonických frekvencí

Efektivitu procesu ablace významně ovlivňuje absorpce laserového paprsku materiálem. Faktory ovlivňující absorpci z hlediska dopadajícího laserového paprsku jsou vlnová délka a směr dopadajícího záření. Z hlediska materiálu je důležitá drsnost a barva povrchu, uspořádání krystalové mřížky a chemické složení. Jelikož absorpce záření není stejná pro celý rozsah vlnových délek, je důležité najít optimální vlnovou délku λ dopadajícího světla, pro které bude absorpce největší. Optimální kombinace vlnové délky a materiálu dokáže zvýšit efektivitu až o několik procent. Typickým příkladem je měď, pro kterou je absorpce vlnové délky 1030 nm okolo 15 %, přičemž pro 515 nm je to až 50 %, a pro laserové záření v modrém spektru (360-480 nm) až 60-70%. Znamená to tedy, že pro překonání odrazivosti materiálu je potřeba několikanásobně zvýšit energii laserových pulsů. Na druhou stranu, generace harmonických frekvencí s sebou nese ztráty ve výkonu, které se pohybují okolo 50 %, což může ve výsledku znamenat méně energeticky efektivní proces mikroobrábění.

Stanovení efektivity a intenzity ablace při generování kratších vlnových délek

Jelikož se se snižující vlnovou délkou absorpce slinutého karbidu zvyšuje (dle Obr. 4), byl navržen experiment mikroobrábění laserem při použití různých vlnových délek, které je možné na použitém laserovém zařízení generovat, tedy 1030 nm (IH), 515 nm (IIH) a 343 nm (IIIH). Další technologické parametry byly ve shodě s předchozími experimenty, a to konstantní překryv pulsů 80 %, opakovací frekvence 200 kHz a 50 přejezdy vytvořený čtvereček o velikosti 2,5 x 2,5 mm. Proměnným parametrem byl výkon laseru, resp. intenzita energie, pro kterou bylo zvoleno 14 různých hodnot. Po vytvoření čtverečků byla jejich hloubka a drsnost povrchu změřena na optickém mikroskopu. Z naměřených hloubek byla následně vypočtena efektivita ablace ($\Delta V/t$) a intenzita ablace (ΔV). Výsledné hodnoty efektivity v závislosti na intenzitě energie jsou zobrazeny v grafu na Obr. 75.

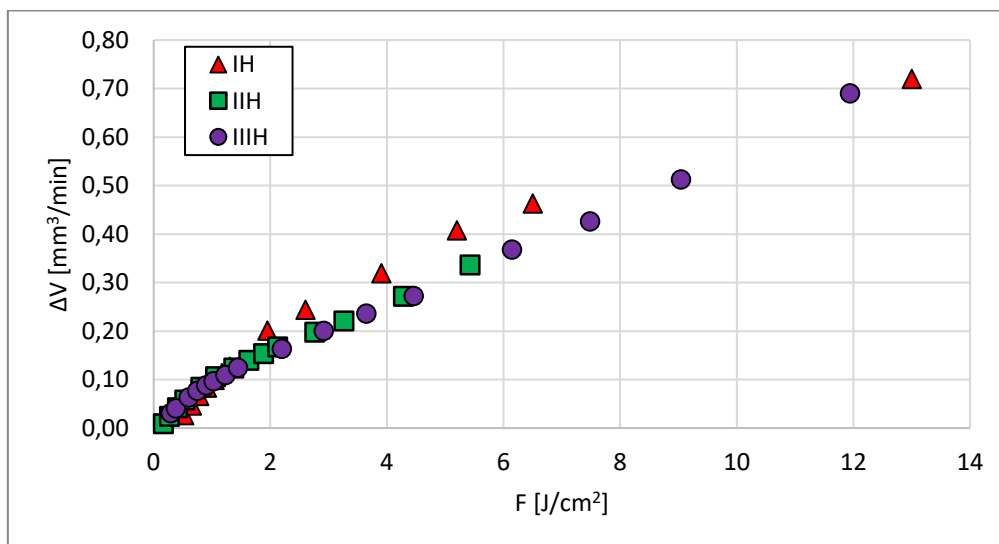


Obr. 75: Efektivita ablace ($\Delta V/t$) v závislosti na intenzitě energie (F) při použití různých vlnových délek - IH (1030 nm), IIH (515 nm), IIIH (343 nm)

Nejvyšší hodnoty efektivity ablace byly naměřeny při použití IIIH s vlnovou délkou 343 nm. Výsledek je zejména ovlivněn energií dopadajících fotonů, která roste se zkracující se vlnovou délkou. Pro různé vlnové délky se také mění ablační prahy materiálu. Tato hodnota má pak přímý vliv na posun grafu v ose x. Maximální hodnota $\Delta V/t$ se totiž teoreticky nachází ve $F = e^2 \cdot F_{th}$. Pro IIIH je také nejmenší

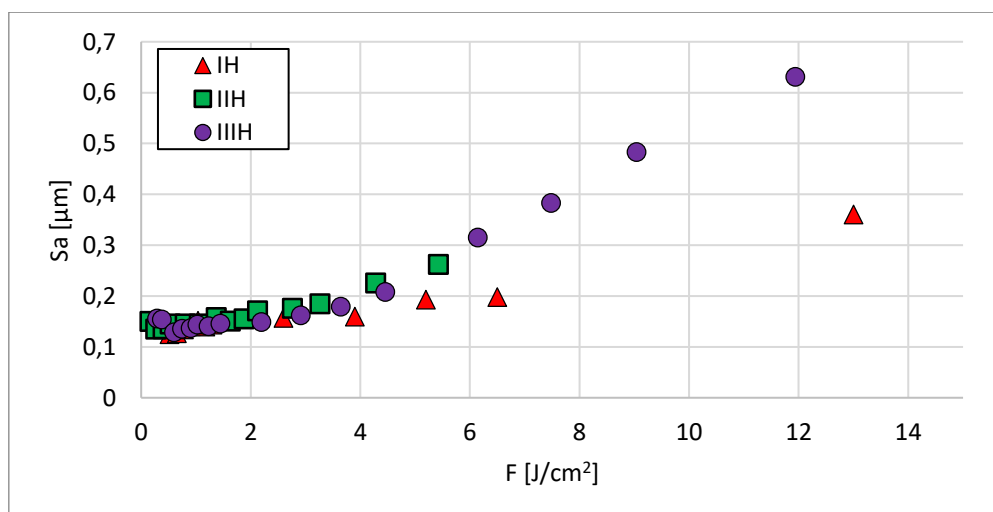
spot, což také ovlivňuje velikost intenzity energie. Nicméně generování IIIH má největší energetickou ztrátu, co se týče účinnosti přenosu energie mezi elektrickou energií a výkonem laseru. Maximální možný výkon pro IIIH je pouze 11 W.

Při porovnání hodnot intenzity ablace (Obr. 76) není mezi harmonickými frekvencemi patrný takový rozdíl jako pro efektivitu ablace. Od $F \approx 2-6 \text{ J/cm}^2$ byla naměřena nejvyšší hodnota ΔV pro IH, nicméně rozdíl oproti IIH a IIIH je minimální.



Obr. 76: Porovnání intenzity ablace slinutého karbidu

Společně se sledováním efektivity úběru materiálu je důležité i srovnání kvality povrchu po laserové ablaci. Pro toto vyjádření byl použit parametr drsnosti povrchu S_a v závislosti na použité intenzitě energie, viz Obr. 77. Z této závislosti je patrný nárůst hodnoty S_a pro vyšší F , zejména od $F \approx 4 \text{ J/cm}^2$. Nejvyšší nárůst byl naměřen pro IIIH, a naopak nejmenší pro IH.



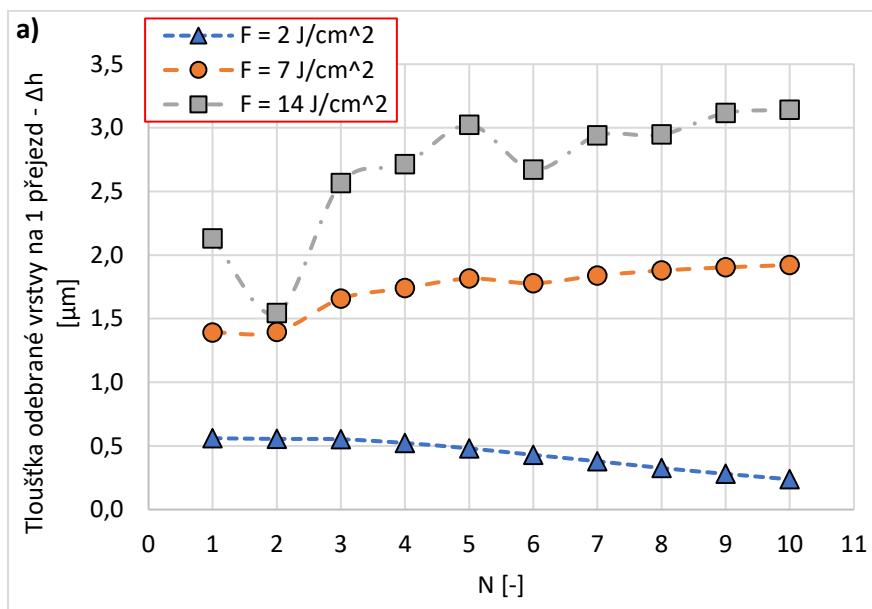
Obr. 77: Drsnost povrchu (S_a) v závislosti na použité intenzitě energie (F) pro různé harmonické frekvence

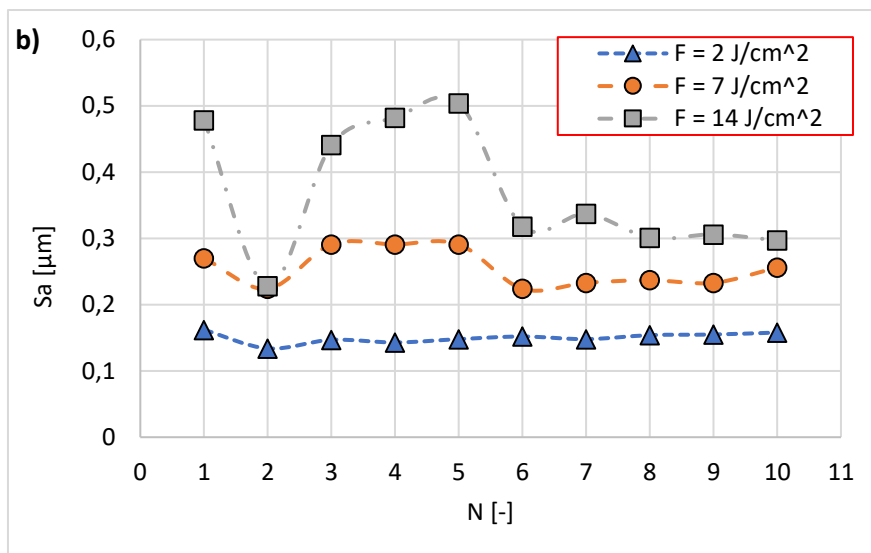
Z výše zmíněných experimentů a jejich následného vyhodnocení je patrné, že nejvyšší efektivity ablace bylo dosaženo pro IIIH. Nicméně pokud se nebere v úvahu přepočítání na jednotku energie, tj. hodnota intenzity ablace, byla nepatrně vyšší hodnota naměřena pro IH. Z porovnání kvality povrchu po procesu

ablace vychází nejlépe použití IH, pro kterou byly naměřeny nejnižší hodnoty drsnosti povrchu S_a i pro vyšší použité intenzity energie. Ačkoliv je pro IH (1030 nm) nejmenší absorpce a nižší efektivita ablace, je vhodné tuto vlnovou délku použít i v dalších experimentech, a to zejména díky dobré kvalitě povrchu po laserovém procesu a možnosti nastavení vyšších průměrných výkonů, a to až do 40 W.

5.4.2.5 Burst mód

Z literatury vyplývá, že generování pulsů v tzv. burstech, výstřelech dokáže zvýšit efektivitu ablace. Bližší popis technologie a aktuálních poznatků v odborné literatuře je v kapitole 2.5.2. Z tohoto důvodu byl navržen a realizován experiment mikroobrábění laserem s využitím generování výstřelů (burstů). Pro použitý femtosekundový laserový zdroj Carbide je možné natavit celkem 10 pulsů v jednom výstřelu. Zároveň je možné natavit interval mezi jednotlivými pulsy v rámci jednoho výstřelu. Dle volby tohoto intervalu je možné dosáhnout vnitřní opakovací frekvenci v řádech MHz, popř. až GHz. Možné je také oba způsoby kombinovat v tzv. Bi-burst módu. Nicméně již předchozí experimenty a zkušenosti ukázaly, že vnitřní opakovací frekvence v řádech GHz s intervalem mezi pulsy v řádech pikosekund vede ke snížení produktivity ablačního procesu díky malé energii v jednotlivých pulsech. Z tohoto důvodu byl navržen experiment pro ověření efektivitu ablace při použití vnitřní opakovací frekvence v desítkách MHz a intervalem mezi pulsy ≈ 15 ns. Experiment byl realizován na stejných vzorcích TH10 jako v předchozích experimentech se stejnými testovacími čtverečky i způsobem evaluace výsledků (měření odebrané hloubky materiálu a drsnosti povrchu). Experiment byl navržen tak, že byly zvoleny tři různé intenzity energie $F = 2, 7, 14 \text{ J/cm}^2$, pro které byl následně otestován kompletní rozsah pulsů v jednom výstřelu $N = 1-10$. Ostatní procesní parametry vstupující do laserového procesu byly zvoleny stejně jako v předchozích experimentech viz např. Tab. 10. Výsledné hodnoty odebraných tloušťek materiálu na jeden skenovací přejezd jsou uvedeny v grafu na Obr. 78-a. Současně byly také měřeny a vyhodnoceny parametry kvality povrchu vyjádřené drsností povrchu S_a viz Obr. 78-b.





Obr. 78: a) Tloušťka odebrané vrstvy na 1 přejezd (Δh) b) drsnost povrchu (S_a) v závislosti na počtu pulsů ve výstřelu (burstu) pro tři různé intenzity energie (F)

Nejmenších úběrů bylo dosaženo při použití $F = 2 \text{ J/cm}^2$. Zároveň byl pozorován klesající trend parametru Δh s rostoucím počtem pulsů N . Opačné chování bylo naměřeno pro $F = 7$ a 14 J/cm^2 . Pro tyto intenzity rostla rychlost úběru téměř lineárně se zvyšujícím se počtem pulsů. Zároveň je ale z průběhů patrný pokles, popř. ne tak progresivní růst pro sudé a liché hodnoty počtu pulsů N . Největší pokles v úběru materiálu byl pozorován pro $N = 2$ pro obě dvě intenzity. Pravděpodobné vysvětlení tohoto výkyvu spočívá v samotné podstatě burst módu, jehož hlavní předností je vysoká opakovací frekvence pulsů vedoucí k obrábění nezrelaxovaného materiálu. Nicméně pro $N = 2$ dochází k odstínění laserového pulsu oblakem plasmy vzniklé po interakci s prvním pulsem. Výsledkem je pak značný nebo úplný pokles energie druhého pulsu a tím i k poklesu efektivity ablace. Ke stejným jevům dochází každou sudou hodnotu N , nicméně pro vyšší hodnoty N nebyl pozorován tak významný pokles v množství odebraného materiálu. Naopak pro liché pulsy dochází vždy k nárůstu úběru. Pro vyšší intenzitu energie jsou rozdíly mezi úběry patrnější. Nejvyššího nárůstu v hodnotě Δh bylo dosaženo při použití deseti pulsů v jednom výstřelu, a to o 47 % více než bez použití burst módu. Dosažená drsnost povrchu částečně kopíruje poklesy a nárůsty v tloušťce odebraného materiálu. Pro $N=2$, kde byl pozorován nejvyšší pokles je také hodnota S_a nejnižší. Zajímavý je také trend pro intenzity $F = 7$ a 14 J/cm^2 , pro které dochází k významnému poklesu S_a pro $N = 6 - 10$.

Pro větší intenzity energie a lichý počet pulsů je vhodné burst mód pro dokončování použít, jelikož může dojít k nárůstu úběru materiálu a zlepšení kvality povrchu za stejný čas obrábění.

5.5 Možnosti dokončení povrchu po hrubování

Navržený komplexní přístup sestávající se z nanosekundového hrubování a femtosekundového dokončování povrchu slinutého karbidu bylo nejprve potřeba ověřit na rovinných vzorcích. Nebylo totiž z literatury zcela zřejmé, zda je možné povrch po hrubování femtosekundovým laserem dokončit. Na rozdíl od klasického obrábění, kdy při nastavení daného úběru materiálu k tomuto úběru dochází, je laserový proces bezkontaktní a úběr materiálu založen na ablací povrchu. Dochází tedy k rovnoměrnému úběru jak na vrcholcích nerovností, tak i v údolích. Může tedy být značně problematické drsnost povrchu po hrubování snížit. Z tohoto důvodu se zdá být nezbytné, aby kromě

ablace docházelo i k částečnému tavení materiálu a tím tak k zahlazování nerovností na povrchu. Pro hrubování byly zvoleny optimální parametry z přechozích experimentů a jsou uvedeny v Tab. 12.

Intenzita energie, F (J/cm^2)	49,5
Opakovací frekvence, f [kHz]	200
Překrytí pulsů, S_x, H_y (%)	50 %
Počet přejezdů, N_p (-)	50

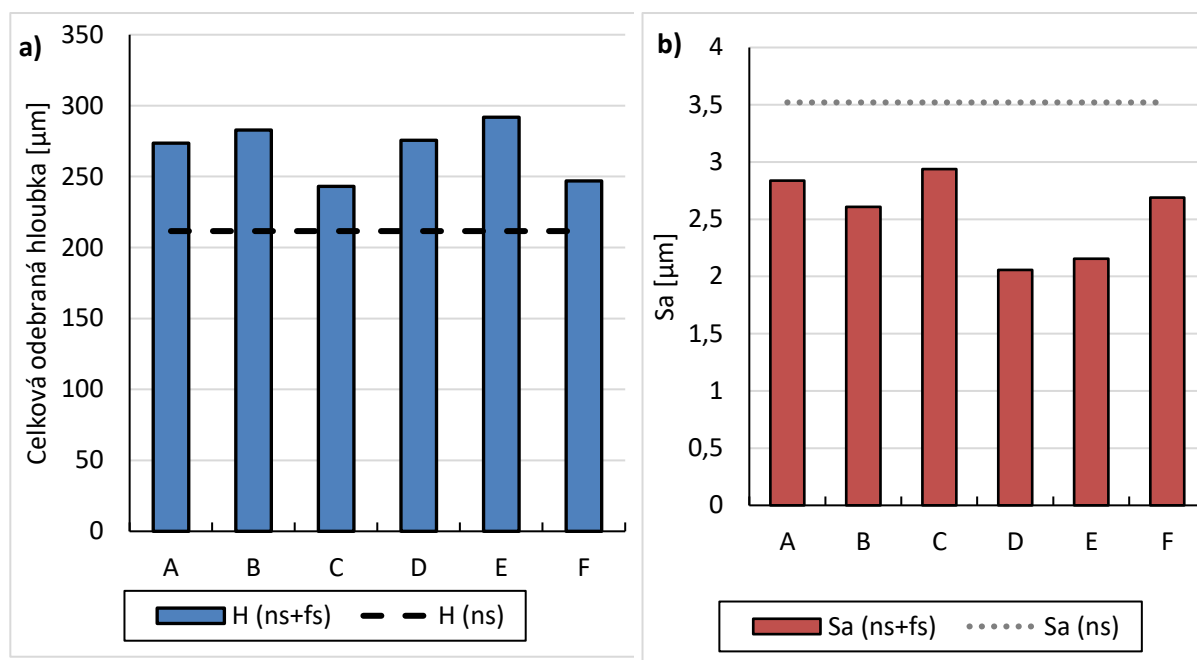
Tab. 12: Zvolené parametry hrubování pro ověření možnosti dokončení povrchu

Po vyhrubování šesti čtverečků stejnými parametry byly nastaveny technologické parametry pro dokončování. Ty byly záměrně nastaveny s vyšší intenzitou energie, aby docházelo i k částečnému tavení povrchu při obrábění. Zároveň byla nastavena opakovací frekvence 200 kHz a skenovací rychlost 1200 mm/s odpovídající překryvu pulsů 80 %. V experimentu byl také sledován vliv burstů pro $N = 3$. Celkem bylo vytvořeno 6 vzorků, s proměnným parametrem intenzity energie, počtu přejezdů a burstů. Popis použitých parametrů včetně označení vzorků je v Tab. 13.

Označení vzorku	A	B	C	D	E	F
F (J/cm^2)	5,8	8,9	8,9	5,8	8,9	8,9
f (kHz)	200					
v (mm/s)	1200					
Počet přejezdů N_p (-)	50	50	20	50	50	20
Burst N (-)	-	-	-	3	3	3

Tab. 13: Označení vzorků včetně použitých procesních parametrů pro jejich výrobu

Fs laserem dokončené čtverečky byly analyzovány na optickém mikroskopu, kde byla měřena jejich hloubka a drsnost povrchu. Následně byly tyto hodnoty porovnány s hodnotami po hrubování. Tato data jsou uvedena v grafech na Obr. 79.



Obr. 79: a) Celková odebraná hloubka; b) drsnost povrchu, při komplexním přístupu (ns+fs) včetně hodnoty pouze po hrubování (ns)

Z grafu celkové odebrané hloubky vyplývá, že použití burstů vede k většímu úběru, zejména pro intenzitu energie $F = 8,9 \text{ J/cm}^2$. Pro 50 přejezdů s touto intenzitou byla naměřena celková hloubka 291 μm , úběr dokončováním je 80 μm . Nejmenší drsnost povrchu byla naměřena pro vzorek D, vytvořený 50 přejezdy s intenzitou $5,8 \text{ J/cm}^2$ a s $N = 3$. V porovnání se stejnými podmínkami vede použití burstů ke zlepšení Sa o $0,83 \text{ μm}$.

Z výsledků tohoto experimentu vyplývá, že bude potřeba použití burstů pro dokončování, aby došlo k odebrání drsnosti povrchu po hrubování. Z hlediska intenzity energie nebyl pozorován velký rozdíl na schopnosti odstranit nerovnosti po hrubování. Postačující pro dokončování proto bude intenzita $5,8 \text{ J/cm}^2$, pro kterou bude možné dosáhnout zvýšení produktivity díky zvýšení opakovací frekvence. Podstatné je také sledování celkového trendu, a to že žádné ze zvolených podmínek nevedli k úplnému zahlazení povrchu. Výchozí drsnost povrchu po hrubování je proto dalším zásadním parametrem, která ovlivňuje možnosti povrch dokončit. Tyto vlastní výsledky byly také publikovány v [91].

5.6 Stanovení optimálního přídatku pro dokončování

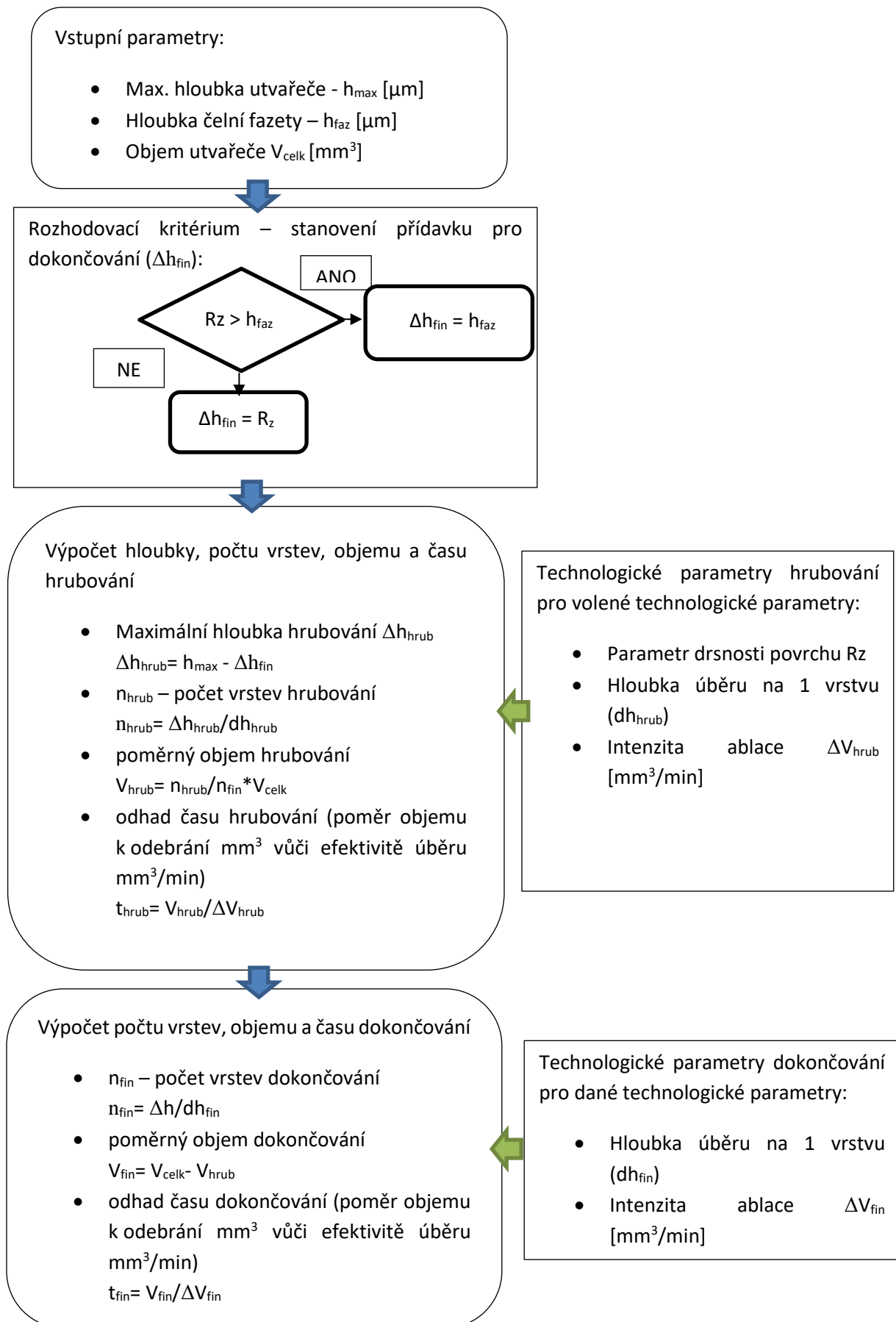
Pro rozdělení vytvářené entity na hrubovací a dokončovací proces je klíčové stanovení přídatku pro dokončování, tj. hloubky, která bude odebrána femtosekundovým laserem. Tento přídatek je nutné nastavit s ohledem na požadovanou výslednou kvalitu a funkčnost utvařeče třísek vzhledem k očekávanému negativnímu ovlivnění po nanosekundovém hrubování. Z tohoto důvodu byl navržen rozhodovací mechanismus, podle kterého se bude hloubka dokončování stanovovat. Myšlenou vytvářenou entitou je v tomto případě utvařeč třísek na řezném nástroji s čelní fazetou umístěný v těsné blízkosti řezné hrany. Myšlenou funkcí utvařeče třísek je zachování kvality řezné hrany v případě že i na ní dochází k ovlivnění laserovým paprskem. Může tak vzniknout na řezné hraně čelní fazeta s určitou hloubkou oproti rovině čela (h_{faz}). Zachování maximální kvality této plochy spolu s poloměrem ostří je podstatné pro zachování funkčnosti nástroje. Z tohoto důvodu je přídatek pro dokončování částečně volen také podle hloubky čelní fazety. Rozhodovací podmínkou je, zda maximální očekávaná výška nerovností povrchu po hrubování (R_z resp. S_z) je větší než hloubka čelní

fazety. Pokud platí, že $Rz > h_{faz}$ je přídavek pro dokončování roven hloubce čelní fazety ($\Delta h_{fin} = h_{faz}$). V opačném případě je přídavek pro dokončování roven velikosti Rz ($\Delta h_{fin} = Rz$). Vhodné by mohlo být používat pro stanovení přídavku pro dokončování pouze parametr Rz , nicméně část utvařeče vzdálenější od řezné hrany neklade takové nároky na kvalitu povrchu, a proto může být volen přídavek menší, než je velikost Rz .

