

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

Habilitační práce

Využití laseru pro výrobu kvalitních a efektivních řezných nástrojů

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Ing. Pavel Zeman, Ph.D.



Praha, listopad 2021

Obsah

Poděkování	3
Seznam použitých symbolů	4
Seznam použitých zkratk	6
1 Úvod	8
2 Cíle práce	12
3 Řezný nástroj	14
3.1 Systém obrábění a nástroj	14
3.2 Definice nástroje a základní terminologie	15
3.3 Řezná část nástroje	17
3.4 Funkce a řezivost nástroje	18
4 Laser a jeho vlastnosti	20
4.1 Funkce laseru	20
4.2 Základní vlastnosti laserového svazku	21
4.3 Procesní parametry	23
4.3.1 Prostorové rozložení intenzity záření	23
4.3.2 Délka a frekvence pulsů	24
4.3.3 Vlnová délka záření.....	25
4.3.4 Zářivá energie a její intenzita	25
4.3.5 Zářivý výkon a intenzita ozáření	26
4.3.6 Překrytí pulsů a rychlost pohybu paprsku	27
5 Laserové technologie pro výrobu nástrojů (výzkum, aplikace, nové poznatky)	28
5.1 Způsoby využití laseru pro řezné nástroje	28
5.2 Interakce paprsku laseru s řezným materiálem.....	30
5.2.1 Vlastnosti řezného materiálu ovlivňující interakci	31
5.2.2 Pohltivost laserového záření materiálem.....	33
5.2.3 Ablací práh materiálu	35
5.2.4 Ablace materiálu	38
5.3 Technologie s úběrem materiálu.....	43
5.3.1 Tvorba makrogeometrie břitu laserem	43
5.3.2 Tvorba mikrogeometrie břitu laserem	52
5.3.3 Odstraňování ochranného povlaku břitu laserem	56
5.4 Technologie bez úběru materiálu.....	59
5.4.1 Zpevnění povrchu rázovou vlnou	59
5.4.2 Řízené tepelné ovlivnění materiálu	61
5.5 Technologie s přidáváním materiálu.....	64
5.5.1 Vrstvení řezného materiálu	65
5.5.2 Nanášení ochranného povlaku břitu	67
5.6 Vlastní výzkum v tématu	69
5.6.1 Pohltivost laserového záření materiálem.....	70
5.6.2 Ablací práh řezných materiálů	72
5.6.3 Ablace řezných materiálů.....	75
5.6.4 Tvorba makrogeometrie břitu laserem	82

5.6.5	Tvorba mikrogeometrie břitu laserem	87
5.6.6	Odstraňování ochranného povlaku břitu laserem	93
5.6.7	Řízené tepelné ovlivnění materiálu	100
5.7	Shrnutí vlastních poznatků a přínosů	103
5.7.1	Způsoby využití laseru pro řezné nástroje	103
5.7.2	Interakce paprsku laseru s řezným materiálem	103
5.7.3	Technologie s úběrem materiálu	106
5.7.4	Technologie bez úběru materiálu	109
6	Metodika pro využití a hodnocení přínosů laseru pro řezné nástroje.....	111
6.1	Stávající přístupy a motivace pro tvorbu metodiky	111
6.1.1	Implementace laserové technologie pro výrobu nástrojů	111
6.1.2	Motivace pro tvorbu metodiky	114
6.2	Návrh metodiky a její popis	115
6.2.1	Návrh metodiky	115
6.2.2	Popis metodiky	118
6.3	Příklady uplatnění a ověření metodiky	126
6.3.1	Nástroj z PKD pro frézování kompozitních materiálů	126
6.3.2	Nástroj z PKNB pro frézování kalené oceli	135
6.4	Shrnutí vytvořené metodiky a jejího uplatnění	145
6.4.1	Návrh metodiky a její popis	145
6.4.2	Příklady uplatnění a ověření metodiky	145
7	Přínosy práce a výhled dalšího výzkumu	148
7.1	Přínos práce pro vědecké poznání oboru	148
7.2	Přínos práce pro praxi	150
7.3	Výhled dalšího výzkumu ve zkoumané oblasti	152
8	Závěr	153
9	Seznam použité literatury	154
10	Seznam prací autora k tématu práce	168
10.1	Publikace v odborných časopisech a příspěvky na konferencích	168
10.2	Výzkumné zprávy	169
11	Přílohy	i
	Příloha 1: Analýza povrchu vzorků před testy interakce laseru s materiálem	ii
	Příloha 2: Technické parametry laserového zdroje Pharos provozovaného na pracovišti HiLASE centrum (AV ČR)	iv
	Příloha 3: Specifikace demonstračního obrobku z materiálu G/PA12	v
	Příloha 4: Technické parametry laserového zařízení Laser Line Ultra, EWAG AG	vi
	Příloha 5: Podoba a základní technické údaje vyvinutého nástroje z PKD	vii
	Příloha 6: Podoba a základní technické údaje vyvinutého nástroje z PKNB	viii

PODĚKOVÁNÍ

Habilitační práce byla vytvořena na základě dlouholetého výzkumu a vývoje, který jsem měl možnost realizovat a vést v rámci více různých projektů spolupráce s průmyslem a jinými výzkumnými pracovišti při svém působení na Ústavu výrobních strojů a zařízení (RCMT), Fakultě strojní, ČVUT v Praze. V první řadě proto mé poděkování směřuje ke spolupracovníkům z RCMT a spolupracujících pracovišť, kteří se významně podíleli na realizaci výzkumů, dosažených výsledcích, ale i jejich analýze a následném uplatnění. Mé poděkování patří rovněž Prof. Ing. Janu Mádlovi, CSc. a Prof. Ing. Jaromíru Houšovi, DrSc., kteří mne přivedli na vědeckou a akademickou dráhu. Svými radami, odborným vedením a poskytnutým prostorem pro samostatnou a tvůrčí práci mi umožnili seberealizaci a profesní růst. Poděkovat bych touto cestou chtěl také Prof. Ing. Františkovi Holešovskému, CSc., a to především za cené kritické připomínky k zaměření práce. Zvláštní poděkování patří mé rodině a přítelkyni za trpělivost a všestrannou podporu v mém snažení práci vytvořit. Vytvoření této práce totiž znamenalo využití nemalého množství večerů, stejně jako celých dnů o víkendech a dovolené.

Pavel Zeman

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A_{dl}	[mm]	průměrná délka delaminace
a_e	[mm]	radiální hloubka řezu
a_p	[mm]	hloubka řezu pro soustružení / axiální hloubka řezu pro frézování
BPP	[mm·mrad]	Beam Parameter Product
d	[mm]	průměr paprsku laseru v ohnisku
D	[mm]	průměr stopy zanechané laserem na povrchu
D_n	[mm]	průměr obráběcího nástroje
d_0	[mm]	průměr laserového paprsku dopadajícího na čočku
E	[-]	Eulerovo číslo
E_p	[J]	energie v pulsu
E_{th}	[J]	prahová hodnota energie v pulsu
F	[N]	výsledná síla řezání
F	[J·m ⁻²]	hustota (intenzita) energie, tzv. fluence
f	[mm]	fokusační (ohnisková) vzdálenost
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	síla posuvu
F_{opt}	[J·m ⁻²]	optimum hustoty (intenzity) energie
f_{ot}	[mm]	posuv na otáčku
F_p	[N]	pasivní síla
f_p	[Hz]	frekvence pulsů
F_{th}	[J·m ⁻²]	prahová hodnota hustoty (intenzity) energie, tzv. ablation threshold
f_z	[mm]	posuv na zub
h	[mm]	rozteč drah paprsku laseru kolmo na směr jeho pohybu
H_x	[%]	podélné překrytí pulsů
H_y	[%]	příčné překrytí pulsů
I_0	[W·m ⁻²]	vstupní intenzita záření
I_{peak}	[W·m ⁻²]	špičková hustota (intenzita) ozáření
$I(z)$	[W·m ⁻²]	intenzita záření v hloubce z pod povrchem
M^2	[-]	faktor kvality paprsku
P_{ave}	[W]	průměrný zářivý výkon
P_{peak}	[W]	špičkový zářivý výkon
r	[mm]	poloměr paprsku laseru v ohnisku
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	největší výška profilu

r_0	[mm]	poloměr laserového paprsku
S_a	[μm]	aritmetický průměr posuzovaného topografického povrchu
S_z	[μm]	největší výška topografického povrchu
T	[s]	perioda pulsů
VB_b	[mm]	střední šířka plošky opotřebení na hřbetě břitů v zóně B
VB_c	[mm]	maximální šířka plošky opotřebení na hřbetě břitů v zóně C
VB_{max}	[mm]	maximální šířka plošky opotřebení na hřbetě břitů v zóně B
VB_N	[mm]	maximální šířka plošky opotřebení na hřbetě břitů v zóně N
v_c	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	řezná rychlost
v_f	[$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	rychlost pohybu paprsku laseru (tzv. skenovací rychlost)
Z	[mm]	hloubka úběru materiálu na jednu vrstvu přejezdu laserem
α	[$^\circ$]	úhel sklonu paprsku vůči ovlivňované ploše
α	[-]	absorpční koeficient
Θ	[mrad]	úhel divergence laserového paprsku
λ	[mm]	vlnová délka laserového záření
π	[-]	Ludolfovo číslo
τ_p	[s]	doba trvání laserového pulsu

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AV ČR	Akademie věd České republiky
BcBN	bezpojivový kubický nitrid boru (Binderless cBN)
CAD	počítačem podporované navrhování (Computed Aided Design)
CVD	chemický způsob nanášení povlaku (Chemical Vapour Deposition)
CVD-D	diamant vyrobený chemickou depozicí (Chemical Vapour Deposition of Diamond)
CW	kontinuální režim laseru (Continuous Wave)
DLC	ochranný povlak typu diamond-like carbon
DLMD	způsob nanášení kovu laserem (Direct Laser Metal Deposition)
EDM	elektrojiskrové obrábění (Electrical Discharge Machining)
EDS	energieově-disperzní spektroskopie (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy)
F RTP	vlákny vyztužené termoplasty (Fibre Reinforced ThermoPlastics)
HAZ	teplem ovlivněná oblast (Heat Affected Zone)
HcBN	vysokoobsahový PKNB (High content cBN)
HFC	obrábění vysokými posuvy (High Feed Cutting)
HiLASE	výzkumné centrum High average power pulsed LASERs, pracoviště Fyzikálního ústavu AV ČR
HPC	obrábění vysokými výkony (High Performance Cutting)
HSC	obrábění vysokými rychlostmi (High Speed Cutting)
KNB	kubický nitrid boru (cBN; c-BN)
LcBN	nízkoobsahový PKNB (Low content cBN)
LCVD	laserem podporovaný chemický způsob nanášení (Laser Chemical Vapour Deposition)
LPS	sintrování z kapalné fáze (Liquid Phase Sintering)
LSM	úprava povrchu laserem (Laser Surface Modification)
LSP	zpevnění povrchu rázovou vlnou vyvolanou laserem (Laser Shock Peening)
MLQ	mazání minimálním množstvím maziva / kapaliny (Minimum Quantity Lubrication / Liquid)
N	nástroj v systému obrábění
O	obrobek v systému obrábění
P	přípravek v systému obrábění
PALS	Prague Asterix Laser System, pracoviště AV ČR
PECS	sintrování výbojem elektrického proudu (Pulse Electric Current Sintering)
PKD	polykrystalický diamant (PCD)
PKNB	polykrystalický kubický nitrid boru (PCBN)

PKNB-L	nízkoobsahový polykrystalický kubický nitrid boru
PKNB-H	vysokoobsahový polykrystalický kubický nitrid boru
PLD	pulsní laserové nanášení (Pulsed Laser Deposition)
PVD	fyzikální způsob nanášení povlaku (Physical Vapour Deposition)
RCMT	Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, součást Ú12135, Fakulta strojní, ČVUT v Praze.
ŘK	řezná keramika
ŘK-N	nitridová řezná keramika
ŘK-S	směsná řezná keramika
S	stroj v systému obrábění
SK	slinutý karbid
SLM	selektivní tavení materiálu laserem (Selective Laser Melting)
S-N-O	stroj-nástroj-obrobek
S-N-O-P	stroj-nástroj-obrobek-přípravek
SPS	sintrování materiálu výbojem plasmy (Spark Plasma Sintering)
VBD	vyměnitelná břitová destička
WC	wolfram-karbid, typ slinutého karbidu
WEDM	elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou (Wire Electrical Discharge Machining)

1 ÚVOD

Třískové obrábění má mezi výrobními technologiemi významnou pozici. Obrábění je využíváno pro výrobu dílců pro prakticky všechna průmyslová odvětví, a i oblasti lidské činnosti. Přestože jsou třískové technologie průběžně zdokonalovány s ohledem na kvalitu, produktivitu a hospodárnost, jsou vystaveny tlaku možné náhrady alternativními, ať již zdokonalovanými stávajícími nebo zcela novými způsoby výroby. Tento tlak ještě více akceleruje další vývoj obrábění. Mezi dominantní aktuální podněty pro vývoj procesů obrábění patří zejména:

- využití nových konstrukčních materiálů pro obrobky;
- zvýšení kvality a přesnosti výrobků;
- růst objemu produkce dílců;
- snižování výrobních nákladů na dílec;
- digitalizace výroby (predikce, automatizace, monitoring).

V porovnání s jinými výrobními technologiemi spočívají přednosti zpracování obráběním především ve variabilitě materiálů, dosažitelných tvarů a rozměrů obrobků a sériovosti (od kusové až po hromadnou výrobu). Důležitým aspektem je vysoká tvarová a rozměrová přesnost, stejně jako kvalita opracovaného povrchu. To vychází z různorodosti možných způsobů obrábění, přístupů a strategií, výrobních zařízení, pracovních podmínek a variant provedení obráběcích nástrojů.

Obráběcí proces je realizován obráběcím systémem, kdy jeho nedílnou a důležitou součástí je obráběcí neboli **řezný nástroj**. Vlastnosti nástroje, způsob jeho použití a jeho chování při interakci s obráběným materiálem a tvorbě třísky mají zásadní vliv na průběh a výsledek obráběcího procesu. Volbou typu, konstrukcí, provedením geometrie břitu a použitými materiály nástroje lze jednoduše, ale přitom zásadně proces obrábění ovlivňovat, a tedy i zlepšovat.

Průběh a děje při vzájemné interakci nástroje a obrobku (např. z pohledu dosažené kvality a přesnosti obrobku, velikosti generovaných sil a teplot, intenzity opotřebení břitu nástroje) přímo vytváří zadání pro potřebné vlastnosti stroje a řezného prostředí a pro nastavení pracovních podmínek. **Zlepšené vlastnosti řezného nástroje povedou ke zlepšení průběhu a výsledku obráběcího procesu.** Nástroj je však součástí celého obráběcího systému a potenciál nástroje bude využit pouze tehdy, bude-li celý systém

správně nastaven a používán.

Realizace řezného nástroje, který je funkčním a současně i efektivním řešením, je motivací výrobců nástrojů. Tato motivace vzniká na základě prostředí tvořeného výrobcí dílců obráběním. Existuje zde silný konkurenční tlak inspirující výrobce dílců k průběžným inovacím, optimalizacím a v konečném důsledku ke zlepšení vlastních výrobních procesů. Úsilí pro snižování výrobních nákladů obrobku, eventuálně udržení nebo zvýšení vlastního zisku, vyžaduje mimo jiných přístupů i **nová řešení na straně řezných nástrojů** a způsobů jejich použití. Tím se těžiště problému přenáší i na výrobce a dodavatele nástrojů, kteří se snaží u zákazníků se svými produkty prosadit v zásadě třemi základními způsoby nebo jejich kombinací:

- lepším využitím potenciálu původního nástroje nebo nástroje srovnatelného s původním řešením;
- vyšší kvalitou nástroje a jeho lepšími užitnými vlastnostmi a technickými parametry, často ve spojení s jeho vyšší cenou;
- nástrojem méně vhodným, případně s nižší kvalitou, často v kombinaci s jeho nižší cenou.

Zejména první dva uvedené body se jeví být dlouhodobě udržitelným způsobem pro zvyšování konkurenceschopnosti produktů v oblasti řezných nástrojů. Vede to ovšem na potřebu uplatňování inovací založených na intenzivním výzkumu a vývoji, a to jak nástrojů a řezných materiálů, tak i způsobů jejich použití. Jedním z možných přístupů dosahování zlepšených vlastností nástrojů je použití nových výrobních metod a postupů. Jedním z nových přístupů je i **využití laseru při výrobě nástroje** (vč. jeho modifikace). Na tuto problematiku je zaměřena předložená práce.

Průmyslové použití laseru je mimo jiných aplikací způsobem, kdy je energie záření využita pro zpracování materiálu – dělení, svařování, obrábění, kladení, značení a tepelné zpracování a ovlivnění materiálu. Je nasnadě, že vybrané způsoby lze aplikovat rovněž při výrobě a modifikaci řezných nástrojů pro zlepšení jejich vlastností. Výsledkem uplatnění laseru by vždy měl být originální řezný nástroj s užitnými vlastnostmi a technickými parametry překonávajícími alternativní řešení. I přes předpokládanou vyšší cenu mohou být takové nástroje konkurenceschopné.

Dnes již existují **komerční řešení nástrojů, pro které bylo využito laseru pro tvorbu a úpravy břitů**. Výrobci takových nástrojů se téměř výhradně soustředí na nasazení

laseru pro tvorbu ryze zákaznických nástrojů s břity z materiálu na bázi diamantu, případně slinutých karbidů a kubického nitridu boru. Uplatnění laserové technologie ovšem může být mnohem rozmanitější a sofistikovanější, a to i díky dynamickému vývoji laserové techniky a způsobů jejího použití (např. ultrakrátkopulsní lasery, výkonnější laserové zdroje, zdokonalené optické komponenty a řídicí software).

K masivnějšímu využívání laseru výrobci nástrojů však zatím nedochází. Důvodů pro tuto skutečnost je více. Základem uvedeného omezení jsou dle mého názoru na straně výrobců nástrojů čtyři hlavní důvody. První příčinou je nedostatečná znalost aktuálních možností laserové techniky a jejího využití pro výrobu řezných nástrojů různými způsoby. V tomto případě je třeba **popsat možnosti a realizovat intenzivní výzkum a vývoj potenciálních způsobů využití laseru pro výrobu a modifikaci nástrojů**. Nabyté znalosti spolu s konkrétními výsledky následně přenášet do praxe.

Druhým důvodem jsou zpravidla vyšší výrobní náklady (vyšší cena) laserem vyráběných nástrojů, která vychází z pořízení a provozu laserového zařízení a nezbytné měřicí a snímací techniky. Je to však jen jedna strana mince. Laserem vytvořené nástroje mají potenciál být ve svých vlastnostech zcela unikátní a v mnoha ohledech mohou předčít standardní vhodná řešení. Je tedy třeba umět **hodnotit nástroje komplexně, a to na základě celkového přínosu při jejich použití** a o tomto pohledu umět přesvědčit uživatele. Je třeba **vyvíjet metody a postupy pro objektivní komplexní hodnocení přínosů obráběcího nástroje** pro konkrétní operace. Tyto znalosti je třeba aplikovat nejen u výrobce, ale především u uživatele nástroje.

Dalším z dílčích důvodů, proč není laser více uplatňován ve výrobě nástrojů, může být i neznalost podstaty a výsledků interakce paprsku laseru a řezného materiálu a způsobů jejich stanovení a ověření. Z toho může plynout neoptimální nastavení procesu výroby nástroje laserem. Takový proces nemusí být dostatečně produktivní, hospodárný a kvalitní. Výrobní náklady a cena nástroje proto dále porostou. Partikulárním problémem je, že dodavatel laserové techniky ne vždy uživateli (výrobci nástroje) umožňuje dostatečně připravený a otevřený systém, který by byl pro realizaci nejrůznějších specifických nástrojů potřeba. V takovém případě je laserové zařízení využito prostřednictvím sad přednastavených parametrů a univerzálních strategií pro výrobu určitého typu nástroje, což je v řadě případů nedostatečné. V reakci na tyto nedostatky je důležité **vyvíjet metody pro poznání interakce laseru a materiálu a optimalizace nastavení laserového zařízení, jakožto součásti výrobního řetězce nástroje**. Tyto

přístupy následně uplatňovat u výrobců nástrojů a případně i dodavatelů laserových zařízení.

S výše uvedeným souvisí i problematika způsobu použití nástroje. Nasazení laserem vyrobených nástrojů je často v obráběných materiálech se specifickou nebo zhoršenou obrobiteľností a za intenzivních a celkově komplikovaných podmínek (vysoké řezné a posuvové rychlosti, vibrující tenkostěnné dílce, přerušovaný řez atp.). U takových nástrojů a aplikací je třeba věnovat větší úsilí **nalezení optimálních pracovních podmínek nástroje**, a to pro dosažení přínosu v celkové bilanci výrobních nákladů a pro splnění požadavků produktivity a kvality. Zejména při použití dražších nástrojů je velmi důležité maximalizovat využití jejich potenciálu, aby mělo jeho nasazení pro uživatele v konečném důsledku přínos. Zde je proto třeba pracovat na tvorbě znalostí na základě specifických případů obrábění a na vývoji a uplatňování optimalizačních technik pro nastavení obráběcího procesu a hodnocení přínosu nástroje.

Na výše uvedené oblasti nedostatků při využití laseru pro výrobu nástrojů reaguje tato práce.

Habilitationální práce vznikla na základě výsledků vlastního dlouholetého výzkumu v rámci více projektů spolupráce formou kolaborativního a smluvního výzkumu s průmyslovými partnery (výrobci řezných nástrojů, řezných materiálů a povlaků) a tuzemskými i zahraničními výzkumnými institucemi. Vznikla takto řada hmotných i nehmotných výsledků výzkumu včetně tematicky navazujících a mnou vedených bakalářských, magisterských i doktorských závěrečných prací. Část těchto výsledků je použita v této práci.

Realizovaný výzkum v tématu byl poměrně různorodý, což vychází z různorodosti možností použití laseru pro výrobu a modifikaci řezných nástrojů. V habilitationální práci jsem se proto pokusil o ucelený pohled na relativně širokou dosud nedostatečně zpracovanou problematiku. Z tohoto důvodu však nebylo možné popisem zacházet do podrobností všech s tématem souvisejících aspektů a vzniklých znalostí. Díky širšímu zaměření ovšem může být práce mimo jiné i výchozím zdrojem pro další týmy realizující výzkum a vývoj v některé ze zpracovávaných oblastí.

2 CÍLE PRÁCE

Cíle práce mají svůj základ v aktuálních trendech vývoje řezných nástrojů, materiálů a ochranných povlaků břitu. Tyto trendy jednoznačně směřují k dosažení vyšších užitných vlastností nástrojů a pro schopnost jejich fungování při intenzivnějších a ztížených pracovních podmínkách. Možných směrů vývoje je ovšem mnoho. Vedle jiných vzniká prostor pro masivnější používání materiálů a povlaků, které tyto podmínky vydrží, a také pro zcela nová řešení nástrojů vyžadující i nové způsoby jejich efektivní výroby. K těmto výrobním metodám lze řadit i laserové technologie.

Technologie opracování a ovlivnění břitu řezného nástroje laserem dnes není plně zavedeným výrobním procesem. Vedle pozitiv v podobě dosažení nových technických možností při použití nástroje (např. vyplývající z kombinace supertvrdeho řezného materiálu a speciálních prvků geometrie břitu) existují i negativa. K těm lze zařadit vyšší výrobní náklady plynoucí především z drahého výrobního a inspekčního zařízení, ale částečně i z neznalosti navrhování nových řešení nástrojů a způsobu použití laserové technologie a jejich důsledků pro výsledné vlastnosti řezného nástroje.

Obráběcí nástroje lze dle určitého úhlu pohledu rozdělit na dvě hlavní skupiny – typizované (tzv. katalogové) a speciální. U katalogových produktů jsou klíčovými body výběr vhodné alternativy a k němu nalezení nevhodnějších podmínek použití. U tohoto sortimentu nástrojů je výzkum a vývoj nových řešení aktuálně velmi progresivní a vede na zcela nové nebo modifikované (tvar, rozměry, geometrie břitu základní materiál a povlak, způsob připevnění řezného elementu k tělesu nástroje atd.), ale univerzálně použitelné řady produktů. I vývoj takových řešení může být v některých fázích podpořen použitím nekonvenčních výrobních technologií, např. laseru.

Speciální nástroje (může se jednat i o upravené typizované) jsou pro výrobce nástrojů velkou výzvou a současně příležitostí. Na jedné straně jsou mnohdy drahým řešením, avšak s potenciálem vysoké efektivity použití v porovnání s katalogovými produkty. Bude-li tento potenciál využit, mohou být takové nástroje vhodnou variantou. Při vývoji speciálních nástrojů je důležitá nejen „chytrá“ myšlenka při návrhu nástroje a způsobu jeho použití, ale i dosažení vysoké kvality zpracování a požadovaných (nebo i unikátních) technických parametrů při nízkých výrobních nákladech. Toho lze docílovat i využitím nových způsobů výroby a úpravy řezných částí nástrojů, ke kterým patří i laserové technologie.

Přestože jsou již známy a zaváděny vybrané přístupy pro použití laseru při výrobě nástrojů, včetně zcela konkrétních vědeckých poznatků a komerčních realizací, není v této oblasti vytvořena dostatečně hluboká znalost. Úsilí pro získávání nových poznatků je třeba soustředit zejména na znalost a popis:

- obecných zásad a celkové širší možnosti a potenciálu využití laseru pro výrobu a modifikaci nástrojů;
- dopadů použití laserové technologie na vlastnosti, funkčnost a řezivost těchto nástrojů;
- metodiky pro vývoj nástrojů vyráběných s použitím laseru, která by propojovala dílčí postupy a dokázala nabídnout i zhodnocení efektivity výroby a použití nástroje.

Na základě uvedených skutečností byl stanoven tento **hlavní cíl práce**:

Vytvořit nové vědecké poznatky pro oblast výroby kvalitnějších a efektivnějších obráběcích nástrojů s využitím laseru.

Součástí splnění cíle je v první kroku definice systému obrábění a základní popis laserového procesu, a to z procesně a uživatelsky orientovaného pohledu, tj. ve vztahu k nastavení zařízení a volbě a řízení parametrů laseru.

Pro dosažení cíle je podstatné vytvořit a popsat přehled způsobů, jakými lze laser při výrobě řezných nástrojů použít, a to včetně stavu poznání a hodnocení potenciálu pro další výzkum a uplatnění. Na základě výsledků vlastního výzkumu pro vybrané způsoby použití přinést nové poznatky pro realizaci kvalitnějších a efektivnějších nástrojů.

Nezbytnou částí řešení je definování způsobů integrace laserového procesu do výrobního řetězce nástroje a s tím související tvorba a popis obecného přístupu pro hodnocení vlastností takto vyráběného nástroje.