5.7 Prediktivní empirický model pro stanovení optimálního přídavku pro dokončování a dalších technologických parametrů

Hodnota přídavku pro dokončování je dalším vstupním parametrem pro výpočet potřebného počtu vrstev pro hrubování a dokončování. Počty jednotlivých odebíraných vrstev jsou pak přímým vstupem do laserového procesu. Z tohoto důvodu byl navržen prediktivní model, který na základě požadovaného tvaru utvařeče stanoví přídavek pro dokončování, počty vrstev pro hrubování a dokončování a odhadne čas celého procesu. Vstupem do prediktivního modelu je na základě modelu utvařeče stanoven jeho celkový objem (V_{celk}), maximální hloubka (h_{max}) a hloubka čelní fazety oproti rovině čela (h_{faz}). Součástí tohoto modelu je také volba parametrů hrubování ze tří různých výkonů laseru. Relativně malý výkon laseru vede k lepší kvalitě povrchu po hrubování což vyžaduje také menší hloubku k dokončování a naopak. Každý z výkonů má z předchozích testů přiřazené parametry maximální výšky nerovností povrchu (Rz) v závislosti na hloubce úběru, hloubku úběru na jednu vrstvu (dh_{hrub}) a intenzitu ablace (ΔV_{hrub}). Na základě těchto parametrů a vstupních podmínek jsou dopočítány výstupní parametry vstupující již do laserového procesu: maximální hloubka hrubování Δh_{hrub} , počet vrstev pro hrubování n_{hrub} , poměrný objem hrubování V_{hrub} a stanoven odhad času hrubovacího procesu t_{hrub} . Stejný postup následuje i u procesu dokončování, pro který byly nastaveny pouze jedny podmínky, a to intenzita energie $F = 5,8 \text{ J/cm}^2$. Tyto procesní parametry mají stejně jako u hrubovacích podmínek přiřazenou hloubku úběru na jednu vrstvu (dh_{fin}) a intenzitu ablace (ΔV_{fin}), vycházející z výsledků z předchozích experimentů. Obdobně jsou pak stanoveny parametry pro dokončování: počet vrstev dokončování n_{fin} , poměrný objem dokončování V_{fin} a odhad času dokončování t_{fin} .

Výstupem tohoto prediktivního modelu je doporučení optimálního výkonu laseru pro hrubování vedoucího k maximální produktivitě při očekávané stejné kvalitě povrchu a s tím související potřebný počet odebíraných vrstev pro hrubování a dokončování spolu s odhadem času celého procesu. Logika modelu je schematicky zobrazena na Obr. 80.



Obr. 80: Schematické znázornění prediktivního modelu sloužícího k určení optimálního přídávku pro dokončování

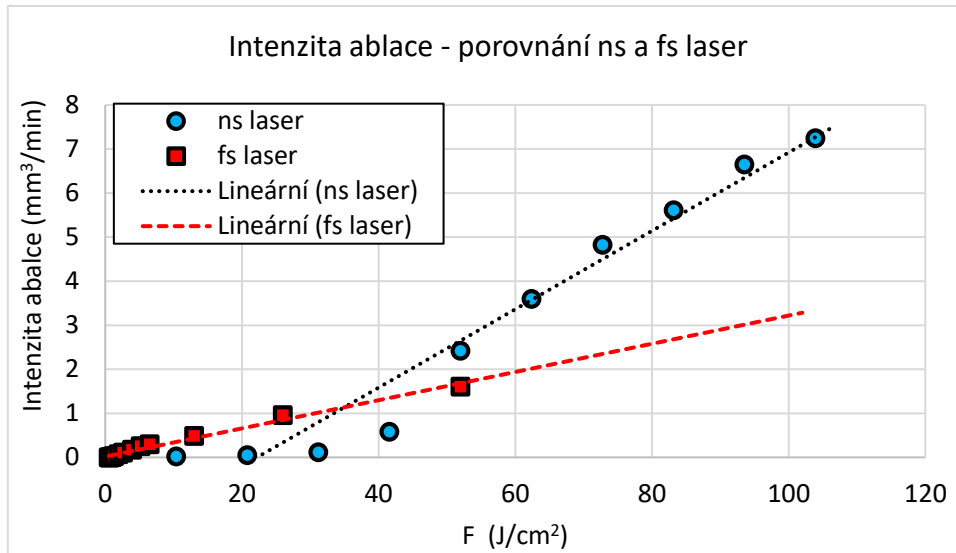
5.8 Dílčí shrnutí

Testování interakce laserového záření se slinutým karbidem s označením TH10 bylo rozděleno do několika fází. Nejprve byl popsán testovaný materiál a použita laserová zařízení – nanosekundový laserový zdroj (200W-EP-Z, SPI) a femtosekundový laserový zdroj (Carbide, Light Conversion). Dále byly navrženy a realizovány experimenty k určení optimální skenovací strategie a pro nastavení vhodných zpoždění galvoskenneru včetně nastavení funkce skywriting. Při použití liniového šrafování byl jako optimální úhel natočení šraf stanoven úhel 17°.

U nanosekundového hrubování byl stanoven optimální průběh pulsu – waveform s označením 0. Tato vlna má optimální opakovací frekvenci 200 kHz pro kterou generuje energii v pulsu 1,05 J/cm². Následně byly stanoveny optimální překryvy pulsů, které vedou k dobré produktivitě a kvalitě povrchu. Optimální překryv pulsů byl v obou směrech šrafování stanoven na 50 % a optimální intenzita energie v rozsahu od 40-60 J/cm², což při opakovací frekvenci 200 kHz odpovídá 60 - 80 W. Pro menší intenzity energie nebo naopak pro větší překryv pulsů dochází k nárůstu drsnosti povrchu, který je způsoben rozdílnými teplotami tavení obou složek slinutého karbidu. Se stanovenými technologickými parametry byly vytvořeny entity, u kterých byla analyzována tepelně ovlivněná oblast (TOO) a drsnost povrchu pro různé dosažené hloubky úběru. TOO byla analyzována na elektronovém mikroskopu a projevuje se jako oblast ve které absentuje pojivový kobalt. Bylo zjištěno, že tato oblast je velká jen několik mikrometrů a příliš se s odebranou tloušťkou materiálu nezvyšuje. Jako klíčové se proto ukázala drsnost povrchu, zejména pak parametr Sz, který charakterizuje maximální výšku nerovností v měřené oblasti. Parametr Sz navíc roste s odebranou hloubkou, a to podle logaritmické závislosti, která byla vytvořena a popsána. Znalost tohoto parametru se následně ukázala jako klíčová pro stanovení přídatku pro dokončování.

Odlíšný postup byl zvolen pro stanovení optimálních technologických parametrů pro dokončování. V prvním kroku byl stanoven ablační práh, $F_{th} = 0,16 \text{ J/cm}^2$. Se znalostí této hodnoty byly provedeny experimenty k určení intenzity a efektivity ablace. Byl stanoven optimální rozsah podmínek intenzity energie $F = 4-9 \text{ J/cm}^2$, pro které dochází k většímu úběru materiálu v čase a zároveň nedochází k výraznému zhoršení kvality povrchu. Vyšší intenzity energie byly zároveň voleny s ohledem na nutnost dokončení již obrobeného povrchu. Následně byly provedeny experimenty, které dle literární rešerše mohou zvýšit efektivitu ablace. Nejprve byl realizován experiment se zvýšením opakovací frekvence při zachování intenzity energie a překryvu pulsů a dále byl vyzkoušen burst-mód. Jedná se metodu generování pulsů ve výstřelech, tzv. burstech, které díky změně způsobu interakce pulsů a materiálu mohou zvýšit efektivitu procesu. Obě tyto metody vedly ke zvýšení efektivity ablace až čtyřnásobně, a to zejména pro vyšší intenzity energie. Pro další experimenty proto byly zvoleny podmínky zvýšené opakovací frekvence (600 kHz), odpovídající skenovací rychlosti (3600 mm/s) a použití lichého počtu pulsů v jednom burstu. Na závěr testů interakce femtosekundového laseru s materiálem byla měněna vlnová délka na 515 nm (IIH) a 343 nm (IIIH), nicméně jako optimální byla stanovena vlnová délka 1030 nm pro kterou je možné dosáhnout nejvyššího průměrného výkonu (40W).

Z testů interakce obou laserů se slinutým karbidem byla potvrzena původní myšlenka, a to že většího odebraného objemu materiálu v čase je možné dosáhnout pro nanosekundové pulsy viz Obr. 81.



Obr. 81: Porovnání intenzity ablace ns a fs laseru při fundamentálním nastavení

Se základními znalostmi interakce paprsku laserů s materiálem byly provedeny první experimenty k ověření komplexního přístupu, a to použití nanosekundového laseru pro hrubování a femtosekundového pro dokončování povrchu. Byly vytvořeny vzorky stejnými parametry pro hrubování, které byly následně dokončeny různými procesními parametry (intenzita energie, burst, počet přejezdů). Z experimentu vyplynulo, že použití burstů vede k větší schopnosti odebrat nežádoucí drsnost povrchu po hrubování, stejně tak jako větší počet přejezdů. Minoritní vliv na eliminování negativní drsnosti povrchu byl pozorován u intenzitu energie. Ukázalo se, že femtosekundovým laserem je možné TOO a drsnost povrchu odebrat, resp. snížit, nicméně je podstatná i výchozí kvalita povrchu po hrubování.

Na závěr kapitoly byl definován prediktivní empirický model, který na základě vstupních parametrů o vytvářené entitě (utvařeci třísek) určuje velikost přídatku pro dokončování. Podstatou tohoto modelu je rozhodovací algoritmus, který na základě celkové hloubky utvařeče a hloubky odsazení čelní fazety stanovuje, zda bude přídatek pro dokončování stanoven podle parametru Sz nebo právě podle velikosti odsazení čelní fazety. Toto rozhodovací kritérium bylo zvoleno na základě nutnosti vysoké kvality řezné hrany, která by měla být primárně obráběna pouze femtosekundovým laserem. Výstupem tohoto prediktivního empirického modelu je doporučení jednoho ze tří výkonů laseru pro hrubování vedoucího k maximální produktivitě při očekávané stejné kvalitě povrchu a s tím související potřebný počet odebíraných vrstev pro hrubování a dokončování spolu s odhadem času celého procesu.

6 Ověření navržené metodiky

K ověření navržené metodiky pro efektivní úběr materiálu laserem byl proveden experiment, jehož cílem bylo komplexním způsobem vytvořit utvařecí třísek do nástrojového materiálu ze slinutého karbidu (TH10). Následně pak ověřit jeho vlastnosti při testu obrábění a porovnat jeho řezivost s konvenčně vytvořenými utvařeči, jak lisovaným, tak vytvořenými laserem klasickým způsobem.

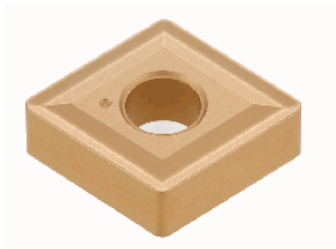
6.1 Návrh experimentu

Pro experimenty byly od výrobce nástrojů Tungaloy pořízeny destičky s geometrií typu C s úhlem 80° a poloměrem rádiusu $0,8\text{ mm}$ z materiálu TH10. Pořízeny byly dva typy – s utvařečem označením CNMG120408 a bez utvařeče s označením CNMA120408. Utvařeč na těchto nástrojích byl vytvořen lisováním a slouží v testech jako referenční. Jeho geometrie byla analyzována a následně replikována technikami laserového mikroobrábění do nástrojů bez utvařeče. Utvařeče byly vytvořeny dvěma typy laserů – s femtosekundovými a nanosekundovými pulsy a jejich kombinací, zkoumaným komplexním přístupem. Po vytvoření byly utvařeče opět analyzovány a porovnány s referenční lisovanou geometrií. Zároveň byla provedena metalografická analýza mikrostruktury pod povrchem. Následně byla zkoumána řezivost nástrojů v testu obrábění oceli podélným soustružením. Vyhodnocena byla jejich trvanlivost, schopnost utvářet třísku, drsnost obrobeného povrchu a řezné síly. Vzorky na konci trvanlivosti byly znovu analyzovány na mikroskopu pro porovnání jejich opotřebení.

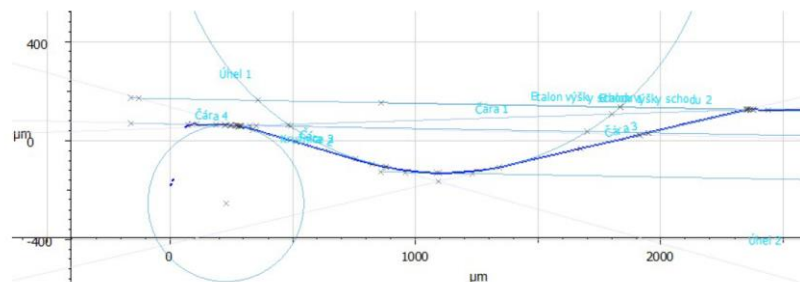
6.2 Analýza konvenčně vyráběného nástroje

Vyměnitelná břitová destička s označením CNMG120408 (Obr. 82-a) má utvařeč třísek vytvořený lisováním při slinovacím procesu. Detailní analýza nástroje byla provedena na 3D optickém měřicím přístroji (InfiniteFocusG5) viz profil na Obr. 82-b.

a)



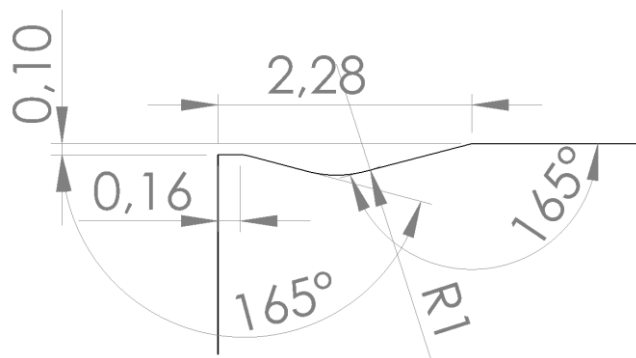
b)



Obr. 82: a) Vyměnitelná břitová destička s označením CNMG120408 s utvařečem a) pohled na celou VBD; b) profil geometrie utvařeče

Profil utvařeče byl následně vymodelován, aby bylo možné data ve formátu *.stl* přenést do laserového zařízení. Další variantou vytvoření modelu entity mohou být metody reverse engineeringu, které jsou založeny na trasování naskenovaného modelu pomocí ploch a křivek. I pro tyto metody platí potřeba vytvoření negativního modelu laserem vytvářené entity, tak aby bylo možné naprogramovat dráhy pro pohyb laserového paprsku.

Detailní pohled na překreslený profil utvařeče včetně zakótování hlavních rozměrů je na Obr. 83. Celková hloubka utvařeče je $280\text{ }\mu\text{m}$, jeho vzdálenost od řezné hrany $0,16\text{ mm}$ a hloubka čelní fazety proti zbytku čela nástroje je $0,1\text{ mm}$.

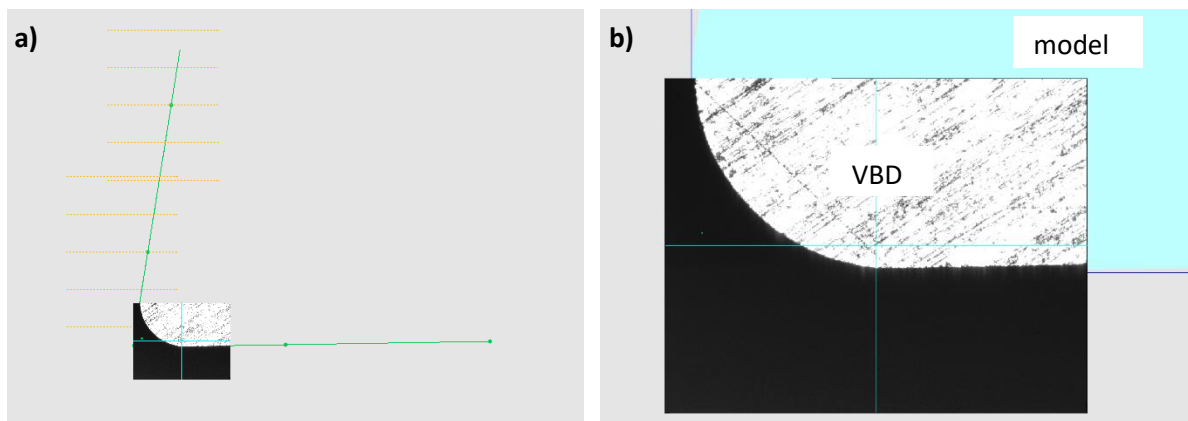


Obr. 83: Výkres utvařeče třísek včetně hlavních kót

Výsledný model byl nakreslen delší o 0,04 mm na čelní fazetě kvůli přidavku na hraně, tak aby nedošlo k možnému nedopálení řezné hrany.

6.3 Výroba utvařečů třísek laserem

Celkem byly laserem vytvořeny tři varianty utvařečů, a to pouze femtosekundovým laserem, pouze nanosekundovým a komplexním přístupem. Postup výroby utvařečů jednotlivými způsoby je popsán níže. Po vložení VBD destičky do stroje bylo potřeba správně polohovat model vůči nástroji tak aby byly zachovány rozměry fazety. Při nesprávné pozici nebo nepřesahování modelu přes hranu VBD hrozí, že se vytvoří nežádoucí ostrá obruba na řezné hraně. Z tohoto důvodu byl model nakreslen větší o 40 μm . O tento rozměr bylo nutné model přesadit oproti řezné hraně. K určení polohy byl využit kamerový zaměřovací modul s automatickým rozeznáváním hran implementovaný přímo ve stroji. Rozeznávací rozhraní využívá kontrastů mezi materiálem VBD a okolím a s přesností na $\pm 3 \mu\text{m}$ dokáže určit řeznou hranu, popřípadě i špičku nástroje a jeho natočení (Obr. 84-a). Nalezené souřadnice X a Y byly následně odsazeny od hrany o přídavek, jak je vidět na modelu a VBD na Obr. 84-b.



Obr. 84: a) zaměřovací rozhraní pro určení řezné hrany; b) nastavení pozice modelu vůči VBD

6.3.1 Výroba utvařeče – pouze femtosekundový laser

Pro vytvoření utvařeče byl použit radiální způsob laserového mikroobrábění řízeného 3D modelem, který byl rozdělen do vrstev o definované tloušťce. Tloušťka vrstvy vychází z poznatků úběrů materiálů při zvolených technologických podmínkách viz. Kapitola 5.4.2. Mezi jednotlivými vrstvami dochází k posuvu skenovací hlavy v ose Z, tak aby byla zajištěna správná fokusace. K odebrání materiálu v jednotlivých vrstvách bylo využito šrafování s natočením mezi jednotlivými vrstvami o 17°. Rozteč

mezi jednotlivými šrafy byla dána parametrem H_v , který byl shodný s překryvem pulsů ve směru skenování S_x .

λ [nm]	1030
τ	275 fs
f [kHz]	600
S_x, H_y [%]	80
v [mm/s]	3600
P [W]	15,5
F [J/cm ²]	5,8
burst	3
n přejezdů [-]	176
čas výroby [s]	290

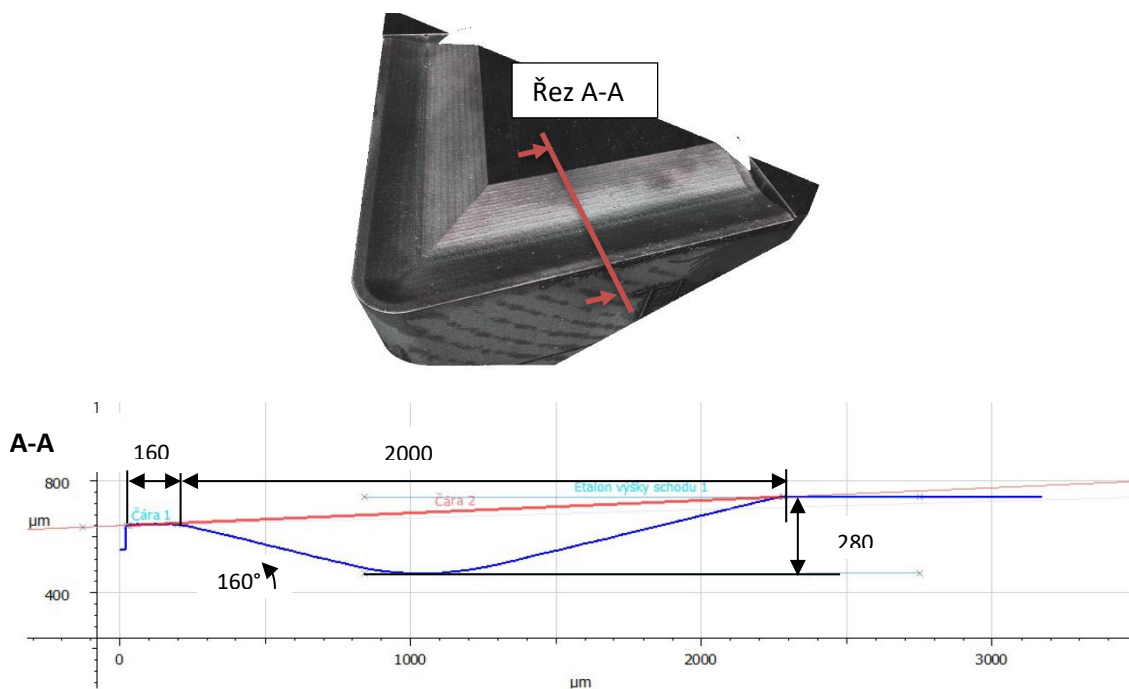
Tab. 14: Technologické parametry použité k výrobě utvařeče třísek - jen fs laser

Využity byly znalosti z předchozích experimentů a použita opakovací frekvence 600 kHz, skenovací rychlost 3600 mm/s a intenzita 5,8 J/cm². Pro výrobu utvařeče bylo potřeba 290 sekund. Podoba laserem vytvořeného utvařeče třísek v porovnání s broušeným je na Obr. 85.



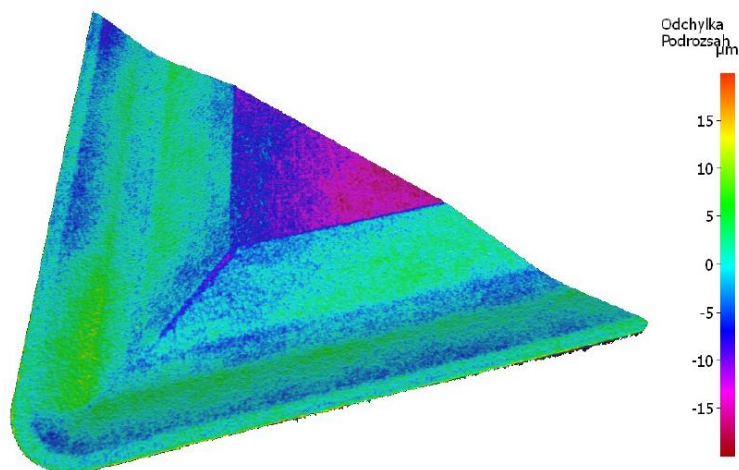
Obr. 85: Fotografie lisovaného a femtosekundovým laserem vytvořeného utvařeče třísek

Vytvořený utvařeč byl nasnímán na mikroskopu a podroben analýze rozměrů. Obrázek 3D skenu vytvořeného utvařeče třísek je na Obr. 86.



Obr. 86: 3D sken utvařeče třísek vytvořeného pouze fs laserem a příčný řez utvařečem s vyznačenými hlavními rozměry v mikrometrech

Pro detailní porovnání s broušeným utvařečem byla použita diferenční analýza (Obr. 87), při které se oba skeny přeloží a dojde k automatickému vyznačení rozdílů. Z této analýzy vyplývá, že maximální rozdíl broušeného a femtosekundovým laserem vytvořeného utvařeče je do 15 μm .



Obr. 87: Diferenční analýza broušeného a femtosekundovým laserem vytvořeného utvařeče

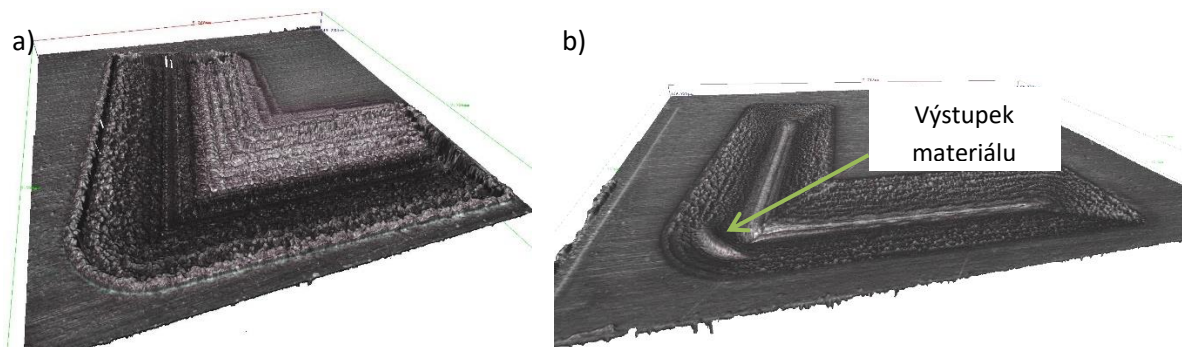
6.3.2 Výroba utvařeče – pouze nanosekundový laser

Pro výrobu utvařeče pouze nanosekundovým laserem byl využit stejný 3D model rozdělený po vrstvách dle úběru na jednu skenovanou vrstvu. Technologické parametry byly zvoleny na základě předchozích experimentů popsaných v kapitole 5.4.1 a jsou shrnuty v Tab. 15. Pro výrobu bylo využito stejné strategie, tedy liniové šrafování modelu v jednotlivých vrstvách. Výhodou nanosekundového laseru je jeho velká hloubka ostrosti cca 2 mm což umožňuje vytvořit více vrstev bez nutnosti přeastřování. Díky tomu je ušetřeno několik vteřin neproduktivního výrobního času oproti femtosekundovému laseru. Hlavní ušetření času je ale v hloubce úběru na 1 přejezd laseru, která byla cca 3,3 μm .

λ [nm]	1064
wf [-]	0
τ [ns]	230
P [W]	60
f [kHz]	200
F [J/cm^2]	31,1
Sx, Hy [%]	50
v [mm/s]	3600
n přejezdů [-]	84
čas výroby [s]	39

Tab. 15: Technologické parametry použité pro výrobu utvařeče - pouze nanosekundový laser

Nevýhodou tohoto procesu je tepelné ovlivnění materiálu a značná drsnost povrchu, jak je vidět na Obr. 88-a. Kromě tepelných procesů zde nastává také značné tavení materiálu v místech akcelerace a decelerace zrcátek skeneru. Řešením v tomto případě může být využití konturového šrafování (Obr. 88-b). Konturový šraf v jednotlivých vrstvách následuje tvar vytvářené geometrie od kraje ke středu.



Obr. 88: Utvařeč třisek vytvořený nanosekundovým laserem: a) pouze liniovým šrafováním; b) pouze konturovým šrafováním

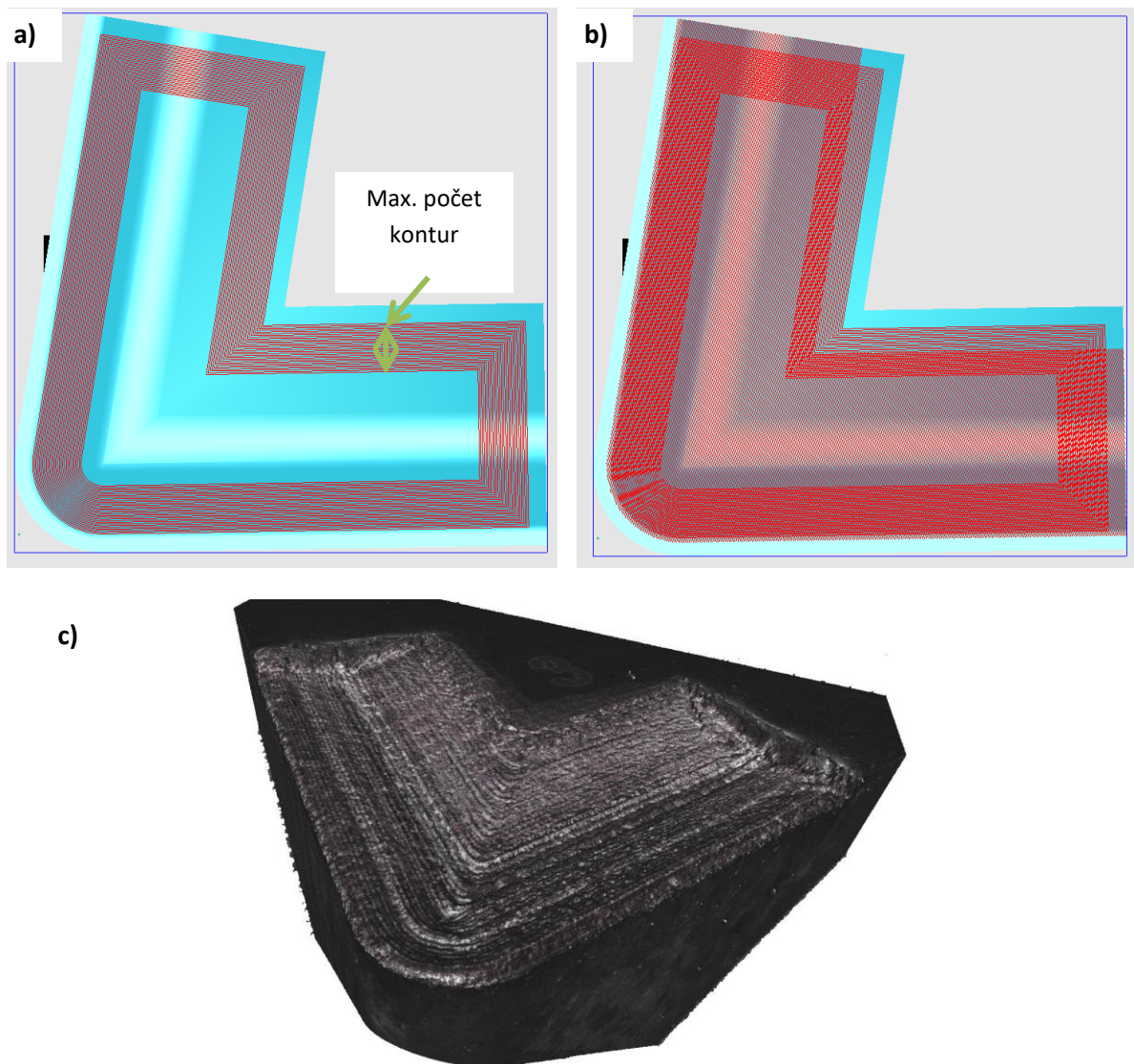
Díky tomu je limitován rozjezd a brždění zrcátek skeneru na okraje utvařeče, které jsou již mimo hlavní oblast řezu při obrábění. Nevýhodou tohoto šrafu je oblast uprostřed utvařeče kde se geometrie potkávají. To může způsobovat těžko řešitelné geometrické prvky které se negativně projeví do tvaru povrchu utvařeče. Tento jev je patrný i u vytvořeného utvařeče, kde je patrný výstupek materiálu (Obr.

λ [nm]	1064	
wf	0	
τ [ns]	230	
f [kHz]	200	
Sx, Hy [%]	50	
v [mm/s]	3600	
typ procesu	hrubovací	semi-dokončovací
P [W]	70	60
F [J/cm ²]	38,6	31,1
typ šrafu	linie	kontury
max. počet kontur	-	30
n přejezdů [-]	75	27
čas výroby	48 s	
Maximální hloubka	320 μm	
Hloubka fazety	120 μm	
Délka fazety	155 μm	

88-b). I přes to, že je kvalita povrchu lepší než pro liniový šraf, tyto výstupky a jiné útvary mohou způsobit problémy při obrábění. Jako vhodné se proto jeví zkombinování obou procesů, kde by byl liniový šraf použit jako hrubovací proces a konturový šraf jako dokončovací, resp. semi-dokončovací proces u komplexního přístupu. Pro hrubovací proces byl použit liniový šraf a výkon laseru 70 W s ostatními technologickými parametry shodnými s předchozími vzorky, viz Tab. 16.

Tab. 16: Technologické parametry použité pro výrobu utvařeče nanosekundovým laserem včetně dosaženého času výroby a hlavních rozměrů

Jako semi-dokončovací proces bylo použito konturové šrafování, s tím, že se nesledovaly kontury celého vzorku ale pouze maximálně prvních 30 jak je vidět na Obr. 89. To mělo za následek vytvoření obálky tvaru utvařeče a efektivní obrobení pouze negativní drsnosti povrchu vzniklé po liniovém šrafování. Výsledkem tohoto procesu byl utvařeč s požadovaným tvarem a dobrou kvalitou povrchu (Obr. 89-c).



Obr. 89: Strategie šrafování použité pro výrobu utvařeče ns laserem: a) konturový šraf s vyznačeným maximálním počtem kontur; b) spojení liniového a konturového šrafování

6.3.3 Výroba utvařeče – komplexní přístup

Výroba utvařeče navrženým komplexním přístupem se sestává z kombinace nanosekundového laserového hrubování a femtosekundového laserového dokončování. Pro výrobu utvařeče komplexním přístupem byly použity parametry, které byly vybrány pro výrobu utvařeče pouze nanosekundovým a pouze femtosekundovým laserem. Bylo to zejména z důvodu toho, aby se jednotlivé výsledky daly mezi sebou porovnat a nemohlo dojít ke zkreslení výsledků vlivem různého nastavení jednotlivých laserů. Technologické parametry pro hrubování i dokončování byly výsledkem optimalizačního procesu, tak aby se jednalo o co možná nejefektivnější proces s dostatečnou kvalitou povrchu. Klíčovým parametrem pro realizaci laserového mikroobrábění komplexním přístupem je stanovení přídávku pro dokončování. U realizovaného vzorku byl přídavek pro dokončování stanoven na základě prediktivního modelu a experimentálních dat z dílčích experimentů laserového mikroobrábění.

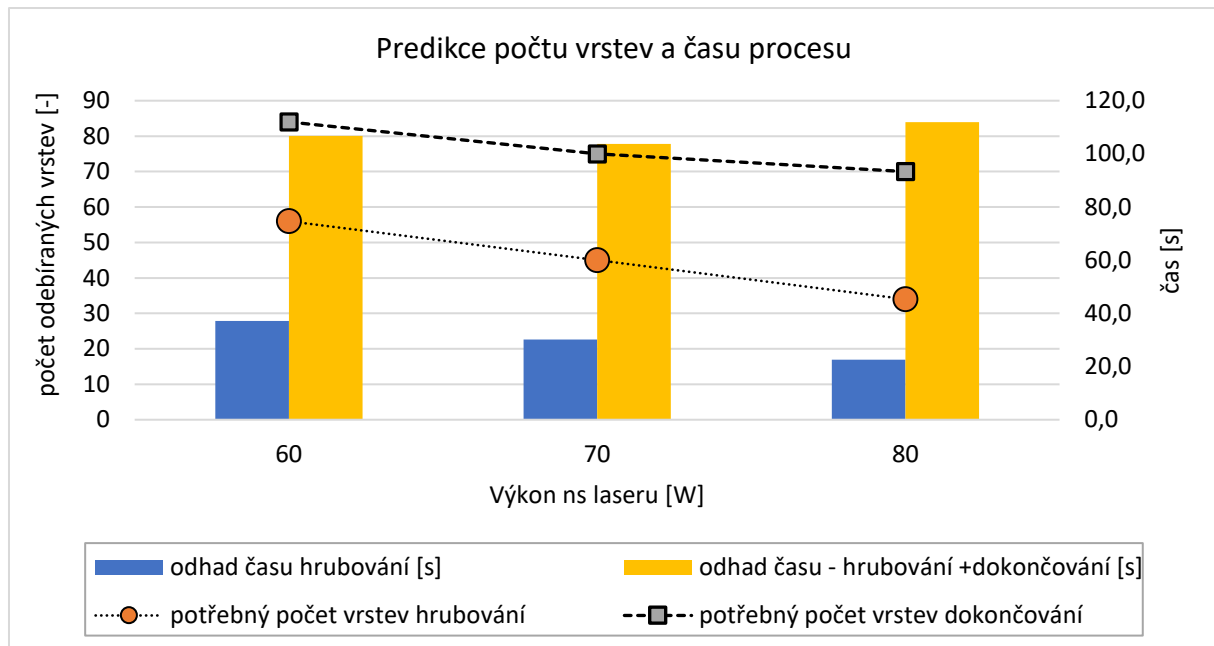
Stanovení přídatku pro dokončování

Pro stanovení přídatku pro dokončování na základě prediktivního modelu byly vyplněny vstupní parametry dle 3D modelu zanalyzovaného a překresleného utvařeče třísek. Z modelu byl odměřen jeho objem, který je $3,58 \text{ mm}^3$, maximální hloubka $300 \text{ }\mu\text{m}$ a hloubka čelní fazety oproti rovině čela je $100 \text{ }\mu\text{m}$. Navržený prediktivní model umožňuje volbu ze tří různých výkonů laseru pro hrubování, stanovených jako optimálních z dílčích experimentů. Pro tyto výkony byly přiřazeny parametry S_z dle předchozích experimentů. K výpočtu těchto hodnot byly použity logaritmické funkce z grafu na Obr. 68-c. Hodnota S_z v Tab. 17 byla uvažována pro hloubku hrubování $300 \text{ }\mu\text{m}$, s tím že byla vynásobena koeficientem 0,8, který kompenzuje hloubku použitou k výpočtu a skutečnou hrubovanou hloubku. Následně byl dopočten přídatek pro dokončování podle rozhodovacího kritéria popsaného v kapitole 5.7. Dále byly stanoveny potřebné počty vrstev pro hrubování a dokončování včetně odhadu časů dílčích procesů.

výkon hrubování (W)	60	70	80
očekávané R_z při hrubování [μm]	67,2	85,1	103,2
výpočet přídatku pro dokončování [μm]	100,0	100,0	103,2
hloubka hrubování [μm]	200,0	200,0	196,8
potřebný počet přejezdů ns laser [-]	56	46	39
objem hrubování [mm^3]	2,4	2,4	2,3
objem dokončování [mm^3]	1,2	1,2	1,2
odhad času hrubování [min]	0,6	0,5	0,4
odhad času hrubování [s]	37,2	31,0	25,9
potřebný počet přejezdů fs laser [-]	59	59	61
odhad času dokončování [min]	0,8	0,8	0,8
odhad času dokončování [s]	48,7	48,7	50,3
Odhad celkového času [s]	85,9	79,7	76,2

Tab. 17: Dílčí hodnoty potřebné k výrobě utvařečtřísek komplexním způsobem laserového mikroobrábění na základě prediktivního modelu

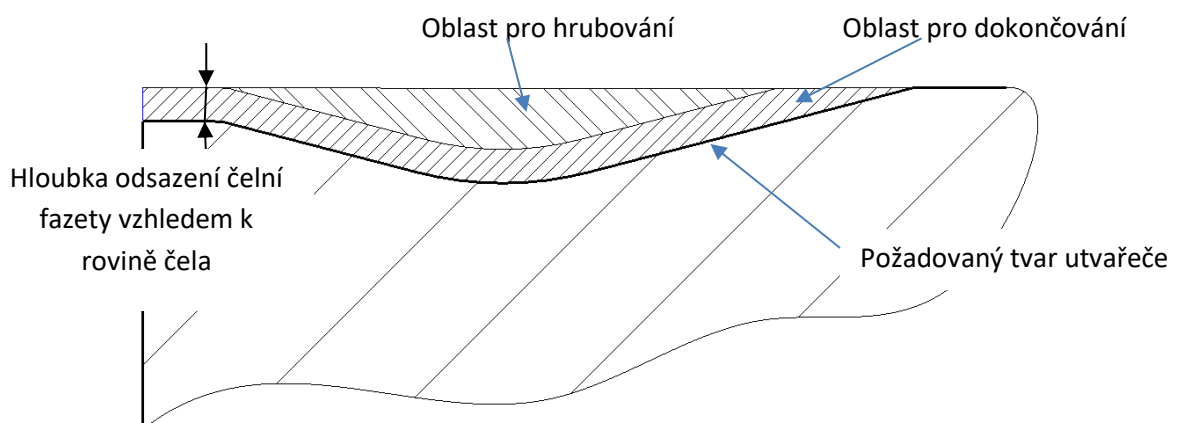
Z predikce času (Obr. 90) nejlépe vychází výkon pro hrubování 70 W, pro který byl vypočítán přídatek $105,7 \text{ }\mu\text{m}$. Nanosekundovým laserem by mělo být odebráno 45 vrstev s předpokladem úběru necelých $200 \text{ }\mu\text{m}$. Odhadovaný čas hrubování by měl být 30 sekund. Odhad času dokončování byl proveden na základě technologických podmínek použitých pro vzorek vytvořený pouze femtosekundovým laserem. Jedná se o technologické parametry: $P = 15 \text{ W}$, $v = 3600 \text{ mm/s}$, $f = 600 \text{ kHz}$.



Obr. 90: Odhadovaný čas hrubování a dokončování v rámci komplexního přístupu včetně potřebných počet vrstev k odebrání při hrubování a dokončování

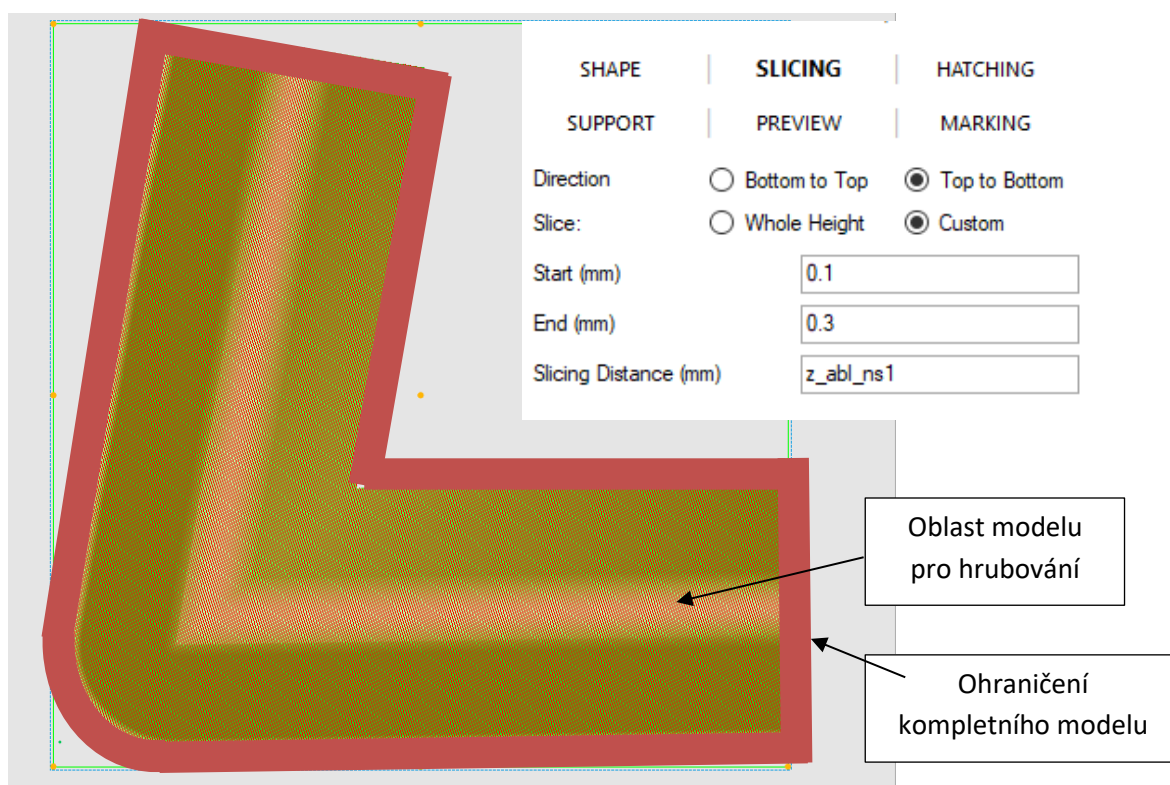
Strategie výroby

Zvolení vhodné strategie laserového mikrobrábění komplexním způsobem je také velmi klíčové, a to zejména pro odstranění nežádoucího tepelného ovlivnění po nanosekundovém hrubování. Nevýhoda laserové technologie, oproti třískovým je ta, že laserový paprsek kopíruje topografii povrchu a ubírá podobně ve všech místech. Nelze tedy jako například u frézování nastavit hloubku řezu 1 mm a spoléhat na konstantní úběr. Pro odstranění zbytkových nerovností povrchu po laserovém hrubování je potřeba zvolit takové parametry, které vedou k dostatečnému úběru a zároveň mají i tendenci povrch natavovat a nerovnosti zahlazovat. Podstatné je také zvolení vhodné strategie hrubování, aby byl povrch poškozen co možná nejméně. U realizovaného vzorku byla zvolena strategie, že oblast samotného utvařeče, tj. jeho konvexní tvar byl vytvořen nanosekundovým hrubováním z referenčního povrchu. Dokončováním pak byla vytvořena fazeta v blízkosti ostří a dokončen tvar utvařeče třísek na požadovanou hloubku viz náskres na Obr. 91.



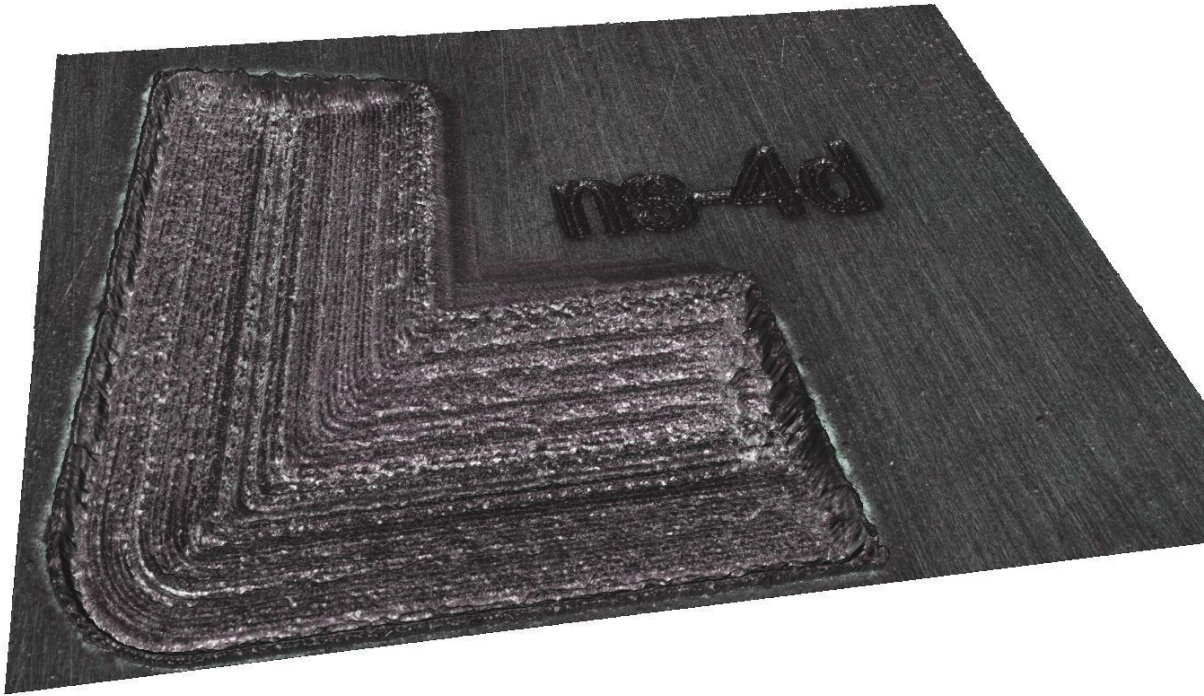
Obr. 91: Náskres zvolené strategie úběru materiálu v procesu hrubování a dokončování

K hrubování i dokončování byl použit stejný model překresleného utvařeče. Pro dosažení požadované oblasti pro hrubování byl model posunut v hladině osy Z přímo v řídicím softwaru pro laserový systém, tak aby začínal v hloubce 0,1 mm. Tím došlo k posunutí modelu až za čelní fazetu. Nicméně laserový paprsek začne obrábět od povrchu materiálu, a proto dojde u hrubování k vytvoření konvexní části utvařeče bez ohledu na posun počáteční hladiny. Posun v hladině Z je patrný v dialogovém okně na Obr. 92 (Start – End). V tomto dialogovém okně se také nastavuje hloubka úběru na 1 vrstvu. Tato hodnota byla výpočtem upravena na základě požadovaného počtu přejezdů v dané odebírané hloubce. Hloubka úběru na jednu vrstvu je dána nastavenými parametry laseru a zadaná hodnota pouze udává po kolika milimetrech se bude posouvat osa Z kvůli zachování fokusační vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že hloubka ostrosti nanosekundového laseru je větší než hloubka celého utvařeče, nemá tato hodnota větší význam než definování počtu odebíraných vrstev. Na stejném obrázku jsou vidět i původní model a vyšrafovaný model pro nanosekundové hrubování.



Obr. 92: Úprava modelu pro hrubování přímo v řídicím softwaru laserového zařízení

Proces hrubování byl stejně jako u výroby nanosekundového utvařeče rozdělen do dvou procesů – liniové šrafování v prvním kroku a konturové šrafování v kroku druhém. Cílem rozdělení hrubování na dva procesy bylo dosažení požadovaného tvaru s co možná nejlepší kvalitou v nejkratším čase. Pro výrobu utvařeče byl použit výkon laseru 70 W pro liniový šraf a 60 W pro semi-hrubovací konturové šrafování. Oba procesy byly řízeny vlastním modelem od počáteční hladiny až do požadované hloubky. Druhý hrubovací proces využíval konturové šrafování s maximálním počtem 30 kontur. To mělo za následek vytvoření pouze tzv. obálky kolem modelu. Došlo tak k zarovnání nerovností po prvním procesu a odebraná hloubka nebyla i díky menšímu počtu (17 přejezdů) velká. Podoba vzorku po dvou hrubovacích procesech je na Obr. 93. Naměřená hloubka hrubovaného vzorku byla 190 μm .



Obr. 93: Topografie vzorku vytvářeného komplexním přístupem po nanosekundovém hrubování (finální testovací vzorek)

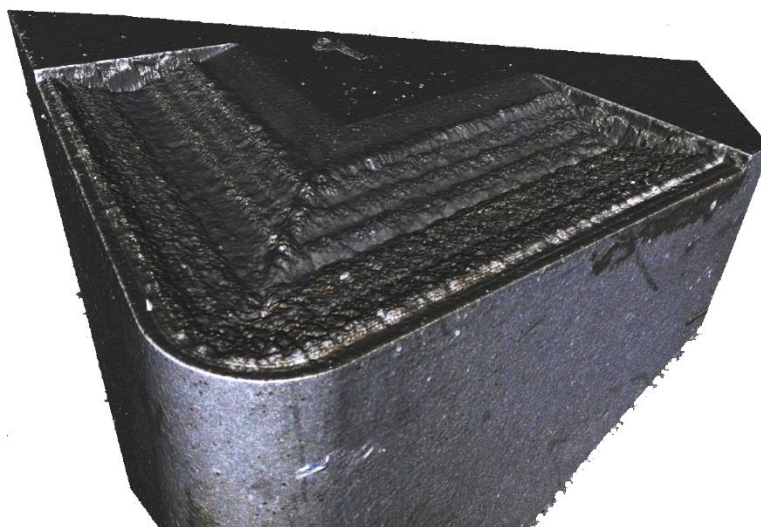
Následoval proces dokončování femtosekundovým laserem. Pro první testování dokončování takto hrubovaného utvařeče byly použity stejné podmínky jako pro vzorek vytvořený pouze femtosekundovým laserem ($P = 15 \text{ W}$, $v = 3600 \text{ mm/s}$, $f = 600 \text{ kHz}$, $S_x, S_y = 80 \%$, $N = 3$). I přesto že se jednalo o podmínky dříve testované, které vedou k částečnému eliminování negativní drsnosti povrchu, bylo potřeba tyto podmínky upravit. Důvodem byly zejména zkosené stěny utvařeče na kterých byla stále velká drsnost povrchu. Z tohoto důvodu byl zvýšen překryv pulsů, a to snížením skenovací rychlosti na 1200 mm/s a zvýšen. Jako výhodné se také ukázalo zvýšení pulsů v burst-módu, na $N = 7$. Zpomalením procesu došlo k prodloužení doby výroby, nicméně bylo možné použít méně skenovaných vrstev a výsledná kvalita povrchu byla také lepší. K výrobě byla použita liniová strategie šrafování s cílem dosáhnout celkového úběru $100 \mu\text{m}$, která byla rovna hloubce čelní fazety a která se také rovnala hodnotě z prediktivního modelu. Pro dokončování byl použit stejný model jako pro hrubování, s tím rozdílem, že pro něj byla vybrána hladina Z od hloubky $0-0,1 \text{ mm}$. V této hloubce má model plný tvar a dochází tedy k úběru jak v části fazety, tak v části konvexního tvaru utvařeče. Ve vyhrubované oblasti utvařeče je sice paprsek částečně mimo ideální ohniskovou vzdálenost, nicméně i díky poměrně velké energii v jednotlivých pulsech a většímu rozostření paprsku došlo k většímu zahlazování nerovností po hrubování. Celkem bylo pro dokončování použito 28 přejezdů, které vedly k maximálnímu úběru v konvexní části do hloubky $285 \mu\text{m}$.

Technologické parametry použité pro hrubování, semi-dokončování nanosekundovým laser a dokončování jsou uvedeny v Tab. 18. Celkový procesní čas byl 111 sekund, z toho 33 sekund trval proces hrubování a 78 sekund dokončování.

typ procesu	komplexní přístup		
označení	ns+fs		
λ [nm]	1064		1030
wf	0		
τ	230 ns		275 fs
f [kHz]	200		600
Sx, Hy [%]	50		93/80
v [mm/s]	3600		1200
operace	hrubování	semi-dokončování	dokončování
P [W]	70	60	15,5
F [J/cm ²]	38,6	31,1	5,8
burst			7
typ šrafu	linie	kontury	linie
max. počet kontur	-	30	-
n přejezdů [-]	33	17	28
čas výroby [s]	(33+78) 111 s		

Tab. 18: Technologické parametry použité pro výrobu utvařeče v rámci komplexního přístupu

Po vytvoření výsledných utvařečů byly na optickém mikroskopu pořízeny 3D skeny viz Obr. 94.



Obr. 94: 3D sken utvařeče třísk vytvořeného komplexním přístupem

Na obrázku je patrný výstupek materiálu za čelní fazetou. Ten je způsoben procesem hrubování, a to díky otáčením laserového paprsku, značením tavením materiálu a jeho tuhnutí nad povrchem. Vzorky takto upravených nástrojů byly označeny jako C-ns+fs.

6.4 Porovnání konvenčního a laserem vytvořených utvařečů třísk

Po vytvoření všech utvařečů byla jejich geometrie nasnímána na 3D optickém mikroskopu (InfiniteFocus G5) a provedena diferenční analýza s referenčním lisovaným utvařečem třísk. Zároveň byl použit „edge master modul“ pro automatické vyhodnocení geometrie řezné hrany. Vzorky byly

označeny tak, že vzorek A byl referenční, B – vzorek pouze z ns laseru, C – vzorek vytvořený komplexním přístupem a vzorek D – vytvořený pouze fs laserem. V následující tabulce jsou pro porovnání znovu uvedeny použité technologické parametry. Z tabulky je patrné, že vzorek B-ns a D-fs byly vytvořeny dílčími parametry použitými pro vzorek vytvořený komplexním přístupem - C-ns+fs. Je tak možné napřímo porovnat přínos dokončovacího procesu oproti pouze vzorku z nanosekundového laseru. Na druhou stranu je možné porovnat výrobní čas vzorku z femtosekundového laseru a vzorku vytvořeného komplexním přístupem včetně kvality obou vzorků. V následující tabulce (Tab. 19) jsou shrnuty použité technologické parametry pro výrobu všech vzorků. Z tabulky je tak patrné přímé porovnání výrobních časů.

typ procesu	jen nano		komplexní přístup			jen femto
označení	B- ns		C -ns+fs			D-fs
λ [nm]	1064		1064	1030		1030
wf	0		0			
τ	230		230 ns	275 fs		275 fs
f [kHz]	200		200	600		600
Sx, Hy [%]	50		50	93/80		80
v [mm/s]	3600		3600	1200		3600
Výrobní operace	hrubování	dokončování	hrubování	semi-dokončování	dokončování	hrubování i dokončování
P [W]	70	60	70	60	15,5	15,5
F [J/cm ²]	38,6	31,1	38,6	31,1	7,3	5,8
burst					7	3
typ šrafu	linie	kontury	linie	kontury	linie	linie
max. počet kontur	-	30	-	30	-	-
n přejezdů [-]	65	27	33	17	28	176
čas výroby [s]	48 s		(33+78) 111 s			290

Tab. 19: Technologické parametry použité pro výrobu utvařečů třísek laserovým mikrobráběním

Vzorek C vytvořený komplexním přístupem byl vytvořen za 111, což je téměř 2,5x více než utvařeč vytvořený pouze nanosekundovým laserem. Oproti tomu, vzorek D vytvořený pouze femtosekundovým laserem byl vytvořen za 290 sekund, což je také téměř 2,5x více.