Pro dosažení hlavního cíle práce byly proto definovány tyto **dílčí cíle práce**:

1. **Vytvořit a popsat přehled způsobů využití laseru pro výrobu nástrojů se zaměřením na metody pro přímé ovlivnění jejich řezivosti.**
2. **Pro metody s úběrem a bez úběru materiálu přinést nové poznatky pro efektivní a kvalitní zpracování moderních řezných materiálů včetně určení přínosu pro řezivost nástroje.**
3. **Vytvořit a zobecnit metodiku pro vývoj, realizaci a hodnocení vlastností funkčních a efektivních řezných nástrojů vyrobených s použitím laserové technologie.**
4. **Funkčnost a potenciál metodiky ověřit na dvou vlastních příkladech vývoje řezného nástroje vyráběného s použitím laseru.**

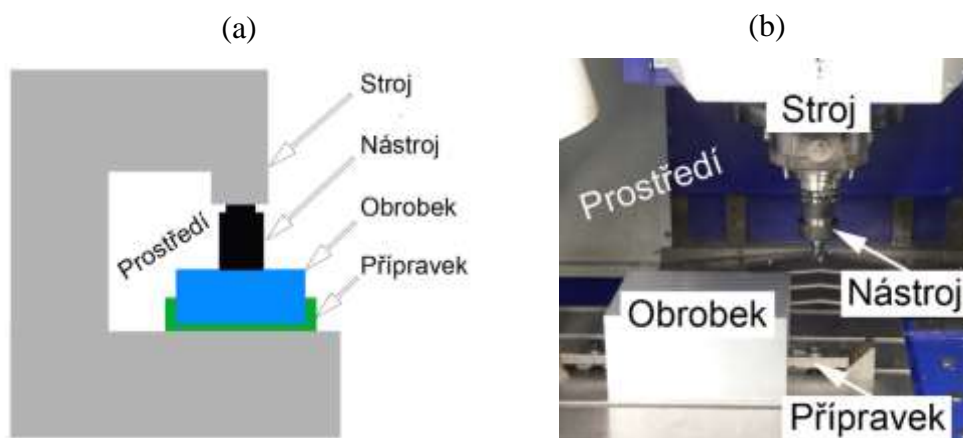
3 ŘEZNÝ NÁSTROJ

V systému obrábění je řezný (obráběcí) nástroj klíčovým prvkem. Nástroj má svou podobu, materiály a způsob výroby, které ovlivňují jeho vlastnosti a efektivitu při obrábění. V této kapitole práce je provedeno vymezení pojmů a názvosloví, které se týkají jak systému obrábění, tak i řezného nástroje, a to včetně vlastních nebo ne zcela jednoznačně určených charakteristik, které je třeba pro práci definovat. Specifikovány jsou zde detaily nástroje s definovanou geometrií břitu, který je objektem potenciálního uplatnění laserové technologie pro výrobu. Popsány jsou základní charakteristiky řezné části a funkce nástroje, a to včetně pro práci důležitého pojmu – řezivosti.

3.1 SYSTÉM OBRÁBĚNÍ A NÁSTROJ

Základní systém obrábění definujeme jako soustavu stroje (S), nástroje (N) a obrobku (O). Tuto soustavu lze doplnit ještě o přípravek pro upnutí obrobku (P). Tento systém pak značíme S-N-O-P. Přesněji je třeba doplnit definici i o řezné (pracovní) prostředí [1, 2]. Jak upnutí obrobku, tak i pracovní prostředí bývají sice často považovány za součást stroje, není to však přesné. Pro konkrétní stroj totiž mohou být použity různé způsoby upnutí obrobku, stejně jako lze na jednom stroji využít různá řezná prostředí. Přípravek i prostředí jsou v obráběcím procesu významnými aspekty.

Schematická podoba a reálný příklad soustavy je uveden na Obr. 1. Všechny uvedené součásti systému obrábění ovlivňují více či méně průběh a výsledky procesu. Jednou z nejdůležitějších částí je přitom **řezný nástroj**.



Obr. 1: Soustava stroj-nástroj-obrobek-přípravek-prostředí: (a) schematické znázornění; (b) reálný příklad.

Řezný nástroj je určen zejména svým **typem, celkovou konstrukcí, tvarem, rozměry a výrobní přesností, provedením řezné části a použitými materiály**. Všechny tyto aspekty ovlivňují budoucí chování nástroje při obrábění a také jeho výrobní cenu a tím i výsledek obrábění ve smyslu jakosti, hospodárnosti a produktivity.

Požadavky na vlastnosti nástrojů se stále zvyšují, a to v důsledku rostoucího použití takových materiálů obrobků a takových způsobů obrábění, které kladou zvýšené nároky na tuhost, přesnost nástroje a vyšší mechanickou a tepelnou únosnost jeho břitu. K moderním obráběným materiálům patří slitiny na bázi niklu, titanu nebo kobaltu, kalené a korozivzdorné oceli nebo kompozitní materiály – tedy obecně ty se zhoršenou nebo velmi specifickou obrobiteľností. K náročným způsobům obrábění lze řadit obrábění vysokými rychlostmi (HSC) [3, 4], obrábění vysokými výkony (HPC) [4, 5], obrábění vysokými posuvy (HFC), obrábění bez použití procesních kapalin (tzv. suché obrábění) nebo obrábění s minimálním množstvím maziva / kapaliny (MQL) [6]. Pro dosahování lepších výsledků obrábění uvedených materiálů a uvedenými způsoby jsou jedním z nejdůležitějších přístupů inovace řezných nástrojů.

Nástroje pro obrábění lze dělit do dvou hlavních skupin – nástroje s definovanou nebo nedefinovanou geometrií břitu. Tato práce je zaměřena na **nástroje s definovanou geometrií břitu**, které jsou v práci označovány termínem řezný, případně obráběcí nástroj. Tyto nástroje jsou využívány pro dnes stále nejrozšířenější technologie (soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, závitování atd.) a jejich další zdokonalování má proto pro technologii obrábění významný efekt. Inovace obráběcích nástrojů je realizována prostřednictvím neustálého vývoje materiálů, ochranných povlaků, optimalizací geometrie břitu a celkového provedení nástroje. V souvislosti s tím je třeba vyvíjet i zdokonalené nebo zcela nové výrobní metody nástrojů. Jedním z zajímavých směrů pro jejich výrobu může být i využití laserového paprsku.

3.2 DEFINICE NÁSTROJE A ZÁKLADNÍ TERMINOLOGIE

Řezný nástroj je definován jako **nástroj určený pro obrábění** [7]. Názvosloví nástrojů s definovanou geometrií břitu pro soustružení, frézování a vrtání určují platné normy [7–11]. Geometrické a kinematické veličiny při jejich použití jsou předmětem zdroje [12].

Nástroje se skládají ze dvou hlavních částí – upínací a řezné části. Soustružnický nůž je tvořen stopkou a řeznou částí. Frézy s válcovou stopkou a vrtáky mají základní prvky: stopka, těleso a řezná část. Nástrčné frézy se skládají z tělesa s upínacím otvorem a řezné

části. V dalším přiblížení lze části nástrojů detailně definovat dle [10]. Konkrétní reálné nástroje však jsou z hlediska konstrukce komplikovanějšího provedení, protože mohou obsahovat i upínací prvky řezné části, tlumící, seřizovací a vyvažovací elementy atp.

Obráběcí nástroje s definovanou geometrií břitu lze mimo jiné dělit dle jejich provedení na dvě hlavní skupiny – celistvé (tzv. monolitní) a s vyměnitelnými řeznými elementy.

U **monolitních nástrojů** je řezná i upínací část nástroje vyrobena z jednoho polotovaru (řezného) materiálu. Dnes se toto provedení nástrojů využívá zejména pro čelní válčové frézy, závitníky a šroubovitě vrtáky menšího průměru až po tzv. mikronástroje (zpravidla definovány jako rotační nástroje s průměrem řezné části pod 1 mm). Monolitní nástroje nacházejí uplatnění také u dalších operací, jako je protahování, vystružování, odvalování a obrázení ozubení atd. Další způsob využití je i pro menší tvarové nástroje pro soustružení, a to především z rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu. V řadě případů neexistuje k monolitním nástrojům jiná alternativa.

Výhodou monolitických variant je v především vysoká přesnost a kvalita provedení, které je dosahováno zpravidla broušením. Z toho plyne i dobrá výsledná přesnost celé nástrojové sestavy určená například nízkým radiálním a axiálním házením u vícebřitých rotačních nástrojů. Z podstaty provedení je také dosaženo vysoké pevnosti přechodu mezi řeznou a upínací částí monolitního nástroje.

Hlavní nevýhodou zmíněných nástrojů je jednoznačně jejich cena a variabilita použití. Skutečnost, že je i upínací část vyrobena z řezného materiálu, který je velmi často drahou variantou materiálu vhodného pro těleso, resp. upínací část nástroje, vede na potřebu opakovaného použití monolitních nástrojů. Proto po jejich opotřebení, v případech, kdy to je efektivní, následuje renovace nástroje pro jeho opětovné použití. Samotná renovace je smyslupná, vede-li na nižší náklady, než je cena nového nástroje. Cyklus renovace je možné dle typu a charakteru nástroj a jeho opotřebení opakovat i vícekrát.

Nástroje s vyměnitelnými břitovými elementy nebo také vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) jsou charakteristické menším elementem řezného materiálu připevněným různým způsobem (lepení, pájení, šroubový spoj, předepnutí) k tělesu nástroje. Břítové elementy mohou být buď standardizovaného provedení definovaného v [13] nebo speciálního / vlastního tvaru. Nástroje s těmito prvky se používají velmi hojně, a to od hrubovacích operací, až po běžné dokončovací obrábění. Uplatňují se dnes již nejen v případě nástrojů větších rozměrů. Z hlediska technologie jsou takové nástroje

využívány nejvíce pro soustružení, frézování a vrtání. Charakteristickým rysem vyměnitelných prvků je, že již nejsou po svém prvním opotřebení přebrušovány a opětovně použity.

Výhod spojených s nasazením vyměnitelného elementu je hned několik. Z hlediska funkce je umožněno další použití tělesa nástroje i v případě, že při obrábění nastane celková destrukce řezné části. Výhodou je i nižší cena nástroje v porovnání s obdobnou monolitickou variantou. Důvodem pro to je především skutečnost, že jeden vyměnitelný element zpravidla obsahuje větší počet identických břitů. Mezi výhody lze zařadit i ekologické dopady a omezení plýtvání přírodními zdroji drahých kovů, které jsou nezbytné pro výrobu řezného materiálu.

Použití vyměnitelných břitů ale má i nevýhody. U rotačních vícebřitých nástrojů je to menší přesnost z hlediska axiálního a radiálního házení břitů a menší tuhost spojení řezné a upínací části nástroje.

3.3 ŘEZNÁ ČÁST NÁSTROJE

Dle [10] je řeznou částí nazývána funkční část nástroje skládající se z prvků tvořících třísku. K těmto prvkům patří: **řezná hrana (ostří), čelo a hřbet**. Řezná hrana je tvořena hlavní a vedlejší hranou a špičkou (hrotem). Na ostří navazují plochy čela a hřbetu. Čelo a hřbet břitu jsou zpravidla tvořeny souborem ploch. Čelo bývá rovněž opatřeno jednou, případně i více fazetami pro zpevnění břitu a utvařečem třísky.

Řezná část nástroje má svou aktivní část, která je přímo v kontaktu s třískou a obrobkem při konkrétních záběrových podmínkách – Obr. 2. Podoba a vlastnosti řezné části jsou v uspořádání nazývaném zjednodušeně geometrie břitu a zásadně ovlivňují výsledky obrábění. Mají významný vliv na proces tvorby třísky a v důsledku toho i na velikost řezných sil, množství generovaného tepla při obrábění, teplotu řezání, trvanlivost břitu, chvění, kvalitu obrobené plochy atd. Geometrie břitu proto zásadním způsobem ovlivňuje produktivitu, hospodárnost i jakost obrábění. Z tohoto pohledu je volba vhodné geometrie břitu pro danou aplikaci klíčová.

Výše uvedený popis však není kompletní a definuje nástroj a jeho řeznou část jen z pohledu tzv. **makrogeometrie břitu**, která je určena základními tvary, rozměry a úhly břitu, tedy prvky jako jsou utvařeč třísky, čelní fazety, lomená hřbetní plocha atp. Na proces tvorby třísky má ovšem vliv i podoba tzv. **mikrogeometrie břitu**. Mikrogeometrie doplňuje informace o stavu břitu z pohledu kvality opracování ploch čela, hřbetu a řezné

hrany, tvaru a rozměrů zaoblení samotné řezné hrany, ale také dalšími geometrickými útvary na řezné části nástroje o velikosti v řádu jednotek až stovek mikrometrů. U povlakovaných nástrojů je součástí mikrogeometrie i tloušťka, struktura a stav a jakost povrchu ochranného povlaku.



Obr. 2: Podoba a názvosloví řezné části nástroje s definovanou geometrií břitu dle [10].

Řezný materiál je materiál použitý pro řeznou část nástroje. Může být tvořen pouze základním materiálem (někdy označován jako tzv. substrát) nebo dnes častěji v kombinaci s nanosenou tenkou vrstvou ochranného povlaku (tzv. povlak). Mezi nejpoužívanější materiály současnosti patří různé varianty: rychlořezné oceli, slinutého karbidu (SK) vč. cermetů, řezné keramiky (ŘK), polykrystalického kubického nitridu boru (PKNB) a polykrystalického diamantu (PKD). Poslední dva uvedené materiály bývají označovány jako tzv. supertvrdé materiály. Materiál a povlak břitu nástroje spolu s jeho makro- a mikrogeometrií zásadně ovlivňují výsledky obráběcího procesu.

3.4 FUNKCE A ŘEZIVOST NÁSTROJE

Nástroj a především jeho řezná část (a blíže její aktivní část) je při interakci s obrobkem a oddělovanou třískou vystaven extrémnímu silovému a teplotnímu zatížení a také abrazivním, adhezivním, deformačním, lomovým a difúzním jevům a chemickým reakcím. Podstatou správné funkce nástroje je, aby při daných podmínkách obrábění těmito účinkům co možná neúčinněji odolával. Vývoj nástrojů je primárně orientován právě pro potlačení degračních projevů těchto účinků.

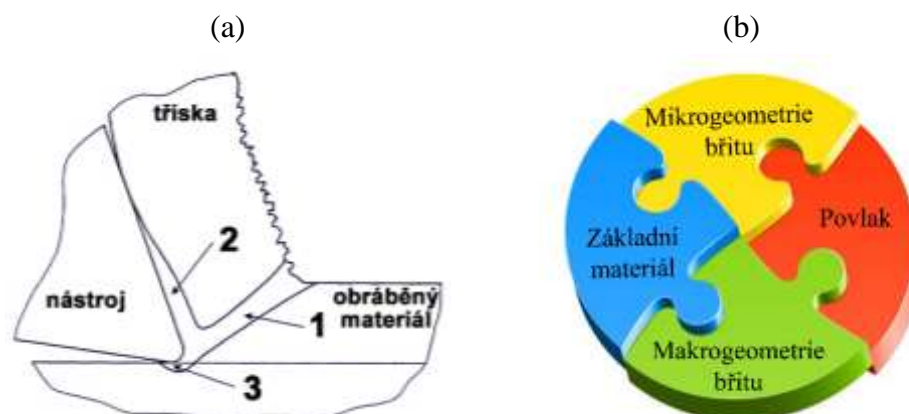
Základní charakteristikou pro klasifikaci i kvantifikaci vlastností nástrojů a jejich odolnosti a vhodnosti pro obrábění je tzv. řezivost. **Řezivost je schopnost nástroje obrábět konkrétním způsobem za daných podmínek, čímž zásadně ovlivňuje**

dosahovanou kvalitou, hospodárnost i produktivitu obrábění. Řezivost může být hodnocena z mnoha aspektů – kvalita obrobeného povrchu, trvanlivost břitu, síly při obrábění, utváření třísky, integrita povrchu a další [1]. Cílem inovace nástrojů je řezivost zvyšovat. To lze především v těchto směrech:

- zlepšení odolnosti řezného materiálu;
- zdokonalení geometrie břitu;
- zvýšení tuhosti a tlumení nástroje;
- zvýšení přesnosti nástroje a upínače;
- stanovení vhodných podmínek použití nástroje.

Velmi účinným přístupem pro zvýšení řezivost je směr dalšího vývoje řezné části nástroje – řezného materiálu a geometrie břitu. To jsou prvky, které jsou v přímé interakci se vznikající třískou a s nově formovanou obrobenou plochou. Ve třech oblastech (1, 2 a 3 – Obr. 3a) zóny řezání se totiž odehrávají plastické deformace materiálu, které jsou zdrojem výsledného tepelného a mechanického zatížení působícího na nástroj.

Především makro- a mikrogeometrie břitu a řezný materiál (základní materiál a případně ochranný povlak) ovlivňují velikost oblastí a celkovou intenzitu plastických deformací obráběného materiálu. Řezivost je tedy zásadně ovlivněna mnoha různými detaily, jako například i způsobem opracování a jakostí povrchu břitu a naneseného ochranného povlaku. Z tohoto důvodu je třeba k problematice vývoje nástrojů s vyšší řezivostí přistupovat komplexně tedy se znalostí řezného materiálu, makrogeometrie břitu, mikrogeometrie břitu a ochranné vrstvy a jejich vzájemných vazeb a vlivů – Obr. 3b.



Obr. 3: Aspekty vývoje obráběcích nástrojů: (a) detail oblasti řezání a tři oblasti plastických deformací materiálu při obrábění [14]; (b) schéma komplexního přístupu k vývoji řezného nástroje.

4 LASER A JEHO VLASTNOSTI

Laserové záření je charakterizováno jevy a vlastnostmi, které vedou na široký způsob jeho využití. Progresivní vývoj zdrojů pro generování záření, optických komponent pro jeho modifikaci a vedení a celých zařízení (včetně nezbytných softwarů) znamená, že je dnes k dispozici velké množství průmyslově využitelných laserových systémů s velmi rozmanitou škálou vlastností. Jejich volbou a nastavením lze zcela zásadně ovlivňovat účinek laseru v dané aplikaci.

Pro ucelený pohled na řešenou problematiku považuji za důležité alespoň stručně shrnout základní poznatky vztahující se k funkci laseru a k vlastnostem laserového paprsku. Důležité je zde rovněž nadefinovat dále v práci používané pojmy a hlavní procesní parametry z oblasti laserové techniky. Popis je záměrně proveden pouze z procesního a aplikačně-uživatelského pohledu, který je motivován mezioborovým přesahem práce mezi třískovým obráběním a laserovými technologiemi.

4.1 FUNKCE LASERU

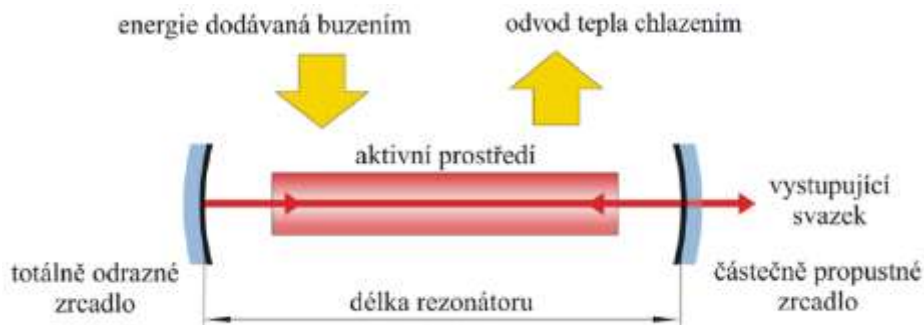
LASER je zdroj vysoce koherentního elektromagnetického záření, které vzniká díky stimulované emisi záření aktivních částic buzených vnějším zdrojem energie [15]. Generování laserového záření vyžaduje splnění tří základních podmínek: (i) inverzi populace (dodáním energie vhodnému materiálu), (ii) stimulovanou emisi a (iii) kladnou zpětnou vazbu (t.j. mechanismus, umožňující generovat v daném prostředí více fotonů o dané energii/vlnové délce, než kolik je jich ztraceno absorpcí nebo vyzářením).

Laserový paprsek vzniká přechodem elektronů mezi jednotlivými energetickými hladinami. Přičemž energetických hladin, mezi kterými se elektron pohybuje, je více. U stimulované emise pohybující se foton interaguje s elektronem, který je v excitovaném stavu a přiměje ho k přechodu do nižší energetické hladiny. Při dopadu fotonu na elektron dojde k vyzáření dalšího fotonu. Původní foton přitom není pohlcen a oba fotony se pohybují dále stejným směrem, jako foton, který emisi vyvolal. Fotony jsou synchronizovány, mají stejnou frekvenci a stejnou fázi. Proces se může lavinovitě opakovat, čímž dochází k zesilování záření. [16–18]

Aby došlo ke spuštění stimulované emise, která bude probíhat kontinuálně, je nutné vytvořit tzv. inverzní populaci. To znamená, že je v energeticky vyšší hladině více elektronů než v hladině nižší. Látku, ve které může být dosaženo inverzní populace,

nazýváme aktivní prostředí. [19, 20]

Vyzářené fotony se v aktivním prostředí laserového zdroje pohybují zcela náhodně a je nutné je usměrnit. K tomu slouží optický rezonátor (Obr. 4). Ten se skládá ze dvou vzájemně rovnoběžných zrcadel. Jedno je nepropustné a druhé polopropustné. Mezi zrcadly dochází k usměrňování a zároveň produkci dalších fotonů. Pokud jsou fotony zesíleny na určitou úroveň, polopropustné zrcadlo je propustí ven a tím vzniká laserový paprsek. [18, 19]



Obr. 4: Schématické znázornění laserového zdroje. [21]

Paprsek (někdy také označován jako „svazek“) vystupující z rezonátoru je veden do optické soustavy různého provedení dle typu aplikace laseru. Jedno z vhodných provedení pro výrobu nástrojů je takové, kdy je optická cesta tvořena nejprve beam expandérem upravujícím průměr kolimovaného svazku. Paprsek dále vstupuje do galvo skeneru umožňujícího jeho rychlý pohyb (rozmítání) v ploše. Optická soustava je dále tvořena výstupním objektivem s fokusační čočkou.

4.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI LASEROVÉHO SVAZKU

Důležité základní vlastnosti laserového svazku jsou monochromaticnost, koherence a divergence.

Monochromaticnost znamená, že všechny fotony laserového paprsku mají stejnou energii a díky tomu má záření pouze jednu vlnovou délku. Tato vlastnost vyplývá již z podstaty stimulované emise a je určena použitým aktivním prostředím. [16, 19]

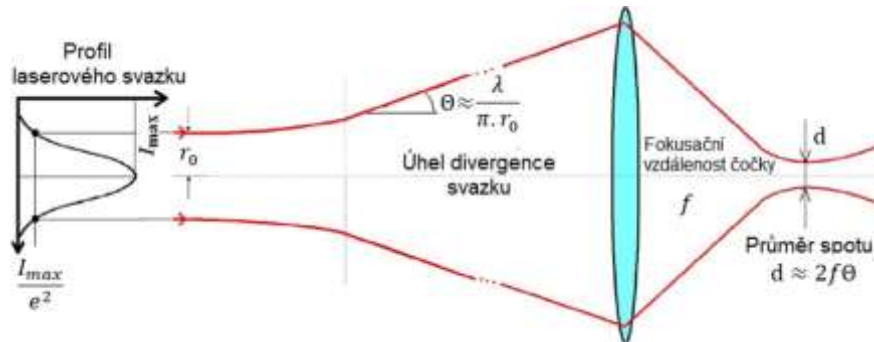
Koherence je vlastnost, při které fotony kmitají se stejnou frekvencí a jejich fázový rozdíl je neměnný. [16, 19]

Malá divergence neboli směrovost záření znamená, že fotony mají stejný směr a pohybují se vzájemně paralelně. Díky nízké divergenci je možné koncentrovat maximální energii

do velmi malé oblasti. Ideální divergence by byla nulová, nicméně to není možné díky difrakčnímu jevu. Divergence je charakterizována úhlem divergence θ například dle Obr. 5 a rovnice (1). [16, 19, 22, 23]

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi r_0} \quad [\text{mrad}] \quad (1)$$

Kde λ je vlnová délka záření [mm], r_0 je poloměr laserového paprsku [mm].



Obr. 5: Princip divergence laserového paprsku. [23]

Kvalitu laserového paprsku lze popisovat různými parametry a vlastnostmi. Z hlediska aplikací je jedním z nejdůležitějších parametrů BPP (Beam Parameter Product), který je násobkem divergence paprsku a jeho poloměru v ohnisku – rovnice (2). Čím vyšší je BPP , tím nižší je kvalita paprsku. BPP paprsku s ideálním Gaussovským rozložením energie v prostoru (označovaný také jako „Gaussovský paprsek“) je dán poměrem vlnové délky záření a π . [23, 24]

Faktor kvality paprsku M^2 je poměr BPP reálného a ideálního paprsku s Gaussovským rozložením energie stejné vlnové délky, viz rovnice (3). Pro ideální svazky s Gaussovským rozdělením je tedy $M^2 = 1$, pro jiný typ rozdělení je $M^2 > 1$. Hodnoty $M^2 < 1$ nejsou fyzikálně možné. [21, 24]

$$BPP = r \cdot \theta \quad [\text{mm} \cdot \text{mrad}] \quad (2)$$

$$M^2 = BPP \cdot \frac{\pi}{\lambda} \quad [-] \quad (3)$$

Kde BPP je beam parameter product [mm·mrad], r je poloměr paprsku v ohnisku [mm], θ je úhel divergence svazku [mrad], M^2 je faktor kvality laserového paprsku [-] a λ je vlnová délka záření [mm].

Důležitou vlastností je velikost zaostřeného paprsku v ohnisku. Velikost paprsku ovlivňuje vhodnost použití laseru pro určitou aplikaci. Pro kruhový svazek s Gaussovým rozložením energie je velikost zaostřeného paprsku definována průměrem. Výsledný průměr paprsku v ohnisku závisí na počátečním průměru, vlnové délce, fokusační vzdálenosti a kvalitě svazku. Průměr, na který může být paprsek zaostřen lze vypočítat z rovnice (4). [23, 24]

$$d = \frac{4 \cdot \lambda \cdot f \cdot M^2}{\pi d_0} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

Kde d je průměr paprsku v ohnisku [mm], f je ohnisková vzdálenost [mm], d_0 je průměr laserového paprsku dopadajícího na čočku [mm].

4.3 PROCESNÍ PARAMETRY

Každý laserový systém je definován parametry, které významně ovlivňují způsob interakce laseru s materiálem, její intenzitu a efektivitu a výslednou kvalitu procesu. Parametry určují vhodnost konkrétního laserového zdroje a záření pro danou technologii a jsou dané typem aktivního prostředí, typem buzení, pracovním režimem laserového zdroje a vlastnostmi použitých optických komponent. K základním, z hlediska procesu důležitým, procesním charakteristikám laseru patří zejména:

- prostorové rozložení intenzity záření;
- délka a frekvence pulzů;
- vlnová délka záření;
- zářivá energie a její intenzita;
- zářivý výkon a intenzita ozáření;
- překrytí pulsů a rychlost pohybu paprsku.

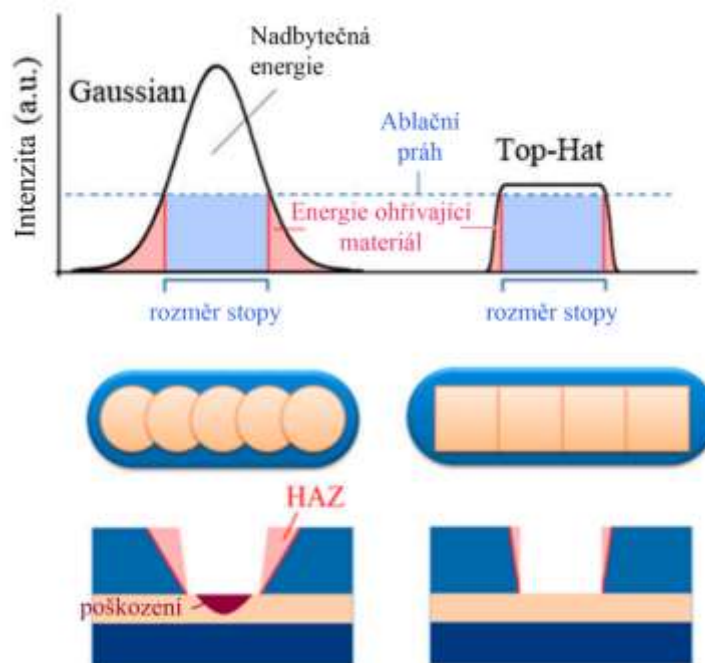
Proces interakce je významně ovlivněn i dalšími doplňujícími nebo odvozenými charakteristikami jako například úhlem dopadu paprsku na povrch, fokusační vzdáleností a rozměrem paprsku v ohnisku.

4.3.1 PROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ INTENZITY ZÁŘENÍ

Laserové záření může vykazovat různé prostorové rozložení intenzity, což ovlivní i výsledek interakce paprsku s materiálem.