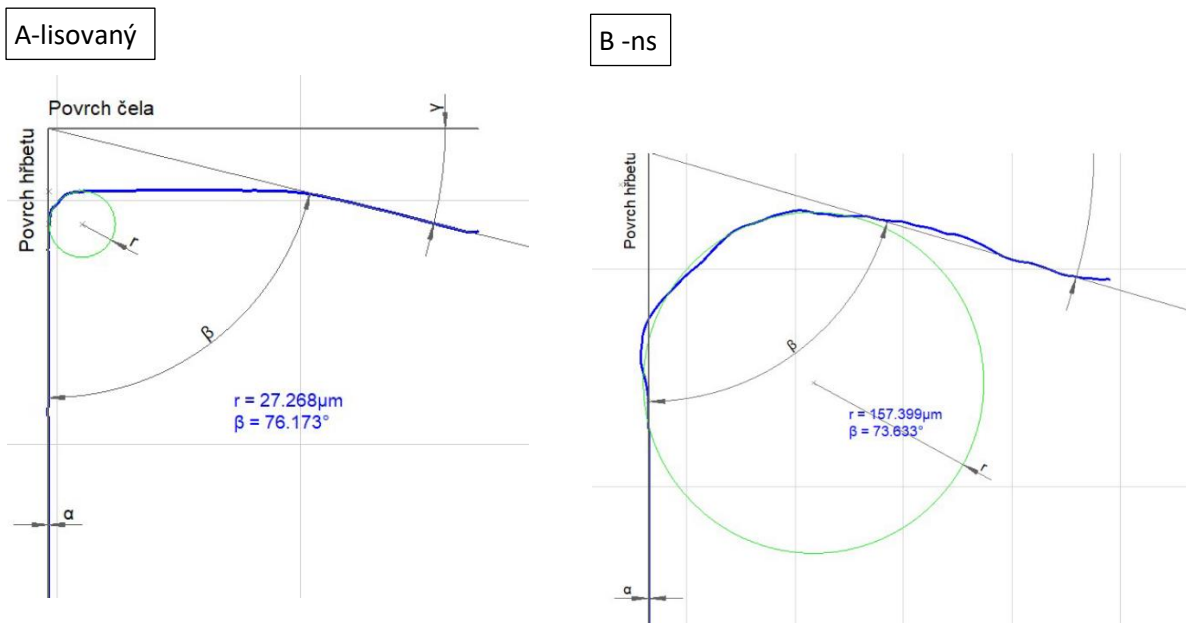
6.4.1 Porovnání kvality a geometrie konvenčního a laserem vytvořených utvařečů třísek

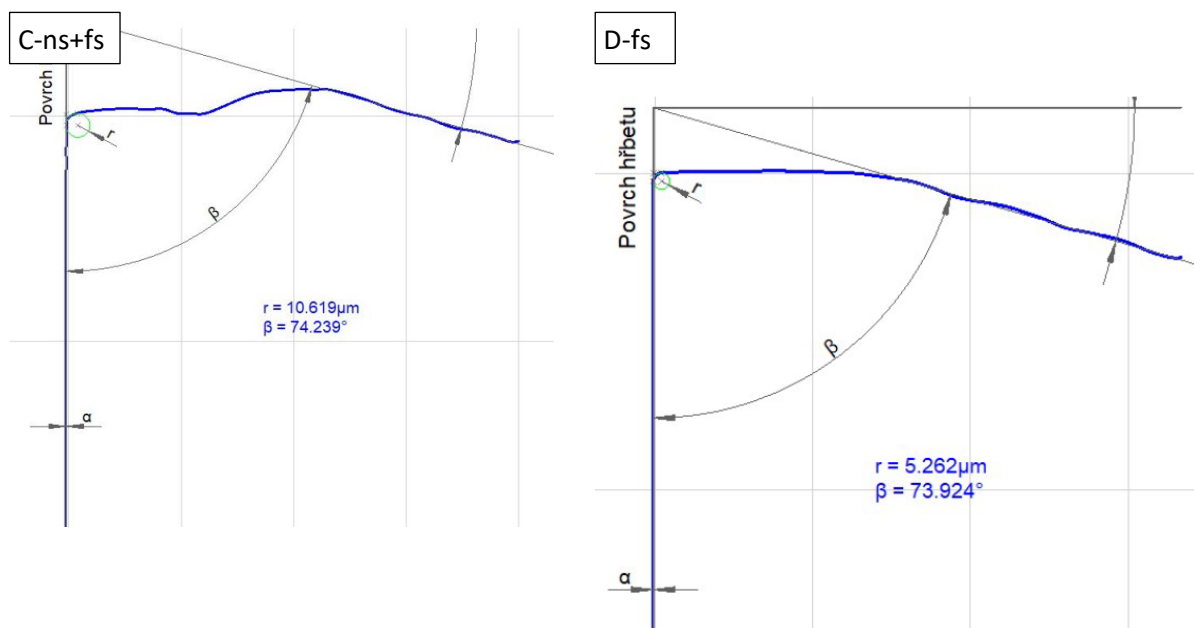
Porovnání kvality vytvořených vzorků je patrné ze 3D skenů na Obr. 95. Vzorky A a D jsou téměř identické, u vzorku B je patrné značné poškození povrchu a vzorek C je svojí kvalitou mezi vzorky B a D. Pro detailnější porovnání vytvořené geometrie, jsou zobrazeny profily řezné hrany včetně hodnoty zaoblení ostří r [μm] a úhlu čela β [μm].



Obr. 95: 3D skeny utvařečů třísek pro referenční (A) a laserem vytvořené vzorky (C-D)

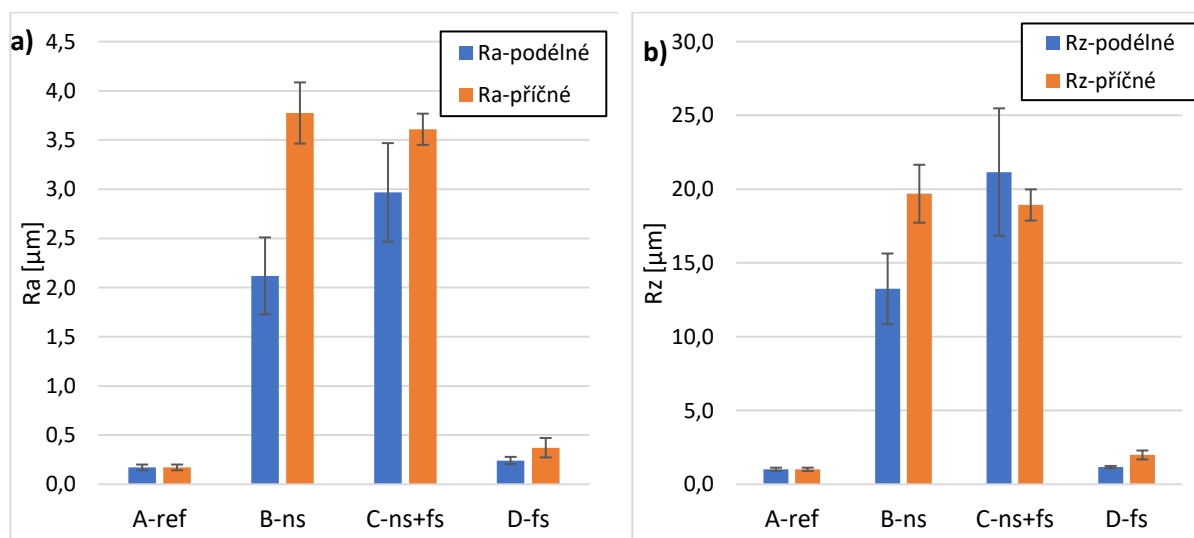
U lisovaného vzorku je patrné poměrně velké zaoblení ostří $r = 27,3 \mu\text{m}$. U laserem vytvořených vzorků C a D byla vytvořena mnohem ostřejší geometrie, a to $r = 10,6 \mu\text{m}$ pro vzorek C a $r = 5,2 \mu\text{m}$ pro vzorek D. Naopak u vzorku B se na zaoblení řezné hrany negativně projeví efekty způsobené tepelným procesem. Úhel čela se u laserem vytvořených utvařečů třísek příliš neliší, nicméně je o trochu menší než u referenčního lisovaného utvařeče.





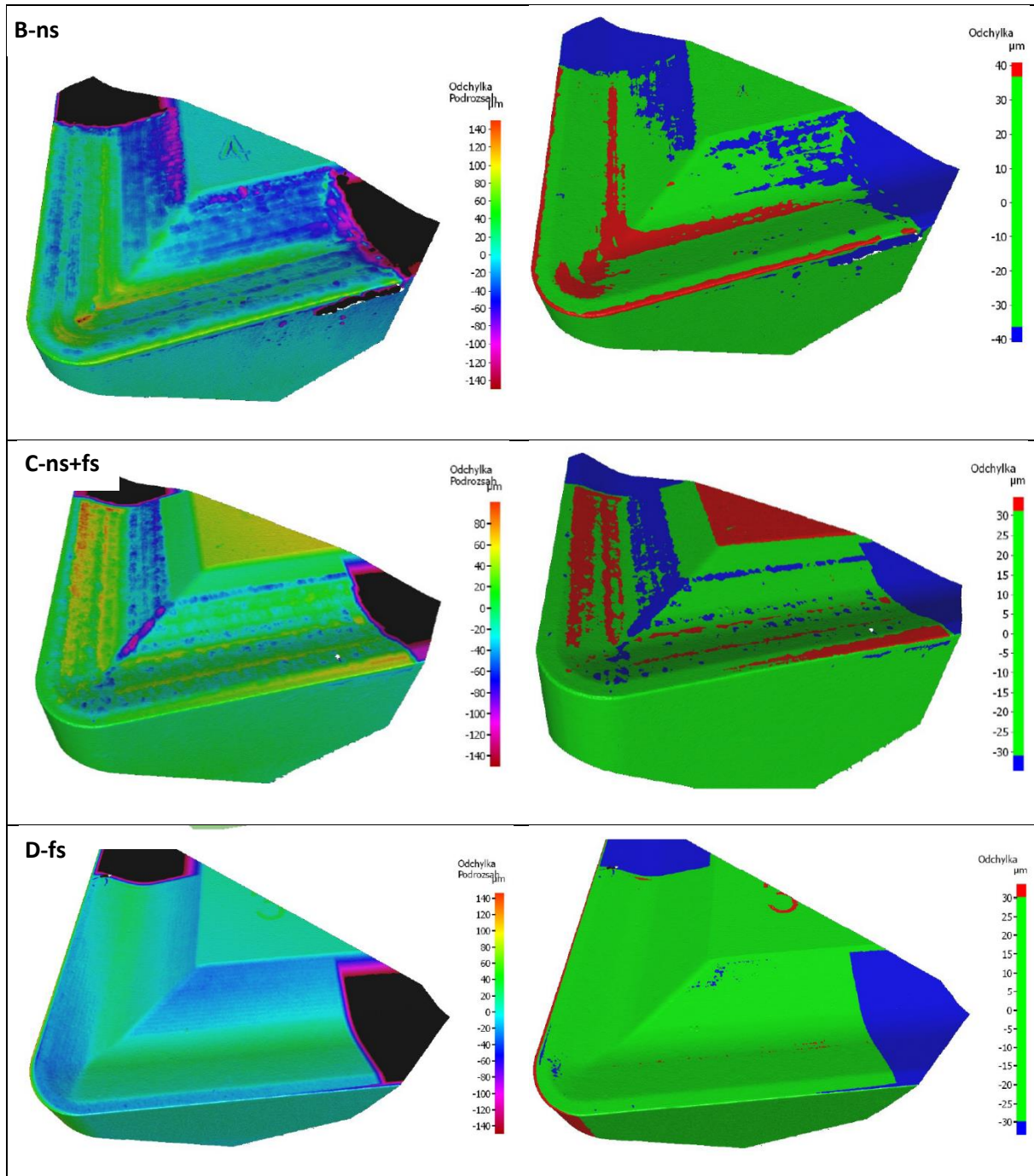
Obr. 96: Profily řezné hrany včetně vyhodnocení poloměru zaoblení ostří a úhlu čela pro referenční (A) a laserem vytvořené vzorky (C-D)

U vzorků byla dále porovnána jejich drsnost povrchu. K tomu byly použity parametry R_a [μm] a R_z [μm]. Měření bylo provedeno v podélném i příčném směru na profil utvařeče. Jako příčný směr je označen směr odchodu třísky. Použitím čárových parametrů drsnosti povrchu oproti plošným bylo docíleno lepšího popsání kvality povrchu. V každém směru bylo provedeno pět měření a hodnoty následně zprůměrovány a zobrazeny v grafu na Obr. 97. Chybové úsečky v grafu jsou dány směrodatnými odchylkami těchto průměrů. Nejmenší drsnost povrchu byla naměřena u lisovaného vzorku, následně pak u vzorku D z femtosekundového laseru. U vzorků B a C byla naměřena stejná drsnost povrchu v příčném směru. V podélném směru byla naměřena nižší drsnost povrchu pro vzorek B, což mohlo být způsobeno nataveným materiálem mezi čelní fazetou a konvexním tvarem utvařeče. Naopak v příčném směru, který by mohl být pro proces obrábění směrodatnější, byla naměřena nižší průměrná hodnota drsnosti povrchu. Nicméně s přihlédnutím k chybovým úsečkám jde o statisticky nevýznamný rozdíl.



Obr. 97: Drsnost povrchu a) průměrná aritmetická úchylka od střední čáry profilu – R_a [μm]; b) výška nerovnosti profilu – R_z [μm], referenčního (A) a laserem vytvořených vzorků (C-D)

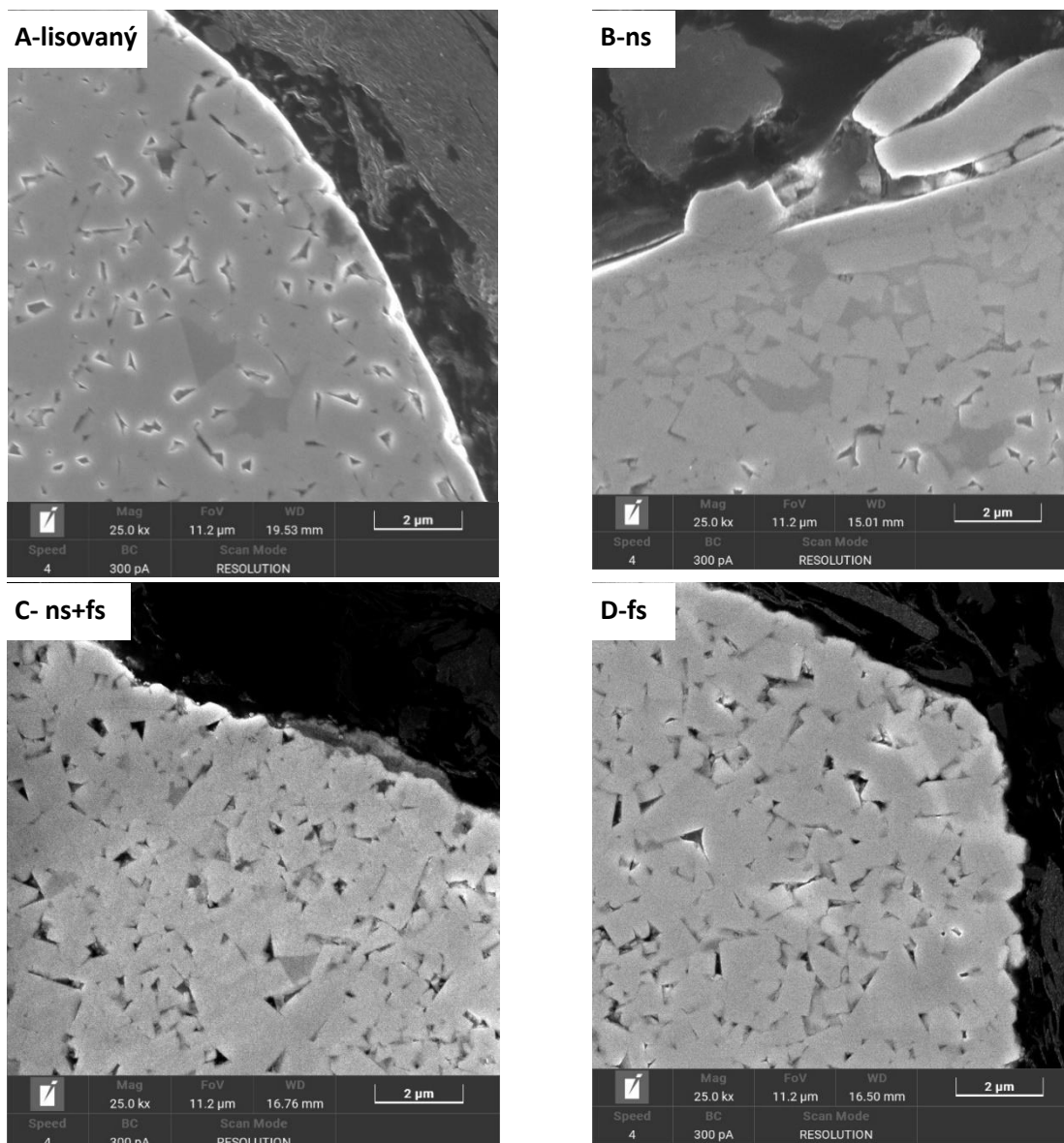
Jako poslední byla provedena diferenční analýza mezi laserem vytvořenými vzorky a vzorkem lisovaným. Nejprve došlo k vyrovnání a překrytí obou diferovaných modelů a následně k barevnému vyznačení odchylek. Na Obr. 98 jsou výsledky diferenční analýzy, které ukazují barevnou mapu odchylek porovnávaných tvarů. V levém sloupci jsou zobrazeny odchylky na barevné škále, v pravém sloupci jsou barevně odlišeny pouze oblasti, které jsou nad stanovenou hodnotou tolerance. U vzorku B byla naměřena větší hloubka než u lisovaného vzorku a také je patrné zaoblení řezné hrany které se projevilo větší odchylkou. U vzorku C byly pozorovány větší odchylky rozměrů od lisovaného utvařeče v celém objemu, zejména pak na bocích utvařeče. Dobrá shoda s referencí je na řezné hraně. U vzorku D byly naměřeny jen malé odchylky od tvaru lisovaného utvařeče, avšak všechny menší než 30 μm .



Obr. 98: Diferenční analýza laserem vytvořených vzorků se vzorkem referenčním. V levém sloupci jsou barevnou mapou vyznačeny odchylky mezi oběma modely, v pravém sloupci jsou barevně vyznačeny odchylky od nastavené hodnoty tolerance

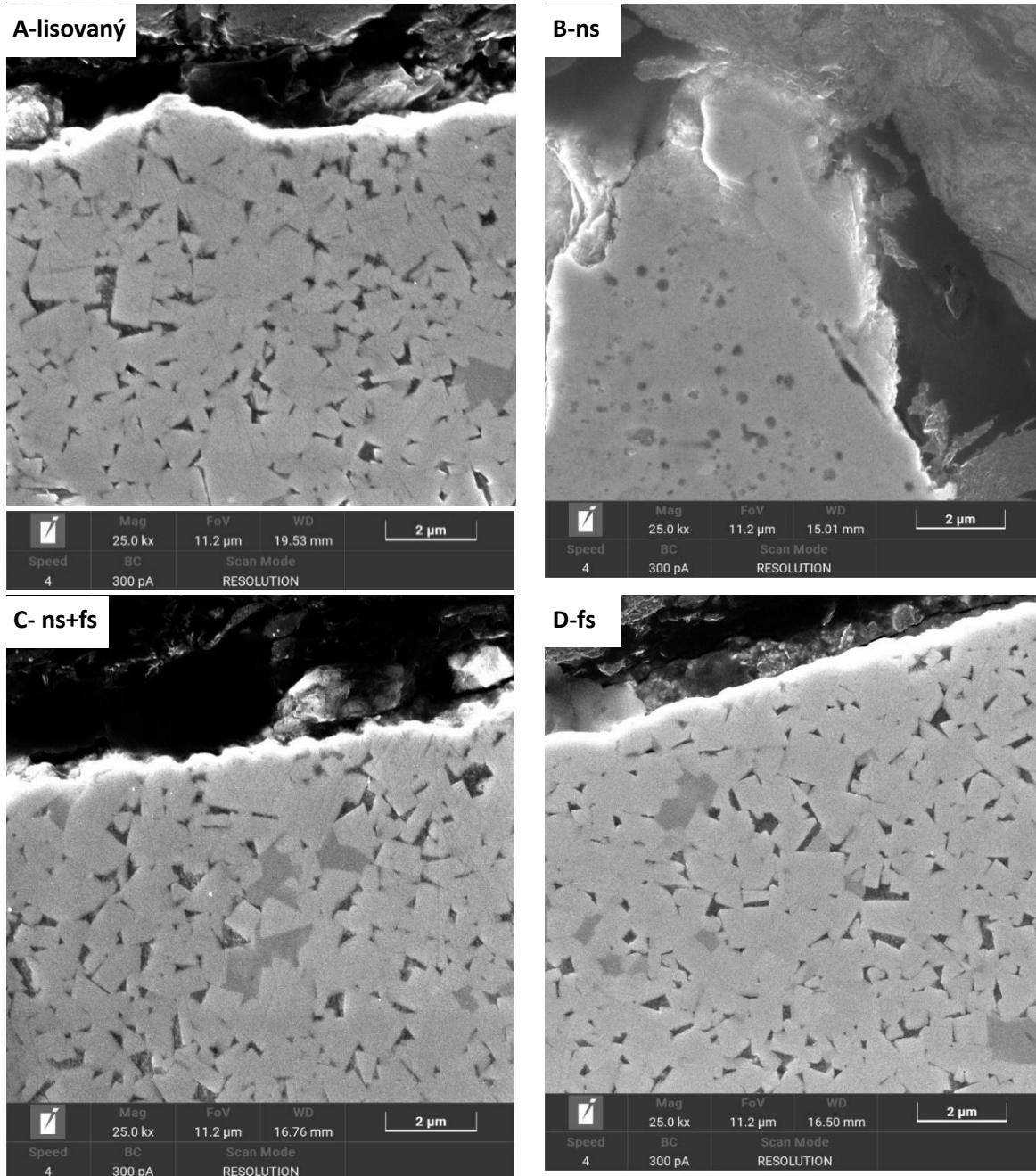
6.4.2 Metalografická analýza tepelně ovlivněné oblasti

Analýza mikrostruktury laserem ovlivněných nástrojů byla provedena na elektronovém mikroskopu (SEM) na pracovišti Hilase v Dolních Břežanech. Laserem vytvořené vzorky byly nařezány, zality do vodivé pryskyřice a následně vyleštěny na metalografické brusce. U vzorků byly pozorovány změny v mikrostruktuře v podvrchové vrstvě na ostří nástroje a v utvařeči třísek. Změny v mikrostruktuře byly hodnoceny podle předchozích pozorování, viz kapitola 5.4.1.3. Snímky řezné hrany na přechodu čela a hřbetu jsou zobrazeny na Obr. 99. U vzorku A je vidět jiné zbarvení než u ostatních vzorků. To není způsobeno změnou mikrostruktury nýbrž větším nábojem vzorku v místě řezné hrany. Z hlediska mikrostruktury je tento vzorek identický s ostatními, jak potvrdily snímky pořízené uprostřed vzorku. U vzorku B jsou patrné přestříky materiálu způsobené teplem od nanosekundového laserového obrábění. Zároveň je patrná změna mikrostruktury do hloubky cca 2 μm . U vzorků C a D nejsou patrné rozdíly v mikrostruktuře na řezné hraně. Je to dáno tím, že u vzorku C vytvořeného komplexním přístupem nedošlo k ovlivnění řezné hrany nanosekundovým laserem. Nedošlo tedy k negativnímu tepelnému ovlivnění a vzniku přetavených výstupků, jako je patrné u vzorku B.



Obr. 99: 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)

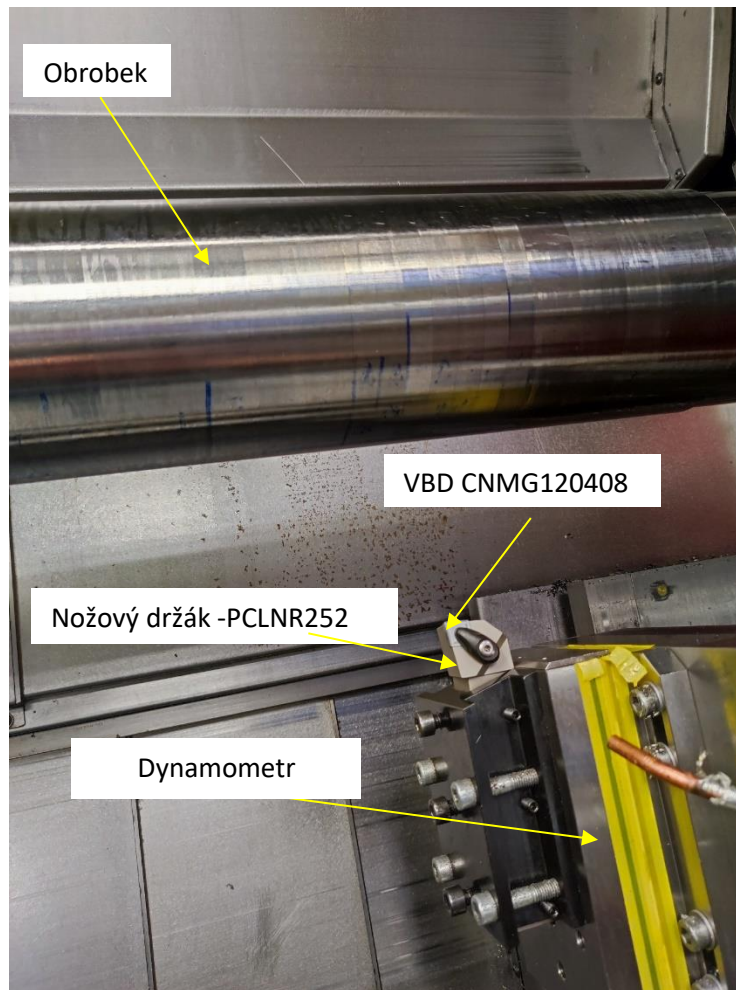
Snímky se stejným zvětšením byly také pořízeny v místě, kde se utvařeč začíná svažovat do konvexního tvaru (Obr. 100). I u těchto snímků je pozorovatelné znatelné tepelné ovlivnění spojené s výstupky nataveného materiálu po nanosekundovém laserovém obrábění, viz vzorek B. Zároveň je ze snímku vidět také změna v mikrostruktuře, která byla způsobena tavením, odpařením pojivového kobaltu a opětovným tuhnutím WC. U vzorku C je patrný vliv dokončování femtosekundovým laserem, který odstranil tepelné ovlivnění způsobené nanosekundovým laserem včetně většiny nerovností. Snímek vzorku C a vzorku D vytvořeného pouze femtosekundovým laserem jsou tedy velmi podobné.



Obr. 100: Snímky povrchu začátku konvexní části utvařeče třísek z elektronového mikroskopu pro nástroje označené A-D: a) referenční; b) nano; c) komplexní přístup; d) femto

6.5 Testy řezivosti nástrojů

Vytvořené vzorky nástrojů s utvařeči třísek A až D byly porovnány v testu obráběním. Jednalo se o podélné soustružení uhlíkové oceli 1.1191 bez procesní kapaliny (tj. suché obrábění). Tato ocel je používána jako jeden z etalonových materiálů pro testy řezivosti nástrojů. Experimenty byly provedeny na soustružnickém centru SP430 (Kovosvit MAS). Rotační polotovar (pr. 120 x 800 mm) byl upnut do tříčelistového sklíčidla a podepřen koníkem. Na Obr. 101 je pohled do stroje s ustaveným obrobkem a měřicí sestavou včetně upnutého nástroje a piezoelektrického dynamometru. Břitové destičky byly upnuty do upínače s označením PCLNR525M12-A.



Obr. 101: Ustavený nástroj a obrobek ve stroji při řezném testu

Do experimentu vstupovaly 4 varianty utvařečů na nástrojích, blíže popsané v předchozí kapitole (Tab. 20). Cílem navrženého experimentu bylo ověřit, zda laserem upravená makrogeometrie řezného nástroje dokáže podobně utvářet třísku a mít stejnou trvanlivost jako vzorek lisovaný.

typ zpracování	lisování	nanosekundový laser	komplexní přístup	femtosekundový laser
označení	A-lisovaný	B- ns	C -ns+fs	D-fs

Tab. 20: Označení nástrojů s laserem vytvořenými utvařeči třísek (B-D) a referenčním lisovaným nástrojem (A) vstupujících do řezného testu

Podmínky obrábění (Tab. 21) byly nastaveny dle doporučení výrobce, s mírným posunem k nižší řezné rychlosti, tak aby docházelo k opotřebením plynulým otěrem na hřbetě.

Řezná rychlost - v_c [m/min]	80
Posuv - f_{ot} [mm]	0,2
Hloubka řezu - a_p [mm]	1,5

Tab. 21: Řezné podmínky zvolené pro testování nástrojů s laserem vytvořeným utvařečem třísek

Před samotným obráběním byly vybrané řezné hrany s utvařeči nasnímány na mikroskopu, aby byl zachycen výchozí stav vzorků viz Příloha 1 – Foto nástrojů před experimentem obrábění. Nástroje

byly nafoceny z čela a hřbetu, stejně jako byly následně pořízeny snímky v průběhu obrábění, viz Příloha 3 – Foto opotřebených nástrojů v měřených intervalech) této práce.

6.5.1 Popis experimentálních testů a metodiky vyhodnocování

Měřenou veličinou v testu obrábění byly řezné síly, které byly zaznamenávány přes dynamometr a řídicí kartu do počítače. Dále bylo měřeno opotřebením břitů pro vyhodnocení jejich trvanlivosti. Současně s měřením opotřebením nástrojů byla měřena drsnost obrobeného povrchu. Byly také zachytávány tvořené třísky. Intervaly mezi jednotlivými měřeními byly nastaveny na 60 sekund, vyjma prvního záběru, kdy byly pořízeny fotografie opotřebením a sesbírány třísky už po 10 sekundách obrábění.

Měření opotřebením a vyhodnocení trvanlivosti břítu

Po předem stanovených časových úsecích obrábění byla na nástroji měřena velikost dominantního způsobu opotřebením. Velikost opotřebením břítu byla měřena v souladu s normou ISO 3685. Vyhodnocování stanovených kritérií opotřebením na hřbetu a čele břitové destičky bylo prováděno na optickém mikroskopu KEYENCE VHX 7000. Z každého měření byl pořízen záznam v podobě číselné hodnoty sledovaného kritéria opotřebením (VB_b a VB_{max}) a fotografický snímek opotřebením břítu s měřítkem. Jelikož se jednalo o polodokončovací soustružení, tak byla zvolena limitní hodnota opotřebením $VB_{MAX\ lim} = 300 \mu m$. Když opotřebením břítu testovaného nástroje překročilo tuto hodnotu, bylo měření daného břítu ukončeno a pomocí lineární interpolace byla stanovena jeho trvanlivost.

Měření sil při obrábění

V průběhu obrábění byla nástrojová hlava umístěna na piezoelektrickém dynamometru (9257B, Kistler), který snímá velikost silového zatížení ve třech směrech – X, Y, Z. Z těchto směrů pak byly vyhodnoceny síly F_x (F_p), F_y (F_c), F_z (F_f), které jsou součástí příloh této práce (Příloha 2 – Jednotlivé složky řezné síly při obrábění:). Opotřebením nástroje se zpravidla projevuje nárůstem řezných sil, proto je toto měření důležité pro komplexní popsání chování nástrojů při obrábění. Navíc může skokový nárůst sil při obrábění indikovat poškození nástroje které může v konečném důsledku poškodit celý stroj. Silové zatížení jednotlivých neopotřebením nástrojů může také indikovat rozdíly v laserem vytvořené makro/mikrogeometrii oproti lisovanému nástroji.

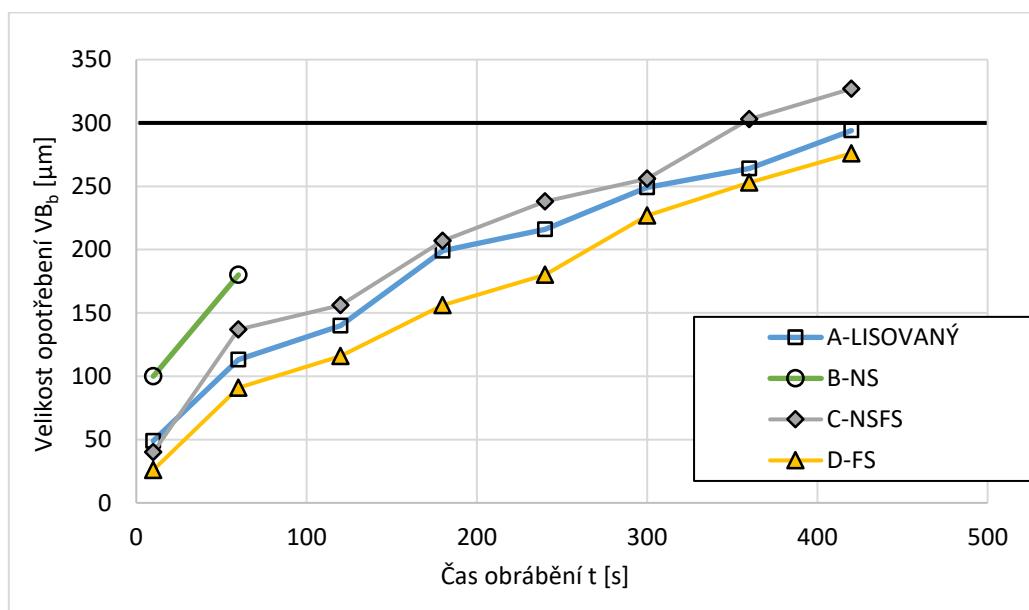
Měření drsnosti obrobeného povrchu

Parametry drsnosti obrobeného povrchu byly měřeny přenosným dotykovým drsnoměrem MarSurf PS10. Přesnost uvedeného přístroje je $\pm 2 \%$ z naměřené hodnoty. Měření drsnosti povrchu bylo prováděno v souladu s normou ČSN EN ISO 4288, která stanovuje postup měření pro periodické a neperiodické profily drsnosti, zejména pak délky vyhodnocovaných profilů. Na konkrétním obrobením

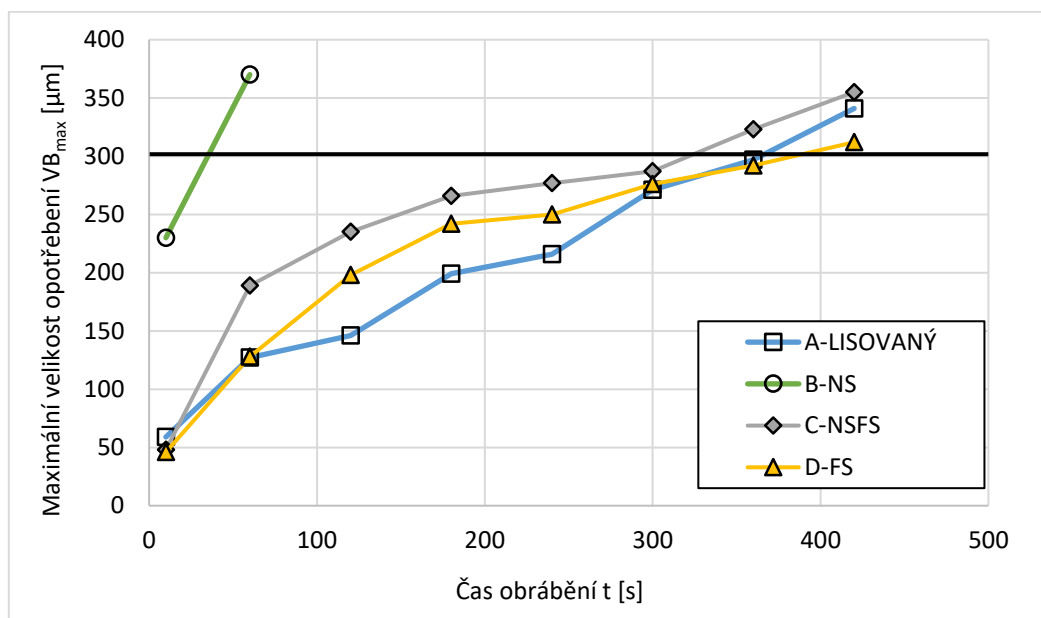
povrchu bylo provedeno 5 opakovaných měření, které byly následně průměrovány. Z těchto hodnot byly vypočteny směrodatné odchylky, které jsou součástí vyhodnocení. Vyhodnocovány byly parametry drsnosti povrchu Ra, a Rz.

6.5.2 Vyhodnocení opotřebení a trvanlivosti břitu

Z naměřených dat byla vykreslena výsledná závislost velikosti opotřebení VB_b na čase, viz Obr. 102. Obdobně maximální velikost opotřebení VB_{max} na čase obrábění (Obr. 103). V grafech je znázorněna hranice pro stanovené limitní opotřebení ($VB_{lim} = 300 \mu\text{m}$).



Obr. 102: Závislost velikosti opotřebení na hřbetě VB_b na čase obrábění t



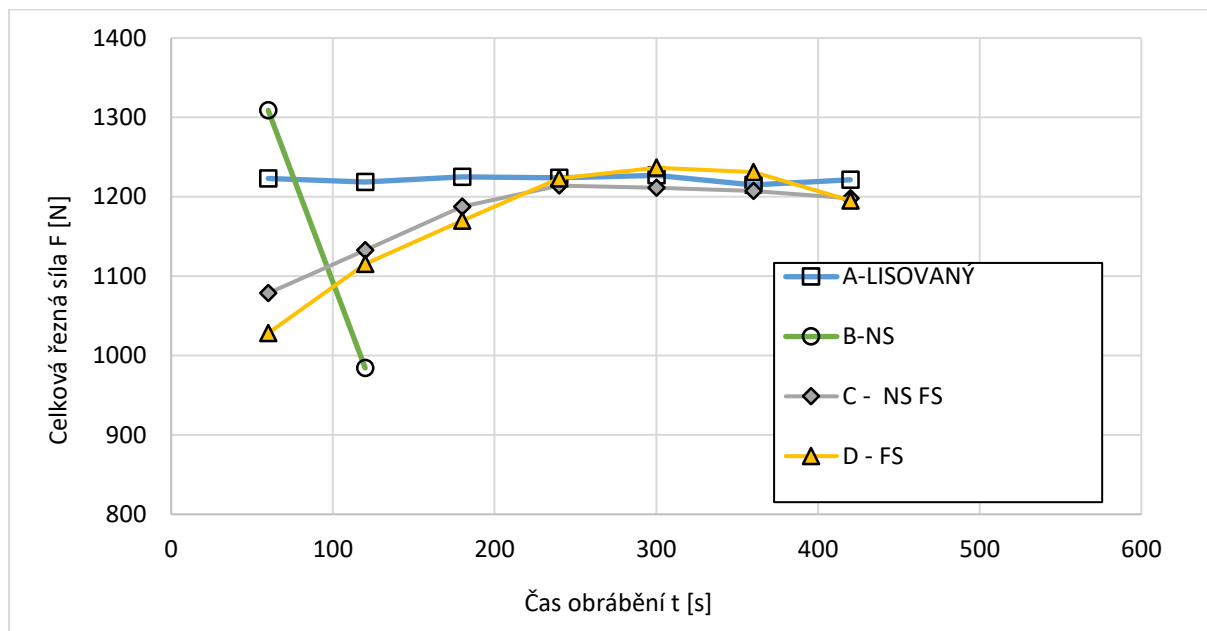
Obr. 103: Závislost maximální velikosti opotřebení na hřbetě VB_{max} na čase obrábění t

Z hlediska maximálního opotřebení na hřbetě nástroje je patrné, že byla dosažena podobná trvanlivost pro vzorky A-lisovaný ($T = 360 \text{ s}$), C-ns+fs ($T = 360 \text{ s}$) i D-fs ($T = 420 \text{ s}$). Tento výsledek ukazuje, že komplexním přístupem vytvořený utvařecí třísek dokáže svojí trvanlivostí konkurovat velmi přesně

vyrobenému lisovanému utvařeči třísek a v případě vzorku D-fs jeho trvanlivost i překonat. Naopak nejkratší trvanlivost byla zjištěna u vzorku B-ns, který již po 60 sekundách obrábění překonal maximální stanovenou velikost opotřebení. U tohoto vzorku došlo vlivem nízké kvality řezné hrany k vyštípnutí části břitu, které vedlo až k jeho celkové destrukci. Ostatní vzorky se byly opotřebovávány otěrem na hřbetu nástroje a plynule tak narůstala hodnota jejich opotřebení VB_b . Při obrábění se také tvořil nárůstek materiálu na čele břitu.

6.5.3 Vyhodnocení řezných sil

Ze složek řezné síly F_c , F_f a F_p byla vektorovým součtem vypočtena celková řezná síla. Naměřené hodnoty v jednotlivých časech obrábění jsou zobrazeny v grafu na Obr. 104. Nejvyšší síla v začátku obrábění byla naměřena pro vzorek B-ns, který má nejméně pozitivní geometrii břitu tzn. největší poloměr ostří a celkově nejhorší kvalitu provedení mikrogeometrie ostří. U tohoto vzorku byl v dalším čase měření pozorován pokles síly, pravděpodobně způsobený vylomením břitu. Nejmenší hodnoty celkové řezné síly byly zaznamenány pro vzorek D-fs, který má nejmenší poloměr ostří. Nicméně i vzorek C-ns-fs měl podobný průběh řezné síly v čase. Téměř konstantní sílové zatížení v čase bylo pozorováno pro vzorek A- lisovaný. Po 240 sekundách obrábění vykázaly laserem vytvořené vzorky a referenční lisovaný vzorek stejné hodnoty řezné síly, které zůstaly konstantní až do konce trvanlivosti břitů. Konstantní hodnota celkové řezné síly také ukazuje na plynulé opotřebení nástrojů otěrem bez výrazného poškození ostří. Shodná velikost a průběh celkové řezné síly po počáteční fázi opotřebení nástrojů také ukazuje na velmi podobný tvar makrogeometrie utvařeče. Výsledné průběhy celkové řezné síly opět ukazují na dobrou kvalitu komplexním způsobem vytvořeného utvařeče třísek a jeho dobrou shodu s lisovaným utvařečem. Dílčí grafy naměřených složek celkové řezné síly jsou zobrazeny v Příloze 2 této práce.

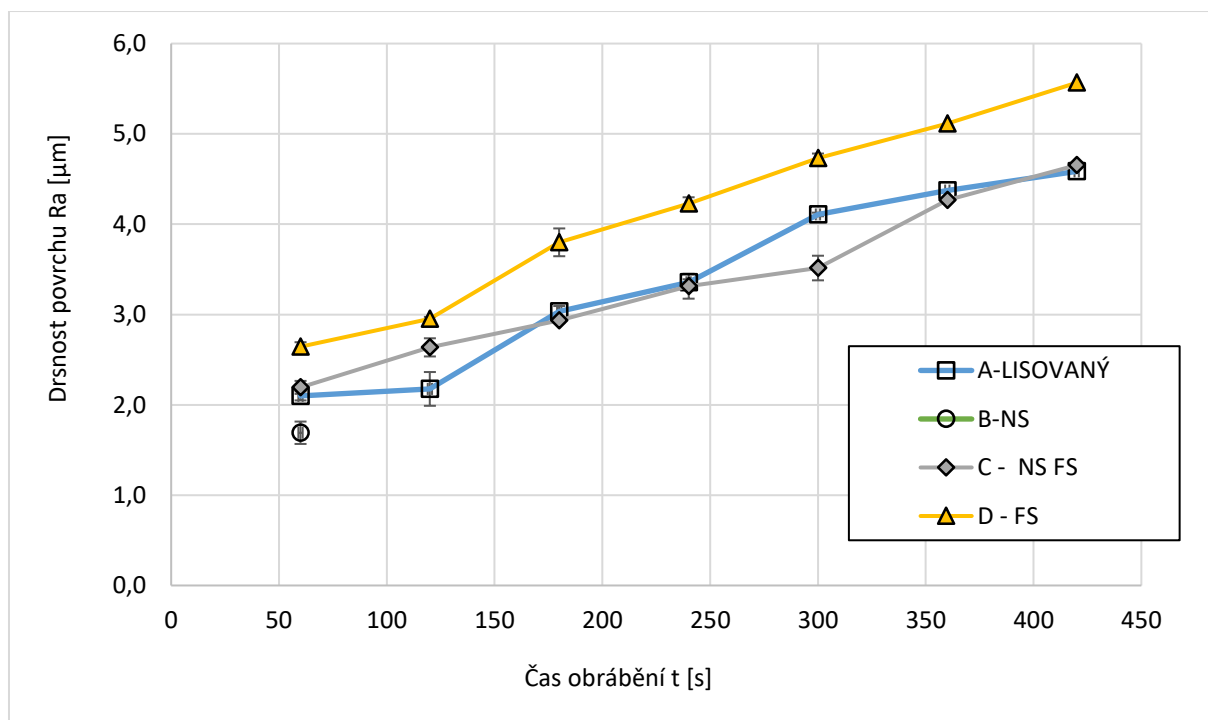


Obr. 104: Závislost celkové řezné síly F na čase obrábění t

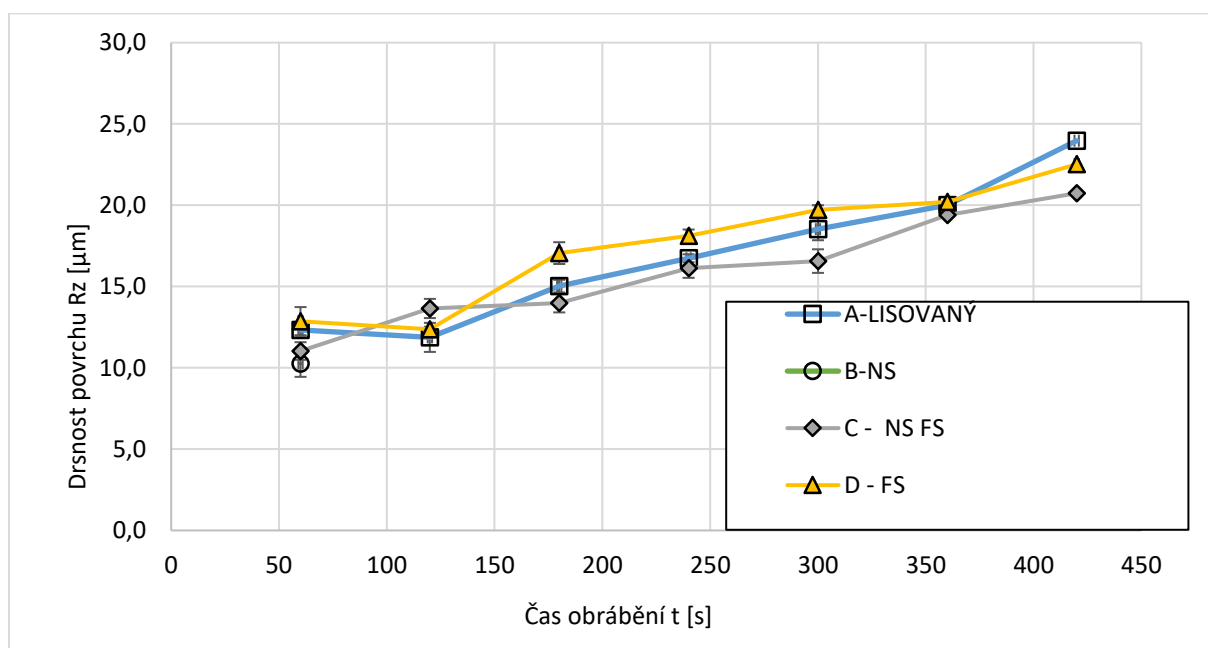
6.5.4 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Na jednotlivých měřených úsecích byla vyhodnocena drsnost obrobeného povrchu. Pro popis drsnosti obrobeného povrchu byly vybrány parametry R_a (Obr. 105) a R_z (Obr. 106). Z grafů je patrný podobný průběh drsnosti povrchu pro všechny nástroje. To opět ukazuje na dobrou shodu komplexním

způsobem vytvořeného utvařeče, lisovaného a utvařeče vytvořeného fs laserem. Zároveň se ukazuje, že úprava mikrogeometrie nástroje laserem nevede ke zhoršení kvality obrobeného povrchu. S rostoucím časem obrábění a opotřebením břitu rostou i naměřené hodnoty Ra a Rz. Nejvyšší drsnost povrchu, zejména Ra, byla naměřena pro vzorek D-fs. Nárůst hodnoty drsnosti povrchu u tohoto vzorku může být způsoben nejmenším poloměrem ostří. Naměřené hodnoty odpovídají kvalitě obrobeného povrchu v procesu polodokončování, s rostoucím opotřebením nástroje pak spíše povrchu po hrubování.



Obr. 105: Závislost drsnosti povrchu Ra na čase obrábění t



Obr. 106: Závislost drsnosti povrchu Rz na čase obrábění t

6.5.5 Vyhodnocení třísek

Nasbírané třísky v průběhu obrábění byly analyzovány z hlediska tvaru. Tyto tvary jednotlivých utvořených třísek jsou zobrazeny v Tab. 22.

T [s]	10	60	120	180	240	300	360	420	480
A-ref									
B-ns									
C-NS-FS									
D-FS									

Tab. 22: Třísky v průběhu obrábění nástroji A-D v různých časových intervalech s vyznačenými oblastmi dobrého utváření třísky

U referenčního lisovaného vzorku docházelo od začátku obrábění k tvoření dlouhé vlnité šroubovitě třísky. Od 240 sekundy obrábění se již tvorba třísky změnila a docházelo ke vzniku dlouhé smotané třísky až do konce trvanlivosti břitu. V tento časový okamžik došlo pravděpodobně k opotřebení čelní fazety a ke změně funkce makrogeometrie utvařeče. Obdobný tvar třísky vykazoval i vzorek D vytvořený femtosekundovým laserem, s tím rozdílem, že dlouhou vinutou (šroubovitou) třísku tvořil až do 420 sekund obrábění. Odlišné chování proti lisovanému vzorku může být způsobeno menším poloměrem ostří a celkově jinou mikrogeometrií utvařeče v těsné blízkosti břitu. Ta může způsobovat změnu kontaktních a třecích vlastností mezi čelem břitu a třískou, resp, jeho hřbetem o obrobeným povrchem. Nicméně naměřená drsnost povrchu lisovaného nástroje a vzorku D byla podobná. Malý rozdíl byl zaznamenán při měření drsnosti povrchu ve směru odchodu třísky. U obou nástrojů došlo na konci trvanlivosti rovněž k tvorbě dlouhé smotané třísky. U vzorku B byl tvar třísek na začátku obrábění podobný vzorkům A a D, nicméně díky brzké destrukci břitu dosáhl maximální hranice opotřebením již po 60 sekundách. U varianty C byl tvar třísek na začátku obrábění jiný než u ostatních variant. Nástroj tvořil krátkou vinutou (šroubovitou) třísku, která se s přibývajícím časem obrábění začala prodlužovat. V začátku obrábění funguje pravděpodobně výstupek za čelní fazetou jako sekundární utvařeč a pomáhá k lepší tvorbě třísky. Postupem času však dojde k jeho opotřebením a zahlazením. Od 300 sekundy obrábění tento nástroj tvořil dlouhou třísku, obdobně jako nástroje A a D na konci trvanlivosti. Trochu odlišné utváření třísky u vzorku C oproti lisovanému vzorku mohlo být částečně díky vytvořené mikrogeometrii na konci rovné fazety před začátkem utvařeče chovající se jako mikroutvařeč třísky. Tento výstupek vznikl při nanosekundovém hrubování vnitřní části utvařeče. Utváření třísky nástrojem vytvořeným komplexním přístupem je podobné, v začátku obrábění i lepší než u lisovaného utvařeče.

6.6 Dílčí shrnutí

K výrobě utvařečů laserem byly použity podmínky a strategie z předchozích experimentů. Muselo nicméně dojít k jejich mírné úpravě, a to kvůli složitosti vytvářeného utvařeče v porovnání s rovinnými vzorky. U hrubování byly využity konturové šrafy v kombinaci s liniovými pro snížení drsnosti povrchu utvařeče. Následně byl zvýšen překryv pulsů pro dokončování u komplexního přístupu, aby bylo možné eliminovat velkou drsnost povrchu odebrat a zvýšit tak podobnost nástroje s lisovaným. Laserem vytvořené nástroje byly z hlediska tvaru a rozměru v dobré shodě s referenčním nástrojem vytvořeným lisováním. Použití komplexního způsobu vedlo k ušetření výrobního času o téměř 60 % oproti výrobě pouze femtosekundovým laserem. Naopak utvařeč třísek vytvořený pouze nanosekundovým laserem byl vytvořen za pouhých 48 sekund, což je poloviční čas výroby v porovnání s komplexním přístupem. U vzorků utvařečů byla také provedena metalografická analýza s následným pozorováním na elektronovém mikroskopu. Tato analýza potvrdila, že komplexním přístupem došlo k odstranění nežádoucí tepelně ovlivněné oblasti a ke snížení drsnosti povrchu po hrubování. Zároveň díky upravení čelní fazety pouze femtosekundovým laserem nedošlo k jejímu tepelnému ovlivnění. Naopak u vzorku z nanosekundového laseru byly pozorovány výstupky s přetaveným materiálem a také tepelné ovlivnění podpovrchové vrstvy.

Následně byla experimentem obrábění ověřena řezivost laserem vytvořených nástrojů a nástroje s lisovaným utvařečem třísek. Nejnižší trvanlivost byla naměřena u vzorku B, vytvořeného pouze nanosekundovým laserem, a to zejména díky velké drsnosti povrchu na čelní fazetě a zaoblenému ostří. Nekvalita tohoto nástroje vedla k jeho vyštípnutí v začátku obrábění, které bylo vyšší než stanovená mezní hranice opotřebením. Ostatní laserem modifikované nástroje – vytvořený komplexním přístupem (ozn. C-ns-fs) a jen fs laserem (ozn. D-fs), vykazovaly obdobnou řezivost jako lisovaný nástroj. Dosažená

trvanlivost vzorku C byla shodná s lisovaným nástrojem a to 360 sekund. O 60 sekund delší trvanlivost ($T = 420$ s) byla naměřena u vzorku D-fs. Z hlediska utváření třísky, mikro a makro-geometrie laserem vytvořených utvařečů vedla k lepšímu dělení po delší časový úsek. U vzorku C-ns-fs byla pozorována krátká dělená tříska, která se začala měnit s 240 sekundou obrábění. Pravděpodobné vysvětlení tohoto jevu je ve vytvořeném výstupku na přechodu mezi čelní fazetou a svažujícím se tvarem utvařeče, který vznikl vlivem nanosekundového hrubování. Tento výstupek, může sloužit jako sekundární utvařeč třísky a pomáhat tak k jejímu dělení. Oproti tomu u vzorku lisovaného a vytvořeného pouze fs laserem byla pozorována dlouhá (šroubovitá) tříska, která se s přibývajícím časem začala prodlužovat. Z hlediska řezných sil byla opět pozorována dobrá shoda mezi vzorky C-ns-fs, D-fs a referenčním nástrojem. Mírné rozdíly v celkové řezné síle byly naměřeny v začátku procesu obrábění. Nejmenší naměřená síla byla u vzorku D-fs, pravděpodobně vlivem nejvíce pozitivní geometrie ostří ze všech vzorků. Nižší celková řezná síla, než u referenčního vzorku byla naměřena také u vzorku C-ns-fs. Pravděpodobně také vlivem mikrogeometrie ostří a jeho zaoblení, které bylo také menší než u referenčního nástroje. Po 240 sekundách obrábění se řezné síly u nástrojů vyrovnaly. Tento trend odpovídá i změně v utváření třísky. Posledním sledovaným parametrem byla drsnost obrobeného povrchu. Toto měření ukázalo, že vzorek C-ns-fs vede ke shodné kvalitě obrobeného povrchu jako vzorek referenční. Mírně vyšší drsnost povrchu, zejména u sledovaného parametru R_a , byla naměřena pro vzorek D-fs. Opět je zde možný vliv mikrogeometrie ostří včetně drsnosti povrchu čelní fazety a přechodu do makrogeometrie utvařeče.

Experimenty obrábění ukázaly, že nástroj vytvořený komplexním přístupem laserového mikroobrábění dosáhl srovnatelné řezivosti s nástrojem lisovaným, stejně tak jako s nástrojem vytvořeným pouze femtosekundovým laserem. Naopak nástroj vytvořený pouze nanosekundovým laserem vykázal kritické opotřebení již po 60 sekundách v řezu. U sledovaného vzorku vytvořeného komplexním přístupem bylo dosaženo stejné trvanlivosti jako u vzorku referenčního, lepšího dělení třísky a řezných sil zejména v začátku obrábění a také shodné kvality obrobeného povrchu.

7 Ekonomické zhodnocení komplexního přístupu

Na základě navrženého komplexního přístupu laserového mikroobrábění dochází k použití dvou laserových zařízení místo jednoho. Tento přístup přináší nové provozní náklady, zejména na odpisy stroje a jeho provoz a také na dalšího zaměstnance případně zastavěnou plochu. Z tohoto důvodu byly provedeny ekonomické kalkulace, které nejprve uvažují odpisovou dobu femtosekundového i nanosekundového laseru deset let a s touto odpisovou dobou stanovují cenu výrobku za jeden kus při maximální reálné produkci v jednosměnném provozu po celou odpisovou dobu. V druhé podkapitole jsou analyzovány ekonomické náklady komplexního přístupu v porovnání s obráběním pouze femtosekundovým laserem při změně objemu vytvářené entity na řezném nástroji. V poslední podkapitole je proveden výpočet návratnosti investice do druhého laserového zařízení v závislosti na objemu vyráběných kusů.

7.1 Náklady na pořízení a provoz zařízení

Pro potřeby výpočtu nákladů na výrobu utvařeče byla zvolena dvě laserová zařízení – s femtosekundovými a nanosekundovými pulsy. Obě zařízení vycházela ze stroje použitého pro realizaci experimentů v této práci, nicméně pro větší smysluplnost a snadnější výpočet důležitosti nanosekundového laseru bylo zařízení rozděleno na dva samostatné stroje. U femtosekundového laseru byl uvažován laserový zdroj, který umožňuje podobný výkon a délku pulsu jako byla použita v experimentech. Zároveň ale není nutnost u tohoto zařízení mít optické trasy pro další generované

Odhadovaná cena zařízení [Kč]	12 000 000
Odpisová doba [rok]	10
Roční odpis [Kč/rok]	1 200 000
Fixní energie [Kč/rok]	122 880
Cena energie [Kč/kWh]	5
Počet hodin stand-by [hod./rok]	3072
Spotřeba stand-by [kWh/h]	8
Spotřeba v zatížení [kWh/h]	14
Údržba [Kč/rok]	70000
Náklady prostoru [Kč/rok]	120 000
Zabraná plocha [m ²]	10
Náklady na m ² [Kč/m ² /rok]	12000
Roční fixní náklady celkem [Kč/rok]	1 512 880

vlnové délky včetně opce pro jejich generaci a zesilování. Zůstává však potřeba kamery pro optické zaměřování a tři osy pro pohybování s nástroji. Podmínkou je vybavení stroje optickou cestou pro vedení vlnové délky 1030 nm zakončené galvoskennerem s F-theta čočkou. Z tohoto důvodu byla cena zařízení, po konzultaci s integrátory podobných systémů, odhadnuta na 12 milionů korun. Dále byl uvažován provoz stroje 10 let a na tuto dobu byla stanovena i doba odpisová. Dle dispozic obdobných strojů na trhu byla stanovena zastavěná plocha na 10 m². Stroj

není příliš náročný na údržbu nicméně počítá se s výměnou filtrů v odsavači zplodin a možného poškození optických komponent v celkové hodnotě 70 tis. Kč/rok. Zároveň je počítáno s tím, že bude stroj zapnutý po celý pracovní týden a mimo pracovní směnu bude v tzv. stand-by režimu. Důvodem tohoto provozu je šetření času při zapínání a vypínání a také času, který je potřeba pro zahřátí stroje, zejména pak laserového zdroje. Dle aktuálního zařízení dostupného pro experimenty se spotřebou ve stand-by režimu 8kW/h, při 3072 nepracovních hodinách za rok a ceně 5 Kč/kWh byl stanoven fixní náklad na energii 122880 za rok. K fixním nákladům je také přičten náklad na zabranou plochu, která při uvažování nákladu 12 tis. Kč/m²/rok činí 120000 Kč/rok. Celkové roční fixní náklady bez započítání mzdy obsluhy činí 1 510 tis. Kč/rok. Rozpis jednotlivých položek ročních fixních nákladů je v Tab. 23.