Ve většině případů generují laserové systémy profil s Gaussovým rozložením intenzity

energie s kruhovým tvarem paprsku v ohnisku - Obr. 6 (levá část). Pro některé aplikace laserového mikroobrábění může být přínosné použít jiné rozložení, například téměř obdélníkového profilu, tzv. „top-hat“ - Obr. 6 (pravá část). V takovém případě lze dosáhnout vyšší efektivity ablace a menší velikosti tepelně ovlivněné oblasti (Heat Affected Zone, HAZ). Nevýhodou je, že se profil v podobě čtverce vytvoří jen v obrazové rovině zdroje a nelze ho šířit ani fokusovat. Dalším příkladem rozložení energie může být třeba „Besselův“ paprsek. Jeho použití je však limitováno i velkou ztrátovostí, kdy se do něj transformuje jen 5 až 10 % energie. [16, 22, 25–28]



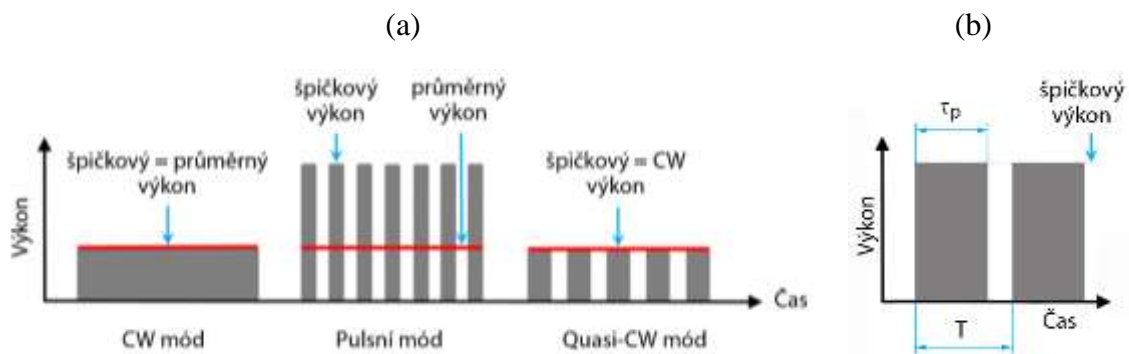
Obr. 6: Porovnání rozložení intenzity záření (nahore) a jejího dopadu pro stopu na povrchu (uprostřed) a řezu zpracovávaným materiálem s vyznačenou HAZ (dole) pro: (vlevo) Gaussovské rozložení energie; (vpravo) rozložení „top-hat“. [27]

4.3.2 DÉLKA A FREKVENCE PULSŮ

Laserová zařízení mohou pracovat v kontinuálním (CW – continuous wave), kvazikontinuálním (quasi-CW), nebo pulzním režimu. Podstata těchto režimů je schematicky ukázána na Obr. 7. V případě kontinuálního módu je laserový paprsek vyzařován nepřetržitě. Kvazikontinuální lasery pracují částečně v kontinuálním a částečně v pulzním režimu, kdy zdroj emituje paprsek pouze v určitých časových intervalech. To má za následek snížení teploty v rezonátoru. Nedochozí k úplnému přerušování záření, ale pouze ke snížení produkce fotonů. Frekvence pulsů dosahují desítek až tisíců Hz a tato funkce se ukazuje jako velmi vhodná pro dosažení vysoké kvality při

procesech výkonného řezání nebo svařování. [24, 29]

Pulzní lasery emitují záření ve formě optických pulzů po velmi krátký čas (τ_p). Časové rozestupy mezi pulzy ($T - \tau_p$) jsou zpravidla mnohem delší než jejich délka. Pulzní lasery dělíme na ty s krátkou délkou pulzu (stovky nanosekund až stovky pikosekund) a ultrakrátkou délkou pulzu (od desítek pikosekund po stovky femtosekund). Ultrakrátkopulzní lasery se používají pro aplikace zpracování materiálu s minimálním tepelným ovlivněním. [16, 24, 26, 29]



Obr. 7: Režimy laserů: (a) kontinuální, pulzní a kvazikontinuální mód; (b) detail délky pulzu pulzního laseru.

4.3.3 VLNOVÁ DÉLKA ZÁŘENÍ

Vlnová délka (λ) je základní charakteristikou laserového záření. Zásadně ovlivňuje množství pohlceného záření materiálem. Její volba je proto určující pro způsob a efektivitu interakce laseru s konkrétním materiálem. Záření může být generováno o základní vlnové délce (tzv. I. harmonická délka, I H) nebo vlnovým laděním o vyšších harmonických frekvencích, např. II. a III. harmonická vlnová délka (II H, III H). V zásadě se ale vlnová délka pohybuje v rozsahu mezi ultrafialovou až infračervenou oblastí spektra a je určena typem aktivního média a vyzářeným kvantem energie při emisi. Vyjádřit ji lze jako poměr rychlosti světla ve vakuu a frekvence fotonu. [22, 30, 31]

4.3.4 ZÁŘIVÁ ENERGIE A JEJÍ INTENZITA

Energie záření je dle [32] definována jako energie vyzářená, přenesená nebo přijatá ve formě elektromagnetického vlnění. energii paprsku vstupující do procesu je možno vyjádřit například absolutní hodnotou energie v jednom pulzu E_p dle vztahu (5) nebo hustotou, resp. intenzitou, dopadající zářivé energie na plochu v daném bodě. Hustotu energie (F), také označovanou jako fluence, je možné vypočítat dle vztahu (6). [16, 22]

$$E_p = \frac{P_{ave}}{f_p} \quad [\text{J}] \quad (5)$$

$$F = \frac{E_p}{\pi r^2} \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (6)$$

Kde P_{ave} je průměrný zářivý výkon [W], f_p je frekvence pulsů [Hz], r je poloměr paprsku v ohnisku [m].

4.3.5 ZÁŘIVÝ VÝKON A INTENZITA OZÁŘENÍ

Výkon laseru lze definovat jako změnu zářivé energie v čase, nebo z pohledu procesu jako množství energie, která byla vyzářena za jednu sekundu. V zásadě lze pro pulsní lasery rozlišovat výkon špičkový a výkon průměrný. Špičkový výkon (P_{peak}) je dán množstvím zářivé energie za dobu trvání laserového pulzu podle rovnice (7). [16, 32]

$$P_{peak} = \frac{E_p}{\tau_p} \quad [\text{W}] \quad (7)$$

Kde E_p je energie v pulzu [J], τ_p je doba trvání jednoho pulzu [s].

Průměrný výkon je definován rovnicí (8) jako množství uvolněné energie po dobu trvání cyklu. Průměrný výkon laseru pracujícího v kontinuálním režimu je roven výkonu špičkovému, zatímco pulsní laser emituje záření s pravidelnou pauzou mezi pulzy. Díky tomu může být špičkový výkon výrazně vyšší než výkon průměrný. [16]

$$P_{ave} = E_p \cdot f_p = \frac{E_p}{T} \quad [\text{W}] \quad (8)$$

Kde E_p je energie pulzu [J], T je perioda pulsů [s], f_p je frekvence pulsů [Hz].

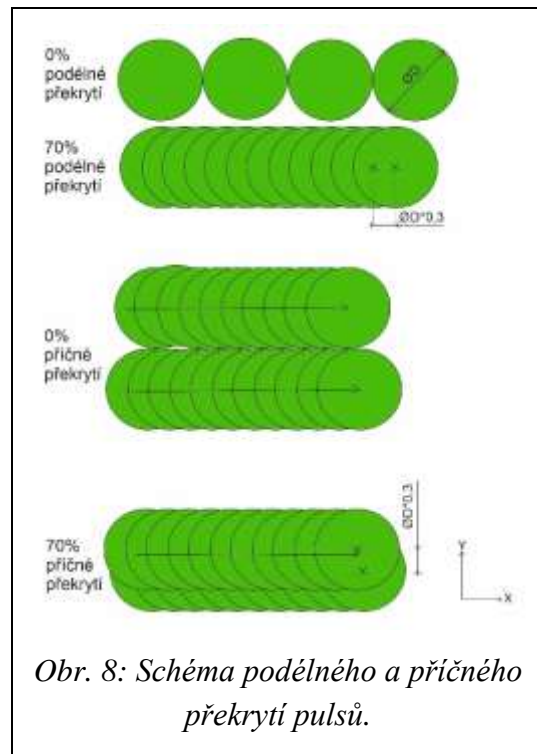
Intenzita ozáření, či hustota výkonu, je definována jako zářivý výkon dopadající na povrch o elementu plochy. Špičková intenzita ozáření (I_{peak}) se mění v závislosti na průměru paprsku. Pro paprsek s Gaussovým rozdělením intenzity platí vztah (9). [16, 32, 33]

$$I_{peak} = \frac{P_{peak}}{\pi r^2} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (9)$$

Kde P_{peak} je špičkový výkon [W], r je poloměr laserového paprsku [m].

4.3.6 PŘEKRYTÍ PULSŮ A RYCHLOST POHYBU PAPRSKU

V případě kontinuálních laserů je zaručena nepřetržitá dodávka laserového záření a tím vzniká souvislá stopa ovlivnění na povrchu materiálu. U pulzních laserů je tato stopa definována kombinací frekvence pulzu a rychlosti pohybu paprsku, tzv. skenovací rychlost. To vede k různým hodnotám překrytí pulsů, resp. stop zanechaných laserem na materiálu, ve směru pohybu paprsku i kolmo na něj (Obr. 8). Vzájemné překrytí pulsů v ploše určují faktory: podélné překrytí pulsů H_x (tzv. overlap; vztah (10)) a příčné překrytí pulsů H_y (tzv. šrafování) – vztah (11). [22]



Obr. 8: Schéma podélného a příčného překrytí pulsů.

$$H_x = \left(1 - \frac{v_f}{D \cdot f_p}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (10)$$

$$H_y = \left(1 - \frac{h}{D}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (11)$$

Kde v_f je skenovací rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$], f_p je frekvence pulsů [Hz], h je rozteč drah paprsku v ose Y (kolmo na směr pohybu paprsku) [mm], D je průměr stopy zanechané laserem na povrchu [mm].

5 LASEROVÉ TECHNOLOGIE PRO VÝROBU NÁSTROJŮ (VÝZKUM, APLIKACE, NOVÉ POZNATKY)

Jedním z mnoha způsobů využití laseru je i pro výrobu řezných nástrojů. Laser je zde zdrojem energie pro docílení změn v materiálu. Výrobci nástrojů dnes lasery běžně nasazují pro prototypové až sériové značení. V případě nástrojů z nejtvrdějších materiálů je laser používán i při přípravě polotovarů segmentů řezné části. Jen několik předních světových firem pracuje s laserem v těchto materiálech pro tvorbu konečné podoby makrogeometrie břitu. Laser má ovšem pro řezné nástroje potenciál mnohem masivnějšího, širšího a efektivnějšího uplatnění. Další způsoby využití jsou prozatím pouze předmětem výzkumů, které jsou navíc v řadě případů v rané fázi řešení.

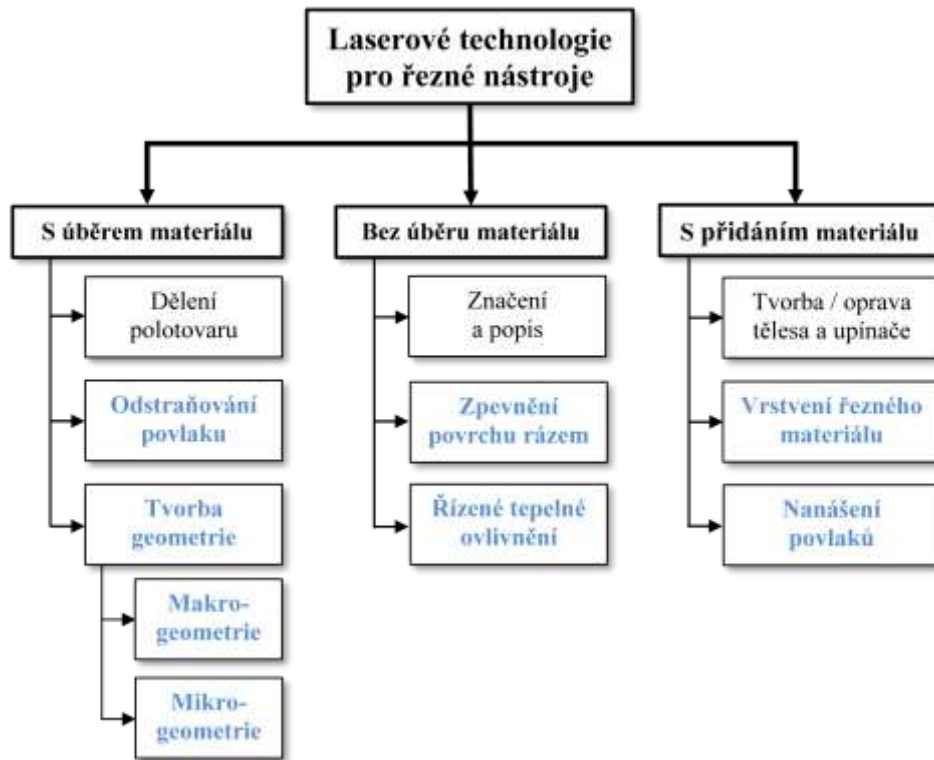
V kapitole je nejprve vytvořen a popsán přehled možných způsobů využití laseru pro výrobu nástrojů, a to s důrazem na procesy, které přímo ovlivňují funkční vlastnosti nástroje – především jeho řezivost. V další části je řešena interakce laserového paprsku s materiálem, jakožto aspektu pro efektivní a kvalitní využití laseru. Následně jsou detailněji rozpracovány jednotlivé oblasti a skupiny technologií, a sice formou popisu podstaty a principu řešení, shrnutí známých poznatků a definice potenciálu budoucího vývoje. Nejvýznamnější část kapitoly tvoří popis a výsledky vlastního výzkumu vybraných způsobů použití laseru pro nejpoužívanější řezné materiály, vč. povlaků.

5.1 ZPŮSOBY VYUŽITÍ LASERU PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE

Využití laseru pro výrobu a modifikaci (úpravu již vyrobených) obráběcích nástrojů je různorodé. Uplatnění a smysl nasazení laserové technologie leží v těchto oblastech:

- identifikace nástrojů;
- výroba řezného materiálu a povlaku;
- výroba a renovace upínačů a těles nástrojů;
- výroba polotovaru břitové části;
- tvorba geometrických charakteristik řezné části nástroje;
- řízená změna vlastností povrchu částí nástroje.

V zásadě lze **způsoby použití laseru** třídit dle vytvořeného schématu (Obr. 9) na procesy: (i) s úběrem materiálu, (ii) bez úběru materiálu a (iii) s přidáváním materiálu. Společným rysem všech těchto způsobů je, že laser je využíván jako zdroj energie, která se v interakci s materiálem mění v teplo, které způsobuje požadované efekty.



Obr. 9: Přehled způsobů využití laseru pro výrobu a modifikaci řezných nástrojů.

Důležitým hlediskem výroby řezných nástrojů jsou výrobní náklady, ovlivňující do značné míry jeho prodejní cenu. Použití laseru při výrobě může tyto náklady oproti konvenčním způsobům výroby výrazně zvýšit. Mělo by proto být dosaženo situace, kdy **laserem vytvořený nástroj disponuje výrazně zlepšenými nebo zcela unikátními vlastnostmi**, které povedou k celkově vysoké efektivitě nástroje v operaci.

Přestože výši výrobních nákladů na nástroj budou více či méně ovlivňovat všechny uvedené přístupy, je důležité soustředit se na ty, které **mají potenciál výrazně ovlivnit funkční vlastnosti nástroje** (především jeho řezivost), jsou technicky a časově náročné (a nákladné) a případně již nyní nebo v blízké době uplatnitelné v praxi. Právě takové přístupy použití laseru budou předmětem popisu možností a výsledků nasazení laseru při výrobě řezných nástrojů. Jsou jimi technologie (ve schématu zvýrazněny modře):

- s odebráním materiálu – tvorba geometrie břitu, odstraňování povlaku z břitu;
- bez úběru materiálu (ale se změnou jeho vlastností) – zpevnění povrchu břitu rázovou vlnou, řízené tepelné ovlivnění povrchu řezného materiálu;
- s přidáváním materiálu – vrstvení řezného materiálu, nanášení ochranného povlaku.

Zbylé tři technologie uvedené ve schématu na Obr. 9 (dělení polotovarů segmentů břitů, značení a popis nástrojů, tvorba a oprava těles a upínačů nástrojů) neovlivňují přímo

řezivost nástroje. Jsou to zpravidla již zavedené, technicky zvládnuté a relativně jednoduché způsoby využití laseru pro řezné nástroje. Společným znakem těchto způsobů je především potřeba minimalizace výrobního času při dodržení předepsané kvality. Z uvedených důvodů nebude těmto technologiím v práci věnován větší prostor.

Dělení materiálu laserem, zejména polotovarů břitových segmentů ze supertvrdých materiálů (PKNB a PKD) je alternativou vůči elektrojiskrovému řezání drátem, anebo jedinou volbou v případě zpracování elektricky nevodivých materiálů (např. CVD-D, tj. diamant vyrobený chemickou depozicí). Dělení je prováděno na jednodušších typech laserových zařízení. Jelikož je vytvořený polotovar segmentu dále zpracováván, neměla by tato technologie při správném nastavení ovlivnit výsledné vlastnosti nástroje. Produktivita dělení materiálu je proto cestou ke snižování výrobních nákladů na nástroj.

Značení a popis nástrojů je realizován na jednodušších a produktivních laserových zařízeních s nižší hodinovou režijní sazbou nákladů. Proces je technologicky zvládnutý, v praxi zavedený, produktivní a poskytuje dostatečně kvalitní výsledky a zásadněji neovlivňuje jak výrobní náklady, tak ani výslednou řezivost nástroje.

Vývoj **technologií kovového 3D tisku** umožňuje mimo jiné realizovat tělesa nástrojů, resp. i celé nástrojové upínače. V kombinaci s laserem se jedná zpravidla o výrobní způsob SLM (Selective Laser Melting). Výroba těles i upínačů je touto metodou již komerčně využívána. Především u fréz a vyvrtávacích hlav velkých průměrů je možné optimalizovat tuhost a dynamické vlastnosti nástroje při snižování jejich hmotnosti s pozitivním dopadem na dynamiku obráběcího procesu. Výroba upínačů rotačních nástrojů je motivována tvorbou jinak obtížně vyrobitelných vnitřních kanálků pro vedení procesního média do řezu a pro tvorbu štíhlejších upínačů s integrovaným účinnějším systémem upínání, než je tomu v případě upínačů vyráběných konvenčními metodami.

5.2 INTERAKCE PAPRSKU LASERU S ŘEZNÝM MATERIÁLEM

Pro efektivní použití laseru při výrobě nástrojů je důležitá znalost interakce paprsku laseru s konkrétním materiálem. Způsob a podmínky interakce rozhodují o charakteru ovlivnění materiálu, tj. o mechanismu, rychlosti a kvalitě odstranění a / nebo tepelného ovlivnění materiálu. Cílem práce přitom není popsat podstatu a princip interakce samotné, ale způsoby hodnocení jejího průběhu a výsledku s vlivem základních vlastností řezných materiálů. Na základě takových znalostí lze systematickými postupy určit vztah mezi nastavením procesu a požadovanými parametry výroby laserem z daného materiálu.

5.2.1 VLASTNOSTI ŘEZNÉHO MATERIÁLU OVLIVŇUJÍCÍ INTERAKCI

Pro výsledek interakce laserového paprsku s materiálem je určující řada jeho vlastností. Problematika vlivu materiálu na interakci je detailněji popsána např. v [26, 34, 35].

Z pohledu aplikačního využití laseru nejen pro zpracování řezných materiálů jsou zajímavé především známé nebo snadno definovatelné charakteristiky: **tepelná vodivost, hustota, součinitel délkové roztažnosti, teplota tavení, tepelná kapacita, teplota varu a měrné skupenské teplo varu** [22, 36, 37]. Znalost těchto vlastností řezných materiálů v porovnání s laserem běžně opracovávanými kovy může napomoci v predikci interakce a interpretaci jejích výsledků.

Nízká **tepelná vodivost materiálu** v kombinaci s vysokou absorpcí záření a nízkou teplotou tavení a teplotou varu jsou základním předpokladem pro produktivní opracování laserovým paprskem. Nižší tepelná vodivost materiálu způsobí větší koncentraci tepla v menším objemu materiálu a lokálně zvýší teplotu při stejné vložené energii. Čím nižší budou teploty tavení a bod varu v materiálu obsažených prvků, tím menší energie bude třeba pro odstranění materiálu jeho odtavením nebo sublimací vyvolaných laserem.

Tepelná vodivost řezných materiálů byla porovnána s vodivostí vybraných kovových slitin (Titan Grade 5, ocel 12050, hliníková slitina EN AW 7075, měď 423001), které jsou laserem běžně zpracovávány - Tab. 1 a Obr. 10. Ve stejné tabulce jsou pro srovnání uvedeny i hodnoty hustoty materiálů a součinitelů délkové roztažnosti.

Je patrné, že mezi jednotlivými typy řezných materiálů jsou velké rozdíly v měrné tepelné vodivosti. Na jedné straně je možné pracovat s diamantem jakožto materiálem s vysokou tepelnou vodivostí. Oproti tomu může být opracována řezná keramika, s vodivostí až 50x nižší. Slinutý karbid typu K10 má tepelnou vodivost přibližně $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Materiály typu PKNB vykazují velký rozptyl hodnot především v závislosti na podílu zrn vůči pojivové fázi. Větší podíl KNB znamená vyšší tepelnou vodivost.

Řezné materiály mají tepelnou vodivost srovnatelnou s kovy laserem běžně zpracovávanými. Zvláštní pozornost si však z tohoto pohledu vyžadují diamantové materiály, kdy při vysokém podílu diamantové složky (např. u CVD-D materiálu) může být tepelná vodivost několikanásobně větší než u mědi.

V případě porovnání dle **hustoty materiálu** není, až na výjimku, kterou tvoří slinutý karbid, výraznější rozdíl mezi řeznými materiály. Řezné materiály typu směsná ŘK,

nízkoobsahový PKNB a PKD mají hustotu podobnou jako například slitina Ti6Al4V. U vysokoobsahového PKNB a nitridové ŘK je hustota ještě nižší – blízká hustotě hliníkové slitiny EN AW 7075.

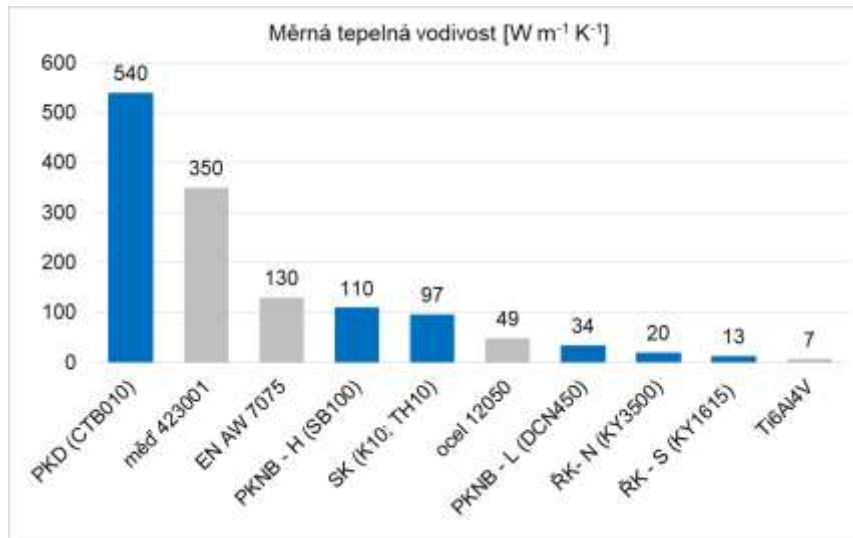
Tab. 1: Měrná tepelná vodivost, hustota a součinitel délkové roztažnosti vybraných řezných a kovových materiálů. [38, 39]

Typ materiálu, komerční název (výrobce nebo značení)	Měrná tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Hustota [g·cm ⁻³]	Součinitel délkové roztlačnosti [10 ⁻⁶ ·K ⁻¹]
Slinutý karbid, TH10 (Tungaloy)	97	14,7	5,4
Řezná keramika nitridová, KY3500 (Kennametal)	10 až 30 *)	3,2	3,2 až 3,5 *)
Řezná keramika směsná, KY1615 (Kennametal)	13 *)	4,2 *)	8,0 až 8,5 *)
Nízkoobsahový PKNB, DCN450 (Element Six)	34	4,3 *)	5,4 *)
Vysokoobsahový PKNB, SB100 (Ijjin)	100 až 120 *)	3,4 *)	4,9
Polykrystalický diamant, CTB010 (Element Six)	540	4,1	4,2
ocel 12050 (1.1191)	49	7,87	13
měď 423001 (CW024A)	350	8,94	17,7
EN AW 7075 (3.4365)	130 až 155	2,81	24
titan Grade 5 (Ti6Al4V)	7	4,43	9,2

*) Hodnota pro konkrétní typ vzorku není od výrobce známa. Z tohoto důvodu byly použity hodnoty pro stejné typy materiálů podobného chemického složení ze zdroje [38].

Nízká hodnota **součinitele délkové roztlačnosti** je jedna z důležitých charakteristik řezných materiálů pro jejich použití. Tato vlastnost bude vhodná i pro laserový proces při generování velkého množství tepla. Ukázané řezné materiály mají součinitel délkové roztlačnosti podobný. Mírně vyšší je pouze u směsné a oxidové keramiky. V porovnání s vybranými představiteli kovů vykazují řezné materiály nízké hodnoty. Z tohoto pohledu lze očekávat příznivé chování materiálů pro řezné nástroje při jejich zpracování laserem. Ani z pohledu **teploty tavení a varu** prvků a sloučenin obsažených v řezných materiálech není třeba očekávat zhoršené podmínky pro interakci paprsku laseru s materiálem.

Jednotlivé prvky obsažené v řezných materiálech jsou často shodné s prvky v běžně laserem obráběných kovech (uhlík, wolfram, hliník, křemík, titan aj.). Určitou komplikací je vícesložkové složení (tvrdá fáze + pojivo) u SK, PKNB a PKD. Vlastnosti tvrdé a pojivové fáze jsou totiž zpravidla výrazně odlišné. Například teplota tavení WC je 2627 až 2870 °C a kobaltu 1495 °C [38]. Teplota varu wolframu je 5660 °C a kobaltu 2870 °C [40]. Na každou z fází tak bude laserový proces s daným nastavením parametrů působit jinak.



Obr. 10: Porovnání měrné tepelné vodivosti pro vybrané řezné materiály a kovy.

Přestože je problematika interakce materiálu s laserem určena mnoha dalšími faktory s mnohem složitějšími souvislostmi a vazbami, naznačují zde uvedené skutečnosti, že **řezné materiály v principu nebudou špatně nebo omezeně zpracovatelné laserem**. V porovnání s jinými materiály je jen třeba se **soustředit na takové nastavení procesu, aby nedocházelo k nežádoucí degradaci vlastností zajišťujících řezivost**. V tomto ohledu bude důležité vždy pro konkrétní typ materiálu experimentálně definovat vztah mezi nastavením laserového procesu a jeho výsledky.