Tab. 23: Rozpad položek ročních fixních nákladů pro femtosekundový laser

Nanosekundový vláknový laser s průměrným výkonem 200 W má několikrát nižší pořizovací cenu, nicméně díky nutnosti galvoskenneru a kamerového zaměřování byla cena stanovena na 2,5 milionu korun. Cena je také poměrně vysoká díky vysoké ceně zařízení vzhledem k průměrnému výkonu. Dostatečný by mohl být i zdroj s výkonem 100 W nebo 70 W, které se vyrábí se stejnou maximální energií v pulsu a jejich cena je nižší. Nicméně i procesní čas na těchto zařízeních by byl delší. Dle dispozic obdobných strojů na trhu a konzultace s integrátory byla stanovena zastavěná plocha na 8 m². Vzhledem k přenosu laserového paprsku optickým vláknem, nízkým nárokům na údržbu zařízení a případnou výměnu filtrů, byly stanoveny celkové náklady na údržbu 30 tis./rok. Fixní náklady na energii jsou u nanosekundového zdroje také nižší, a to zejména díky možnosti stroj plně vypnout na konci směny. Ve stand-by režimu proto běží pouze přes oběd, případně v průběhu jiných prostoje ve výrobě. Celkové náklady na fixní energii byly proto stanoveny na 9600 Kč/rok. Majoritní položkou nákladů jsou proto odpisy stroje, které při odpisové době 10 let činí 250 tisíc Kč ročně. Náklady na zabranou plochu byly stanoveny podobně jako u femtosekundového laseru, s tím rozdílem, že u tohoto stroje je

zapotřebí menší zastavěná plocha. Tyto náklady činí 96 tis. Kč/rok. Celkové roční fixní náklady nanosekundového laseru bez započítání mzdy obsluhy byly stanoveny na 385 tis. Kč. Rozpis jednotlivých položek ročních fixních nákladů je v Tab. 24.

Odhadovaná pořizovací cena [Kč]	2 500 000
Odpisová doba [roky]	10
Odpis [Kč/rok]	250 000
Fixní energie [Kč/rok]	9600
Cena energie [Kč/kWh]	5
Počet hodin stand-by [hod./rok]	240
Spotřeba stand-by [kWh/h]	8
Údržba [Kč/rok]	30 000
Náklady prostoru [Kč/rok]	96 000
Zabraná plocha [m ²]	8
Náklady na m ² [Kč/m ² /rok]	12 000
Roční fixní náklady celkem [Kč/rok]	385 600

Tab. 24: Rozpad položek ročních fixních nákladů pro nanosekundový laser

U každého z laserových zařízení je počítáno s obsluhou v jednosměnném provozu. Náklady na obsluhu s uvažovanou hrubou měsíční mzdou 32 tis. jsou po připočtení odvodů (24,8% sociální pojištění, zdravotní pojištění 13,5%, celkem 33,8% [92]) 42 816 Kč měsíčně. Ročně tak náklady na operátora jednoho laserového zařízení činí 513 792 Kč viz Tab. 25.

	měsíčně	ročně
Hrubá mzda [Kč]	32000	384000
Odvody (SZP + sociální fond) [Kč]	10816	129792
Super hrubá mzda [Kč]	42816	513792

Tab. 25: Náklady na obsluhu jednoho laserového zařízení

Celkové fixní náklady jsou pak součtem nákladů na odpisy stroje a jeho provoz bez ohledu na počet vyrobených kusů.

V kalkulacích není uvedena režie pracoviště, která významně ovlivňuje cenu výrobku. Nicméně tato režie by neměla vliv na cenu laserem upraveného nástroje z hlediska porovnání nákladů při použití dvou nebo jednoho laserového zařízení.

7.2 Porovnání nákladů na výrobu utvařeče třísek

Pro porovnání nákladů na výrobu utvařeče třísek komplexním přístupem a pouze femtosekundovým laserem byly použity výrobní časy z provedeného experimentu. Ke každému z procesních časů byl přiřazen čas dávkovací a přípravný – 1 minuta ke každé operaci. Celkově tak výroba utvařeče komplexním způsobem vychází na 4,05 minuty včetně dvou dávkovacích časů, z toho výroba na nanosekundovém laseru trvala 1,55 minuty a femtosekundovém 2,5 minuty. Výrobní čas na femtosekundovém laseru při přičtení jedné minuty dávkovacího času je 5,8 minuty. Pro výpočet nákladů byly výrobní časy vynásobeny fixními náklady včetně nákladů na mzdu s připočtením nákladů na spotřebu elektrické energie v zatížení a stlačeného vzduchu. Výsledné náklady na jeden vyrobený kus (Kč/ks) komplexním způsobem a pouze nanosekundovým a femtosekundovým laserem jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 26). Komplexním přístupem bylo ušetřeno 46 % nákladů oproti obrábění pouze femtosekundovým laserem, a to při uvažování odpisové doby strojů 10 let a jejich využitelnosti 85 % v jednosměnném provozu. Kromě ušetřených nákladů bylo komplexním přístupem dosaženo také úspory výrobního času a to o 30 %. Nanosekundovým laserem je možné ušetřit až 86 % nákladů, nicméně jak bylo ověřeno při testech obrábění, tyto nástroje jsou náchylné na vytrhávání řezné hrany a dosahují téměř nulové trvanlivosti.

Způsob laserového mikroobrábění	Náklady na výrobu jednoho kusu (Kč/ks)	Procesní čas včetně dávkovacího (min)
Komplexní přístup		
Ns laser	14,4	1,55
Fs laser	57,4	2,5
celkem	71,8	4,05
jen ns laser	16,9	1,8
jen fs laser	134	5,8

Tab. 26: Náklady na výrobu jednoho kusu různými přístupy laserového mikroobrábění včetně procesních časů

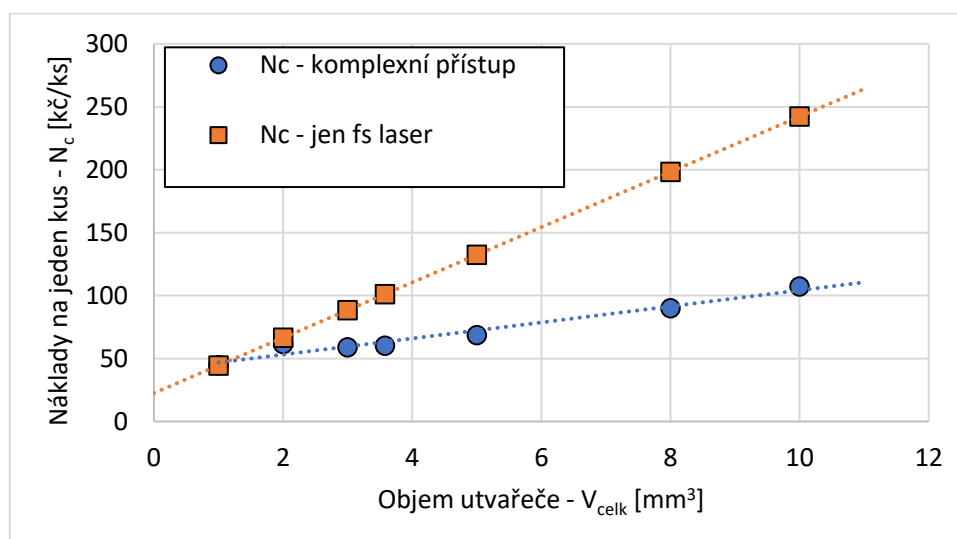
7.3 Náklady vzhledem k objemu vytvářené entity

Pro ověření citlivosti ekonomického modelu na objem vytvářené entity (utvařeče třísek), bylo vybráno 7 modelových případů. Tyto případy se lišily v objemu utvařeče, maximální hloubce entity a velikosti hloubky čelní fazety. Dále bylo uvažováno, že byly všechny případy vytvořeny stejným výkonem pro hrubování – 70 W. Zvolené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 27. Modelové hodnoty byly použity pro výpočet nákladů na jeden kus při použití komplexního přístupu a při použití pouze femtosekundového laseru. Pro výpočet nákladů na jeden kus byly použity hodinové režijní sazby při použití femtosekundového laseru a při použití komplexního přístupu.

Objem utvařeče [mm ³]	10	2	3.6	3	5	8	1
Maximální hloubka entity [μm]	500	100	300	200	400	450	50
Zvolený výkon pro hrubování [W]	70						
Hloubka čelní fazety [μm]	150	30	100	60	120	130	20

Tab. 27: Modelové případy pro ověření ekonomického modelu

Zpracování nákladů na jeden kus v závislosti na objemu utvařeče a různých přístupech laserového obrábění je v grafu na Obr. 107.



Obr. 107: Graf nákladů na jeden kus (N_c) v závislosti na objemu utvařeče pro komplexní přístup a jen fs laser

Z porovnání nákladů na výrobu jednoho kusu utvařeče vyplývá, že pro malé objemy a hloubky utvařečů dochází k výrobě pouze fs laserem a grafy se shodují. Pro větší objem utvařeče roste rozdíl v nákladech mezi komplexním přístupem a výrobou pouze fs laserem. U komplexního přístupu jsou také patrné

konstantní náklady při malých objemech utvařečů. To je dáno zejména podobným časem pro dokončování entit, který činí významnou část nákladů. Pro větší objem utvařeče roste i rozdíl mezi oběma závislostmi a ukazuje se přínos komplexního přístupu.

7.4 Návratnost investice

Pořízení druhého laserového zařízení pro realizaci entit na nástrojích znamená vícenásobek se kterým je zapotřebí kalkulovat. Dříve uvedené výpočty nákladů na kus vychází z předpokladu, že se jedná o sériovou produkci po dobu odpisů obou strojů tj. 10 let. V následujících modelech se vychází z předpokladu, že je výroba omezena jen na určitý počet celkových kusů. Zohledňuje se proto přímá cena zařízení na každý kus. Ve výpočtech je brána v úvahu stejná kapacita zařízení jako v předchozích kalkulacích, stejně tak jako časové náročnosti operací včetně dávkového a neproduktivního času. V následující tabulce (Tab. 28) jsou uvedeny hodnoty použité pro následné výpočty nákladů na výrobu jednoho kusu při různých počtech vyráběných kusů, viz Tab. 29. V této tabulce jsou počítány výrobní náklady pro různý počet vyráběných kusů. Pro výpočet byla použita data z reálné výroby utvařeče.

Disponibilní kapacita [hod/rok]	
ns laser	1516
fs laser	1496
Výrobní čas včetně dávkovacího [min]	
komplexní přístup – ns laser	1,55
komplexní přístup – fs laser	2,5
celkem	4,05
jen fs	5,8

Tab. 28: Vstupní hodnoty pro výpočet nákladů na výrobu při různých počtech vyráběných kusů

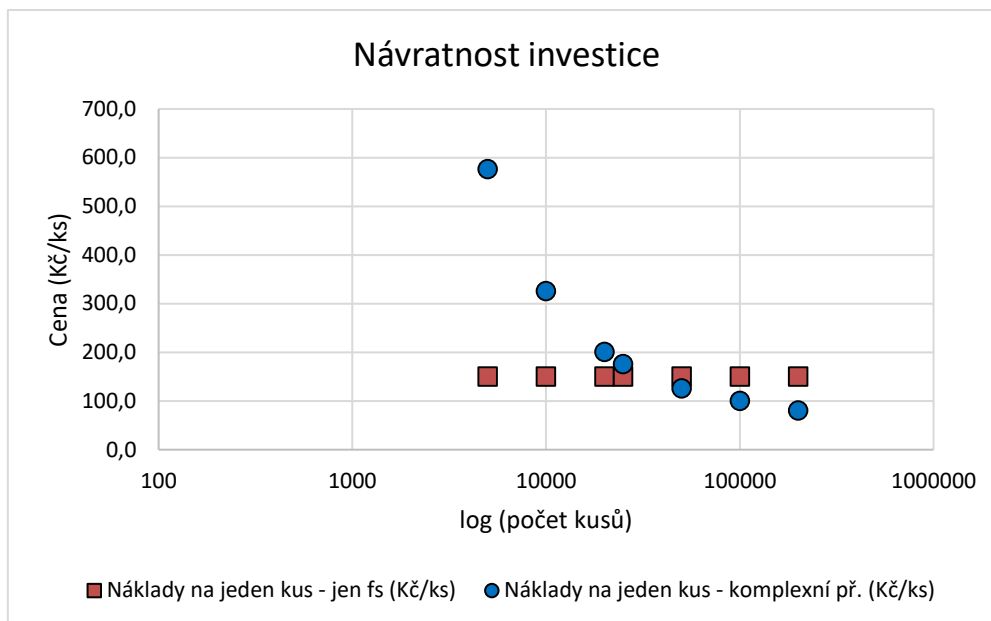
Modelově byly zvoleny různé velikosti dávek od 5000 kusů až do 1 milionu kusů. Pro každý případ byl dopočten čas výroby dle disponibilních ročních kapacit jednotlivých zařízení a podle času potřebného k výrobě jednoho utvařeče. Následně byly použity hodinové režijní sazby (HRS) z předchozí kalkulace pro výpočet celkových nákladů na výrobu utvařečů pouze femtosekundovým laserem. U komplexního přístupu byly dopočítány hodinové režijní sazby nanosekundového laseru podle času potřebného k výrobě jedné dávky. Proto jsou HRS – nano uvedeny

zvlášť a liší se podle počtu vyráběných kusů. Následně byly dopočteny ceny jednoho kusu ze součtu nákladů na nanosekundovém a femtosekundovém laseru.

počet kusů	5000	10000	20000	25000	50000	100000	200000
čas výroby jen fs [h]	555,8	1111,7	2223,3	2779,2	5558,3	11116,7	22233,3
čas výroby jen fs [dny]	69,5	139,0	277,9	347,4	694,8	1389,6	2779,2
čas výroby jen fs [roky]	0,37	0,74	1,49	1,86	3,72	7,43	14,86
Celkové náklady – jen fs [tis. Kč]	753	1506	3012	3765	7530	15060	30120
Náklady na jeden kus - jen fs [Kč/ks]	150,6	150,6	150,6	150,6	150,6	150,6	150,6
Čas výroby komplexní př. – nano [hod.]	149	297	594	743	1485	2971	5942
Čas výroby komplexní př. - femto [hod.]	240	479	958	1198	2396	4792	9583
Čas výroby komplexní př. – celkem [hod.]	388	776	1553	1941	3881	7763	15525
změna HNS – nano [Kč/hod.]	17227	8797	4582	3739	2053	1210	532
Náklady ns [tis. Kč]	2558	2613	2722	2776	3049	3594	3160
Náklady fs [tis. Kč]	324	649	1298	1622	3245	6491	12982
Celkové náklady – komplex [tis. Kč]	2883	3262	4020	4399	6295	10086	16143
Náklady na jeden kus - komplexní př. [Kč/ks]	576,7	326,3	201,0	176,0	125,9	100,9	80,7

Tab. 29: Výpočet celkových časových a finančních nákladů na různý počet vyrobených kusů

Pro rozpočítání nákladů na pořízení druhého (nanosekundového laseru) jsou HNS přepočteny na cenu zařízení včetně ročních fixních nákladů spjatých s náklady na obsluhu, údržbu a energie. Pro malý počet kusů, např. 5000 je také vidět vysoký nárůst hodnoty HNS, a to díky krátkému času potřebnému k výrobě celé dávky. Pro vyšší počet kusů se začíná cena výroby jednoho kusu snižovat a pro velikost dávky okolo 38 tis. kusů je pořízení druhého laseru zaplacené, jak je patrné z grafu na Obr. 108. Jedná se o počet kusů, který je pouze na fs laseru vyrobitelný za 2,7 roku, nicméně komplexním přístupem je možno tento objem kusů vyrobit za 2 roky. Tato časová úspora není v návratnosti investice do dalšího laserového zařízení započítána.



Obr. 108: Graf závislosti ceny za jeden kus při různém počtu kusů v dávce při použití pouze fs laseru a komplexního přístupu.

7.5 Dílčí shrnutí

Na základě představeného konceptu komplexního laserového mikrobrábění bylo provedeno ekonomické zhodnocení tohoto přístupu. V prvním kroku byly stanoveny náklady na pořízení dvou strojů místo jednoho včetně kalkulace fixních nákladů a nákladů na obsluhu při provozu těchto zařízení. Následně byly vypočteny náklady na výrobu utvařeče třísek klasickým způsobem femtosekundovým laserem a komplexním přístupem. Pro tento výpočet byla využita odpisová doba strojů 10 let a jejich provoz na 85 % kapacity v jednosměnném provozu. Při tomto provozu je cena výroby utvařeče třísek komplexním způsobem téměř o polovinu nižší (72 Kč oproti 134 Kč) oproti výrobě pouze femtosekundovým laserem. Utvařeč je možné vytvořit také pouze nanosekundovým laserem za zlomek nákladů, nicméně vzhledem k minimální trvanlivosti takto vytvořeného nástroje není takový způsob výroby vhodný. Dále byly vypočítány náklady na výrobu utvařeče komplexním způsobem a fs laserem z hlediska jeho objemu. Z této simulace vyplynulo, 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 počet kusů nástrojů, který je potřeba vyrobit, aby se vrátila investice spojená s pořízením druhého stroje, tj. nanosekundového laseru pro hrubování. Z tohoto výpočtu vyplynulo, že pro splacení nanosekundového laseru, včetně nákladů na jeho provoz, je potřeba vyrobit 38 tis. kusů a jejich výroba zabere 2 roky při jednosměnném provozu. V tomto výpočtu navíc není započítán výrobní čas, který bude díky druhému laseru ušetřen. Při výrobě stejného počtu kusů na pouze femtosekundovém laseru by trvala výroba 2,7 roku. Navržený komplexní způsob může být také vhodné provozovat na laseru který je např. ve firmě pro popisování nástrojů. Nanosekundové lasery jsou totiž běžné jako popisovací. Díky tomu by došlo také ke snížení nákladů a rychlejší návratnosti investice.

8 Celkové shrnutí výsledků

Pro naplnění cílů disertační práce byla navržena metodika, která v prvním kroku stanovuje postupy pro určení efektivního laserového mikroobrábění dvěma typy laserových zdrojů s dlouhými pulsy (nanosekundový) a s ultrakrátkými pulsy (femtosekundový). Testování interakce laserového záření se slinutým karbidem s označením TH10 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 galvoskenery, 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. Oba zmíněné postupy vedly ke zvýšení efektivity ablace až čtyřnásobně.

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. Úspěšně tak byla ověřena myšlenka komplexního přístupu.

Již od stanovení metodiky komplexního přístupu byl jako klíčový parametr označován přídavek pro dokončování. Tuto tloušťka 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 s ohledem na produktivitu, ekonomičnost a kvalitu obrobeneho povrchu.

K ověření navržené metodiky byly dále navrženy a realizovány experimenty konvenčního obrábění laserem modifikovanými nástroji. Do komerčně dostupných nástrojů ze slinutého karbidu (TH10) byly

vytvořeny utvařeče třísek metodou komplexního přístupu, a pouze femtosekundovým a nanosekundovým laserem. 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, aby byl ověřen celkový postup navržené metodiky. Laserem modifikované nástroje byly v dobré shodě s referenčním nástrojem. 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. 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 utvařečem vytvořeným komplexním přístupem byla řezivost srovnatelná s lisovaným nástrojem, včetně řezných sil a utváření třísky. 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.

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

V následující tabulce jsou shrnuty hlavní poznatky z náročnosti výroby utvařečů jednotlivými technologiemi a jejich porovnání. Klíčovými porovnávacími aspekty jsou náročnost a nákladovost výroby, kvality vytvořeného utvařeče a jeho řezivost.

Typ utvařeče	Cena jednoho břitu nástroje při maximalizaci produkce [Kč]	Kvalita	Trvanlivost nástroje [s]	Složitost výroby	Výhody	Možné nevýhody
lisovaný	150 (cena nakoupeného nástroje se 4 břity)	Velmi dobrá kvalita utvařeče, nicméně s jistými limity např. zaoblení ostří	360	Potřeba prášku, formy, lisu a vytvrzovací pece	Sériovost produkce, dostatečná kvalita povrchu a ostří	Složitý proces na odladění, potřeba specifické formy pro jeden tvar utvařeče třísek
Pouze ns	35 (cena nástroje bez marže a nákladů na materiál)	Špatná kvalita utvařeče a zejména řezné hrany vedoucí k jeho velmi malé trvanlivosti	60	Potřeba pouze ns laseru	Univerzálnost tvaru utvařeče, rychlost výroby, nízké pořizovací náklady stroje, nízké provozní náklady	Velmi malá trvanlivost nástroje díky významnému tepelnému ovlivnění a nekvalitě řezné hrany
Pouze fs	134 (cena nástroje bez marže a nákladů na materiál)	Velmi vysoká kvalita utvařeče srovnatelná s lisovaným. Kvalita řezné hrany vyšší než u lisovaného vedoucí k větší trvanlivosti	420	Potřeba pouze fs laseru	Velmi přesný proces bez negativního tepelného ovlivnění materiálu	Vysoké pořizovací náklady laserového zařízení, velmi dlouhý proces laserového mikrobrábění
Komplexní přístup	72 (cena nástroje bez marže a nákladů na materiál)	Dobrá kvalita utvařeče bez tepelného ovlivnění včetně dobré řezné hrany vedoucí ke shodné řezivosti s lisovaným nástrojem	360	Potřeba ns a fs laseru	Proces kombinující rychlost a přesnost výroby obou laserových zařízení, univerzální použití napříč řeznými materiály	Vysoké pořizovací náklady laserového zařízení včetně nákladů na druhé zařízení, případně i jeho obsluhu

Tab. 30: Celkové shrnutí porovnávaných výrobních technologií pro utvařeče třísek dle hlavních aspektů

9 Důsledky pro vědu a průmyslovou praxi

V této práci navržená a otestovaná metoda komplexního přístupu přináší nový pohled na celou technologii laserového mikroobrábění a její vazby na nástrojové materiály. 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. 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. I z tohoto důvodu není k nalezení příliš vědeckých publikací zabývajících se interakcí laseru s tímto materiálem. Příkladem jsou grafy efektivity ablace slinutého karbidu, porovnání efektivity a intenzity ablace při použití různých vlnových délek, efektivita ablace a dosahovaná kvalita povrchu při využití burst-módu, a další. Přínosné by mohly být i provedené materiálové analýzy včetně analýzy tepelně ovlivněné oblasti po procesu hrubování nanosekundovým laserem.

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 vyrábí ze slinutého karbidu. 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%. Pro ověření smysluplnosti přístupu byla provedena ekonomická kalkulace náročnosti celého procesu a zejména kalkulace vícenákladů spojených s pořízením druhého laserového zařízení. 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. Dále byly stanoveny náklady na pořízení druhého laserového zařízení a limitní počet vyrobených kusů který vede k návratnosti investice. Dále byl navržen empirický model, který na základě experimentálních dat z testů ablace jednotlivými laserovými zařízeními predikuje výrobní čas operace a také moment kdy dochází ke změně z hrubování na dokončování. Predikce času výroby může vést k lepšímu plánování výroby a celého procesního řetězce. Další myšlenkou této práce je, že celkový navržený postup může sloužit jako metodika pro efektivní obrábění dalších nástrojových materiálů. Vhodný by tento přístup mohl být například pro nástroje z kubického nitridu bóru u kterých je problematické utvařeče třísek vytvářet. Navrženým komplexním přístupem by bylo možné tyto nástroje obrábět efektivně bez omezení jejich funkčních vlastností.

10 Doporučení pro další výzkum

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. Navržený a otestovaný komplexní přístup může být dobře použit u kubického nitridu boru (CBN), který patří mezi ultra-tvrdé nástrojové materiály a jeho obrobiteľnosť konvenčnými metodami je obtížná. Navíc tyto materiály získávají na oblibě a jejich objem každoročně roste. Dalším nástrojovým materiálem vhodným pro obrábění komplexním přístupem je řezná keramika. Tento materiál je velmi dobře laserem obrobiteľný a efektivita ablace je několikrát vyšší než u slinutého karbidu. Další výzkum by bylo také dobré směřovat do testování obrobiteľnosti komplexním způsobem polykrystalického diamantu. Tento materiál je velmi dobrý tepelný vodič a jeho obrobiteľnosť laserem je naopak velmi nízká. Navíc je velmi teplotně citlivý a již při nízké teplotě dochází k jeho grafitezaci, která způsobuje snížení životnosti nástroje.

Velký potenciál v dalším výzkumu vidím také u použití burst-módu. Tato technika generování pulsů je na trhu jen několik málo let a ukazuje se, že může být převratnou při zvyšování efektivity ablace femtosekundových laserů. Další výzkum, a i trh s laserovými zdroji se posouvá významně dopředu, a to nejen ve zvyšování výkonu laserů, ale zároveň ke zvyšování jejich účinnosti a snižování ceny. Z tohoto důvodu může být nynější investice do laserového mikroobrábění vysoká.

Trh s lasery pracujícími s ultrakrátkými pulsy (pikosekundy, femtosekundy) každoročně roste o několik procent. Prognózy dokonce předpokládají 15% každoroční nárůst do roku 2028 viz Obr. 109 [93]. Stejně tak roste i objem aplikací mikroobrábění, kde se tyto lasery využívají. Spolu s nárůstem objemu tohoto segmentu na trhu se předpokládá i pokles ceny a vyšší dostupnost těchto laserových zdrojů. Tento trend snižování ceny za jednotku výkonu je dobře pozorovatelný u laserových zdrojů s vyššími výkony. Dá se tedy předpokládat, že s větší dostupností laserových zdrojů bude otevírat jejich nové aplikační možnosti, mezi které patří další výzkum v oblasti femtosekundového obrábění a také navrženým komplexním přístupem.



Obr. 109: Predikce trhu s lasery s ultrakrátkými pulsy [93]

11 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.

Rešerši současného stavu poznání se věnuje kapitola 2, která popisuje řezné materiály, technologii mikroobrábění laserem a úpravu geometrie řezných nástrojů s využitím různých typů laserů. Závěr této kapitoly je věnován metodám ke zvyšování efektivity mikroobrábění laserem. Dílčí část je také věnována komplexnímu přístupu, který kombinuje nanosekundový a femtosekundový laserový zdroj pro proces hrubování a dokončování. Nicméně publikovaná studie v tomto tématu se věnuje obrábění oceli bez bližší analýzy tepelného vlivu nebo drsnosti povrchu po hrubování. Z tohoto důvodu jsou postupy, metodiky a závěry popsané v této práci unikátní a dříve nepublikované.

Kapitola 4 „Návrh a zpracování metodiky efektivního laserového mikroobrábění“, se věnuje popisu postupů vedoucích ke stanovení efektivního obrábění laserem, a to od nastavení procesních parametrů, strategií až po popsání metodiky komplexního přístupu. Uvedené dílčí postupy nejsou v literatuře nové, nicméně jejich kombinace a celkové zpracování je unikátní.

V kapitole 5 jsou popsány výsledky již dílčích experimentů zabývajících se interakcí dvou typů laserů s vybraným nástrojovým materiálem, kterým byl slinutý karbid. Provedené experimenty vedly ke stanovení procesních parametrů vedoucích k efektivní ablací materiálu při dosažení požadované kvality povrchu, jak nanosekundovým, tak femtosekundovým laserem. 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 je klíčové stanovení přídavku pro dokončování, tak aby byl proces efektivní a došlo ke zlepšení povrchu. K tomuto účelu byl navržen prediktivní empirický model, který na základě parametrů hrubování a parametrů vytvářené entity určí velikost přídavku pro dokončování a odhadne čas celého procesu.

Následně byly v kapitole 6 použity optimalizované procesní parametry a navržené postupy 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 obrobeneho povrchu. U komplexního přístupu byla pozorována lepší tvorba třísky, zejména v začátku obrábění, než u nástroje lisovaného.