5.2.2 POHLTIVOST LASEROVÉHO ZÁŘENÍ MATERIÁLEM

PODSTATA JEVU

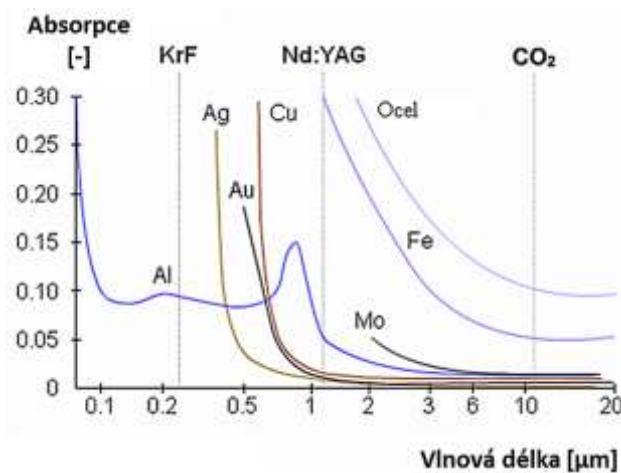
Při dopadu paprsku laseru na povrch materiálu je jeho část pohlcena (absorpce), část odražena (reflexe) a část prochází skrz materiál (transmise). U netransparentních materiálů, kterými řezné materiály zpravidla jsou, je uvažována nulová hodnota transmise. Odrazivost je proto inverzní hodnotou pohltivosti (absorpce). [16]

Schopnost materiálu absorbovat laserové záření je důležitou vlastností pro ovlivnění materiálu laserem. Absorpce záření materiálem je vyjádřena Beer-Lambertovým zákonem na základě definice absorpčního koeficientu – vztah (12). Tento koeficient je specifický pro konkrétní materiál a je ovlivněn především vlnovou délkou dopadajícího záření, teplotou a stavem povrchu materiálu. Pro dosažení největší pohltivosti záření je důležité, aby paprsek dopadal na povrch materiálu, pokud možno pod úhlem 90°. [22, 26, 30]

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (12)$$

Kde $I(z)$ je intenzita záření v hloubce z [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$], I_0 je vstupní intenzita záření [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$], α je absorpční koeficient [-].

Čím je absorpce vyšší, tím může být do materiálu přivedeno více energie, která se stává zdrojem tepla pro ovlivnění a proces je efektivnější. Kvalitu a efektivitu procesu založeného na absorpci je možné ovlivnit správným nastavením vlnové délky záření [26]. Jsou známy závislosti absorpce záření na vlnové délce pro různé prvky a kovy – viz např. Obr. 11, ale i plasty [41]. Lasery s dlouhou vlnovou délkou nejsou vhodné k ablaci kovů, protože většina energie bude povrchem odražena. [16, 42].



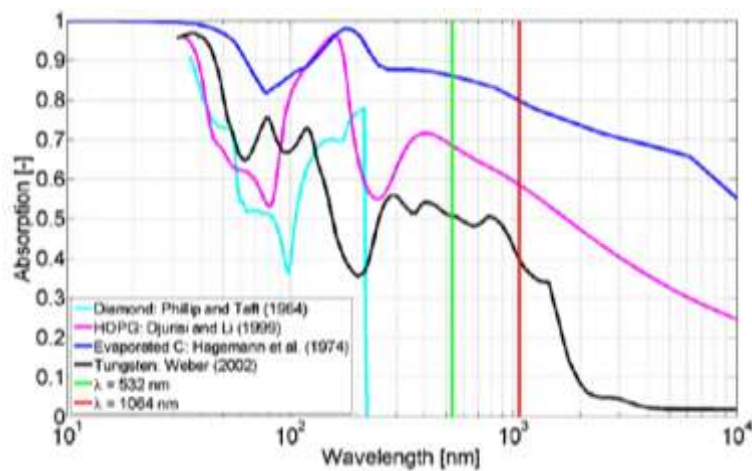
Obr. 11: Závislosti absorpce záření na jeho na vlnové délce pro různé materiály a různé typy laserů. [43]

POHLTIVOST ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Závislosti absorpce na vlnové délce pro různé řezné materiály nebyly u řezných materiálů doposud dostatečně zkoumány. Zdroje, které odkazují alespoň na dílčí výsledky pohltivosti řezných materiálů, resp. chemických prvků v nich obsažených jsou např. [44,

45]. Jak vyplývá z Obr. 12, vykazoval diamant při vlnové délce větší než 220 nm plnou propustnost, resp. nulovou pohltivost laserového záření. Dle tohoto zdroje jej tedy nelze laserem ablovat a ovlivňovat při běžně používaných vlnových délkách záření 532 a 1064 nm. To však nebude platit pro řezné materiály obsahující diamant (typu PKD a CVD-D), jelikož ty prokazatelně uvedenými vlnovými délkami zpracovávat lze a mají tedy nenulovou absorbtivitu.

Oproti tomu wolfram, jakožto základní prvek slinutých karbidů, má průběh pohltivosti s vlnovou délkou pro opracování laserem příznivější. Platí zde, že s kratší vlnovou délkou roste pohltivost záření. Při 532 nm lze tedy očekávat vyšší pohltivost laserového záření než pro 1064 nm.



Obr. 12: Závislosti absorpce záření na jeho na vlnové délce pro různé materiály a různé typy laserů. [44]

Jedním ze směrů vlastního výzkumu popisovaného v práci je experimentální stanovení pohltivosti laserového záření pro sadu základních typů řezných materiálů.

5.2.3 ABLAČNÍ PRÁH MATERIÁLU

DEFINICE A ZPŮSOB STANOVENÍ

Interakci paprsku s materiálem lze charakterizovat více způsoby. Jedním z nejdůležitějších a výchozích kroků pochopení interakce je stanovení ablačního prahu (tzv. ablation threshold) materiálu. Hodnota této veličiny charakterizuje, zda bude při konkrétní kombinaci parametrů a vlastností paprsku a materiálu, laserem materiál odebírán (tzv. ablován) nebo jen tepelně ovlivněn. Nepřekročí-li hodnota hustoty energie prahovou hodnotu, ablace nenastane. [22]

Ablační práh je minimální množství energie (tzv. prahová intenzita energie F_{th}), která je třeba pro to, aby došlo k překonání vazebných sil mezi atomy v mřížce a došlo k ablaci, jejímž základem je ionizace materiálu a přeměna na plazma. [46]

Hodnota prahové intenzity energie závisí především na vlastnostech materiálu, stavu jeho povrchu, délce pulzu a vlnové délce použitého laseru. Různé materiály proto mají různě velký ablační práh pro konkrétní parametry zpracování.

Ablační práh řezného materiálu lze stanovit stejným postupem jako u jiných materiálů, a to graficko-výpočetní metodou na základě experimentálních dat, viz např. v [22, 46–48]. Pro různé hodnoty energie v pulsu E_p rozložené v paprsku např. dle Gaussova normálního rozdělení a popsané vzorcem (5) je měřen průměr paprsku laseru prostřednictvím stopy D zanechané na povrchu analyzovaného materiálu. Závislost mezi vloženou energií a stopou v materiálu je určena vzorci (6) a (13).

$$D^2 = 2r^2 \cdot \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right) \quad (13)$$

Rovnici (13) lze po dosazení ze (6) upravit do tvaru rovnice přímky popsané vztahem (14). Následně je provedena substituce dle vztahů (15) až (19).

$$\ln 2E_p = \frac{D^2}{2r^2} + \ln F_{th} + \ln \pi r^2 \quad (14)$$

$$y = a \cdot x + b \quad (15)$$

$$y = \ln 2E_p \quad (16)$$

$$a = \frac{1}{2r^2} \quad (17)$$

$$x = D^2 \quad (18)$$

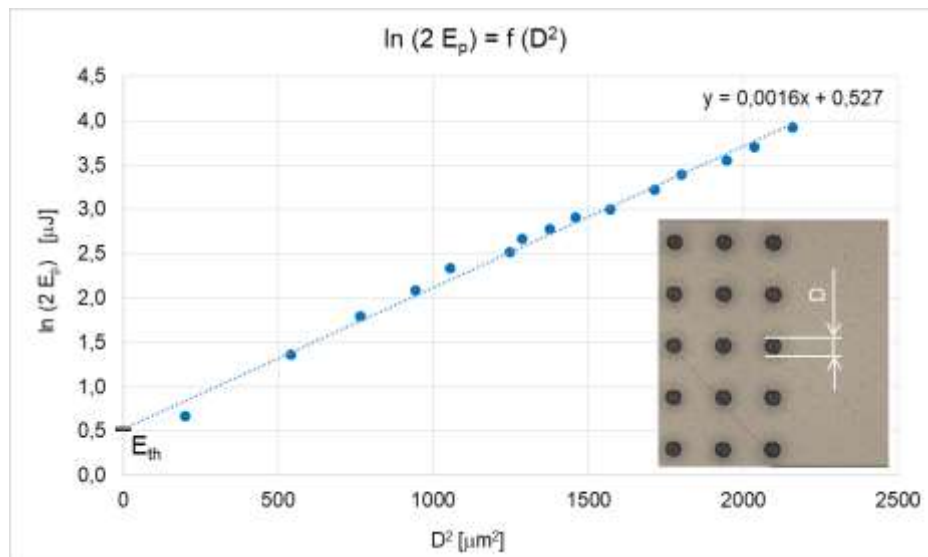
$$b = \ln F_{th} + \ln \pi r^2 \quad (19)$$

Poloměr svazku v ohnisku je vyjádřen úpravou vztahu (17) takto:

$$r = \sqrt{\frac{a}{2}} \quad (20)$$

Extrapolací graficky vynesené závislosti $\ln 2E_p = f(D^2)$ do hodnoty $D^2 = 0$ je získána

prahová hodnota energie v pulsu E_{th} a následně samotný ablační práh F_{th} . Způsob vynesení závislosti s naznačením měření jedné stopy zanechané na povrchu materiálu lze demonstrovat příkladem na Obr. 13.



Obr. 13: Příklad vynesení závislosti $\ln(2E_p) = f(D^2)$ s naznačením měření průměru jedné stopy (D) zanechané laserem na povrchu materiálu.

Tímto způsobem je možné experimentálně relativně rychle a přesně definovat ablační práh materiálu pro konkrétní laserový systém a jeho nastavení. Metodu lze použít i pro řezné materiály.

ABLAČNÍ PRÁH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Stanovením hodnot ablačního prahu řezných materiálů již bylo předmětem několika odborných prací. Známé údaje byly shrnuty v Tab. 2 a komentovány níže.

Tab. 2: Hodnoty ablačního prahu různých řezných materiálů dle vybraných zdrojů.

Řezný materiál	Ablační práh (F_{th}) [$J \cdot cm^{-2}$]					
	[49]	[44]	[50]	[51]	[52]	[37]
SK	0,13	0,1 až 0,2	-	-	0,4	0,3 a 0,4
CERMET	0,44	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	5,62	1,1	-	-
KNB	0,14	-	-	-	-	-
PKD	0,35	0,4	-	-	-	1,6

V první studii [49] byly za pomoci pevnolátkového ($\lambda = 1064$ nm), pikosekundového laseru (12 ps) s maximálním průměrným výstupním výkonem 80 W zjištěny prahové

hodnoty ablace pro čtyři typy řezných materiálů. Tento výzkum lze doplnit závěry z [44], kde byly stanoveny prahy pro PKD ($F_{th} = 0,4 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$) a pro SK ($F_{th} = 0,1$ až $0,2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$). Interval hodnot je u slinutého karbidu určen obsahem kobaltu, kdy s jeho rostoucím obsahem velikost ablačního prahu klesala. Zajímavostí tohoto srovnání je, že přestože nebylo pracováno se stejnými materiály ani se stejnými typy a parametry laserů, byly v obou testech dosaženy podobné hodnoty ablačních prahů jak pro PKD, tak i SK.

Naopak v pracích [37] a [52] stanovili autoři s využitím Ti:sapphire laseru ($\tau_p = 100 \text{ fs}$, $\lambda = 800 \text{ nm}$) hodnotu ablačního prahu SK (WC-Co) na výrazně vyšší hodnotu, než je ve výše uvedených studiích, a to $0,3$ resp. $0,4 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ dle poměru WC a Co. Ablační prah PKD materiálu zde byl určen také vyšší – až 4x oproti údajům v [44].

Obrobitelnost řezné keramiky typu Al_2O_3 byla prezentována v [50]. Při použití femtosekundového Ti:safírového laseru ($\lambda = 785 \text{ nm}$, $\tau_p = 185 \text{ fs}$) byla stanovena hodnota $F_{th} = 5,62 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Mimo jiné bylo zjištěno, že s rostoucím počtem pulzů do jednoho místa klesá i hodnota ablačního prahu. Tento jev je pojmenován jako inkubační efekt. Podobným laserovým zařízením byla pro řeznou keramiku typu Al_2O_3 nalezena prahová hodnota i ve studii [51], a to $1,1 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Tedy výrazně nižší než v [50].

Z předložených údajů plyne, že je prozatím nedostatečně široká databáze hodnot ablačního prahu řezných materiálů. Hodnoty se navíc významně liší podle:

- konkrétního složení, struktury a stavu povrchu materiálu;
- typu laseru a parametrů procesu (délka pulzu, vlnová délka záření, počtu pulsů atd.);
- konkrétní metodiky měření a vyhodnocení (vč. typů použitých přístrojů).

Vyšetření ablačních prahů pro sadu základních typů řezných materiálů je dalším ze směrů vlastního výzkumu v rámci práce. Důležitým aspektem takového výzkumu je, že bude proveden pro jedno konkrétní laserové zařízení a za jasně definovaných a v širokém intervalu volených vlastností paprsku a parametrů procesu.

5.2.4 ABLACE MATERIÁLU

DEFINICE A TYPY ABLACE

Laserová ablace je proces, kdy je vlivem působení kontinuálního nebo pulsního laseru odstraňován ovlivňovaný materiál. K úběru materiálu dochází, jsou-li pohlcením energie laserového záření a ohříváním materiálu vytvořeny podmínky pro porušení vazebních sil mezi atomy a přeměnu skupenství na plazma. V závislosti na vlastnostech laserového

záření a ovlivňovaného materiálu se mění způsob, rychlost i efektivita ablace.

Bylo zmíněno, že je-li laserový proces nastaven na intenzitu energie nižší, než je ablační práh, k úběru materiálu nedochází. V případě ovlivnění materiálu těsně nad ablačním prahem je využita právě taková energie, která je pro ablaci potřebná. Rychlost ablace je zde nízká, ale je umožněn přesný a celkově kvalitní proces. V praxi se materiál neodebírá za podmínek těsně nad ablačním prahem. S dále se zvyšující se intenzitou energie roste i rychlost ablace, avšak proces je z hlediska obráběného vzorku méně přesný a kvalitní. Ablační práh bývá zpravidla několikanásobně přesáhnout, což vede k produktivnějšímu procesu s tím, že ani tak nemusí tyto podmínky vést k nežádoucímu ovlivnění povrchu. [22, 46, 47, 53–55]

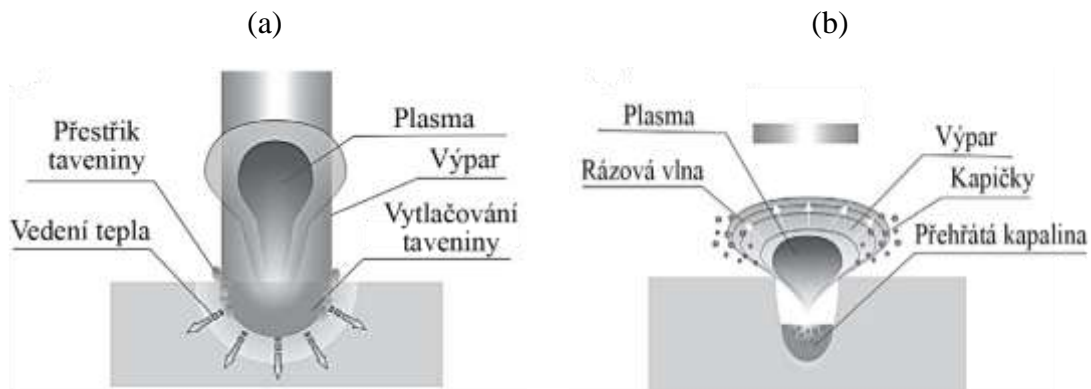
Lze rozlišit dva základní způsoby ablace – termální (tzv. hot ablation; horká ablace) a atermální (tzv. cold ablation; studená ablace). **Termální ablace** je zpravidla navozena při použití kontinuálních laserů nebo pulzních laserů s krátkou délkou pulsu, kdy při ablaci dominuje vedení tepla, tavení, vypařování a vznik plasmy. Nutnou podmínkou pro vyvolání termální ablace (Obr. 14a) je zahřívání materiálu nad kritickou teplotu, což je umožněno pro laserové záření při relativně dlouhých dobách trvání pulsů. Energie je absorbována na ovlivňovaném povrchu a vedením tepla se vytváří teplotní pole. Materiál je prohříván až ke vzniku taveniny s následným odpařením a vznikem plasmy [42, 46].

Tento způsob ablace je doprovázen vznikem výrazné teplem ovlivněné oblasti (HAZ) [22, 56, 57]. V oblasti dochází ke změně chemického složení a struktury materiálu a tím i ke změně mechanických a dalších vlastností oproti výchozímu stavu materiálu. Vlastnosti povrchu jsou v této oblasti teplem degradovány natolik, že v případě řezného materiálu to může být důležitým faktorem pro řezivost celého nástroje. Rychlost, a tedy produktivita úběru materiálu při termální ablaci je ovšem vysoká [16, 58, 59].

U ultrakrátkých pulzů k termální ablaci nedochází, protože difuzní časy materiálů jsou zpravidla delší, než je doba trvání pulzu, a tedy nedojde k potřebnému zahřátí materiálu v okolí ovlivňované oblasti. U ultrakrátkých pulzů je případné zahřívání materiálu způsobeno až relaxací excitovaných elektronů v mřížce materiálu, který nedostal dostatek energie pro ablaci.

Atermální ablace (Obr. 14b) je proces, který může nastat při použití ultrakrátkopulsních laserů v kombinaci s dostatečně vysokými hustotami energie. Dochází k multifotonové absorpci, při které je fotony předáno elektronu dostatečné množství energie pro jeho únik

z krystalové mřížky. To vede k narušení vazeb v mřížce a následné ionizaci materiálu, přímému přechodu z pevné fáze do fáze plazmatu. Díky ultrakrátkému pulzu elektrony nemají čas přenést získanou energii do mřížky. Dochází tedy k odpaření elektronů, zatímco teplota mřížky je relativně nízká. Tím je docíleno úběru materiálu bez ohřevu okolí místa působení laserového paprsku. [42, 46]



Obr. 14: Princip ablace: (a) termální; (b) atermální. [46]

Při zjednodušení lze uvést, že atermální ablace kovů nastává, pokud je použito ultrakrátko pulzních laserů s délkami pulsů v desítkách ps a kratších [22]. Ve skutečnosti je ale problematika komplikovanější, protože jisté tepelné ovlivnění nově vzniklého povrchu materiálu a vznik HAZ lze zaznamenat i při práci s femtosekundovými délkami pulsů. [58]

U řezných materiálů bude posouzení charakteru ablace důležité zejména s ohledem na rychlost a kvalitu zpracování povrchu a případnou změnu jeho vlastností. Kvalita povrchu po interakci s laserem bude významná pro řezivost, zvláště půjde-li o konečnou technologii přípravy povrchu aktivní části břitu nástroje.

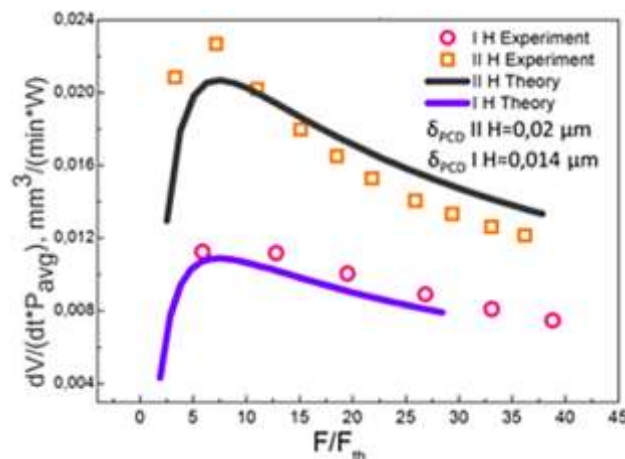
ABLACE ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Předmětem studií zabývajících se ablací řezných materiálů jsou zejména **efektivita, rychlost a kvalita ablace**. Studií a výzkumů na dané téma existuje celá řada pro různé typy řezných materiálů. V rámci přehledu existujících poznatků bylo vybráno několik zdrojů s důležitými a komplexními výsledky, a to především pro definici oblastí získávaných poznatků.

Ve studii [49] byl definován vztah (21) pro výpočet optimální hodnoty intenzity energie F_{opt} pro ablací, kde e je Eulerovo číslo. Tento vztah je možné použít pro výpočet výchozích podmínek úběru materiálu laserem.

$$F_{opt} = e^2 F_{th} \quad (21)$$

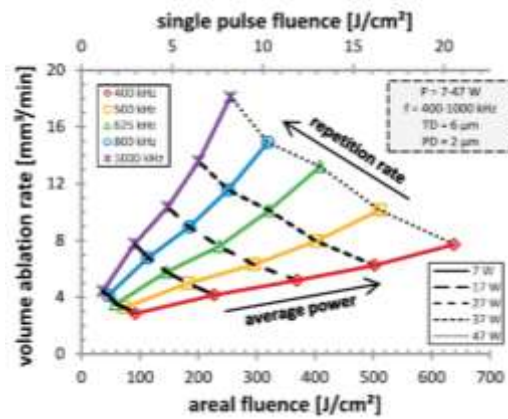
Efektivita ablace byla hodnocena poměrem objemu odebraného materiálu za jednotku času a průměrného zářivého výkonu. V průběhu závislosti tohoto parametru na poměru použité F a prahové F_{th} intenzity energie bylo nalezeno maximum, které je nazváno optimem efektivnosti ablace. Příklad nalezení maxima průběhu závislosti je pro materiál PKD ukázán na Obr. 15. Pro všechny analyzované řezné materiály (SK, CERMET, PKD a KNB) bylo toho optimum mezi 5 a 10násobkem prahové intenzity.



Obr. 15: Naměřená a teoretická závislost efektivnosti ablace na poměru použité a prahové hodnoty intenzity energie pro obrábění PKD 1. (I H) a 2. (II H) harmonickou vlnovou délkou záření. [49]

Obdobné průběhy s počátečním strmým nárůstem závislosti do maxima a následným pozvolnějším poklesem byly v rámci jiných prací naměřeny pro kovové materiály (např. ocel 1.4301, měď Cu-DHP) [60]. Průběhy pro různé délky pulsů přitom vykazovaly jednoznačnou závislost snížení efektivnosti ablace se zvětšující se délkou pulsů. Pro řezné materiály takováto závislost vyšetřena prozatím nebyla.

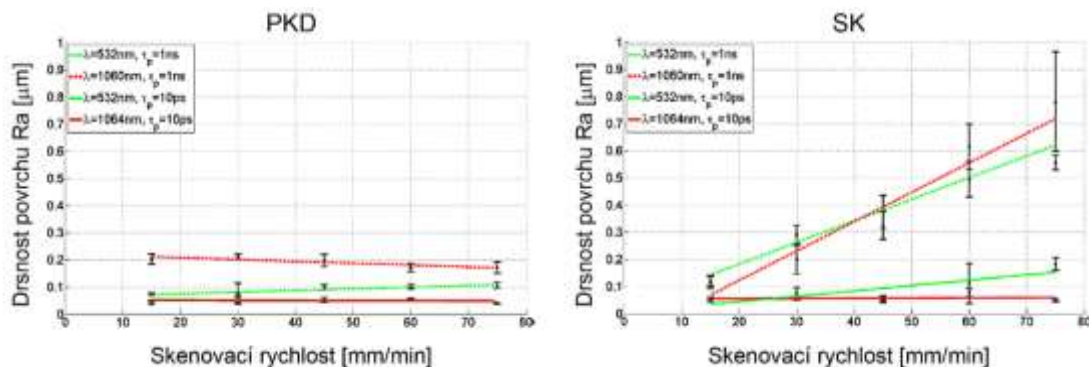
Jiný způsob vyjádření charakteru ablace je v [61]. Produktivita úběru materiálu laserem je definována závislostí objemu odebraného materiálu za čas na použité intenzitě energie záření, tedy bez vztahu k použitému průměrnému zářivému výkonu. Výsledky pro materiál PKNB ukazují, že při konstantním překrytí jednotlivých pulsů byla nejvyšší produktivita na řezných materiálech dosažena pro kombinaci nejvyššího použitého výkonu (47 W) a nejvyšší opakovací frekvence pulsů (1 MHz). Za použití nejintenzivnějších podmínek je možné ablovat až $18 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ PKNB. Byla-li z těchto hodnot vyjádřena efektivita procesu (objem za čas vztážený na jednotku výkonu laseru), byl získán obdobný průběh jako ve studii [49].



Obr. 16: Experimentálně získaná závislost objemu ablovaného materiálu na intenzitě energie (fluence) pro různé průměrné výkony (average power) a opakovací frekvence (repetition rate) záření pro obrábění PKNB. [61]

Kromě produktivity a celkové efektivity procesu je neméně důležité hledisko kvality vznikajícího povrchu. Jedním ze závěrů práce [44] je, že při maximálních hodnotách objemu úběru řezného materiálu laserem vzniká nekvalitní povrch. Akceptovatelná jakost povrchu je až při přibližně polovičních nebo menších hodnotách maximálního dosažitelného úběru v čase.

Příklad výsledku, který dokumentuje vliv délky pulsu laseru a vlnové délky na kvalitu obrábění PKD a SK laserem je uvedený na Obr. 17. Oba materiály mají závislost drsnosti povrchu Ra na rychlosti pohybu paprsku pro různé parametry laseru odlišné. PKD materiál nevykazoval s nárůstem rychlosti výraznější změnu pro žádné z nastavení procesu, přestože použití první harmonické vlnové délky vedlo na vyšší hodnoty drsnosti povrchu. Slinutý karbid pro obě λ při $\tau_p = 1$ ns vykazoval výraznou změnu parametru Ra s rychlostí pohybu paprsku. To je dle autorů pravděpodobně způsobeno dosažením podmínek pro termální ablaci.



Obr. 17: Závislost parametru drsnosti laserovaného povrchu Ra na rychlosti pohybu paprsku při různých vlnových délkách záření (1064 a 532 nm) a délkách pulsu (1 ns a 10 ps) pro dva řezné materiály – PKD (vlevo); SK (vpravo). [44]

Výsledná kvalita povrchu po opracování řezné keramiky typu Al_2O_3 byla řešena v [51] při použití laseru s $\lambda = 775 \text{ nm}$ a $\tau_p = 180 \text{ fs}$. Při vyšší intenzitě energie ($2,8 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$) byla zaznamenána vyšší hodnota drsnosti povrchu (Ra až $1,3 \text{ } \mu\text{m}$) než v případě intenzity těsně nad ablačním prahem ($1,4 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$) - $Ra = 0,65 \text{ } \mu\text{m}$.

Efektivita, rychlost a kvalita ablace jsou klíčovými aspekty opracování řezných materiálů laserem. Z tohoto důvodu je veden a v práci popsán vlastní výzkum jejich experimentálního stanovení pro kombinaci různých typů řezných materiálů a vlastností laserového paprsku a procesu.

5.3 TECHNOLOGIE S ÚBĚREM MATERIÁLU

K laserovým technologiím s úběrem materiálu využitelných při výrobě řezných nástrojů lze zařadit dělení polotovarů na výchozí segmenty řezných částí, tvorbu výsledné makro- a mikrogeometrie břitu a technologii laserového odstraňování ochranných povlaků při renovaci nástrojů. Základem těchto procesů je odstraňování materiálu laserem, tedy ablace.

5.3.1 TVORBA MAKROGEOMETRIE BŘITU LASEREM

PODSTATA METODY

Makrogeometrie břitu řezných nástrojů má výrazný vliv na výsledky řezného procesu. Volba geometrie v kombinaci s pracovními podmínkami určuje trvanlivost břitu, velikost sil a teplot při obrábění a v neposlední řadě i kvalitu obrobku a hodnoty charakteristik integrity jeho povrchu. Možnosti konvenčních a v praxi zavedených postupů výroby řezných částí nástrojů jsou limitovány jednak z pohledu požadovaného tvaru a přesnosti geometrie břitu, která by byla vhodná (případně optimální) pro danou výrobní operaci, a pak také efektivitou výroby, která se promítá do výrobních nákladů nástroje.

Využitím laseru pro tvorbu makrogeometrie břitu lze v řezných materiálech vytvářet přesně a opakovatelně geometrické prvky na břitu, a to i takové, které konvenční technologie neumožňují. Předmětem zpracování jsou především utvařeče třísek na čele břitu a hřbetní plochy v materiálech na bázi slinutého karbidu, řezné keramiky, kubického nitridu boru a diamantu.

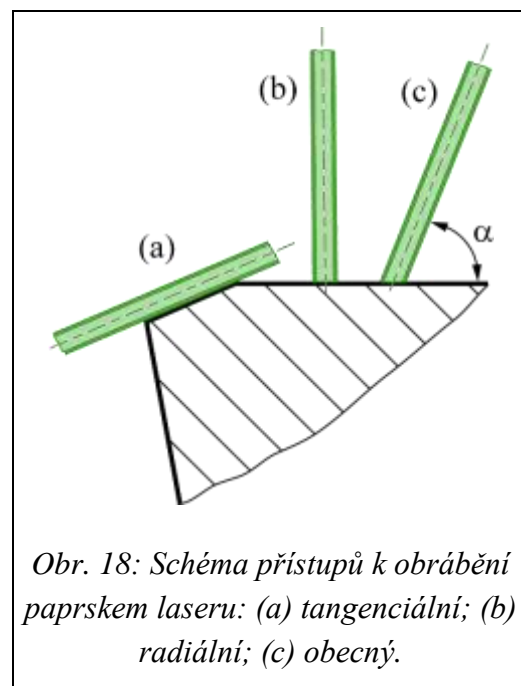
Laser je možné nasadit pro vyhotovení makrogeometrie břitu **nástrojů ze slinutého karbidu**, a to za účelem výroby prototypových a vývojových variant (podpora při vývoji

nových nástrojů) anebo přímo komerčně využitelných nástrojů specifických s ohledem na tvar, rozměr a přesnost provedení. Ty mohou nacházet uplatnění v procesech, kde nefungují standardní řešení. Pro **supertvrdé materiály** je laser jedním z již zavedených výrobních způsobů (kromě broušení a WEDM). Může však být i jediným způsobem, jak požadovanou makrogeometrii břitu docílit. Vývoj těchto řezných materiálů navíc směřuje do oblasti, ve které jsou zavedené technologie výroby nástrojů významně neefektivní nebo zcela nepoužitelné – např. pro materiály typu CVD-D a HcBN (vysokoobsahový PKNB). Laser se tak stává klíčovým nebo i jediným způsobem pro jejich obrábění.

Základem tvorby makrogeometrie břitu laserem je proces ablace, označovaný též jako „mikroobrábění laserem“. Pro různé řezné materiály a různou požadovanou kvalitu výstupu bude mít proces různá nastavení, a to včetně vhodného typu laserového zdroje a vlastností laserového paprsku (délka pulsu, vlnová délka, energie v pulsu atd.). Toto nastavení by mělo vycházet ze znalosti interakce konkrétního laseru s vybraným materiálem.

Podobně jako u jiných subtraktivních metod výroby je důležité zvolit vhodné pracovní parametry a strategie pohybu paprsku vůči obrobku. Existuje velké množství variant nastavení procesu, kterým lze konkrétního tvaru laserem docílit. Výchozím nastavením strategie je způsob orientace svazku laseru vůči opracovávané ploše tvořící makrogeometrii (Obr. 18):

- tangenciální (a);
- radiální (b);
- obecný (c).



Radiální strategie je způsob, kdy je paprsek orientován normálově vůči ovlivňovanému povrchu. V tom případě je využito maximum energie paprsku a úběr materiálu je nejúčinnější. Přebytný materiál je odebrán postupně v jednotlivých vrstvách (tzv. Z-hladinách). Výška jedné odebrané vrstvy je závislá na průběhu interakce paprsku a materiálu. Přesnost výsledného tvaru a kvalita povrchu jsou do značné míry určeny výškou jednotlivých odebíraných vrstev. Tento přístup je zpravidla využíván pro tvorbu

uzavřených útvarů na dobře přístupných místech např. v podobě utvařečů třísek VBD.

Určitou variantou radiálního obrábění je obrábění výchozí tvarové plochy s normálovou orientací paprsku vůči ovlivňovanému bodu (místu). Tento způsob je náročný na zvládnutí řízení kinematiky a dynamiku pohybu paprsku a vzorku. Přes možnost dosažení kvalitního povrchu a přesného tvaru je tento způsob komplikovaný, málo produktivní a není proto využíván.

Tangenciální obrábění je způsob, kdy je pozice paprsku prakticky rovnoběžně s obráběnou plochou. Na vhodně tvarovaných a přístupných (otevřených) plochách nástroje lze tímto způsobem dosáhnout vyšší kvality a přesnosti opracování než v případě radiálních strategií, a to při menším tepelném ovlivnění povrchu. Tento přístup je vhodný například pro realizace čelních a hřbetních ploch (vč. fazet) jak nerotačních, tak i rotačních nástrojů, tedy včetně monolitních čelních válcových fréz a mikronástrojů. Dále je způsob vhodný pro přesné opracování řezných hran malých průměrů.

Obecná strategie použití laseru je případ, kdy se jedná o jiný způsob, než je radiální nebo tangenciální obrábění. Osa paprsku je vůči rovinné ploše skloněna o obecný úhel (α), který je jiný než 0 nebo 90°. Teoreticky lze paprsek vůči povrchu naklonit v celém uvedeném rozsahu, zpravidla se však tato strategie blíží svým nastavením radiálnímu obrábění a paprsek je z kolmé orientace vychýlen jen na minimální možnou odchylku – s rostoucím úhlem se snižuje pohltivost (zvyšuje se odrazivost) laserového záření. Toto odchýlení je přitom nezbytné buď z důvodu tvarové složitosti a nepřístupnosti opracovávané plochy nebo nedostatečných možností kinematiky laserového zařízení.

Přínos laserové technologie je zřejmý v případě realizace jinak nevyrobitelných prvků makrogeometrie. Použitím nástrojů s vhodnějším designem vede na dosažení vyšší řezivosti z jednoho nebo více uvedených hledisek – vhodné utváření třísek, snížení mechanického a tepelného zatížení bříty, prodloužení trvanlivosti bříty, vyšší jakosti obráběného povrchu. Laserová technologie může být použita i jako alternativní technologie výroby konvenčním postupům. Pro přehled, v jakých aspektech může být použití laserové technologie výhodné nebo naopak, byla vytvořena Tab. 3. Tento zobecněný pohled na vztah různých výrobních metod je bez uvažování možných detailů prvků makrogeometrie (velikost, tvar, materiál, počet kusů). V tabulce jsou subjektivním pohledem shrnuty vlastní zkušenosti, které plynou i z přímé spolupráce s výrobcí nástrojů používajícími laserové technologie.

Tab. 3: Výhody (+), nevýhody (-) a srovnatelný přínos (o) použití laserové technologie v porovnání s vybranými konvenčními postupy výroby makrogeometrie břitu.

Hledisko	Lisování a slinování	Broušení	EDM
Variabilita vyráběného tvaru a rozměru	+	+	+
Náročnost zvládnutí technologie	-	-	-
Přesnost výroby	+	o	+
Opakovatelnost výroby	-	o	o
Kvalita povrchu	-	o	+
Produktivita výroby	-	o	-
Výrobní náklady a cena nástroje	-	-	-

K hlavním nevýhodám použití laserové technologie lze řadit výslednou cenu nástrojů, která plyne z vyšších výrobních nákladů, nižší produktivity a náročnosti zvládnutí nové výrobní metody. Zvládnutí výroby souvisí zejména s problematikou nastavení optimálních parametrů výroby pro nalezení optima mezi produktivitou (cenou) a kvalitou výroby pro každý konkrétní případ makrogeometrie a řezný materiál.

Pro eliminaci výše uvedených nevýhod a pochopení souvisejících jevů je současný výzkum v dané oblasti orientován především na tyto základní směry:

- vliv interakce paprsku laseru na změnu vlastností řezných materiálů;
- pracovní parametry laseru pro kvalitní a produktivní opracování řezných materiálů;
- vliv makrogeometrie břitu vytvořené laserem na řezivost nástroje.

STAV PROBLEMATIKY

Využití laseru pro tvorbu makrogeometrie břitu obráběcích nástrojů je nejvíce rozšířenou technikou již s konkrétními komerčními realizacemi. Ty jsou aplikovatelné teoreticky pro všechny řezné materiály, avšak uplatňovány jsou zejména v materiálech typu PKNB a diamant. Možnosti a potenciál pro tvorbu makrogeometrie břitu laserem jsou dle řezného materiálu, typu nástroje a uvažované aplikace různé.

Materiál **slinutý karbid** teoreticky dobře interaguje s laserovým paprskem v širokém pásmu jeho parametrů, viz např. [36, 44, 52, 56, 62–64]. Pro VBD ze slinutého karbidu není s ohledem na vysoce produktivní, efektivní, ale i jakostní konvenční způsoby výroby prvků makrogeometrie (lisování + slinování + broušení) laseru využíváno v sériové

výrobě. Opracování laserem má své uplatnění v případě výroby nižšího počtu kusů. To mohou být případy výroby speciálních zákaznických nebo prototypových nástrojů, kdy je výroba konvenčními postupy neekonomická nebo u nástrojů, které je třeba opatřit konvenčními technologiemi nevyrobitelnými prvky geometrie. V takových případech lze výrobou geometrie břitu laserem dosáhnout efektivnějšího a přesnějšího řešení se stejnou nebo lepší funkcionalitou v porovnání se standardně vyráběnými nástroji.

Mimo přímé komerční uplatnění nachází laser využití i ve fázi vývoje a zavádění nových nástrojů před jejich sériovou produkcí. Při vývoji nástrojů je třeba připravit větší počet potenciálně vhodných variant makrogeometrie břitu, ze kterých se postupnými kroky založenými především na výsledcích testování vybere varianta vhodná pro uvedení na trh a sériovou výrobu. Výroba více variant geometrie břitu VBD v počtu několika kusů je konvenční technologií časově, technicky i ekonomicky náročná. Jsou-li však různé varianty utvařečů třísek vyráběny laserem, lze celý proces vývoje a tvorby prototypových vzorků urychlit a tím celkově zefektivnit. Jedná se také o technologicky snazší a pružnější výrobu. Tento způsob využití laseru ovšem není doposud významněji využíván.

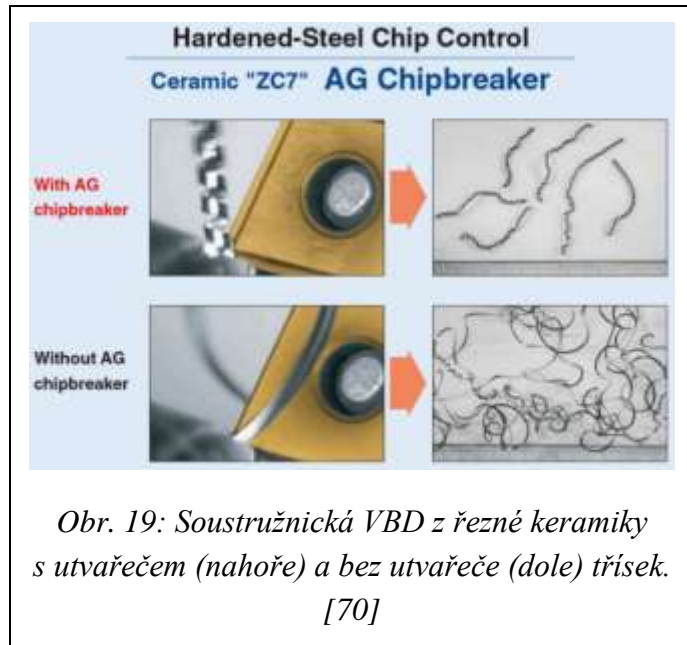
V případě výroby monolitních nástrojů ze slinutého karbidu platí, že běžný způsob výroby je jak produktivní, tak i flexibilní již pro několik vyráběných kusů. Z tohoto důvodu může být smysluplné využití laseru pro monolitní rotační nástroje soustředěno na realizaci speciálních (“nebrousitelných”) struktur na čele břitu [22] nebo na přesnou a opakovatelnou výrobu nástrojů o průměru menším než jeden milimetr. Taková řešení ovšem zatím nejsou komerčně dostupná.

Ablace **keramických materiálů** (oxidového, směsného i nitridového typu) pulsními lasery je rovněž zvládnutým způsobem. Obtížnost obrábění keramiky laserem spočívá především v možnosti vzniku tepelně iniciovaných trhlin. To se však neděje při vhodné nastavených parametrech laseru s krátkou a zejména ultrakrátkou délkou pulsů. Stejně jako u ostatních materiálů i u řezné keramiky při použití laseru vzniká teplem ovlivněná oblast, ve které jsou změněny původní vlastnosti materiálu. [51, 65–69]

Přes uvedené skutečnosti se opracování makrogeometrie laserem pro keramické nástroje prozatím prakticky nerozvíjí a nevyužívá. Souvisí to zejména s faktem, že podoba geometrie břitu je v případě tohoto materiálu dána potřebou zajištění mechanické a tepelné únosnosti břitu. Především nízká lomová houževnatost, ohybová pevnost, a i tepelná vodivost keramiky určuje podobu břitů. Z těchto vlastností plyne omezení

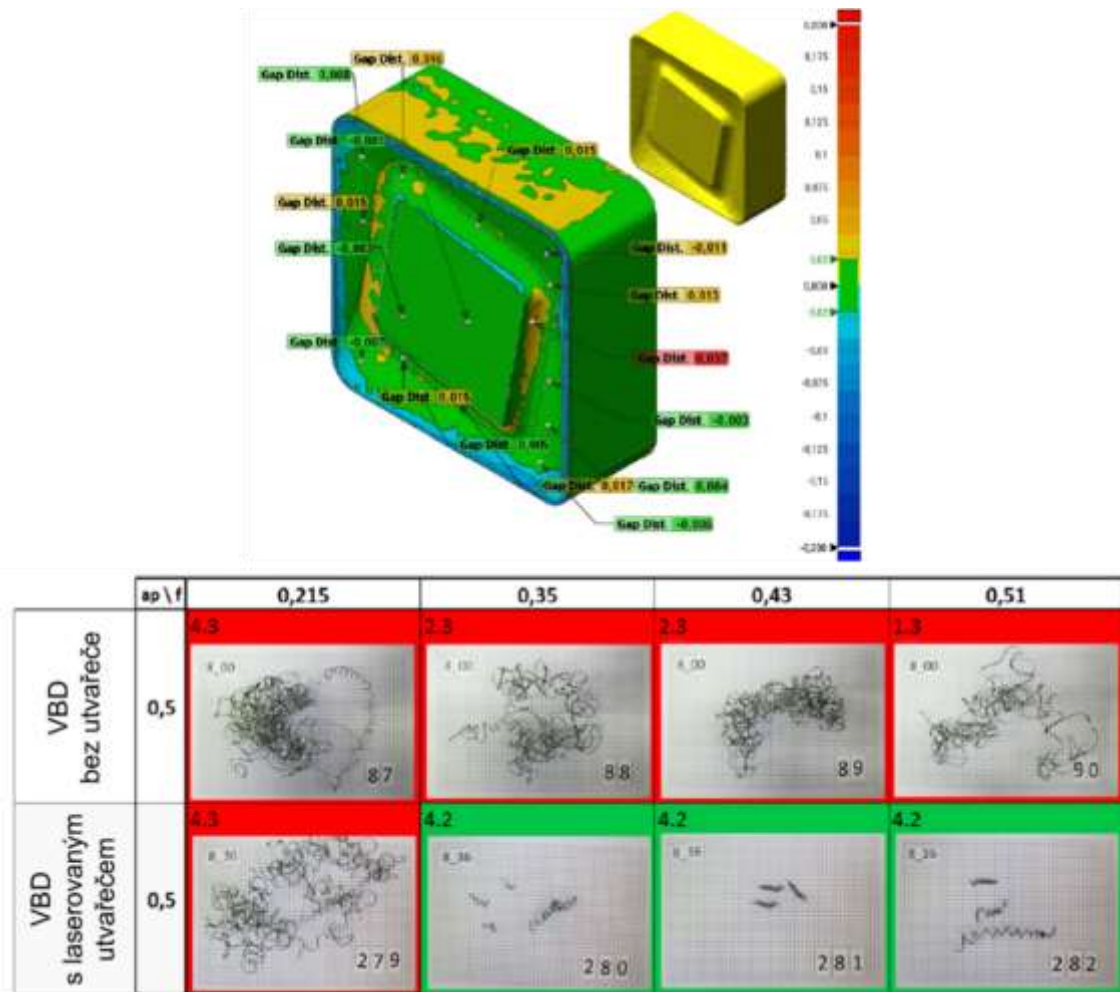
možností realizace utvařečů třísek v řezné keramice. Nízká tepelná vodivost keramiky v kombinaci s menším objemem materiálu břitu může vést k jeho přehřátí a plastické deformaci nebo ke vzniku tepelně iniciovaných trhlin s následným křehkým porušením materiálu.

Je evidentní, že u tohoto řezného materiálu nebude možné pracovat s tak pozitivní geometrií břitu, jako je tomu u např. slinutých karbidů. Další vývoj řezné keramiky směrem k větší houževnatosti, mechanické únosnosti a odolnosti proti rázům při obrábění zvyšuje i potenciál pro využití laseru při tvorbě geometrie takových nástrojů. Aplikace tvorby makrogeometrie



laserem v ŘK nejsou nereálné již dnes. Snaha o přípravu utvařečů třísek na čele břitu jsou zachyceny např. ve dvou patentech [71, 72] nebo v případě komerčního řešení VBD s označením ZC7 (firma NTK Cutting tools) [70]. V žádném z případů se však nejedná o vytvoření utvařeče přímo laserem.

Pozitivnější a tvarově složitější utvařeče třísek vyrobené laserem ve VBD z různých typů řezné keramiky byly předmětem výzkumů [73] a [74]. Bylo ověřeno, že laserem lze vytvořit kvalitní a plně funkční, mechanicky i teplotně únosné utvařeče třísek v nitridové i oxidové keramice (včetně whiskerové). Laserem mohou být vytvořeny tvarově přesné utvařeče s odchylkou od výchozího modelu v řádu několika setin milimetru (Obr. 20). Použitím vybraných provedení makrogeometrie bylo dosaženo například zlepšení procesu utváření třísky. Test byl proveden při podélném soustružení nástrojové oceli v žíhaném stavu (ocel 19 550) při řezných podmínkách: $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$ a $f_{ot} = 0,215, 0,35, 0,43 \text{ a } 0,51 \text{ mm}$.



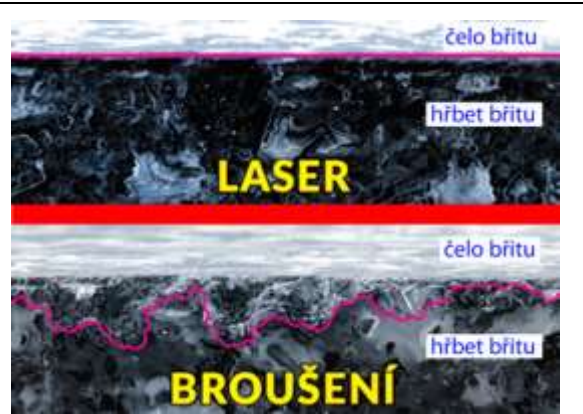
Obr. 20: Model a diferenční analýza pro určení přesnosti laserované VBD z řezné keramiky (nahore). Výsledky testu utváření třísky (dole) - zeleně označeny kombinace a_p/f_{ot} pro vhodně utvářené třísky; červeně označeny kombinace a_p/f_{ot} pro nevhodně utvářené třísky. [74]

Kubický nitrid boru je včetně pojivové fáze laserem dobře obrobitelný. Zřejmě jedinými zásadnějšími technickými nevýhodami použití laserového paprsku pro tvorbu makrogeometrie břitu z PKNB je teplo šířící se do materiálu při jeho ablaci a možná zhoršená kvalita opracovaných ploch. I v tomto materiálu vzniká při ablaci laserem tepelně ovlivněná oblast, ve které degradují vlastnosti materiálu. Aby byla degradace vlastností minimální a kvalita zpracování vysoká, je třeba využívat vhodná zařízení (především laserové zdroje s ultrakrátkými pulsy – nejčastěji v řádech jednotek pikosekund), vhodné parametry procesu a výrobní strategie.

Tvorba makrogeometrie břitu laserem je u tohoto materiálu zpravidla omezena na dokončovací opracování ploch hřbetu při současném vytvoření řezné hrany již upevněného řezného elementu na nástroji. V takových případech má laser už komerční

uplatnění a u předních výrobců nástrojů z PKNB je zavedenou výrobní alternativou k technologiím WEDM a broušení. Kromě hřbetních ploch lze laserem vytvářet i čelní fazetu. Jako u ostatních materiálů jsou i zde možnosti reálného uplatnění laseru dány výslednou kvalitou a celkovou efektivitou laserového procesu.

Jednou z výhod použití laseru je kvalitnější opracování hřbetní plochy a s tím související kvalitnější provedení ostří. Při způsobu výroby hřbetní a čelní plochy broušením dochází k vydrolování zrn KBN z pojiva. Řezná hrana je proto deformačně namáhaná a neprochází přes zrna, ale kolem nich. Ostří i navazující části hřbetní a čelní plochy vykazují vždy určité nerovnosti odpovídající velikosti zrn KBN v



Obr. 21: Detail kvality ostří nástroje z PKNB po výrobě laserem (nahore) a broušením (dole).

broušeném segmentu - Obr. 21 (dole). Naproti tomu laser zrna přerézává a vznikající geometrie je výrazně kvalitnější, jak ukazuje horní část stejného obrázku.

Laser má jednoznačné využití v případech, kdy je obtížné nebo zcela nemožné efektivně brousit nebo erodovat PKNB – opracování materiálů s nízkým nebo žádným obsahem pojiva (HcBN, BcBN). S ohledem na vlastnosti těchto materiálů, s očekávaným přínosem pro řezivost, a jejich stále masivnějšímu využívání, má laserová technologie pro tvorbu makrogeometrie břitu potenciál dalšího uplatňování. Je však třeba proces dále zkvalitňovat a zefektivňovat i na základě výsledků výzkumů.

I v souvislosti s tímto řezným materiálem je možné uvažovat o realizaci tvarově složitějších utvařečů třísek laserem. Smysluplnost přítomnosti utvařeče je ovšem limitována nízkou lomovou houževnatostí materiálu, která povede k nízké mechanické únosnosti pozitivnějšího



Obr. 22: VBD s laserovaným utvařečem v PKNB. [75]

břitu a jeho opotřebení formou křehkého lomu. Ojedinelými komerčními příklady takových realizací jsou nástroje firem Tungaloy [76] nebo Seco Tools [75] (Obr. 22).

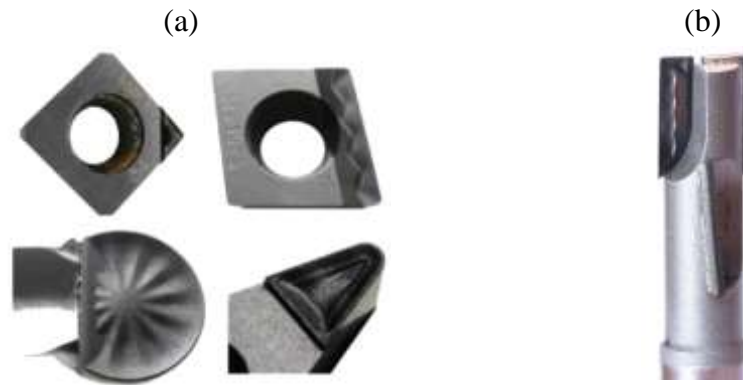
Utvařeče jsou zde v nástrojích připraveny pro obrábění materiálů s tvrdostí pod 50 HRC, a to z důvodu lepšího a řízeného utváření třísky. Výroba tvarově složitého utvařeče třísek je pomocí broušení, případně elektroerozivního obrábění složitá až nemožná. Díky pokračujícímu vývoji PKNB materiálů směrem k vyšší houževnatosti, je třeba o této variantě využití laseru vážně uvažovat.

Řezné části nástrojů z **polykrystalického diamantu** i **CVD diamantu** jsou bez výraznějších obtíží laserem obrobitelné. To je především díky vysoké pohltivosti laserového záření o kratších vlnových délkách a vlastnostem prvků tvořících tyto materiály. Určité komplikace může způsobovat vysoká tepelná vodivost materiálu. Použití ultrakrátkopulsních laserů však tuto vlastnost překonává.

Využití laseru pro tvorbu makrogeometrie je v tomto materiálu v zásadě dvojitá. První je spojené s tvorbou pouze hřbetních ploch břitu jakožto alternativy k broušení nebo WEDM. V případě bezpojivových materiálů je laser zpravidla nejefektivnější nebo dokonce i jedinou využitelnou výrobní metodou. Efekty aplikace laseru pro kvalitu hřbetní plochy a s tím související kvalitu ostří jsou podobné jako v případě PKNB. Laser dokáže řezat zrna tvrdé fáze a vytvářet kvalitnější ostří, což bude mimo jiné dále v práci doloženo příkladem výsledků vlastního výzkumu.

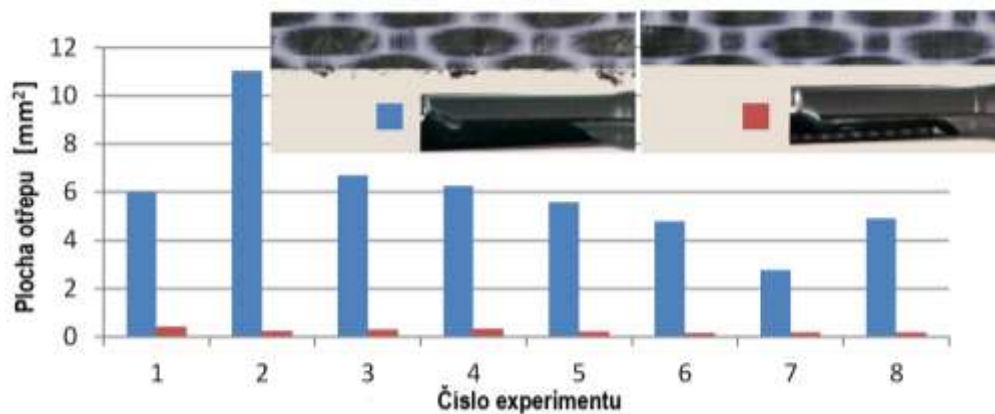
Na rozdíl od ŘK a PKNB je v případě materiálu na bázi diamantu již výrazně komerčně uplatňována i tvorba utvařečů třísek na čele břitu. Přestože je diamant mnohem tvrdší, smysl využití spočívá především v aplikační oblasti – obrábění plastů, kompozitů s polymerní maticí a hliníkových slitin. Pozitivní geometrie přináší výhody zejména v menším silovém a tepelném zatížení, vyšší kvalitě obrobeného povrchu, v menších vibracích dílce i nástroje a v delší trvanlivosti břitů nástrojů. Řezné nástroje s diamantovými břitů opatřené laserovaným utvařečem břitu jsou dnes již běžným artiklem renomovaných firem – viz např. Obr. 23.

Přínos přítomnosti laserovaného utvařeče na čele břitu PKD nástroje lze deklarovat vlastním výzkumem [77], který byl soustředěn na zvýšení kvality obrábění vláknového kompozitu s polymerní maticí. Pro test byly použity dva shodné nástroje za stejných podmínek, přičemž jeden byl opatřen laserovaným utvařečem s pozitivní makrogeometrií a druhý byl vyroben ve standardní podobě. Jak je ukázáno na Obr. 24, byla laserovanou variantou radikálně snížena delaminace materiálu za různých řezných podmínek (číslo experimentu). Delaminace byla hodnocena velikostí plochy otřepů na obrobené hraně.



Obr. 23: Příklady provedení diamantových nástrojů z PKD a CVD-D s použitím laseru při výrobě geometrie břitu: (a) různá provedení utvařečů třísek na soustružnických nástrojích (fa. BECKER Diamantwerkzeuge GmbH); (b) stopková fréza s laserovaným utvařečem (fa. HUFSCHMIED GmbH).

Rapidní vývoj v oblasti laserů a možností jejich využití jistě povede k dalšímu snižování nákladů a zkvalitnění výroby makrogeometrie diamantových nástrojů laserem. V případě bezpojivových diamantových materiálů bude tento vývoj znamenat jejich významnější využívání.