Na závěr této práce, v kapitole 7, 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.

12 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.

Dílními cíli disertační práce byly:

- Stanovení dílních technologických parametrů pro efektivní mikroobrábění slinutého karbidu laserem, a to pro hrubovací (nanosekundový) i dokončovací (femtosekundový) proces. Technologické parametry pro efektivní procesy hrubování a dokončování i s ohledem na kvalitu povrchu byly nalezeny a následně použity pro další experimenty.

Dílní cíl byl splněn

- Definovat a otestovat velikost přídávku pro dokončování, jako klíčového parametru pro návaznost operací hrubování a dokončování s cílem požadovaného tvaru a kvality povrchu. 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 přídávku pro dokončování byla také ověřena metalografickou analýzou u vzorků použitých pro test řezivosti.

Dílní cíl byl splněn

- 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.

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.

Dílní cíl byl splněn

- Tvorba empirického modelu sloužícího k výpočtu přídávku pro dokončování s ohledem na požadovanou hloubku a kvalitu povrchu vytvářené 3D entity. Empirický model byl vytvořen a použit pro stanovení výpočtu přídávku 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.

Dílní cíl byl splněn

- Definování ekonomického hlediska zvolené strategie a porovnání efektivity inovativního přístupu s klasickým.

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.

Dílčí cíl byl splněn

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.

13 Citovaná literatura

- [1] RIZZO, Antonella, Saurav GOEL, Maria GRILLI a Roberto IGLESIAS. The Critical Raw Materials in Cutting Tools for Machining Applications: A Review. *Materials*. Basel: MDPI, 2020, **13**(6). Dostupné z: doi:10.3390/ma13061377
- [2] PETRŮ, Jana. *Současný vývoj v oblasti řezných nástrojů*. MM Průmyslové spektrum, 2020, (5).
- [3] GENGA, R. M., L. A. CORNISH, M. WOYDT, A. JANSE VAN VUUREN a C. POLESE. *Contents lists available at ScienceDirect International Journal of Refractory Metals & Hard Materials journal homepage: www.elsevier.com/locate/IJRMHMMicrostructure, mechanical and machining properties of LPS and SPS NbC cemented carbides for face-milling of gr.* International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, (73).
- [4] SUGIHARA, T. a T. ENOMOTO. *Performance of cutting tools with dimple textured surfaces: A comparative study of different texture patterns* [online]. Precision Engineering, 2017, (49), 52-60 [cit. 2020].
- [5] BAUMEISTER, M, Dickmann K. a et AL. *Fiber laser micro-cutting of stainless steel sheets*. Appl. Phys. A, 2006, . Dostupné z: doi:DOI: 10.1007/s00339-006-3687-9
- [6] HERWIG, Patrick. REMOTE LASER CUTTING OF METALLIC MATERIALS. *Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS* [online]. 2019 [cit. 2020]. Dostupné z: https://www.iws.fraunhofer.de/content/dam/iws/en/documents/publications/product_sheets/400-5b_remote_metalle_en.pdf
- [7] BUCHFINK, Gabriela. *The Laser as a Tool*. Wutzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 2007.
- [8] MILLER, Philip, Ravi AGGARWAL a ET AL. *Laser Micromachining for Biomedical Applications*. 2009, .
- [9] JUDY, Jack. Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications. *Smart Materials and Structures*. IOP Publishing, 2001, **2001**(10), 1115-1134.
- [10] 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/>
- [11] HUSÁK, Miroslav. Užití MEMS v průmyslu. *AUTOMA*. 2008, **2008**(12).
- [12] OXFORD LASERS. Laser micro cutting. *Oxford Lasers* [online]. 2019 [cit. 2020]. Dostupné z: <https://www.oxfordlasers.com/laser-micromachining/laser-micro-cutting>
- [13] HECHT, Jeff. *Short history of laser development*. Auburndale: Optical Engineering, 2010, **49**(9).

- [14] IPG PHOTONICS CORPORATION. IPG Technology. *IPG Photonics* [online]. 2017 [cit. 2018]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/whyipg>
- [15] MEIJER, J., K. DU. a A. GILLNER. *Laser Machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons* [online]. 2002, , s. 531-550 [cit. 2019]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61699-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61699-0)
- [16] ČERMÁK, Adam. *Laser v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů*. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2017.
- [17] DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING. Section 2.9: Reflection and Absorption of Laser Beams. *Advanced Manufacturing Laboratory* [online]. 2018 [cit. 2018]. Dostupné z: <http://www.aml.engineering.columbia.edu/ntm/level2/ch02/html/l2c02s09.html>
- [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] VRBOVÁ, Miroslava a Helena JELÍNKOVÁ. *Úvod do laserové techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998.
- [21] 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](https://doi.org/10.5772/63892)
- [22] 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-backtobasics-primer>
- [23] CHENG, Jian, Chang-sheng LIU a ET AL. *A review of ultrafast laser materials micromachining* [online]. Optics & Laser Technology, 2013, (46), 88-102 [cit. 2020].
- [24] PASCHOTTA, R. Femtosecond Lasers. *RP Photonics encyclopedia* [online]. 2018 [cit. 2020]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/femtosecond_lasers.html
- [25] CARBIDE: Femtosecond Lasers for Industry and Science. *LIGHT CONVERSION* [online]. 2020 [cit. 2020]. Dostupné z: <http://lightcon.com/uploads/datasheets/CARBIDE%20datasheet%20-%2020200114.pdf>
- [26] DENKER, B. a E. SHKLOVSKY. *Handbook of solid-state lasers: Materials, systems and applications*. Portland: Ringgold, Inc, 2013.

- [27] DLIP Quickly Changing Surface Functionalization. *Photonics.com* [online]. 2016 [cit. 2018]. Dostupné z: https://www.photonics.com/a60796/DLIP_Quickly_Changing_Surface_Functionalization
- [28] READY, John a Dave FARSON. *LIA Handbook of laser materials processing*. Orlando: Laser Institute of America Magnolia Publishing, Inc., 2001.
- [29] POLYGON SCANNING. *Next scan technology* [online]. 2020 [cit. 2020]. Dostupné z: <https://nextscantechnology.com/technology/>
- [30] SCANcube. *SCANLAB: innovators for industry* [online]. 2019 [cit. 2020]. Dostupné z: <https://www.scanlab.de/sites/default/files/PDF-Dateien/Data-Sheets/Scan-Systems/SCANcube-EN.pdf>
- [31] DMG MORI. *LASERTEC 20 PrecisionTool* [online]. 2020 [cit. 2020]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/lasertec/lasertec-precisiontool/lasertec-20-precisiontool>
- [32] 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/>
- [33] 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>
- [34] 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
- [35] 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/>
- [36] ELAS. *Portfolio* [online]. Elas [cit. 2020]. Dostupné z: <https://e-lasers.com/product/>
- [37] KUNZE, Tim. DIRECT LASER INTERFERENCE PATTERNING: TAILORED STRUCTURING SOLUTIONS. *FRAUNHOFER INSTITUTE FOR MATERIAL AND BEAM TECHNOLOGY IWS* [online]. 2019 [cit. 2020]. Dostupné z: https://www.iws.fraunhofer.de/content/dam/iws/en/documents/publications/product_sheets/800-6_DLIP_solutions.pdf
- [38] RYK, G. a I. ETSION. *Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction* [online]. 2006, , s. 792-796 [cit. 2019]. Dostupné z: doi:doi:10.1016/j.wear.2006.01.031

- [39] KONG, Tiantian, Guanyai LUO a et ALL. *Bioinspired Superwettability Micro/Nanoarchitectures: Fabrications and Applications* [online]. *Advanced Functional Materials*, 2019, **29**(11) [cit. 2019].
- [40] HARTJEN, P., O. NADA a N. GULOW. *Cytocompatibility of Direct Laser Interference-patterned Titanium Surfaces for Implants* [online]. *In vivo*, 2017, (31), 849-854 [cit. 2018]. Dostupné z: doi:10.21873/invivo.11138
- [41] CLARK, P., P. CONNOLLY a A. CURTIS. *Topographical control of cell behaviour: II. multiple grooved substrata* [online]. *Development*, 1990, (108), 635-644 [cit. 2018]. Dostupné z: <http://dev.biologists.org/content/develop/108/4/635.full.pdf>
- [42] A. ARSLAN, H. *Surface Texture Manufacturing Techniques and Tribological Effect of Surface Texturing on Cutting Tool Performance: A Review* [online]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2016, , 447-481 [cit. 2020].
- [43] 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, .
- [44] WU, Maochao, Aibing YU, Qiujie CHEN a Yanlin WANG. *Design of adjustable chip breaker for PCD turning tools*. 2020, .
- [45] Technologie. *Rotana* [online]. 2020 [cit. 2020]. Dostupné z: <https://www.rotana.cz/12-technologie.html>
- [46] Applications. *Hofmeister Innovation* [online]. 2020 [cit. 2020]. Dostupné z: <http://hofmeister-innovation.eu/>
- [47] 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).
- [48] 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).
- [49] BIČIŠŤOVÁ, Radka a Jaroslav ŘASA. *Výzkum využití 3D gravírování laserem pro výrobu zkušebních utvařečů třísky na vyměnitelných břitových destičkách*. Praha: Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, 2011.
- [50] ČERMÁK, Adam. *Laser v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojí, 2017.
- [51] CASCÓN, Itxaso. *Tailored Chip Breaker Development for Polycrystalline Diamond Inserts: FEM-Based Design and Validation*. 2019, . Dostupné z: doi:doi:10.3390/app9194117
- [52] LEITZ, Karl-Heinz, Benjamin REDLINGSHÖFER, Yvonne REG a Andreas OTTO. *Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses*. *Physics Procedia*, 2011, (12).

- [53] NEUENSCHWANDER, B., B. JAEGGI a M. SCHMID. *From fs to sub-ns: Dependence of the material removal rate on the pulse duration for metals*. Physics Procedia, 2013, **41**.
- [54] DANIEL, Christian a ET AL. Picosecond laser processing of polycrystalline cubic boron nitride — A method to examine the ablation behavior of a high cubic boron nitride content grade material. *Journal of Laser Applications*. Laser Institute of America, 2015, (28). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2351/1.4931930>
- [55] STANKEVIČ, Valdemar a ET AL. Processing of ultra-hard materials with picosecond pulses: From research work to industrial applications. *Journal of Laser Applications*. Laser Institute of America, 2018, (30). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2351/1.5040633>
- [56] EBERLE, Gregory a Konrad WEGENER. *Ablation study of WC and PCD composites using 10 picosecond and 1 nanosecond pulse durations at green and infrared wavelengths*. Physics Procedia, 2014, **56**, 951–962.
- [57] KIM, Sung Hoon, Ik-Bu SOHN a Sungho JEONG. *Ablation characteristics of aluminum oxide and nitride ceramics during femtosecond laser micromachining*. Applied Surface Science, 2009, **255**(24).
- [58] PERRIE, W. *Femtosecond laser micro-structuring of alumina ceramic*. Applied Surface Science, 2005, **248**(1), 213-217.
- [59] 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](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.014)
- [60] METZNER, Daniel, Peter LICKSCHAT a Steffen WEIßMANTEL. *High-quality surface treatment using GHz burst mode with tunable ultrashort pulses*. Applied Surface Science, 2020, . Dostupné z: doi:[10.1016/j.apsusc.2020.147270](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147270)
- [61] AMPLITUDE. Tangor 100. <https://amplitude-laser.com/products/lasers-for-industry/tangor/>. 2022.
- [62] GIANNUZZI, G. *Laser micromachining with bursts of ultrashort pulses*. disertační práce: Università Degli Studi Di Bari Aldo Moro, 2018.
- [63] KRAMER, T., Z. YIGMIN, S. REMUND, B. JAEGGI a A. MICHALOWSKI. Increasing the Specific Removal Rate for Ultra Short Pulsed Laser-Micromachining by Using Pulse Bursts. *JLMN - Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. 2017, **12**(2). Dostupné z: doi:[10.2961/jlmn.2017.02.0011](https://doi.org/10.2961/jlmn.2017.02.0011)
- [64] ŽEMAITIS, Andrius, Paulius GEČYS, Marynas BARKAUSKAS a Gediminas RAČIUKAITIS. Highly-efficient laser ablation of copper by bursts of ultrashort tuneable (fs-ps) pulses. *Scientific Reports*. 2019, (12280). Dostupné z: doi:[10.1038/s41598-019-48779-w](https://doi.org/10.1038/s41598-019-48779-w)

- [65] FÖRSTER, Daniel, Beat JÄGGI, Andreas MICHALOWSKI a Beat NEUENSCHWANDER. Review on Experimental and Theoretical Investigations of Ultra-Short Pulsed Laser Ablation of Metals with Burst Pulses. *Materials*. MDPI, 2021, **14**(3331). Dostupné z: doi:10.3390/ma14123331
- [66] METZNER, D., P. LICKSCHAT a S. WEIßMANTEL . Laser micromachining of silicon and cemented tungsten carbide using picosecond laser pulses in burst mode: ablation mechanisms and heat accumulation. *Applied Physics A*. Springer, 2019, (4622019). Dostupné z: doi:10.1007/s00339-019-2755-x
- [67] BRENNER, Andreas, Fabian KURZIDIM, Christian FORNAROLI a Arnold GILLNER. *Combination of short and ultrashort pulse laser processing for productive large scale structuring of 3D plastic mould steel*. Aachen: Journal of Laser Applications, 2018.
- [68] 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).
- [69] BRENNER, Andreas, Markus ZECHERLE, Sven VERPOORT, Kersten SCHUSTER a Claus SCHNITZLER. *Efficient production of design textures on large-format 3D mold tools*. Journal of Laser Applications, 2020, **32**.
- [70] BRECHER, Christian, Michael EMONTS, Jan-Patrick HERMANI a Thomas STORMS. *Laser Roughing of PCD*. Physics Procedia, 2014, (56).
- [71] LEITZ, Karl a Benjamin REDLINGSHÖFER. *Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses* [online]. Erlangen, Německo: Physics Procedia, 2011, (12), 230-238 [cit. 2019]. Dostupné z: doi:doi:10.1016/j.phpro.2011.03.128
- [72] ZHENG, Buxiang, Gedong JIANG a ET AL. *Surface ablation and threshold determination of AlCu4SiMg aluminum alloy in picosecond pulsed laser micromachining* [online]. Optics and Laser Technology, 2017, **94**(1), 267-278 [cit. 2019]. Dostupné z: doi:DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.02.003
- [73] Enhancing laser thin-film ablation. *Industrial-laser solutions* [online]. [cit. 2015]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-30/issue-1/features/enhancing-laser-thin-film-ablation.html>
- [74] MANNION, Paul,. *Ablation thresholds in ultrafast laser micromachinig of common metals in air*. Opto Ireland. International Society for Optics and Photonics, 2003, , 470-478.
- [75] SANNER NICOLAS, et. *Measurement of femtosecond laser-induced damage and ablation thresholds in dielectrics* [online]. Applied Physics A, 2009, (94), 889-897 [cit. 2019].
- [76] 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.

- [77] 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
- [78] WARHANEK, M., C. WALTER, M. HIRSCHI a J. BOOS. *Comparative analysis of tangentially laser-processed fluted polycrystalline diamond drilling tools*. 2016, .
- [79] ACKERL, Norbert, Maximilian WARHANEK, Johannes GYSEL a Konrad WEGENER. *Path calculation of 7-axes synchronous quasi-tangential laser manufacturing*. 2019, .
- [80] EBERLE, Gregory, Claus DOLD a Konrad WEGENER. *Laser fabrication of diamond micro-cutting tool-related geometries using a high-numerical aperture micro-scanning system*. 2015, .
- [81] DOLD, Claus. *Picosecond laser processing of diamond cutting edges*. Zurich: ETH Zurich, 2013.
- [82] DENKENA, Berend, Alexander KRODEL, Lars ELLERSIEK a Marita MURRENHOF. *Production of chip breakers on cemented carbide tools using laser ablation*. 2020, .
- [83] 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
- [84] DANIEL, Christian, Jannik MANDERLA, Sina HALLMANN a Claus EMMELMANN. *Influence of an angular hatching exposure strategy on the surface roughness during picosecond laser ablation of hard materials*. 2016, .
- [85] EBERLE, Gregory a Konrad WEGENER. Ablation Study of WC and PCD Composites Using 10 Picosecond and 1 Nanosecond Pulse Durations at Green and Infrared Wavelengths. *Physics Procedia*. 2014, **56**(-), 951-962. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2014.08.115
- [86] LI, Tiejun, Qihong LOU, Jingxing DONG, Yunrong WEI a Jingru LIU. Selective removal of cobalt binder in surface ablation of tungsten carbide hardmetal with pulsed UV laser. *Surface and Coatings Technology*. 2001, **145**(1-3), 16-23. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/S0257-8972(01)01288-9
- [87] UPADHYAYA, G.S. Materials science of cemented carbides — an overview. *Materials & Design*. 2001, **22**(6), 483-489. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/S0261-3069(01)00007-3
- [88] ZIMMERMANN, Marco, Benjamin KIRSCH, Yiyun KANG, Thomas HERRMANN a Jan C. AURICH. Influence of the laser parameters on the cutting edge preparation and the performance of cemented carbide indexable inserts. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020, **58**(-), 845-856. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2020.09.003
- [89] YANG, Jiao Xi, Xuan He MIAO, Zhi Cheng WANG a Xi Bing WANG. Nanosecond Excimer Laser Ablation (W,Ti)C-Co Cemented Carbide. *Advanced Materials Research*. 2012, **583**(-), 333-337. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.583.333

- [90] YEH, L.-Y., D. HELLRUNG, A. GILLNER a R. POPRAWA. Development in the model-industry: Micro-machining of hard metal (WC-10%Co) by Nd:YAG-laser. *ICALEO*. Laser Institute of America, 1999, **1999**(144), 144-152. Dostupné z: doi:10.2351/1.5059296
- [91] 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
- [92] MESEC.CZ. <https://www.mesec.cz/danovy-portal/dan-z-prijmu/socialni-a-zdravotni-pojisteni/>. *Daňový portál*. 2022.
- [93] RESEARCH, KBV. Global Ultrafast Lasers Market Size, Share & Industry Trends Analysis Report. <https://www.kbvresearch.com/ultrafast-lasers-market/>. 2022.
- [94] JAGDHEESH, R., M. DIAZ a J. L. OCANA. *Bio inspired self-cleaning ultrahydrophobic aluminium surface by laser processing* [online]. *RSC Advances*, 2016, (77), 72933-72941 [cit. 2018]. Dostupné z: <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2016/RA/C6RA12236A#!divAbstract>
- [95] SCHEIDELER, L. a J. GEIS-GERSTORFER. *Investigation of cell reactions to microstructured implant surfaces* [online]. *Materials Science and Engineering C*, 2013, (23), 455-459 [cit. 2018]. Dostupné z: doi:10.1016/S0928-4931(02)00321-1
- [96] MOCEK, Tomáš. Laser: supernástroj člověka 21. století. *AVCR* [online]. 2017 [cit. 2020]. Dostupné z: http://www.avcr.cz/opencms/export/sites/avcr.cz/.content/galerie-souboru/Laser_supernastroj-cloveka-21.-století.pdf
- [97] SUGIHARA, T. a T. ENOMOTO. *Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces* [online]. *Precision Engineering*, 2013, (37), 888–896 [cit. 2020].
- [98] ALAGAN, N. T. a P. ZEMAN. *Investigation of micro-textured cutting tools used for face turning of alloy 718 with high-pressure cooling* [online]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, (37), 606-616 [cit. 2020].
- [99] SIVAIAH, P., Venkata Ajay KUMAR a ET AL. *Ffect of novel hybrid texture tool on turning process performance in MQL machining of Inconel 718 superalloy* [online]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, (35), 61-71 [cit. 2020].
- [100] STOETERAU, Rodrigo L. , Andreas JANSSEN a Guilherme MALLMANN. *Analysis of dimple textured surfaces on cutting tools* [online]. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2016 [cit. 2020].
- [101] JIANXIN, Deng, Wu ZE a ET AL. *Performance of carbide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes* [online]. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, (30), 164-172 [cit. 2020].

- [102 ZHANG, Kedong, Jianxin DENG a ET AL. *Effect of microscale texture on cutting performance of WC/Co-basedTiAlN coated tools under different lubrication conditions* [online]. Applied Surface Science, 2015, (326), 107–118 [cit. 2020].
- [103 STANKEVIČ, Valdemar , Adam ČERMÁK a ET AL. *Processing of ultra-hard materials with picosecond pulses: From research work to industrial applications* [online]. Journal of Laser Applications, 2018, (30) [cit. 2020].
- [104 TAMIL ALAGAN, Nageswaran. *Effects of high-pressure cooling in the flank and rake faces of WC tool on the tool wear mechanism and process conditions in turning of alloy 718* [online]. Wear, 2019, (434–435) [cit. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.037>.
- [105 PAKUŁA, D., M. STASZUK, P. KOŹMÍN, A. ČERMÁK a M. DZIEKONSKA. *Structure and properties of coating obtained by Chemical Vapour Deposition with the laser microstructuring*. Vacuum, 2018, **153**.
- [106 OBIKAWA, Toshiyuki, Akihiro KAMIO, Hidemitsu TAKAOKA a Akira OSADA. *Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, (51).
- [107 KÜMMEL, Johannes, Daniel BRAUN, Jens GIBMEIER a Johannes SCHNEIDER. *Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation*. Journal of Materials Processing Technology, 2015, **215**.
- [108 NEVES, Davi, Anselmo DINIZ a MILTON SERGIO FERNANDES DE LIMA. *Efficiency of the laser texturing on the adhesion of the coated twist drills*. Journal of Materials Processing Technology, 2006, (179).
- [109 HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Brno, 2006.
]
- [110 CHANDLER, David. Explained: Phonons. *MIT News* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <http://news.mit.edu/2010/explained-phonons-0706>
- [111 KURZYNOWSKI, Tomasz a Edward CHLEBUS. *Parameters in Selective Laser Melting for processing metallic powders* [online]. Proceedings of SPIE, 2012, **8239**(8239) [cit. 2019].
- [112 *SURFACE HARDENING OF CEMENTED CARBIDE BODY* [online]. 2017 [cit. 2020]. WO 2017/167906 A1.

14 Publikace autora

14.1 Publikace přímo související s disertační prací

- [76] 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.
- [77] 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
- [83] 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
- [91] 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

14.2 Vědecké články

- [113] 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. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/9/2228>
- [114] 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.
- [115] 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.
- [116] 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.

14.3 Výzkumné zprávy

- [117] 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.
- [118] 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.

- [119] 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.
- [120] 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.
- [121] 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.
- [122] 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.
- [123] 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.
- [124] 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.

14.4 Patenty a užité vzory

- [125] 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>
- [126] ZEMAN, P. et al. *Prototyp nástroje z PKNB s optimalizovanou geometrií břitu.* [Prototyp] 2022.
- [127] Kožmín, P.; Čermák, A.; Šorm, M.; Surovátka, Š.; Surovátka, 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>

14.5 Ostatní publikace

- [128] 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.

- [129] ZEMAN, P. a T. PRIMUS. Efektivní laserové technologie pro změnu podoby a vlastností povrchu součástí. *TECHMAGAZÍN*. 2021,(09), 8-10. ISSN 1804-5413.
- [130] 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.

Seznam obrázků

Obr. 1: Rozdělení nástrojových materiálů podle jejich tvrdosti a houževnatosti [112].....	14
Obr. 2: Mikroobrábění laserem – řezání pro mikroelektronické komponenty (MEMS) [11].....	15
Obr. 3: Graf závislosti intenzity výkonu na délce pulsu pro výběr laserových technologických operací (upraveno) [14].....	15
Obr. 4: Graf absorpce nástrojových materiálů [16]	16
Obr. 5: Laserové mikroobrábění ultrakrátkými a krátkými pulsy, a) délka pulsu 200 fs, $F = 0,5 \text{ J/cm}^2$; b) délka pulsu 3,3 ns, $F = 4,2 \text{ J/cm}^2$ [18]	17
Obr. 6: Schéma závislosti kvality obrobeného povrchu na délce pulsu pro kovy [22].....	17
Obr. 7: Pikosekundový laserový zdroj (IPG) a vedení paprsku optickým vláknem [13]	18
Obr. 8: Laserový zdroj Carbide, výrobce Light Conversion [24]	18
Obr. 9: Vedení paprsku soustavou zrcátek a čoček na optickém stole [87].....	19
Obr. 10: Schéma skenovací galvo hlavy s F-Theta čočkou a skenovacím polem	19
Obr. 11: Pohled do pracovního prostoru stroje RDX1000 od Pulsar Photonics [34]	20
Obr. 12: Stroje pro laserové mikroobrábění: a) Stroj LaserLine Precision od firmy Ewag [32]; b,c)- Stroj LaserTec 20 PrecisionTool od firmy DMG MORI [31].....	20
Obr. 13: a) Pohled do pracovního prostoru stroje Lasertec od DMG Mori – otočně sklopný stůl a procesní optika ve formě galvo hlavy [31]; b) Pohled do vnitřního prostoru stroje od Ewag- pětiosá mechanická kinematika plus dvě osy optické [32].....	21
Obr. 14: Funkční povrchy a jejich inspirace v přírodě (upraveno) [37]	22
Obr. 15: Úprava makrogeometrie řezné hrany laserovým obráběním - firma Hofmeister [51].....	22
Obr. 16: Schéma výrobního postupu frézy: a) radiální obrábění, c)-e) tangenciální obrábění [47]	23
Obr. 17: Laserem vytvořená makrogeometrie na nástroji a) průměr 150 μm , b) průměr 100 μm , c) průměr 50 μm [47]	23
Obr. 18: Obrázek ze SEM kulové frézy z PCD	24
Obr. 19: Utvařec č. 40 s nejlepším výsledkem (model v programu Artcam).....	24
Obr. 20: Laserem vytvořená geometrie na fréze z PCD o průměru 1,8 mm [53].....	24
Obr. 21: Utvařeče na nástrojích vytvořené laserovou ablací	25
Obr. 22: Geometrické parametry utvařeče třísek [50].....	25
Obr. 23: Schéma vlivu tloušťky odebrané vrstvy na drsnost povrchu [50]	26
Obr. 24: Graf efektivity ablace v závislosti na intenzitě pro různé délky pulsu laseru [57]	26
Obr. 25: Tabulka efektivity ablace pro různé režimy laseru.....	27
Obr. 26: Množství odebraného materiálu za jednotku času pro různé hodnoty průměrného výkonu a opakovací frekvence [59]	27
Obr. 27: Efektivita ablace v závislosti na intenzitě [59].....	28
Obr. 28: Intenzita ablace pro a) PCD a b) WC [56]	29
Obr. 29: Graf absorpce vybraných nástrojových materiálů [55].....	29
Obr. 30: Efektivita ablace pro a) PCD a b) WC pro různé režimy laseru.....	30
Obr. 31: Grafické závislosti průměru naměřeného laserem vytvořeného bodu v závislosti na hustotě energie pro Al_2O_3 a AlN při testování ablačního prahu a grafické závislosti míry ablace na intenzitě pro testované řezné keramiky [58].....	31
Obr. 32: Graf závislosti míry ablace na intenzitě pro oxidickou keramiku [64]	32
Obr. 33: Závislost drsnosti povrchu na odebrané hloubce [58]	32
Obr. 34: Graf efektivity ablace pro a) WC a CBN, b) PCD pro 1. a 2. harmonickou frekvenci [60].....	33
Obr. 35 Příklad burst módu obsahující čtyři pulsy v jednom burstu (upraveno) [64].....	34