Obr. 24: Příklad experimentálně zjištěného vlivu makrogeometrie břitu PKD nástroje na kvalitu obrobene hrany kompozitního materiálu s termoplastickou maticí (modrá – nástroj bez utvařeče; červená – nástroj s laserovaným utvařečem). [77]

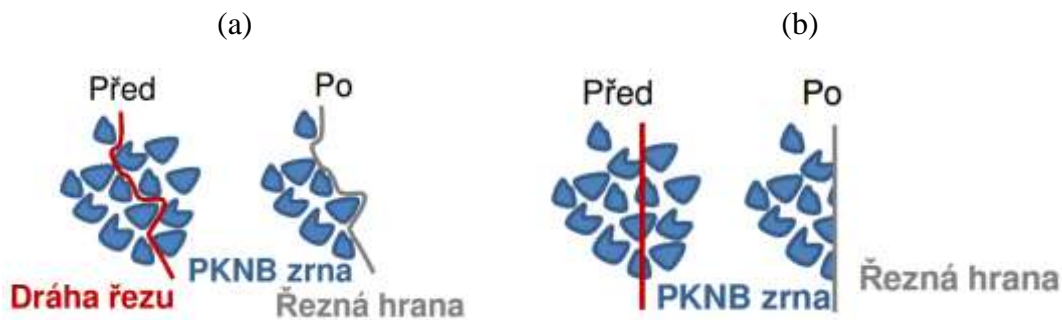
5.3.2 TVORBA MIKROGEOMETRIE BŘITU LASEREM

PODSTATA METODY

Mikrogeometrie břitu řezného nástroje doplňuje a ideálně dále zvyšuje vliv makrogeometrie na řezný proces. Proces utváření třísky je totiž výrazně ovlivněn i velikostí, tvarem a kvalitou provedení řezné hrany, přesností a kvalitou vytvoření navazujících čelních a hřbetních ploch, stejně jako případnou přítomností jiných

geometrických útvarů na těchto plochách. Uvedené rysy mohou zásadně ovlivnit tvorbu třísky změnou podmínek jak v oblasti primární plastické deformace, tak i třecími poměry mezi nástrojem, třískou a obrobeným povrchem. V neposlední řadě může vést vhodná mikrogeometrie ke zvýšení účinku chlazení procesu.

Výrobci řezných nástrojů se v oblasti mikrogeometrie soustředí především na dosažení **požadované velikosti poloměru ostří a nízké drsnosti ploch břítu**. To jsou hlavní prvky mikrogeometrie břítu nástroje vyrobeného jak standardními výrobními postupy, tak i s použitím laseru. Výsledná podoba ostří (velikost, tvar a stav povrchu jeho plochy) je výsledkem řetězce výrobních procesů. Ostří proto může být řízeně vytvářeno i laserem. U řezných materiálů s tvrdou a pojivovou fází je velkou výhodou, že laser dokáže zrna tvrdé fáze dělit a vytvářet tak kvalitnější hranu s menším poloměrem. Na Obr. 25 je schematicky zachycen způsob vzniku řezné hrany pro PKNB nástroj při elektrojiskrovém řezání (a) a obrábění laserem (b).

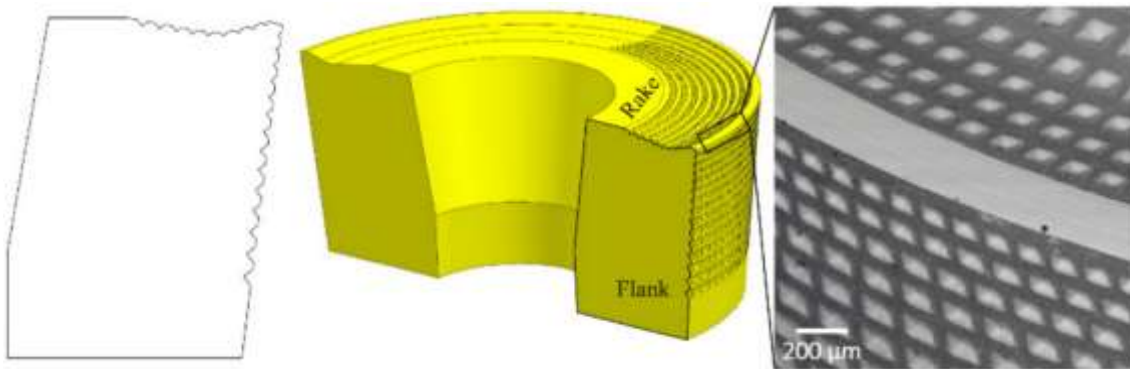


Obr. 25: Tvorba řezné hrany z PKNB: (a) elektrojiskrové obrábění; (b) laser. [78]

Pro dosažení konkrétní velikosti poloměru ostří a stavu povrchu jeho plochy jsou běžně využívány různé dokončovací technologie – tryskání, omílání, kartáčování, honování, leštění aj. Za stejným účelem je možné využít i laser. Přestože existují studie, kdy úprava břítu laserem může vést k podobné nebo lepší řezivosti nástroje v porovnání s jinými technologiemi, jako například pro obrábění niklových a titanových slitin dle [79], není tento způsob komerčně využíván. Jednoznačnou nevýhodou je zde totiž nízká produktivita i hospodárnost procesu. Je-li to žádoucí, jsou i laserem vytvořené řezné hrany dokončovány jiným způsobem, například technologií omílání.

Kromě tvorby řezné hrany lze v rámci mikrogeometrie řízeně vytvářet geometrické útvary menších rozměrů umístěné na čelní a hřbetní ploše břítu pro podporu procesu tvorby třísky. Mluvíme o tzv. strukturách nebo mikrostrukturách. Ty je přitom možné realizovat i na ochranném povlaku břítu. Jedním z nejvhodnějších způsobů tvorby

takových útvarů je použití laseru. Mikrogeometrie břitu je tak tvořena různě velkými pravidelnými nebo nepravidelnými útvary superponovanými na nosné makrogeometrii. Tato oblast řešení je poměrně nová a prozatím nenachází přímé komerční uplatnění. Je však předmětem intenzivních výzkumů. Jedním z typických příkladů může být struktura tvořená soustavou inverzních pyramid na čele a hřbetě břitu nástroje ze slinutého karbidu z [80], viz Obr. 26.



Obr. 26: Příklad vytvořené struktury na čele a hřbetě břitu pro zvýšení účinku chlazení řezného nástroje u kruhové VBD z nepovlakovaného slinutého karbidu. [80]

Podstatou laserové technologie je i v případě tvorby mikrogeometrie břitu ablace materiálu s tím rozdílem, že důraz je zde kladem zejména na kvalitu a přesnost opracování při úběru relativně malého množství materiálu. Plochu opracování lze omezit pouze na aktivní část břitu. Laserem vytvářené struktury na plochách břitu jsou v kontaktu s třískou a obrobkem mají různou podobu, která v zásadě vychází z potřeby: (i) změny třecích podmínek, (ii) snížení kontaktní plochy mezi nástrojem a třískou, (iii) zvýšení aktivní plochy pro účinnější chlazení nástroje, (iv) usměrnění procesní kapaliny do stykových míst mezi nástrojem, třískou a obrobkem. Tímto způsobem lze zpracovat rotační i nerotační nástroje v zásadě ze všech typů řezných materiálů.

STAV PROBLEMATIKY

Výzkum v oblasti řízené tvorby mikrogeometrie břitu obráběcího nástroje laserem je orientován do dvou hlavních směrů:

- úpravy pro přímé ovlivnění procesu tvorby třísky;
- úpravy pro lepší ukotvení ochranného povlaku na nástroji.

V rámci výzkumu je zřejmě největší pozornost věnována úpravám nástrojů pro přímé ovlivnění procesu tvorby třísky. Prvním z dílčích přístupů je využití laseru jako **technologie dokončení a rektifikace řezné hrany a navazujících ploch**, včetně po

povlakování. Zdroje [79, 81–83] dokládají, že výhody tohoto způsobu nasazení laseru mohou v porovnání s dalšími metodami úprav vést k určitému zvýšení řezivosti nástrojů při obrábění různých materiálů (kalené oceli, vláknové kompozity s termoplastickou maticí, niklové a titanové slitiny a další). V případě použití laseru uvedeným způsobem jsou však prozatím efekty velmi blízké účinkům ostatních způsobů úprav bříty. I proto není použití laseru tímto způsobem doposud preferované.

Velmi intenzivně řešeným výzkumným tématem v posledních letech je **tvorba povrchových struktur na čele a hřbetu bříty** laserem. Prakticky pro všechny typy tvrdých řezných materiálů je vyvíjen a optimalizován proces tvorby takových struktur a následně hodnocen jejich účinek na řezný proces z hlediska třecích podmínek, adheze a efektivnějšího chlazení nástroje. Pro struktury vyráběné laserem jsou používána stejná zařízení, jako pro tvorbu makrogeometrie bříty, tj. zpravidla pevnolátkové krátko- (τ_p v jednotkách nanosekund) a ultrakrátkopulsní (τ_p jednotky piko- a stovky femtosekund) lasery o různých vlnových délkách, výkonech a dosažitelných energiích v pulsu.

Na nástrojích jsou vyráběny struktury různých velikostí, tvarů, orientace a pozic vůči řezné hraně a ty jsou následně testovány v řezu. Právě uvedené parametry struktur se ukazují jako klíčové pro ovlivnění procesu tvorby třísky. Nejčastěji se přitom jedná o vytvořené prohlubně (zpravidla tvaru válec, důlek, jehlan) – např. [84, 85] a drážky (liniové struktury, rastry, šestiúhelníky – tzv. včelí plástve) – např. [85–88]. Dílčími zajímavými řešeními jsou struktury zvětšující plochu povrchu nástroje používané v kombinaci s vysokotlakým chlazením při soustružení materiálu Inconel 718 [80, 89, 90].

Zajímavým směrem výzkumu je i **tvorba mikrostruktur v tenkých ochranných povlacích** pro nástroje. Může se jednat například o tvorbu rastru mikrodůlků jakožto rezervoáru mazací látky (např. MoS₂, grafit) pro snížení tření povlaku TiCN vůči oceli [91]. Jinou aplikací je strukturování povlaku Al₂O₃+TiN s cílem tvorby mikro- a nanostruktur pro snížení koeficientu tření a zvýšení odolnosti povlaku proti opotřebení [92]. Tato studie přímo navazuje na řešení v rámci užitého vzoru [93].

Mikrostruktury na aktivních plochách řezných nástrojů jsou vyvíjeny pro obrábění různých typů materiálů, především hliníkové slitiny, slitiny titanu, niklu a oceli. Stejně tak jsou použitelné pro různá řezná prostředí – suché obrábění, konvenční a vysokotlaké chlazení procesní kapalinou a kryogenní chlazení. Studie povětšinou prokazují přínos strukturování nástroje pro snížení tření, řezných sil, opotřebení bříty a adheze materiálu

obrobku. Při obrábění za různých pracovních podmínek a pro různé materiály obrobku a nástroje jsou přínosné různé typy, rozměry, pozice i orientace struktur. Z obecného pohledu to však mimo jiné potvrzuje robustnost tvrzení, že vhodné typy struktur významně zlepšují řezivost nástroje.

Výzkum a vývoj tohoto způsobu úprav řezného nástroje laserem pokračuje. Bude-li prokázán potenciál řešení, je možné následně očekávat i komerční realizace. Tímto směrem je orientován i vlastní výzkum, jak bude ukázáno dále v práci.

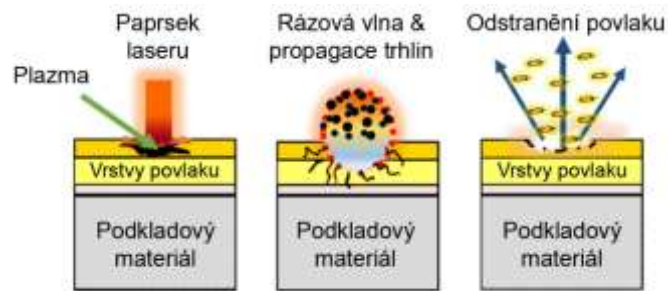
5.3.3 ODSTRAŇOVÁNÍ OCHRANNÉHO POVLAKU BŘITU LASEREM

PODSTATA METODY

Laser lze při výrobě nástrojů využít i při jejich renovaci, a to při odstraňování ochranných povlaků – tzv. metoda laser stripping. Některé obráběcí nástroje mohou být po dosažení limitní velikosti opotřebení, znamenající konec doby možného použití (trvanlivosti břitu) po úpravě znovu použity. Jedná se zpravidla o monolitní frézy, vrtáky a speciální a tvarové nástroje ze slinutého karbidu. Jsou-li nástroje opatřeny ochranným povlakem, je třeba jej před renovací břitu nástroje s opětovným napovlakováním rychle a kvalitně odstranit.

Pro odstraňování povlaků řezných nástrojů jsou využívány metody mechanického, a především chemického a elektrochemického čištění. Odstranění povlaků z břitů nástrojů je složitý proces i s ohledem na skutečnost, že je třeba odstranit tvrdé a tenké vrstvy bez ovlivnění podkladového materiálu. Vzniklý povrch pro nové povlakování by měl být bez narušení struktury povrchu (např. bez obnažení karbidických zrn v důsledku odstranění nadměrného množství kobaltu), změny drsnosti povrchu a zaoblení břitu. Uvedené procesy odpovlakování jsou časově náročné a mohou trvat i 24 a více hodin. Aspekty kvality, produktivity, ale i ekologické zátěže odpovlakování chemickým a elektrochemickým způsobem podněcují vývoj nových způsobů, ke kterým patří i odstranění povlaku ablací laserem (Obr. 27).

Princip procesu spočívá v interakci laserového paprsku v krátkých nebo ultrakrátkých pulsech s povrchem nástroje – povlakem. Paprsek předá tenké vrstvě energii a částice povlaku se vypaří. Jedná se tedy o ablaci materiálu, kdy je možné využít jak termálního, tak i atermálního přístupu.



Obr. 27: Princip a průběh procesu odstranění ochranného povlaku laserem: (vlevo) laserový puls a vznik plazmy; (uprostřed) vznik rázové vlny a propagace trhlin; (vpravo) odstranění části povlaku. [94]

Základní charakteristiky metody odpovlakování laserem byly porovnány s ostatními přístupy v rámci Tab. 4. Tabulka je zobecněným subjektivním pohledem bez vztahu k možným detailům (typ a tloušťka povlaku, podkladový materiál, odpovlakovací zařízení, typ nástroje atp.).

Tab. 4: Výhody (+), nevýhody (-) a srovnatelný přínos (o) použití laseru v porovnání s konvenčními postupy technologie odstranění povlaku.

Hledisko	Mechanické čištění	Chemické čištění	Elektrochemické čištění
Produktivita odstranění	+	+	+
Kvalita odstranění	+	o	o
Ovlivnění podkladového materiálu	+	+	+
Různorodost povlaků	+	+	+
Tvarově složité plochy	-	-	-
Celková náročnost procesu	-	-	-
Náklady na jeden nástroj	-	-	-
Dopad na životní prostředí	o	+	+

Laserová technologie zde má oproti mechanickým, chemickým a elektrochemickým metodám výhodu především v možnosti odstraňování rozličných vrstev (i nejtvrdějších a chemicky inertních), a to bez ovlivnění podkladového materiálu. Odlišný je i dopad na životní prostředí, kdy nevznikají odpadní lázně a ani odpad v podobě opotřebeného abraziva. Při zvládnutí procesu čištění laserem je potenciál výrazného zvýšení produktivity, resp. rychlosti odstranění povlaku z plochy určité velikosti. Oproti tomu k hlavním nevýhodám patří zejména obtížné a homogenní opracování tvarově složitých ploch a členitých povrchů, technická náročnost procesu daná např. správností nastavení

vhodných parametrů a jejich přenositelnost mezi různými aplikacemi a výše nákladů přepočtených na jeden nástroj. Vyšší náklady plynou ze skutečnosti, že na rozdíl od chemických a elektrochemických způsobů lze laserem čistit současně vždy jen jeden nástroj a zařízení je v porovnání s tím pro mechanické čištění výrazně dražší.

I s ohledem na uvedené výhody nepostoupil vývoj technologie odstraňování ochranných povlaků řezných nástrojů laserem do fáze, kdy by byla přímo komerčně využitelná. **Je třeba další výzkum a vývoj v rámci kterého bude důležité optimalizovat strategie pohybu paprsku a jeho vlastností ve vztahu ke kvalitě odstranění povlaku s přihlédnutím k produktivitě pro snížení výrobních nákladů.**

STAV PROBLEMATIKY

Aktuální vývoj tohoto způsobu zpracování nástrojů je soustředěn především na nalezení optimálních parametrů různých typů laseru a jejich vlivu na kvalitu odstranění různých typů povlaků. Tímto způsobem byl veden například výzkum pro odstranění povlaku TiN z mikrofrézy ze slinutého karbidu typu WC excimerovým laserem s krátkou vlnovou délkou (248 nm) [95]. Výsledky potvrdily existenci takových pracovních podmínek, které vedly k produktivnímu a kvalitnímu odstranění povlaku z tvarově členitého nástroje bez poškození povrchu. Podobné výsledky byly zjištěny výzkumem [96] pro odstranění povlaku CrTiAlN z rychlořezné oceli stejným laserem. Zde však na plochém vzorku. V obou uvedených výzkumech bylo zjištěno, že ablační práh povlaků byl nižší než ablační práh použitého řezného materiálu.

Jiný typ povlaku (TiAlN) a laseru (Nd:YAG laserem s vlnovou délkou 355 nm a délkou pulsu 50 ns) byly použity ve studii [97]. Opět byly nalezeny vhodné parametry procesu pro odpovlakování vrstvy z materiálu WC-Co. Byly však mimo jiné popsány dva doprovodné jevy. Prvním je šíření trhlin v podkladovém materiálu až do hloubky 10 μm vlivem působení tepla na materiál a rozdílných tepelných vodivostí kobaltu a WC. Druhým jevem bylo formování oxidu titanu na čištěném povrchu jakožto jistá forma re-depozice odstraňovaného titanu.

Poslední uvedený příklad výzkumu je popsán v [98]. Vědeckým týmem byly hledány kombinace parametrů laseru (Nd:YVO₄ laser o vlnové délce 532 nm) pro odstraňování multivrstvého DLC povlaku. Bylo zjištěno, že je možné kompletně tuto vrstvu odstranit v rámci maximálně 10 přejezdů paprsku s dosažením drsnosti povrchu až $Ra = 0,2 \mu\text{m}$.

Vývoj technologie směrem ke komerčnímu využití lze dokumentovat i v oblasti již

existujících patentů na princip odpovlakování, laserové systémy pro odpovlakování nebo odstranění konkrétních typů povlaků – např. v [99–103].

Podarí-li se docílit efektivního a kvalitního procesu odstraňování povlaku laserem z funkčních ploch i tvarově složitých nástrojů, je možné v budoucnu očekávat i přímé komerční využití této metody.

5.4 TECHNOLOGIE BEZ ÚBĚRU MATERIÁLU

Laserové technologie jsou pro řezné nástroje využitelné i v oblasti ovlivnění vlastností povrchu materiálu bez jeho úběru. V takovém případě laser s materiálem interaguje způsobem, kdy nedochází k jeho ablaci. Tyto přístupy jsou v zásadě dva – využití laseru pro zpevnění povrchu materiálu rázovou vlnou a řízené tepelné ovlivnění řezného materiálu pro změnu jeho vlastností. Žádná z těchto metod prozatím nemá ve spojení s řeznými nástroji reálné a praktické uplatnění a ani není předmětem intenzivnějšího výzkumu. Je však důležité se o nich zmínit, především s ohledem na jejich potenciál.

5.4.1 ZPEVNĚNÍ POVRCHU RÁZOVOU VLNOU

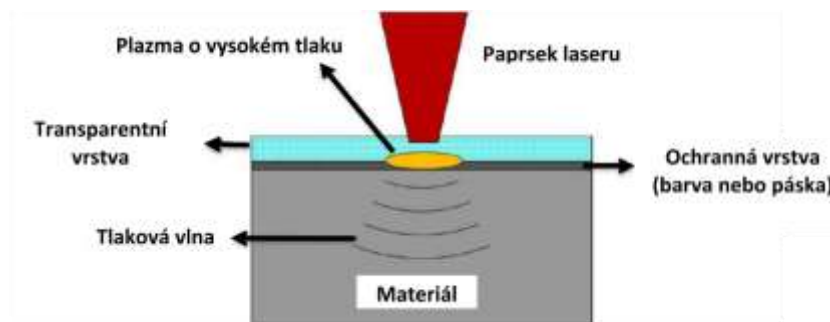
PODSTATA METODY

Technologie zpevnění povrchu rázovou vlnou vyvolanou laserem, tzv. Laser Shock Peening (LSP), vychází v zásadě ze známého a používaného přístupu – mechanického zpevnění povrchu tryskáním kuličkami, kdy nárazy částic vyvolávají plastickou deformaci materiálu. Dochází tak k vnesení tlakových zbytkových napětí, což má za následek mechanické zpevnění povrchu.

Princip způsobu LSP je zobrazen na Obr. 28 a spočívá ve směřování vysokoenergetického laserového pulsu na žádané místo pro ovlivnění. Zpracovávané místo může být pokryto absorpční páskou nebo povlakem tvořícími ablační vrstvu. Dále je povrch opatřen pro laser transparentní vrstvou (např. tekoucí voda). Ablací vrstva je působením laseru odpařena. Tím je vytvořeno plasma o vysokém tlaku generující rázovou vlnu, která je díky vnější transparentní vrstvě směřována do povrchu materiálu a umožňuje jeho ovlivnění. V konečném důsledku jsou v materiálu vyvolány plastické deformace, tlaková zbytková napětí a mechanické zpevnění. Tyto jevy zlepšují únavové vlastnosti materiálu, omezují vznik a šíření trhlin na povrchu materiálu, zlepšují odolnost proti opotřebení a případně zlepšují i korozní vlastnosti povrchové vrstvy. [104–106]

Samotná technologie LSP je známá již poměrně dlouhou dobu, kdy první experimenty

byly prováděny v USA v roce 1968. Postupně je aplikována pro zpracovávání namáhaných strojních součástí zejména pro letectví a energetická zařízení, a to jako potenciální náhrada kuličkování. Výhodou LSP oproti kuličkování je dosažení větších hloubek zpevnění materiálu, vyšší hodnoty zbytkových tlakových napětí, a to při vyšší homogenitě a nižší drsnosti povrchu. Konkrétní parametry jsou závislé jak na vlastnostech použitého záření, tak i na materiálu (modul pružnosti, mez pevnosti, rychlost šíření zvuku v materiálu, jakost opracovávaného povrchu atp.). [104]



Obr. 28: Princip metody Laser Shock Peening. [107]

STAV PROBLEMATIKY

Využití techniky LSP pro řezné nástroje je prozatím předmětem prvních výzkumů, tedy obdobně jako v případě mechanických způsobů pro zpevnění povrchu materiálu. V zásadě je výzkum soustředěn na pozorování efektu vlivu použité metody a procesních parametrů (laser, dráhy paprsku, překrytí atp.) na změny vlastností řezného materiálu [108–111]. K materiálům, které jsou takto ovlivňovány patří slinutý karbid, řezná keramika (Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC), PKNB i PKD. **Využití tohoto způsobu se proto může nacházet nejen v oblasti ovlivnění houževnatějších typů slinutých karbidů, ale zřejmě i nejtvrdších a křehkých materiálů.**

Při výzkumu [112] bylo u materiálu Al_2O_3 dosaženo aplikací LSP zvýšení mikrotvrlosti povrchové vrstvy bez pozorování lomů a trhlin. Pro zpracování polykrystalického diamantu metodou laser shock peening byl veden výzkum [113]. Autoři uvádí, že touto technologií bylo dosaženo zvýšení mikrotvrlosti PKD, avšak při změnách mikrostruktury směrem k větší nehomogenitě. Negativním důsledkem bylo také současné zvýšení drsnosti ovlivněného povrchu.

Zajímavým zdrojem je patent [114], ve kterém byl představen způsob využití LSP pro zvýšení mechanických vlastností slinutého karbidu různého typu, složení a také způsobu

výroby. U všech použitých testovaných variant složení SK (včetně bezwolframových) bylo vlivem aplikace LSP dosaženo současného zvýšení lomové houževnatosti i tvrdosti (otěruvzdornosti) povrchu, tedy důležitých charakteristik pro funkci řezného nástroje. Zmíněný efekt může být využit i v kombinaci s použitím ochranného povlaku. Zpevněný povrch řezného materiálu může vytvořit přechodovou vrstvu snižující vysoký gradient tvrdosti mezi povlakem a slinutým karbidem, jehož tvrdost je zpravidla výrazně nižší. Zvýšení tvrdosti povrchu řezného materiálu i o 10 až 20 % tak může mít velmi příznivý efekt pro adhezi a soudržnost povlaku a celkovou řezivost nástroje.

V žádném z nalezených zdrojů nebyl proveden rozbor přímého vlivu použití technologie LSP na řezivost takto zpracovaného nástroje. Oblast vlivu procesních parametrů technologie LSP na výsledek obrábění by se měla stát předmětem budoucího výzkumu. Obdobně by mohlo být zkoumáno využití zpevnění povrchu laserem pro zvýšení životnosti ocelových těles nástrojů ovlivněním upínací a dosedací části. Potenciál výrazného prodloužení životnosti tělesa nástroje může být naplněn zpevněním dosedacích lůžek pro uložení vyměnitelných břitových destiček nebo zpracováním kriticky namáhaných částí tělesa nástroje - např. paty zubů fréz. **V praxi se prozatím k žádnému využití technologie LSP pro řezné nástroje nepřistupuje.**

5.4.2 ŘÍZENÉ TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ MATERIÁLU

PODSTATA METODY

Bylo zmíněno, že při interakci laseru s řezným materiálem formou ablace vzniká tepelně ovlivněná oblast, jejíž tvorba přináší i změnu vlastností materiálu. Zpravidla jsou při interakci a ablaci materiálu laserem hledány takové parametry, které povedou k nejmenšímu tepelnému ovlivnění a změně (často degradaci) vlastností – viz např. [115–117]. Probíhá-li však proces ohřívání řízeně a bez ablace materiálu, může být využita technika přetavení povrchu laserem (z anglického „laser surface remelting“). Při této metodě je laserem natavena povrchová vrstva materiálu, která následně opětovně tuhne. V první fázi je tedy nejprve vytvořena tavenina. V případě použití laseru jako zdroje tepla je charakteristický rychlý ohřev při výrazně lokálním působení. Přestane-li na ovlivňované místo působit dostatečné množství energie, nastává opětovné tuhnutí materiálu při fázi chladnutí. Důležitým faktorem je, že tuhnutí a chladnutí povrchové vrstvy materiálu, je doprovázeno změnou chemického složení, struktury a fází a tím i výsledných vlastností. Tento způsob ovlivnění materiálu může být chápán jako specifický

způsob tepelného zpracování. Důležitým poznatkem je, že **tento princip může teoreticky fungovat i u řezných materiálů.**

STAV PROBLEMATIKY

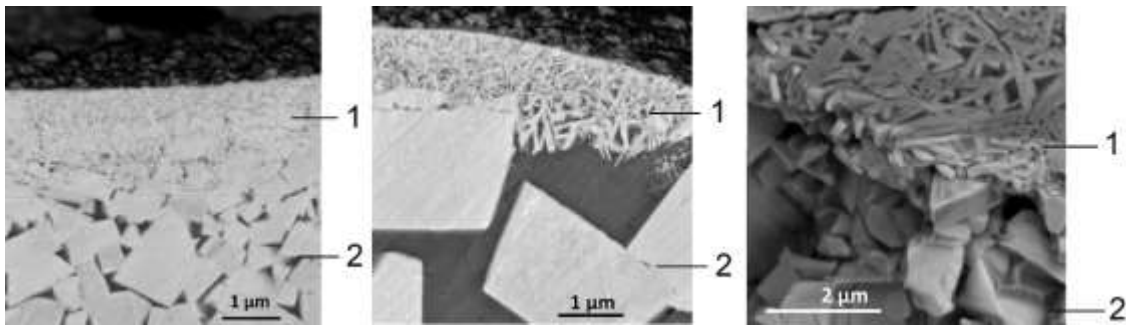
Proces laserového přetavení povrchu je již dobře popsán u kovových materiálů, vč. např. rychlořezných ocelí [118]. Uplatnitelnost metody u dalších řezných materiálů byla doposud zkoumána výhradně u slinutých karbidů.

Výzkum v rámci [119] poukázal na to, že řezné nástroje z SK mohou po technologii slinování vykazovat nehomogenitu z hlediska tvrdosti a spojení karbidických zrn s pojivovou fází. Vložení vysoké energie laserovým paprskem dojde k rychlému ohřevu a natavení všech složek materiálu. Nastavením vhodných vlastností paprsku a strategií jeho pohybu je ovlivněno propojení tavenin pojiva a matrice. Při následném tunutí vzniká jehlicovitá struktura tvořená jednotlivými dendritickými zrny WC s menším podílem pojivové fáze kvůli jejímu vypaření. Ze snímku Obr. 29 je patrná taková struktura s plynulou změnou struktury a velikosti zrn směrem k povrchu. Tato vrstva je v konkrétním případě tloušťky několika mikrometrů.

Stejný zdroj dále uvádí, že po technologii přetavení laserem je třeba ještě aplikovat tepelné zpracování za účelem jednak rekrystalizace zrn a také pro opětovné nasycení povrchových vrstev kovovým pojivem z neovlivněné části materiálu. Teplota tohoto zpracování by již měla být nižší nebo rovna teplotě tavení pojiva.

Procesem přetavení tímto způsobem dojde ke zvýšení povrchové tvrdosti. Povrch slinutého karbidu vzniklý vhodnými podmínkami pro jeho přetavení má větší tvrdost povrchové vrstvy a je odolnější vůči korozi a opotřebení. V rámci tohoto výzkumu bylo ověřeno fungování metody u šesti různých typů SK s rozličnou výchozí tvrdostí. Energie v pulsu se v závislosti na podmínkách laseru pohybovala v rozsahu 2,6 až 7,1 mJ. [119]

Výzkum podstaty vlivu ohřívání slinutého karbidu laserem na morfologické a metalurgické změny byl představen v [120]. Bylo zjištěno, že nárůst teploty materiálu je prudký. Gradient chladnutí byl oproti tomu nižší. Přesto na povrchu vznikaly trhliny v důsledku chladnutí taveniny. I zde byla potvrzena tvorba kompaktní struktury s menšími zrny. V příspěvku [116] jsou ukázány výsledky deklarující, že u takto vytvořené povrchové vrstvy slinutého karbidu došlo k nárůstu tvrdosti povrchu (až o 10 %) při stejné lomové houževnatosti vzorku. Opět byl ovšem identifikován vznik povrchových trhlin.

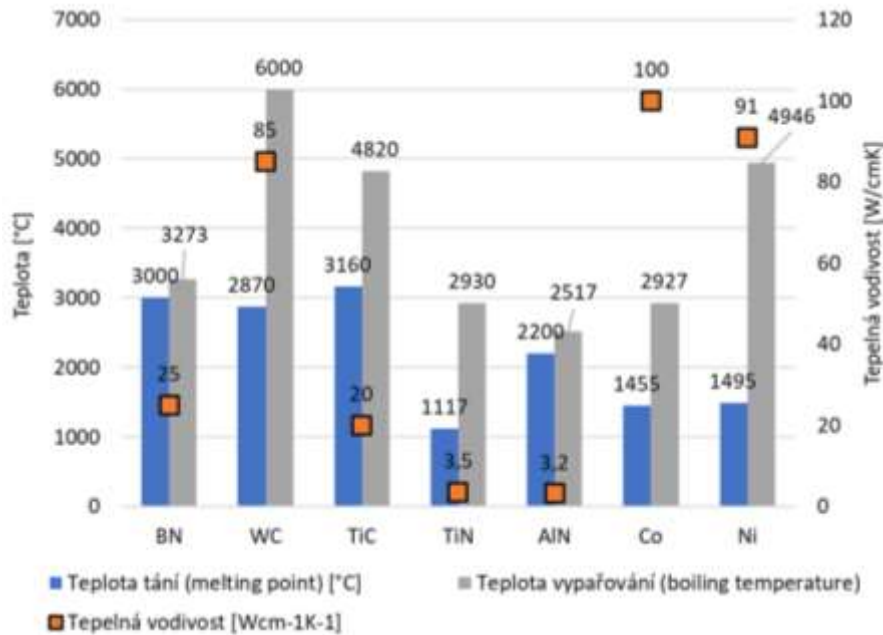


Obr. 29: SEM analýza vzorku slinutého karbidu po přetavení povrchu laserem (1 – nově vzniklá struktura po ztuhnutí, 2 – původní struktura, zrna WC): příčné řezy vzorkem pro demonstraci změn struktury materiálu u volného povrchu (vlevo a uprostřed); 3D analýza nově vzniklé struktury (vpravo). [119]

Práce [115] popisuje výzkum vedený do oblasti ovlivnění povrchu laserem pro cermet na bázi Ti(C,N)-Co. K zajímavým poznatkům patří, že při vyšší vložené energii (množství tepla) do materiálu vznikají jiné fáze (např. TiO_2) a zvyšují se tahová napětí v materiálu. Při testu řezivosti nástroje s laserem modifikovaným povrchem bylo oproti standardnímu vzorku prokazatelně dosaženo redukce adhezních jevů a s tím související nižší intenzity opotřebení břitů formou žlábků na čele. Zaznamenána byla rovněž nižší velikost sil při obrábění. Zmíněné výsledky byly dosaženy při soustružení oceli AISI 1045.

Přestože nebyla dohledána vědecká práce, která by se tomu přímo věnovala, nelze teoreticky vyloučit i možnost přetavovat povrch dalších řezných materiálů, jako např. PKNB nebo PKD. Otázkou ovšem je, zda by takto mohla vzniknout homogenní povrchová vrstva s vlastnostmi vedoucími k vyšší řezivosti nástroje.

Bude-li teoretickým předpokladem pro přetavení povrchové vrstvy materiálu dosažení teploty vedoucí ke změnám v krystalové mřížce, ale zároveň nepřekročení teploty vypařování, lze možnosti posoudit podle fyzikálních vlastností materiálu. Pro možnost efektivního přetavení by byl třeba výrazný rozdíl mezi teplotou tání a vypařování, a pojivová fáze s nižší teplotou tavení, ale současně s vyšší hodnotou vypařování, než je teplota tavení tvrdé fáze. Jak je patrné z Obr. 30 u slinutého karbidu (WC + Co) je poměr teploty tání a vypařování obou složek příznivý. Vhodnou vlastností pro přetavení je i podobná tepelná vodivost. Naopak u složek PKNB (BN + TiC, TiN, AlN aj.) je poměr sledovaných vlastností nepříznivý. Je zde malý rozdíl mezi oběma teplotami složky BN a současně mají prvky pojiva blízkou teplotu vypařování.



Obr. 30: Přehled fyzikálních vlastností vybraných základních složek slinutého karbidu a polykrystalického kubického nitridu boru. [121–125]

Oblasti přetavení řezných materiálů laserem je věnována relativně malá pozornost. Výsledky jsou nejednoznačné a výrazně ovlivněny konkrétními vlastnostmi materiálů. K těm významným bude jistě patřit chemické složení, tepelná vodivost, teplota tavení a vypařování, teplotní roztažnost a změny krystalové mřížky s teplotou. Tento způsob využití laseru by i přes uvedené aspekty mohl být jedním z předmětů budoucího výzkumu a vývoje.

5.5 TECHNOLOGIE S PŘIDÁVÁNÍM MATERIÁLU

V případě řezných nástrojů je možné využít laser také k přidávání neboli postupnému vrstvení materiálu. Kromě stále více se rozšiřujících technik aditivní výroby dílců z plastu, kovů a keramiky i pro aplikace v oblasti těles nástrojů a nástrojových upínačů, lze tvorbu řezných nástrojů laserem aditivním způsobem rozdělit na dvě oblasti – na postupné vrstvení řezného materiálu za účelem tvorby celého břitů nebo jeho části a na depozici ochranného povlaku. V obou případech se při současném stavu poznání jedná pro řezné nástroje pouze o méně významné, více či méně kvalitně zvládnuté experimentální techniky s řadou nevýhod a omezení oproti komerčně používaným metodám výroby. Na druhou stranu již v rámci dosažených výsledků výzkumu krystalizují možnosti a výhody pro aplikace v obráběcích nástrojích a zvyšování jejich řezivosti.

5.5.1 VRSTVENÍ ŘEZNÉHO MATERIÁLU

PODSTATA METODY

Při aktuálním stavu poznání v oblasti 3D tisku materiálů, je možné začít uvažovat také o 3D tisku řezných materiálů, resp. prozatím především slinutého karbidu a cermetu. Materiály na bázi WC-Co mohou být teoreticky vrstveny různými technikami, jako jsou například procesy tryskání pojiva (Binder Jetting) a tavení materiálu elektronovým paprskem (Electron Beam Melting). V případě využití laseru jako zdroje tepla pro tavení materiálu se potom jedná o technologii SLM [126] nebo DLMD (Direct Laser Metal/Material Deposition, tzv. laser cladding) [127].

Technologie SLM pro řezné materiály vychází z principu 3D tisku kovů stejným způsobem. Je plošně nanášena tenká vrstva prášku tvrdokovu a laser selektivně taví a spéká materiál. Takto vrstvu po vrstvě je vytvořen požadovaný 3D tvar. V případě kombinace Co a WC je situace komplikovaná tím, že tavit lze jen kobalt, kterého je však v celkovém objemu karbidu zpravidla méně než 10 %. I z tohoto důvodu musí následovat proces izostatického lisování za tepla pro zvýšení hustoty a snížení pórovitosti materiálu. [126]

Motivací pro vývoj tohoto přístupu výroby řezných částí nástrojů je, že může být vytvořen tvarově a následně i funkčně specifický vzorek, který nelze vyrobit žádnou z ostatních standardních výrobních metod. Mohou tedy vznikat řezné části nástrojů, které mají definovanou vnitřní zpevňující strukturu se soustavou kavit s možností dokonalejšího chlazení břitu procesní kapalinou nebo je na stávajících břitech navrstven otěruvzdornější materiál.

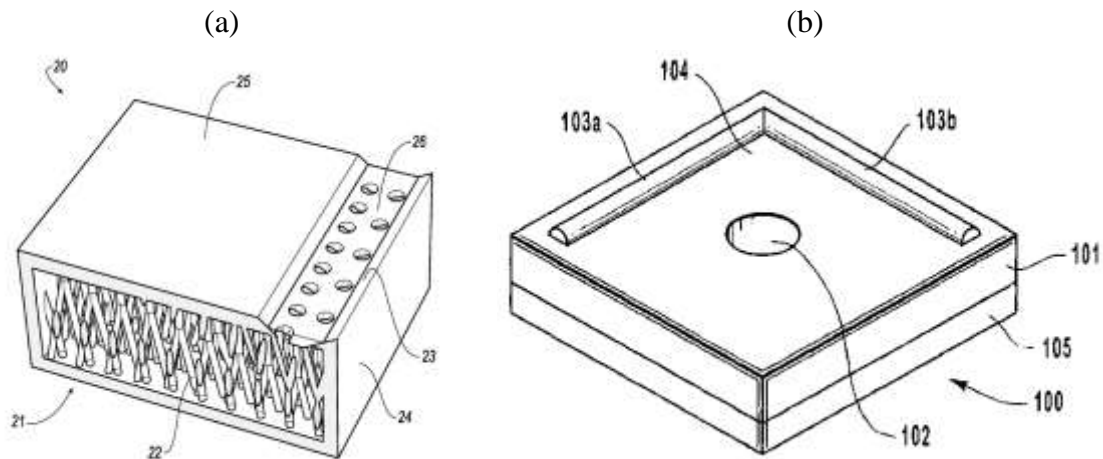
STAV PROBLEMATIKY

Poznatky o aditivní výrobě řezných částí nástrojů lze rozdělit na oblast existujících patentů pokrývajících téma principiálních řešení a jejich přínosů a na oblast několika vědeckých publikací fakticky se zabývajících problematikou SLM slinutého karbidu.

V případě patentů jsou zajímavá řešení v [128–130]. Jsou zde definovány možnosti, jaké využití by technologie mohla mít. Tvorba nástrojů (monolitních i VBD) s vnitřní strukturou, která může sloužit především pro lepší chlazení břitu i místa řezu, je předmětem práce [128]. Jeden z příkladů takového řešení je na Obr. 31a. Vzniklou vnitřní strukturou může protékat procesní kapalina s vyvedením na čelo břitu blízko místu jeho

kontaktu s třískou.

Nanesení tvrdší, a tedy otěruvzdornější vrstvy KNB v podobě utvařeče třísek na destičku ze slinutého karbidu je předmětem řešení v [129] – Obr. 31b. Laserem vytvořené otěruvzdorné části břitů pro různé typy nástrojů jsou řešením v rámci vynálezu [130].



Obr. 31: Příklady řezných částí nástrojů vytvořených aditivní technologií: (a) břitová destička (20) s vnitřní strukturou (22) a vývodem chlazení na čelo břitu (26) pro lepší chlazení břitu i procesu [128]; (b) břitová destička z SK (100) s nanesenou liniovou otěruvzdornou vrstvou z KNB (103a, 103b) na čele břitu (104) [129].

Odborné publikace zpracovávající problematiku vrstvení řezného materiálu laserem jsou zaměřené jak na podstatu laserového procesu [126, 131], strukturu a vlastnosti takto vytvořeného materiálu [127], tak i na konkrétní realizaci pro řezný nástroj [132].

V [126] je při použití metody SLM pro vytvoření dílu ze slinutého karbidu zmíněno, že bez postprocesní metody izostatického lisování za tepla není možné dosáhnout teoretické hustoty. V souvislosti s použitím laseru mohou vznikat defekty v podobě abnormální velikosti zrn a nehomogenity jejich rozložení, lokálního rozkladu fáze WC na W_2C a C nebo změny obsahu Co. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při vysokém obsahu Co.

Kladení slinutého karbidu spékaného laserem z přímo (tryskou) dodávaného prášku bylo popsáno v rámci práce [131]. V ochranné atmosféře argonu byly speciálním typem laseru nanášeny vrstvy bez pórů a trhlin s tvrdostí mezi 900 až 1100 HV₂₀₀.

Výsledek výzkumu [127] poukazuje, že pro výslednou strukturu a složení kladeného materiálu na bázi slinutého karbidu jsou zásadní tyto aspekty: parametry laserového procesu, ředění z materiálu substrátu, originální obsah uhlíku v použitých práscích, velikost částic v prášku a tvar vzorků.

Přímo břitovou destičku ze slinutého karbidu a cermetu se pokusili vytvořit autoři práce [132]. Přestože nebylo dosaženo uspokojivé homogenity materiálu, přesnosti tvaru a kvality povrchu, byl ukázán způsob, jak takový nástroj aditivní technologií vytvořit.

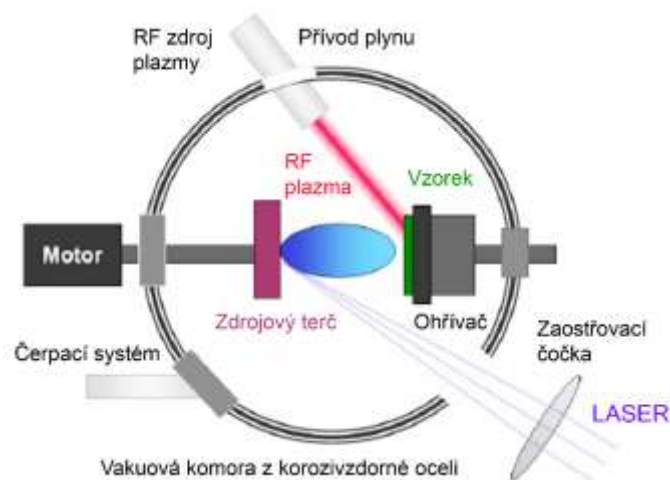
5.5.2 NANÁŠENÍ OCHRANNÉHO POVLAKU BŘITU

PODSTATA METODY

Vedle standardních a komerčně i experimentálně používaných metod nanášení ochranného povlaku (metody PVD, CVD a jejich různé varianty a kombinace) je možné ochranný povlak na předmět nanést také způsobem, kdy je z povrchu zdrojového terče (tzv. targetu) pro povlakování taven, odpařen a ionizován materiál vysokovýkonným pulsním laserem v uzavřené komoře s ochrannou atmosférou - Obr. 32. Tímto způsobem je vytvořeno plasma, které expanduje směrem od targetu k povrchu povlakovaného předmětu. Odstraněný materiál je na povrchu zachycen a kondenzuje zde. Tímto způsobem postupně narůstá povlak. Tato technika se nazývá pulsní laserové nanášení (PLD – Pulsed Laser Deposition). [133, 134]

Výhody tohoto způsobu nanášení povlaku oproti jiným metodám spočívají obecně v [133]:

- dosažení přesného chemického složení povlaku;
- relativně vysoké rychlosti depozice;
- s ohledem na externí zdroj energie se jedná o čistý proces s možností použití jak reaktivních, tak i inertních plynů;
- nanášení multivrstvých povlaků bez nutnosti přerušování procesu.



Obr. 32: Princip technologie nanášení povlaku pulsním laserem. [134]

Nevýhody procesu jsou ovšem natolik zásadní, že prozatím je tento způsob určen výhradně pro výzkumně-vývojové a speciální účely. Nevýhody jsou především [133]:

- tloušťka vznikajícího povlaku je vysoce nerovnoměrná;
- plochy, které lze povlakovat jsou malé;
- nanášený materiál obsahuje makroskopické částice taveniny, což snižuje kvalitu povlaku;
- depozice nových typů povlaků vyžaduje empirickou optimalizaci parametrů procesu.

STAV PROBLEMATIKY

Depozice povlaku technikou PLD je zvládnuta do podoby experimentálně-produkčních zařízení [135, 136] a má tak potenciál pro využití v širokém spektru aplikací, a to převážně v medicíně a elektronice. [133, 135, 137–139]

Využití pro povlakování řezných nástrojů, byť jen na experimentální úrovni, je sice s ohledem na nevýhody PLD omezené, ale ne nemožné, jak dokládá například práce [140]. V této vědecké publikaci byla metoda PLD použita pro napovlakování závitníku diamantovým povlakem. Výsledky ukázaly, že vzniklý povlak má potenciál poskytnout požadovanou řezivost ve smyslu ořezivostnosti, nižšího tření, antiadhezních účinků a z toho plynoucího nižšího silového zatížení v porovnání s nepovlakovaným nástrojem.

Jiný příklad využití PLD pro obráběcí nástroje přináší zdroj [141]. Na břitové destičce z SK byl vytvořen povlak AlMgB_{14} . Byly uskutečněny testy soustružením oceli 12050 bez procesní kapaliny, pro vliv různého složení povlaku na opotřebení břitu. Z výsledků plyne, že povlaky mohou překonat vlastnosti konvenčně připravených povlaků typu TiN, TiCN a TiAlN.

Laser nachází při povlakování nástrojů potenciální využití i v kombinaci s metodou CVD [142]. Jde o proces LCVD (Laser Chemical Vapour Deposition). Výkonný (50 až 200 W), diodový, kontinuální laser je použit pro ohřátí deponovaného povrchu a současně aktivuje výchozí chemickou látku. Tím je možné výrazně snížit teplotu při vzniku povlaku a eliminovat tak jednu z nevýhod CVD metody. Tento způsob byl využit například pro tvorbu povlaku Al_2O_3 [143]. Vrstvy vytvořené zmiňovanou technologií však doposud nebyly testovány přímo na jejich funkční vlastnosti při použití na řezných nástrojích.

5.6 VLASTNÍ VÝZKUM V TÉMATU

V této části práce jsou uvedeny **výsledky vlastního výzkumu a nové poznatky pro procesy výroby nástrojů laserem s úběrem a bez úběru materiálu**. Konkrétně se jedná o témata: (i) pohltivost laserového záření řeznými materiály a povlaky, (ii) ablační práh a ablace řezných materiálů, (iii) tvorba makrogeometrie a mikrogeometrie břitu laserem, (iv) odstraňování ochranného povlaku břitu laserem a (v) řízené tepelné ovlivnění materiálu. Výzkum byl veden pro širší spektrum řezných materiálů.

Popis v práci čerpá z výsledků několika samostatných projektů kolaborativního výzkumu průběžně řešených od roku 2014 s mým zapojením jakožto vedoucího řešitelských týmů a odborných témat za ČVUT v Praze (Fakulta strojní). Těmito projekty byly nebo jsou:

- "Progresivní laserové technologie" č. TA04011000 řešený v letech 2014–2017, poskytovatel TAČR, program: ALFA;
- "Hybridní technologie výroby nástrojů z ultratvrdých materiálů" č. FV10282 řešený v letech 2016–2018, poskytovatel MPO, program: TRIO;
- "Nová generace obráběcích nástrojů z pokročilých materiálů s využitím laserové technologie při jejich výrobě" č. FV40324 řešený v letech 2019–2022, poskytovatel MPO, program: TRIO;
- "Nové nanostruktury pro inženýrské aplikace umožněné kombinací moderních technologií a pokročilých simulací" č. EF16_026/0008396 řešený v letech 2018–2022, poskytovatel MŠMT, program: OPV VV (Dlouhodobá mezisektorová spolupráce);
- „Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství“ č. EF16_026/0008404 řešený v letech 2019–2022, poskytovatel MŠMT, program: OPV VV (Dlouhodobá mezisektorová spolupráce).

Kromě národní projektové spolupráce jsem v tématech vedl i mezinárodní vědeckou spolupráci týmu pracovníků ČVUT v Praze a dvou zahraničních technických univerzit:

- University West, Department of Engineering Science, Trollhättan, Švédsko;
- University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering & the Built-Environment, Johannesburg, Jihoafrická republika.

Vlastní výzkum směřuje jak k **získávání elementárních poznatků a jejich publikování, tak i k dosažení hmotných výsledků** v podobě patentů, užitných vzorů, prototypů a ověřených technologií.

5.6.1 POHLTIVOST LASEROVÉHO ZÁŘENÍ MATERIÁLEM

Pro čtyři různé typy řezných materiálů bylo provedeno experimentální **vyšetření závislosti pohltivosti laserového záření na jeho vlnové délce**. Byly zvoleny materiály – slinutý karbid (SK), řezná keramika nitridová (ŘK – N) a směsná (ŘK – S) a polykrystalický diamant (PKD). Přehled vzorků, jejich složení a komerčního značení s uvedením výrobce je ukázán v Tab. 5. Měření pohltivosti bylo provedeno na přístroji UV-VIS-NIR scanning spectrometer (typ Shimadzu MPC – 3100) umístěném na pracovišti PALS, Fyzikálního ústavu AV ČR. Vzorky pro testy byly reálnými VBD, resp. segmenty v případě PKD materiálu, které by bylo možné použít pro obrábění (Obr. 33).



Obr. 33: Vzorky řezných materiálů pro měření pohltivosti laserového záření (zleva): SK (VBD: CNMA 120804), ŘK – S (VBD: SNGN 120804), ŘK – N (VBD: SNGN 120804), PKD (segment).

Tab. 5: Přehled vzorků řezných materiálů pro analýzu pohltivosti laserového záření.

Označení vzorku	Typ materiálu	Složení a charakteristika	Komerční označení (výrobce)
SK	slinutý karbid	WC (92 hm. %) + NbC a TaC (2 hm. %) + Co (6 hm. %)	TH10 (Tungaloy)
ŘK – N	řezná keramika (nitridová)	$\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$	KY3500 (Kennametal)
ŘK – S	řezná keramika (směsná)	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Zr}_2\text{O}_2 + \text{TiC}$	KY1615 (Kennametal)
PKD	polykrystalický diamant	střední velikost zrn $10 \mu\text{m} + \text{Co}$	CTB010 (Element Six)

V prvním kroku byla udělána analýza stavu vzorků měřením drsnosti ovlivňovaného povrchu. Výsledky jsou zaznamenány v Tab. 6, podoba výchozí kvality povrchů je pro názornost ukázána v Příloze 1. Drsnost povrchu vzorků PKD a ŘK – S je podobná. Nižší drsnost byla opakovaně naměřena pro broušený povrch vzorku SK. Naopak vzorek z nitridové keramiky vykazoval po broušení povrchu zdaleka nejvyšší hodnoty obou sledovaných charakteristik drsnosti.

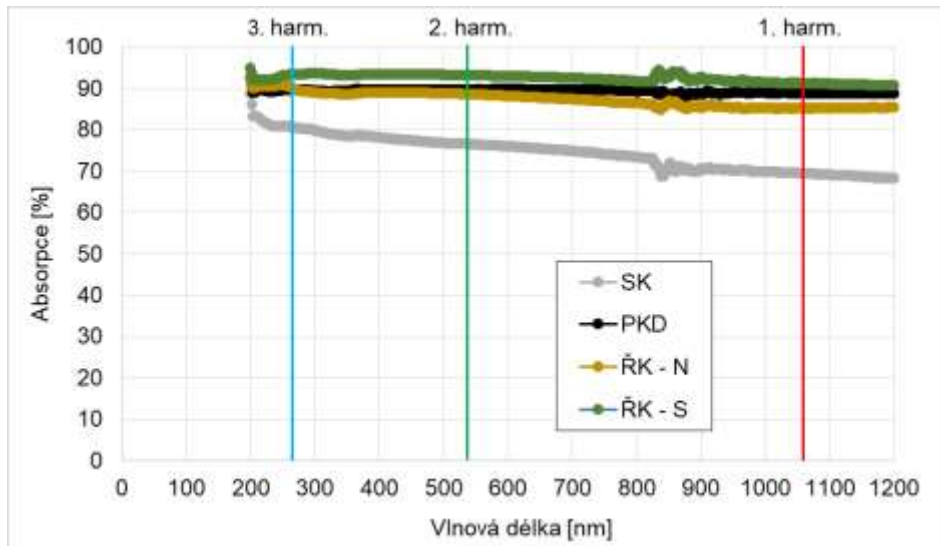
Tab. 6: Parametry drsnosti povrchu Ra, Rz vzorků pro měření pohltivosti laserového záření.

Označení vzorku	Mezní vlnová délka pro měření l_c [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]
SK	0,25 a 0,8	0,106	0,809
ŘK – N	0,8	0,370	2,170
ŘK – S	0,8	0,131	0,897
PKD	0,8	0,130	1,219

Výsledky měření pohltivosti ukázaly, že v rozsahu používaných vlnových délek laserového záření pro ovlivnění řezných materiálů – zpravidla 532 nm (2. harmonická vlnová délka) a 1064 nm (1. harmonická vlnová délka), je rozdíl u všech testovaných materiálů malý a pohltivost je vysoká - Obr. 34. Pro materiál PKD i obě řezné keramiky byla procentuální pohltivost velmi vysoká s tím, že se v uvedeném rozsahu vlnových délek výrazněji neměnila, byť je možné s nárůstem vlnové délky sledovat její mírný pokles. Společným rysem všech těchto materiálů přitom je, že jsou tmavé (PKD – černá, ŘK – N – tmavě šedá, ŘK – S – šedo černá). Výraznější rozdíl pohltivosti byl zaznamenán pouze u slinutého karbidu, kdy bude efektivněji záření využito při kratších vlnových délkách – případně tedy až k 3. harmonické délce. V porovnání s ostatními testovanými materiály je pohltivost SK nižší. Kromě materiálových vlastností to může být ovlivněno barvou (povrch světlejší – kovově stříbrný) a drsností povrchu (po broušení), která byla oproti ostatním vzorkům mírně nižší.

Z výsledků měření plyne, že u všech typů testovaných řezných materiálů je efektivnější využívat lasery s kratšími vlnovými délkami. Důležitými vlastnostmi pro pohltivost záření na reálných vzorcích řezných nástrojů bude jistě technologie výroby nástroje a z toho plynoucí stav a podoba povrchu ve smyslu jeho drsnosti (resp. celkové topografie), ale i barvy a odstínu řezných elementů určených pro ovlivnění laserem.