Obr. 36 Interakce materiálu s laserovým pulsem při použití jednoho pulsu a bustu $N=2$ [65]	35
Obr. 37: Graf znázorňující objem ablovaného slinutého karbidu wolframu na jeden burst při použití více pulsů v burstu [65]	35
Obr. 38: Schéma kombinovaného úběru nanosekundovým a pikosekundovým laserem [66]	36
Obr. 39: Vlevo-Stupeň dokončení procesu v závislosti na procesním čase, vpravo - drsnost povrchu R_a v závislosti na procesním čase pro jednotlivé lasery a režimy [68].....	37
Obr. 40: Porovnání produktivity úběru materiálu pro různé laserové zdroje a jejich režimy [69]	37
Obr. 41: Porovnání efektivity ablace pro jednotlivé pulsy a pro jejich spojení do tzv. burst módu [69]	38
Obr. 42: Porovnání drsnosti povrchu po (vlevo) a před (vpravo) laserovém leštění ultrakrátkými pulsy (USP) [69].....	38
Obr. 43: Schematické znázornění navržené metodiky efektivního mikroobrábění nástrojových materiálů laserem	41
Obr. 44: Schematicky znázorněný postup pro stanovení technologických parametrů komplexního přístupu včetně požadovaného vstupu a výstupu	42
Obr. 45: Schématická podoba testovací matice pro stanovení ablačního prahu materiálu	43
Obr. 46: Podoba testovací matice složené ze čtvercových polí pro experimentální stanovení nejvyšší efektivity ablace	46
Obr. 47: Schéma laserového mikroobrábění používaného pro úpravu geometrie řezných nástrojů-, (a) radiální obrábění, (b) tangenciální obrábění – inspirováno [78], [79], [50].....	47
Obr. 48: Schematické znázornění (a) liniového a (b) konturového šrafování – inspirováno [81].....	48
Obr. 49: Schéma překryvů jednotlivých laserových pulsů [83]	48
Obr. 50: Schématické znázornění natáčení šrafování o daný úhel v jednotlivých ablovaných vrstvách – inspirováno [84].....	49
Obr. 51: Laserové pulsy při akceleraci paprsku	49
Obr. 52: Nastavení zpoždění scanneru v SW DMC	49
Obr. 53: Nastavení generování pulsů na základě polohy v SW DMC	49
Obr. 54: Srovnání výroby linky s funkcí skywriting (nahore) a s běžným nastavením (dole).....	50
Obr. 55: SEM analýza příčného řezu slinutým karbidem s označením TH10 s vyznačením jednotlivých obsažených chemických prvků (provedeno na zařízení Tescan na Hilase AV ČR).....	50
Obr. 56: Tvary pulsů pro jednotlivé křivky (waveform).....	52
Obr. 57: Tvary pulsů pro zvyšující se opakovací frekvenci pro $wf0$	52
Obr. 58: a) Foto pracovního prostoru stroje pro laserové mikroobrábění Master1 b) Optická cestu pro vedení první a druhé harmonické frekvence.....	53
Obr. 59: Graf závislosti drsnosti povrchu S_a na úhlu natočení šraf.....	54
Obr. 60: Zadávané parametry v jednotlivých variantách funkce skywriting	54
Obr. 61: Vytvořená mikrogeometrie na nástrojovém materiálu: vlevo - bez skywritingu, vpravo - zapnutý skywriting (mód 1).....	55
Obr. 62: Vliv vybraných křivek průběhů pulsů (wf) na odebranou hloubku	56
Obr. 63: Vliv různých křivek průběhů pulsů (waveform) na drsnost povrchu: a) na parametr S_z ; b) na parametr S_a	57
Obr. 64: a) Hodnoty intenzity ablace (ΔV) pro různé hodnoty překryvu pulsů (S_x); b) dosažené hodnoty drsnosti povrchu (S_a) pro různé překryvy pulsů (S_x)	58
Obr. 65: 3D pohled na povrch vzorku vytvořeného parametry $F = 22,2 \text{ J/cm}^2$ a $S_x = 80 \%$	58
Obr. 66: SEM/EDX analýza TOO; a)	60

Obr. 67: Detailní 2D pohledy ze SEM na TOO v různých zvětšeníh (A-D).....	61
Obr. 68: a) graf závislosti odebrané hloubky materiálu na počtu přejezdů; b) graf závislosti dosažené drsnosti povrchu Sa; c) Sz, pro různé počty přejezdů	62
Obr. 69: Snímky z konfokálního mikroskopu příčného řezu nanosekundovým laserem vytvořenými vzorky pro analýzu TOO (všechny snímky se stejným měřítkem)	63
Obr. 70: 2D pohled z konfokálního mikroskopu na vrcholky nerovností s vyznačenou TOO ($F = 60 \text{ J/cm}^2$, 100 přejezdů).....	64
Obr. 71: Graf lineární regrese závislosti průměru laserem vytvořeného bodu a použité energie pulsů	65
Obr. 72: Průměrná tloušťka odebrané vrstvy na 1 přejezd a dosažená drsnost povrchu po laserovém procesu v závislosti na použité intenzitě energie (F)	66
Obr. 73: a) Intenzita ablace; b) efektivita ablace pro fundamentální vlnovou délku v závislosti na intenzitě energie.....	66
Obr. 74: a) Průměrná odebraná hloubka; b) drsnost povrchu Sa, pro různé opakovací frekvence a ekvivalentní skenovací rychlosti.....	68
Obr. 75: Efektivita ablace ($\Delta V/t$) v závislosti na intenzitě energie (F) při použití různých vlnových délek - IH (1030 nm), IIH (515 nm), IIIH (343 nm).....	69
Obr. 76: Porovnání intenzity ablace slinutého karbidu.....	70
Obr. 77: Drsnost povrchu (Sa) v závislosti na použité intenzitě energie (F) pro různé harmonické frekvence	70
Obr. 78: a) Tloušťka odebrané vrstvy na 1 přejezd (Δh) b) drsnost povrchu (Sa) v závislosti na počtu pulsů ve výstřelu (burstu) pro tři různé intenzity energie (F)	72
Obr. 79: a) Celková odebraná hloubka; b) drsnost povrchu, při komplexním přístupu (ns+fs) včetně hodnoty pouze po hrubování (ns)	74
Obr. 80: Schematické znázornění prediktivního modelu sloužícího k určení optimálního přídavku pro dokončování	76
Obr. 81: Porovnání intenzity ablace ns a fs laseru při fundamentálním nastavení.....	78
Obr. 82: a) Vyměnitelná břitová destička s označením CNMG120408 s utvařečem a) pohled na celou VBD; b) profil geometrie utvařeče	79
Obr. 83: Výkres utvařeče třísek včetně hlavních kót.....	80
Obr. 84: a) zaměřovací rozhraní pro určení rezné hrany; b) nastavení pozice modelu vůči VBD.....	80
Obr. 85: Fotografie lisovaného a femtosekundovým laserem vytvořeného utvařeče třísek.....	81
Obr. 86: 3D sken utvařeče třísek vytvořeného pouze fs laserem a příčný řez utvařečem s vyznačenými hlavními rozměry v mikrometrech	81
Obr. 87: Diferenční analýza broušeného a femtosekundovým laserem vytvořeného utvařeče	82
Obr. 88: Utvařeč třísek vytvořený nanosekundovým laserem: a) pouze liniovým šrafováním; b) pouze konturovým šrafováním	83
Obr. 89: Strategie šrafování použité pro výrobu utvařeče ns laserem: a) konturový šraf s vyznačeným maximálním počtem kontur; b) spojení liniového a konturového šrafování.....	84
Obr. 90: Odhadovaný čas hrubování a dokončování v rámci komplexního přístupu včetně potřebných počet vrstev k odebrání při hrubování a dokončování.....	86
Obr. 91: Náskres zvolené strategie úběru materiálu v procesu hrubování a dokončování.....	86
Obr. 92: Úprava modelu pro hrubování přímo v řídicím softwaru laserového zařízení	87
Obr. 93: Topografie vzorku vytvářeného komplexním přístupem po nanosekundovém hrubování (finální testovací vzorek)	88

Obr. 94: 3D sken utvařeče třísek vytvořeného komplexním přístupem	89
Obr. 95: 3D skeny utvařečů třísek pro referenční (A) a laserem vytvořené vzorky (C-D).....	91
Obr. 96: Profily řezné hrany včetně vyhodnocení poloměru zaoblení ostří a úhlu čela pro referenční (A) a laserem vytvořené vzorky (C-D)	92
Obr. 97: Drsnost povrchu a) průměrná aritmetická úchylka od střední čáry profilu – R_a [μm]; b) výška nerovnosti profilu – R_z [μm], referenčního (A) a laserem vytvořených vzorků (C-D).....	92
Obr. 98: Diferenční analýza laserem vytvořených vzorků se vzorkem referenčním. V levém sloupci jsou barevnou mapou vyznačeny odchylky mezi oběma modely, v pravém sloupci jsou barevně vyznačené odchylky od nastavené hodnoty tolerance	93
Obr. 99: Snímky řezné hrany z elektronového mikroskopu pro referenční (A) a laserem vytvořené vzorky (C-D) (pozn. u vzorku A není vyšší nasvícení způsobeno změnou v mikrostruktuře ale vyšším nabíjením vzorku v elektronovém poli).....	94
Obr. 100: Snímky povrchu začátku konvexní části utvařeče třísek z elektronového mikroskopu pro nástroje označené A-D: a) referenční; b) nano; c) komplexní přístup; d) femto	95
Obr. 101: Ustavený nástroj a obrobek ve stroji při řezném testu	96
Obr. 102: Závislost velikosti opotřebení na hřbetě VB_b na čase obrábění t	98
Obr. 103: Závislost maximální velikosti opotřebení na hřbetě VB_{max} na čase obrábění t	98
Obr. 104: Závislost celkové řezné síly F na čase obrábění t	99
Obr. 105: Závislost drsnosti povrchu R_a na čase obrábění t	100
Obr. 106: Závislost drsnosti povrchu R_z na čase obrábění t	100
Obr. 107: Graf nákladů na jeden kus (N_c) v závislosti na objemu utvařeče pro komplexní přístup a jen fs laser	107
Obr. 108: Graf závislosti ceny za jeden kus při různém počtu kusů v dávce při použití pouze fs laseru a komplexního přístupu.	110
Obr. 109: Predikce trhu s lasery s ultrakrátkými pulsy [93] y	115

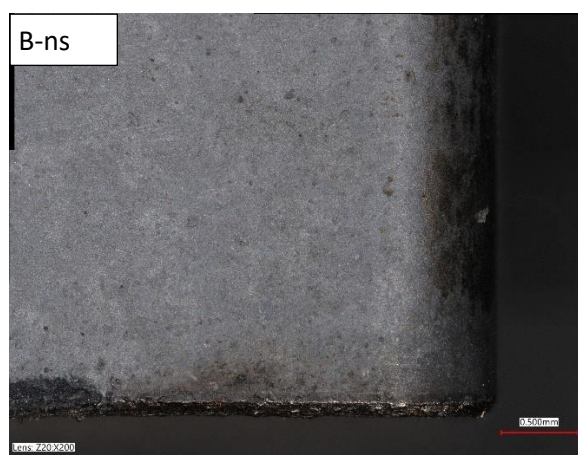
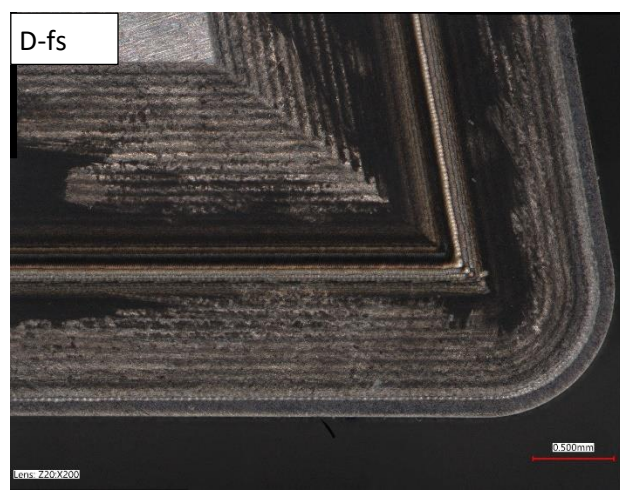
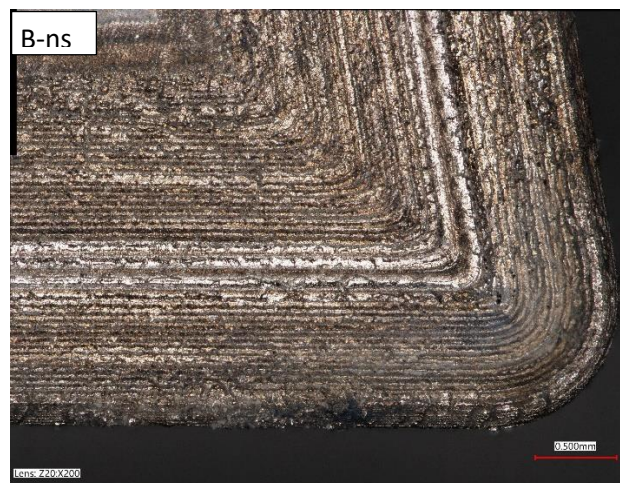
Seznam tabulek

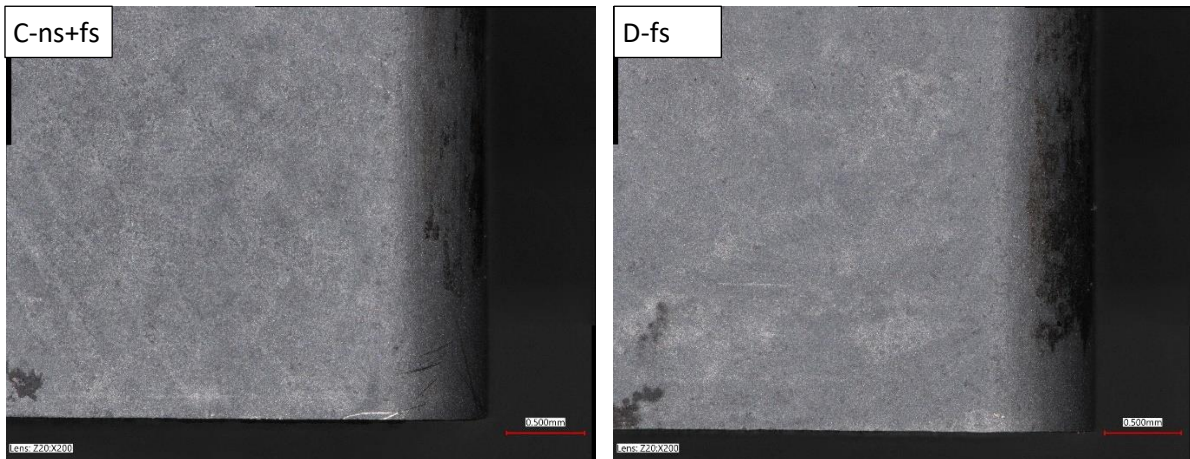
Tab. 1: Tabulka výrobců femtosekundových laserů včetně bližších specifikací jejich zařízení (29).....	18
Tab. 2: Základní parametry strojů pro laserové mikroobrábění řezných nástrojů [31] [32] [33]	19
Tab. 3: Procesní parametry použité ve studii [47] pro výrobu mikrofrézíček	23
Tab. 4: Ablací prahy testovaných nástrojových materiálů [55].....	32
Tab. 5: Chemické složení slinutého karbidu s označením TH10 z materiálového listu	50
Tab. 6: Procesní a technologické parametry zvolené pro realizaci experimentu k ověření ideálního úhlu natočení šraf.....	53
Tab. 7: Konstantní parametry strategie skenování pro stanovení maximální efektivity hrubování	56
Tab. 8: Charakteristiky křivek (w_f) použitých pro stanovení maximální efektivity hrubování	56
Tab. 9: Konstantní a proměnné výkonové a skenovací parametry použité v experimentu určení ideálního překryvu a energie pulsů	57
Tab. 10: Technologické parametry použité při hledání parametrů efektivní ablace při použití fundamentální vlnové délky a opakovací frekvence	65
Tab. 11: Technologické parametry navrženého experimentu k ověření efektivity ablace při zvyšující se opakovací frekvenci pulsů	67
Tab. 12: Zvolené parametry hrubování pro ověření možností dokončení povrchu.....	73
Tab. 13: Označení vzorků včetně použitých procesních parametrů pro jejich výrobu	73

Tab. 14: Technologické parametry použité k výrobě utvařeče třísek - jen fs laser.....	81
Tab. 15: Technologické parametry použité pro výrobu utvařeče - pouze nanosekundový laser	82
Tab. 16: Technologické parametry použité pro výrobu utvařeče nanosekundovým laserem včetně dosaženého času výroby a hlavních rozměrů	83
Tab. 17: Dílčí hodnoty potřebné k výrobě utvařečetřísek komplexním způsobem laserového mikroobrábění na základě prediktivního modelu	85
Tab. 18: Technologické parametry použité pro výrobu utvařeče v rámci komplexního přístupu	89
Tab. 19: Technologické parametry použité pro výrobu utvařečů třísek laserovým mikroobráběním..	90
Tab. 20: Označení nástrojů s laserem vytvořenými utvařeči třísek (B-D) a referenčním lisovaným nástrojem (A) vstupujících do řezného testu	96
Tab. 21: Řezné podmínky zvolené pro testování nástrojů s laserem vytvořeným utvařečem třísek ...	97
Tab. 22: Třísky v průběhu obrábění nástroji A-D v různých časových intervalech s vyznačenými oblastmi dobrého utvaření třísky.....	102
Tab. 23: Rozpad položek ročních fixních nákladů pro femtosekundový laser	105
Tab. 24: Rozpad položek ročních fixních nákladů pro nanosekundový laser	106
Tab. 25: Náklady na obsluhu jednoho laserového zařízení.....	106
Tab. 26: Náklady na výrobu jednoho kusu různými přístupy laserového mikroobrábění včetně procesních časů	107
Tab. 27: Modelové případy pro ověření ekonomického modelu	107
Tab. 28: Vstupní hodnoty pro výpočet nákladů na výrobu při různých počtech vyráběných kusů	108
Tab. 29: Výpočet celkových časových a finančních nákladů na různý počet vyrobených kusů	109
Tab. 30: Celkové shrnutí porovnávaných výrobních technologií pro utvařeče třísek dle hlavních aspektů	113

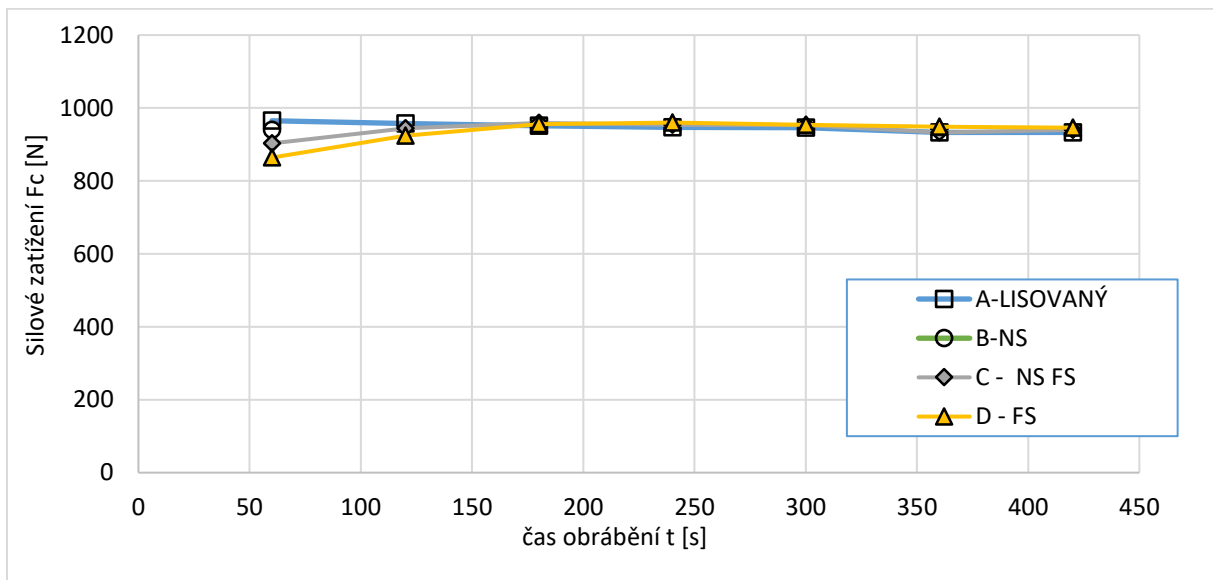
Přílohy

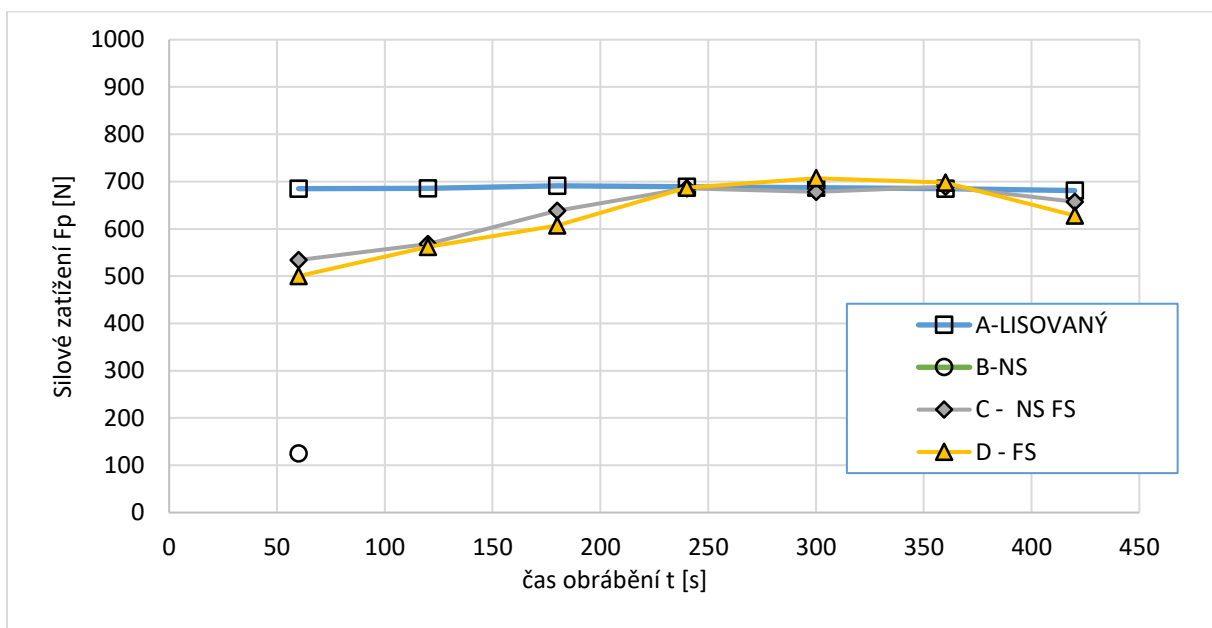
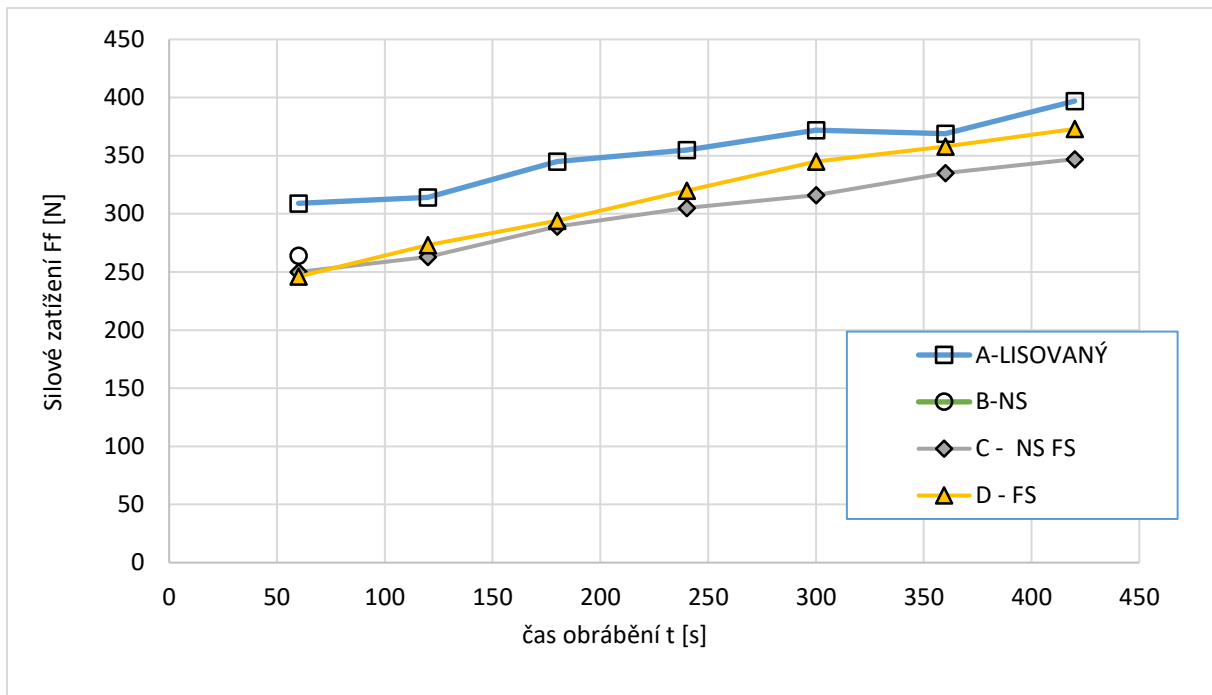
Příloha 1 – Foto nástrojů před experimentem obrábění





Příloha 2 – Jednotlivé složky rezné síly při obrábění:





Příloha 3 – Foto opotřebení nástroje v měřených intervalech

A-LISOVANÝ		VBD číslo	1.1	B-NS		VBD číslo	3.2	C-NSFS		VBD číslo	5.2	D-FS		VBD číslo	1.1
měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]
1	10	0	0	1	10	0	0	1	10	0	0	1	10	0	0
měření č.	Čas t [s]	VB _h [μm]	VB _h [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB _h [μm]	VB _{max} [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB _h [μm]	VB _{max} [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB _h [μm]	VB _{max} [μm]
1	49	59	0	1	100	230	0	1	49	59	0	1	100	230	0
A-LISOVANÝ		VBD číslo	1.1	B-NS		VBD číslo	3.2	C-NSFS		VBD číslo	5.2	D-FS		VBD číslo	1.1
měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]
2	60	0	0	2	60	0	0	2	60	0	0	2	60	0	0
měření č.	Čas t [s]	VB _h [μm]	VB _h [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB _h [μm]	VB _{max} [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB _h [μm]	VB _{max} [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB _h [μm]	VB _{max} [μm]
2	113	127	0	2	180	370	0	2	113	127	0	2	180	370	0

A-LISOVANÝ		VBD číslo	1.1	B-NS		VBD číslo	3.2	C-NSFS		VBD číslo	5.2	D-FS		VBD číslo	1.1
měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]
3	120	0	0	3	120	0	0	3	120	0	0	3	120	0	0
měření č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]
3	120	0	140	3	120	0	0	3	120	0	140	3	120	0	0
A-LISOVANÝ		VBD číslo	1.1	B-NS		VBD číslo	3.2	C-NSFS		VBD číslo	5.2	D-FS		VBD číslo	1.1
měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]
4	180	0	0	4	180	0	0	4	180	0	0	4	180	0	0
měření č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]
4	180	0	199	4	180	0	0	4	180	0	199	4	180	0	0

A-LISOVANÝ				VBD číslo	1.1	B-NS				VBD číslo	3.2	C-NSFS				VBD číslo	5.2	D-FS				VBD číslo	1.1
měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]			měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]			měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]			měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]		
5	240	0	0			5	240	0	0			5	240	0	0			5	240	0	0		
měření č.	Čas t [s]	VB ₀ [μm]	VB ₁₀₀ [μm]	VB ₂₀₀ [μm]	VB ₃₀₀ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₀ [μm]	VB ₁₀₀ [μm]	VB ₂₀₀ [μm]	VB ₃₀₀ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₀ [μm]	VB ₁₀₀ [μm]	VB ₂₀₀ [μm]	VB ₃₀₀ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₀ [μm]	VB ₁₀₀ [μm]	VB ₂₀₀ [μm]	VB ₃₀₀ [μm]
5	240	0	216	216	0	5	240	0	0	0	0	5	240	0	216	216	0	5	240	0	0	0	0
měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]			měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]			měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]			měření č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]		
6	300	0	0			6	300	0	0			6	300	0	0			6	300	0	0		
měření č.	Čas t [s]	VB ₀ [μm]	VB ₁₀₀ [μm]	VB ₂₀₀ [μm]	VB ₃₀₀ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₀ [μm]	VB ₁₀₀ [μm]	VB ₂₀₀ [μm]	VB ₃₀₀ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₀ [μm]	VB ₁₀₀ [μm]	VB ₂₀₀ [μm]	VB ₃₀₀ [μm]	měření č.	Čas t [s]	VB ₀ [μm]	VB ₁₀₀ [μm]	VB ₂₀₀ [μm]	VB ₃₀₀ [μm]
6	300	0	249	271	0	6	300	0	0	0	0	6	300	0	249	271	0	6	300	0	0	0	0

A-LISOVANÝ		VBD číslo	1.1	B-NS		VBD číslo	3.2	C-NSFS		VBD číslo	5.2	D-FS		VBD číslo	1.1		
měřeni č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měřeni č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měřeni č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měřeni č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]		
7	360	0	0	7	360	0	0	7	360	0	0	7	360	0	0		
měřeni č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	VB ₃ [μm]	VB ₄ [μm]	měřeni č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	VB ₃ [μm]	VB ₄ [μm]	měřeni č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	VB ₃ [μm]	VB ₄ [μm]
7	360	0	264	297	0	7	360	0	0	0	0	7	360	0	0	0	0
A-LISOVANÝ		VBD číslo	1.1	B-NS		VBD číslo	3.2	C-NSFS		VBD číslo	5.2	D-FS		VBD číslo	1.1		
měřeni č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měřeni č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měřeni č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]	měřeni č.	Čas t [s]	KB [μm]	KF [μm]		
8	420	0	0									8	420	0	0		
měřeni č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	VB ₃ [μm]	VB ₄ [μm]	měřeni č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	VB ₃ [μm]	VB ₄ [μm]	měřeni č.	Čas t [s]	VB ₁ [μm]	VB ₂ [μm]	VB ₃ [μm]	VB ₄ [μm]
8	420	0	264	341	0							8	420	0	0	0	0