V souvislosti s použitou metodou měření pohltivosti je třeba zmínit, že dosažené výsledky jsou hodnotami pouze při první interakci laseru s původním povrchem vzorku. Dojde-li v důsledku ovlivnění materiálu laserem ke změně charakteru povrchu, jeho prohrátí nebo změně jeho zbarvení, změní se i podmínky pro pohltivost. **Proto je třeba na získaná data nahlížet spíše jako na výchozí údaje pro vhodné nastavení vlnové délky, než na přesné stanovení hodnot pohltivosti pro jednotlivé materiály.**



Obr. 34: Závislost pohltivosti laserového záření na jeho vlnové délce pro čtyři různé řezné materiály s vyznačením tří harmonických vlnových délek.

5.6.2 ABLAČNÍ PRAH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Byl proveden výzkum pro vyšetření velikosti prahové intenzity energie u různých řezných materiálů. Pro výzkum byly zvoleny materiály, které byly použity pro měření pohltivosti záření s doplněním o dva typy PKNB. Přehled všech vzorků je uveden v Tab. 7. Kromě samotného experimentálního stanovení prahových hodnot intenzity energie bylo důležitým cílem i zjištění vlivu použitého nastavení laserového procesu na velikost ablačního prahu a v neposlední řadě i porovnání získaných hodnot s dílčími údaji uvedenými v literatuře.

Experiment byl proveden na zařízení s laserovým zdrojem Pharos od firmy Light Conversion, UAB s možností nastavení vlnové délky na 1030 a 515 nm, s nastavitelnou délkou pulsu v rozsahu 190 fs až 20 ps a výstupním výkonem až 20 W. Laser je provozovaný na pracovišti HiLASE centrum, Fyzikálního ústavu AV ČR. Přehled technických parametrů použitého zařízení je součástí Přílohy 2.

Ablační prah materiálů byl měřen pro 50 opakujících se pulsů do jednoho místa při třech různých kombinacích nastavení laserového zdroje:

- $\lambda = 1030 \text{ nm}$, $\tau_p = 245 \text{ fs}$;
- $\lambda = 1030 \text{ nm}$, $\tau_p = 6 \text{ ps}$;
- $\lambda = 515 \text{ nm}$, $\tau_p = 245 \text{ fs}$.

Tab. 7: Přehled vzorků řezných materiálů pro stanovení ablačního prahu.

Označení vzorku	Typ materiálu	Složení a charakteristika	Komerční označení (výrobce)
SK	slinutý karbid	WC (92 hm. %) + NbC a TaC (2 hm. %) + Co (6 hm. %)	TH10 (Tungaloy)
ŘK – N	řezná keramika (nitridová)	Si ₃ N ₄ + Y ₂ O ₃	KY3500 (Kennametal)
ŘK – S	řezná keramika (směsná)	Al ₂ O ₃ + Zr ₂ O ₂ + TiC	KY1615 (Kennametal)
PKNB – L	polykrystalický KNB (nízkoobsahový)	KNB (45 % obj.) + TiCN	DCN450 (Element Six)
PKNB – H	polykrystalický KNB (vysokoobsahový)	KNB (93 % obj.) + AlN	SB100 (Iljin)
PKD	polykrystalický diamant	střední velikost zrn 10 μm + Co	CTB010 (Element Six)

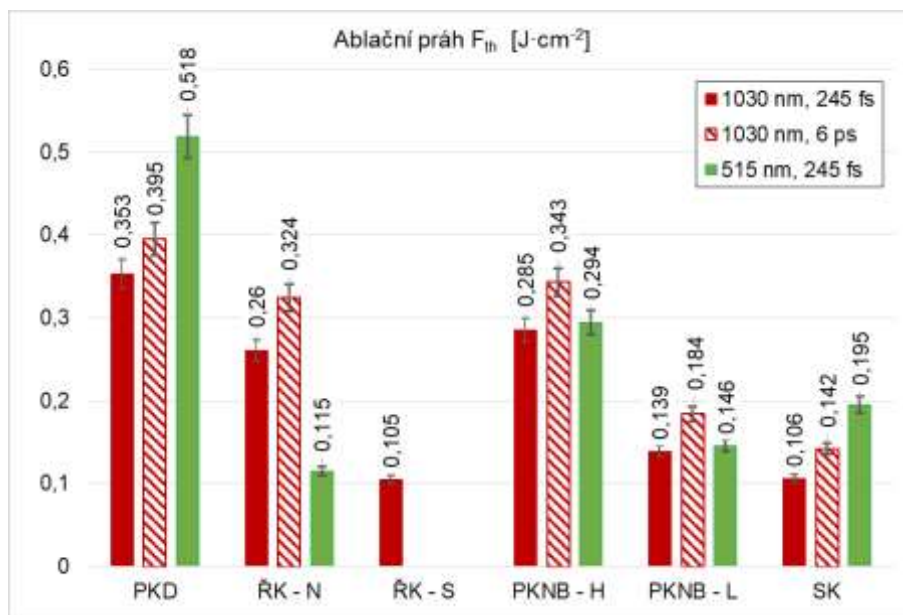
Výsledky experimentu jsou zachyceny v grafu na Obr. 35. V případě vzorku SK byla nejnižší hodnota ablačního prahu získána při výchozí variantě nastavení laseru (1030 nm a 245 fs), a to $0,106 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. S použitím délky pulsu 6 ps se hodnota F_{th} zvýšila, stejně jako pro působení laseru s femtosekundovou délkou pulsu, avšak s $\lambda = 515 \text{ nm}$, a to navzdory větší počáteční pohltivosti záření. Ve srovnání s [44, 49] se u slinutého karbidu jedná o podobné hodnoty. V závislosti na typu SK a použitém laseru lze tedy pro stanovení výchozí hodnoty F_{th} používat rozsah 0,1 až $0,2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Při výchozí variantě nastavení byla nízká hodnota ablačního prahu naměřena také pro oxidovou směsnou keramiku. Hodnota byla opakovaně podobná, jako v případě vzorku z SK. Pro nitridovou keramiku byla hodnota intenzity energie nezbytné pro ablaci materiálu cca 2,5x vyšší než pro směsnou variantu. Při podobné tepelné vodivosti obou materiálů je to způsobeno zřejmě rozdílným chemickým složením. U nitridové keramiky opět platilo, že s délkou pulsu hodnota F_{th} narostla. Přičemž kratší vlnová délka vedla u této keramiky k výraznému snížení ablačního prahu. Hodnoty pro oba typy keramik kontrastují s vysokými hodnotami uvedenými v literatuře, kdy byly zjištěny $1,1 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ [51] a $5,62 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ [50]. Rozdíl sice mohl vzniknout tím, že data byla uvedena pro čistou oxidovou keramiku, i tak je však výrazný.

Rozdíl v ablačních prazích byl zaznamenán také pro oba typy PKNB. Zatímco ablační práh nízkoobsahového (PKNB – L) materiálu je podobný hodnotám pro slinutý karbid,

pro vysokoobsahový typ (PKNB – H) je třeba minimálně 2x vyšší intenzita energie, aby nastala ablace. Při délce pulsu 6 ps je tento poměr dokonce více než čtyřnásobný. Zkrácení vlnové délky záření se v chování obou materiálů tohoto typu významněji neprojevovalo. Při srovnání s materiálem KNB neznámého složení ze zdroje [49] ($0,14 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$) se jeví být pravděpodobné, že se jednalo o některý z dostupnějších a pro řezné nástroje mnohem více používaných LcBN materiálů.

Nejvyšší hodnoty intenzity energie pro začátek ablace materiálu byly naměřeny u PKD, a to navzdory vysoké počáteční pohltivosti záření. Důležitou roli zde zřejmě hraje vysoká tepelná vodivost materiálu. V závislosti na vlastnostech záření se hodnota pohybovala mezi $0,353$ a $0,518 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Při zkrácení délky pulsu došlo ke zvýšení hodnot F_{th} , stejně jako při zkrácení λ . Přestože byly jistě použity jiné typy materiálu a laserové zdroje, bylo ve srovnání s dostupnými údaji v odborných publikacích dosaženo podobného výsledku – $0,35 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ dle [49] a $0,4 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ dle [44]. Naopak při porovnání s údaji v [37] byl rozdíl výrazný.



Obr. 35: Velikost ablačního prahu různých řezných materiálů v závislosti na použitých parametrech laseru.

Výsledky ukazují, že ablační prahy různých řezných materiálů jsou výrazněji odlišné, a to dokonce i u různých variant složení konkrétního typu řezného materiálu. V případě vícesložkových materiálů bude hodnota F_{th} významně ovlivněna objemovým poměrem tvrdé a pojivové fáze, a i velikostí zrn tvrdé fáze. **Bylo prokázáno, že hodnoty minimální intenzity energie pro ablaci jsou závislé na vlastnostech**

použitého laserového záření a zřejmě i na použité metodice měření, přičemž tyto podmínky mohou mít na každý z materiálů různý účinek. Přesto lze stanovené hodnoty brát jako výchozí hodnoty pro nastavení podmínek efektivní ablace. Z tohoto pohledu se jeví jako důležité, ne-li nezbytné, dále orientovat výzkum na rozšiřování databáze prahových hodnot a popis vlivů vlastností laserového záření pro různé kombinace typu řezného materiálu a vlastností laserového záření.

5.6.3 ABLACE ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

EFEKTIVITA, INTENZITA A KVALITA ABLACE

Cílem další části vlastního výzkumu bylo analyzovat **efektivitu, intenzitu (produktivitu) a kvalitu ablace** v závislosti na intenzitě použitého laserového záření u vybraných řezných materiálů. Výzkum byl proveden na čtyřech různých řezných materiálech. Byly použity vybrané stejné vzorky jako při výzkumu ablačního prahu, a to SK, ŘK – N, PKNB – L a PKD. Stejně tak bylo použito identické laserové zařízení – laserový zdroj Pharos (firma Light Conversion, UAB). Různá velikost intenzity energie (F) byla dosažena kombinací opakovací frekvence pulsů ($f_p = 30$ až 100 kHz) a průměrného zářivého výkonu ($P_{ave} = 0,5$ až $2,2$ W) – viz vztahy (5) a (6) – při zachování konstantních hodnot H_x (90 %) a H_y (90 %), a to pro výchozí hodnoty $\lambda = 1030$ nm a $\tau_p = 245$ fs. Druhou alternativou testu pro zpracování materiálu SK byla hodnota $\tau_p = 6$ ps.

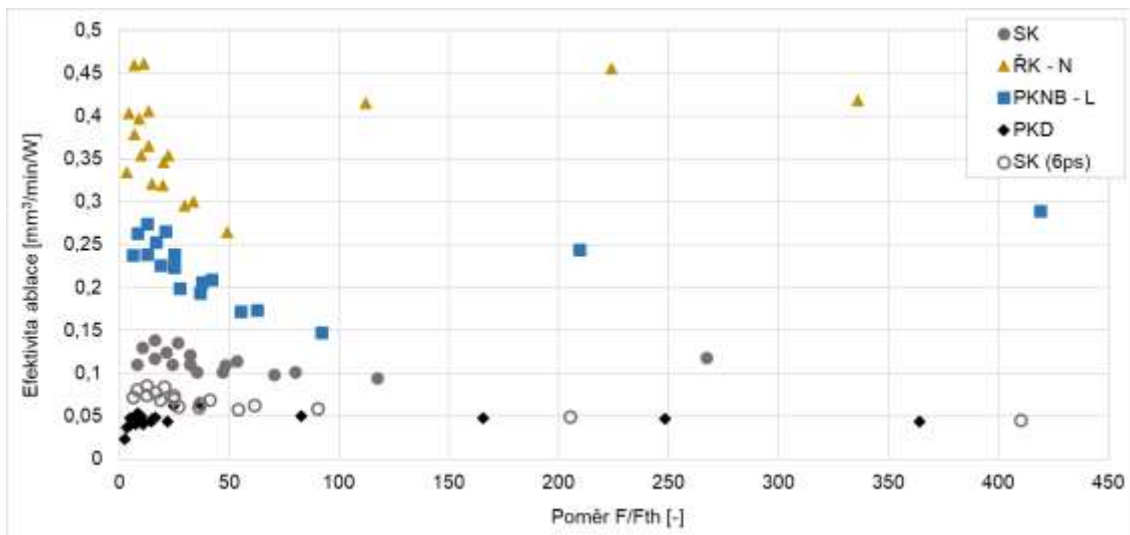
Efektivita ablace byla vyjádřena objemem odebraného materiálu za čas vztaženým na 1 W použitého průměrného výkonu laseru. Výsledky závislosti efektivity ablace na poměru použité F a prahové hodnoty pro daný materiál (viz výsledky uvedené v kapitole 5.6.2) jsou ukázány na Obr. 36.

Efektivita ablace byla pro různé materiály výrazně odlišná. Kromě PKD bylo v náhledu na celý měřený rozsah možné sledovat nejprve klesající průběh závislosti s nárůstem poměru F/F_{th} . Pokles je tím strmější, čím vyšší hodnoty efektivity ablace konkrétní materiál umožňuje. Shluk měřených bodů v levé části grafu byl způsobem různými kombinacemi P_{ave} a f_p , což demonstruje vliv obou parametrů i přes stejné hodnoty F . Zajímavým výsledkem je, že při vysokých poměrech F/F_{th} dochází k opětovnému nárůstu efektivity až na hodnoty blízké maximum z levé části grafu. Efektivního obrábění řezných materiálů laserem lze proto docílit i pro podmínky vedoucí k hodnotám F sto- a vícenásobně větším, než je prahová hodnota daného materiálu. Čím může být materiál obráběn efektivněji, leží minimum průběhu v nižších hodnotách F/F_{th} a současně je

opětovný nárůst efektivity progresivnější.

Byl-li proveden test použití délky pulsu 6 ps na vzorku SK, efektivita ablace se výrazně snížila. To koresponduje například se závěrem zdoje [60] pro různé kovy.

Nejefektivněji bylo možné laserem ablovat nitridovou řeznou keramiku, a to v maximech hodnot přes $0,45 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$. Následoval vzorek materiálu PKNB, SK a za daných podmínek byla nejnižší efektivita zaznamenána u PKD s maximy efektivity okolo $0,05 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$. Výsledky potvrdily, že efektivita ablace nemusí přímo souviset s hodnotou ablačního prahu daného materiálu. Není však bez zajímavosti, že pořadí materiálů dle efektivity ablace odpovídá předpokládaným hodnotám jejich měrné tepelné vodivosti. Nízká vodivost materiálu napomohla k vysoké efektivitě ablace.

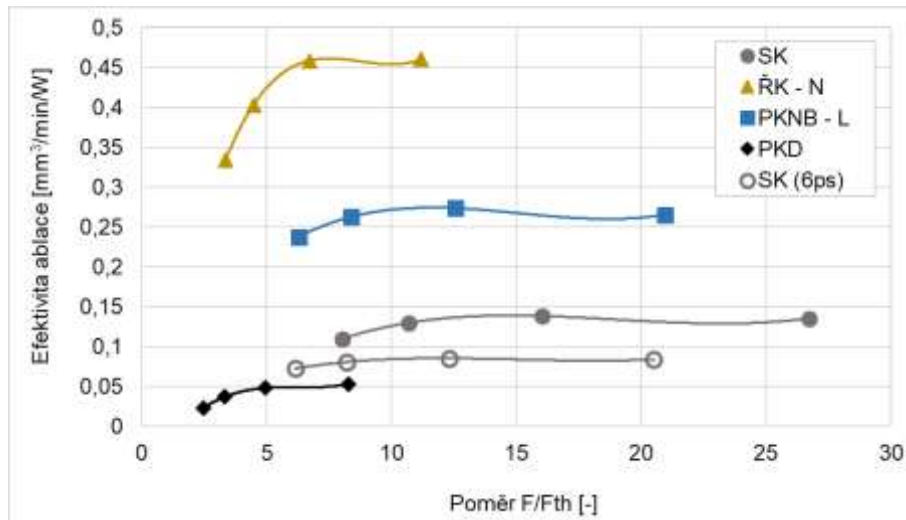


Obr. 36: Závislost efektivity ablace na poměru F/F_{th} pro čtyři řezné materiály za podmínek: $\lambda=1030 \text{ nm}$, $\tau_p=245 \text{ fs}$ a 6 ps , $H_x = 90 \%$, $H_y = 90 \%$.

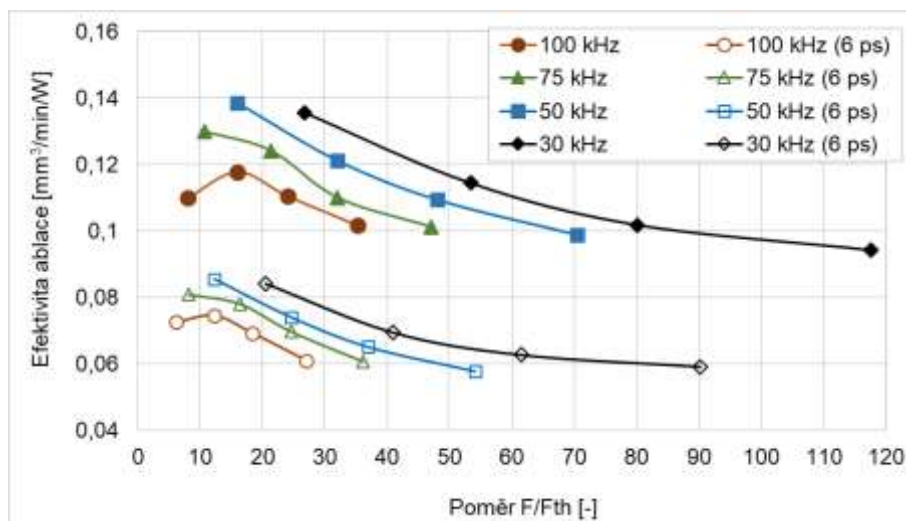
V detailu části závislosti pro ablaci intenzitou blíže hodnotám ablačního prahu (Obr. 37) je evidentní, že i v tomto experimentu byly potvrzeny výše uvedené teoretické poznatky tedy, že maximum efektivity v tomto rozsahu intenzity spočívá přibližně mezi 5 až 10 násobkem F_{th} [49], případně se přibližuje až k jejímu patnáctinásobku. Nově lze uvést, že materiály s vyššími hodnotami efektivity ablace (např. nitridová řezná keramika) mají toto maximum při nižších hodnotách násobku prahové intenzity energie. Navíc je u těchto materiálů průběh závislosti strmější. Tedy, z hlediska nastavení vhodných procesních parametrů je nalezení optima efektivity ablace komplikovanější.

Bylo zmíněno, že i při konstantní F existuje vliv kombinace frekvence pulsů a průměrného výkonu na efektivitu ablace. Příklad vlivu frekvence pulsů je pro ablaci

materiálu SK ukázaný na Obr. 38. Pro obě zvolené délky pulsů (245 fs a 6 ps) je zřejmé, že efektivita ablace s poklesem frekvence narůstá. Při kratších délkách pulsů je vliv frekvence výraznější. Rovněž s nižším výkonem je efektivita ablace vyšší. Obdobné chování efektivnosti s vlivem frekvence bylo při hodnotě 245 fs pozorováno i pro ostatní řezné materiály.



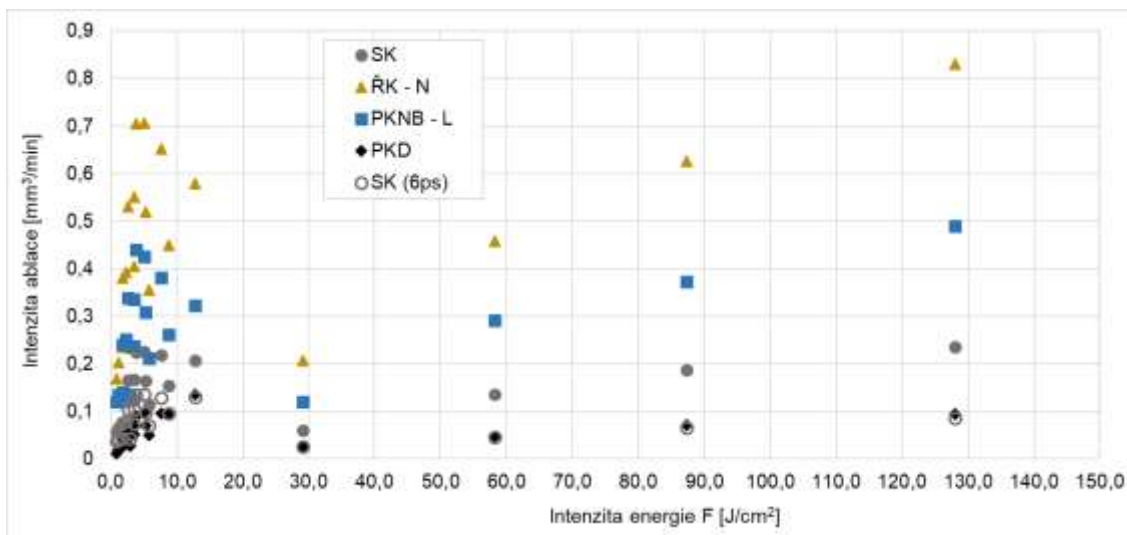
Obr. 37: Závislost efektivnosti ablace na poměru F/F_{th} pro čtyři řezné materiály při ablaci blíž hodnotě ablačního prahu materiálu za podmínek: $\lambda=1030$ nm, $\tau_p=245$ fs a 6 ps, $H_x = 90$ %, $H_y = 90$ %.



Obr. 38: Závislost efektivnosti ablace na poměru F/F_{th} pro slinutý karbid a různé frekvence pulsů za podmínek: $\lambda=1030$ nm, $\tau_p=245$ fs a 6 ps, $H_x = 90$ %, $H_y = 90$ %.

Intenzita ablace je charakteristikou, která popisuje rychlost úběru materiálu při ablaci, a to bez vztahu k hodnotě použitého P_{ave} tedy, objem odabrovaného materiálu za určitý čas. Bude-li hodnota vztažena jen na velikost použité intenzity energie, získáme pro různé materiály průběhy zachycené na Obr. 39.

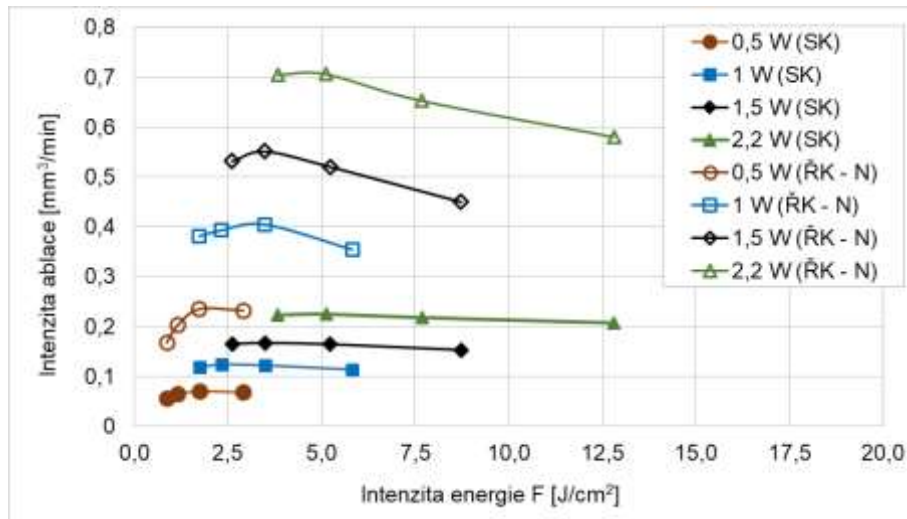
Zajímavým výsledkem je, že zvyšováním F dochází u všech materiálů nejprve k poklesu a při velkých hodnotách k opětovnému nárůstu produktivity ablace. Zejména pro ŘK – N a PKNB bylo možné docílit maxim objemu odebraného materiálu za čas pro nejvyšší použité hodnoty F . Navíc lze očekávat další nárůst v oblasti nad hodnotou $130 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Současně je při těchto intenzitách energie vysoká i efektivita ablace. Z již známých poznatků interakce laseru s materiálem můžeme naopak v této oblasti předpokládat výrazně zhoršenou kvalitu ovlivňovaného povrchu i možnou změnu vlastností materiálu důležitých pro řezivost nástroje. **Z tohoto pohledu lze uvažovat o novém efektivnějším přístupu k procesu laserové ablace – jeho rozdělení na dva dílčí režimy. V prvním by byl odebrán materiál s co největší intenzitou bez potřeby sledování hlediska kvality povrchu, avšak s přídavkem větším, než je velikost HAZ. Následně by byl povrch dokončen podmínkami pro menší hodnoty intenzity, ale s vysokou kvalitou opracování a bez tepelného ovlivnění materiálu.**



Obr. 39: Závislost intenzity ablace na intenzitě energie laseru pro čtyři řezné materiály za podmínek: $\lambda=1030 \text{ nm}$, $\tau_p=245 \text{ fs}$ a 6 ps , $H_x = 90 \%$, $H_y = 90 \%$.

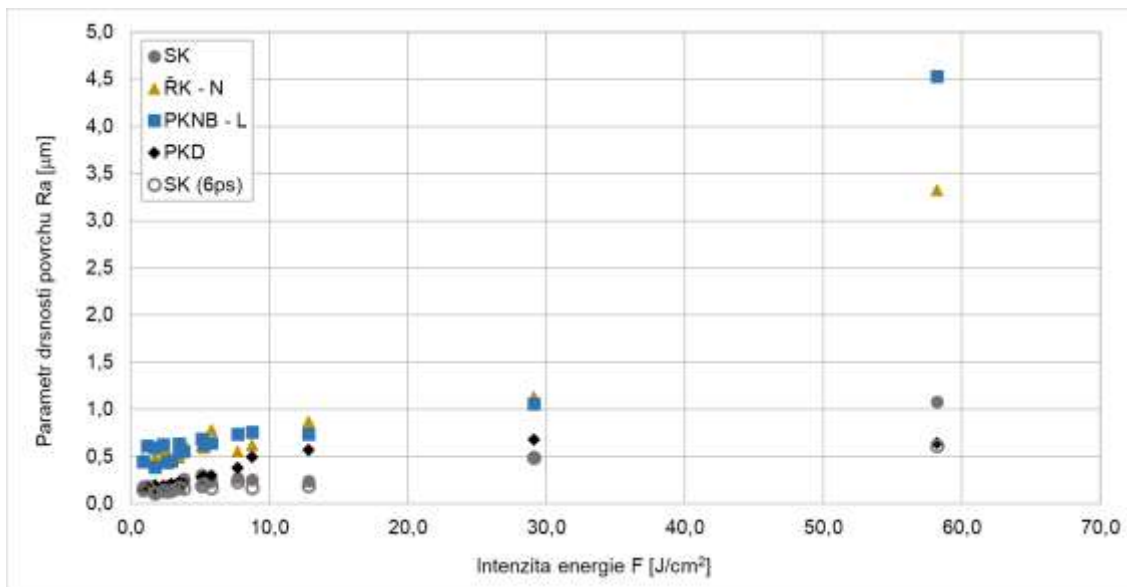
Důležitým poznatkem dále je, že pro materiál SK byla při dané F ablace výrazně intenzivnější v případě délky pulsů 245 fs než pro 6 ps . To je i v souladu se závěry stanovenými pro efektivitu ablace.

Zhuštění bodů v levé části grafu má za následek vliv kombinace P_{ave} a f_p na ablaci. Pro dva vybrané materiály (SK, ŘK – N) je tento vliv demonstrován na Obr. 40. S rostoucím výkonem (a frekvencí pulsů) se zvyšuje intenzita ablace. U materiálu efektivněji ablovaného je tento nárůst výraznější.



Obr. 40: Závislost intenzity ablace na intenzitě energie laseru pro SK a ŘK – N a různé průměrné výkony laseru za podmínek: $\lambda=1030$ nm, $\tau_p=245$ fs a 6 ps, $H_x = 90$ %, $H_y = 90$ %.

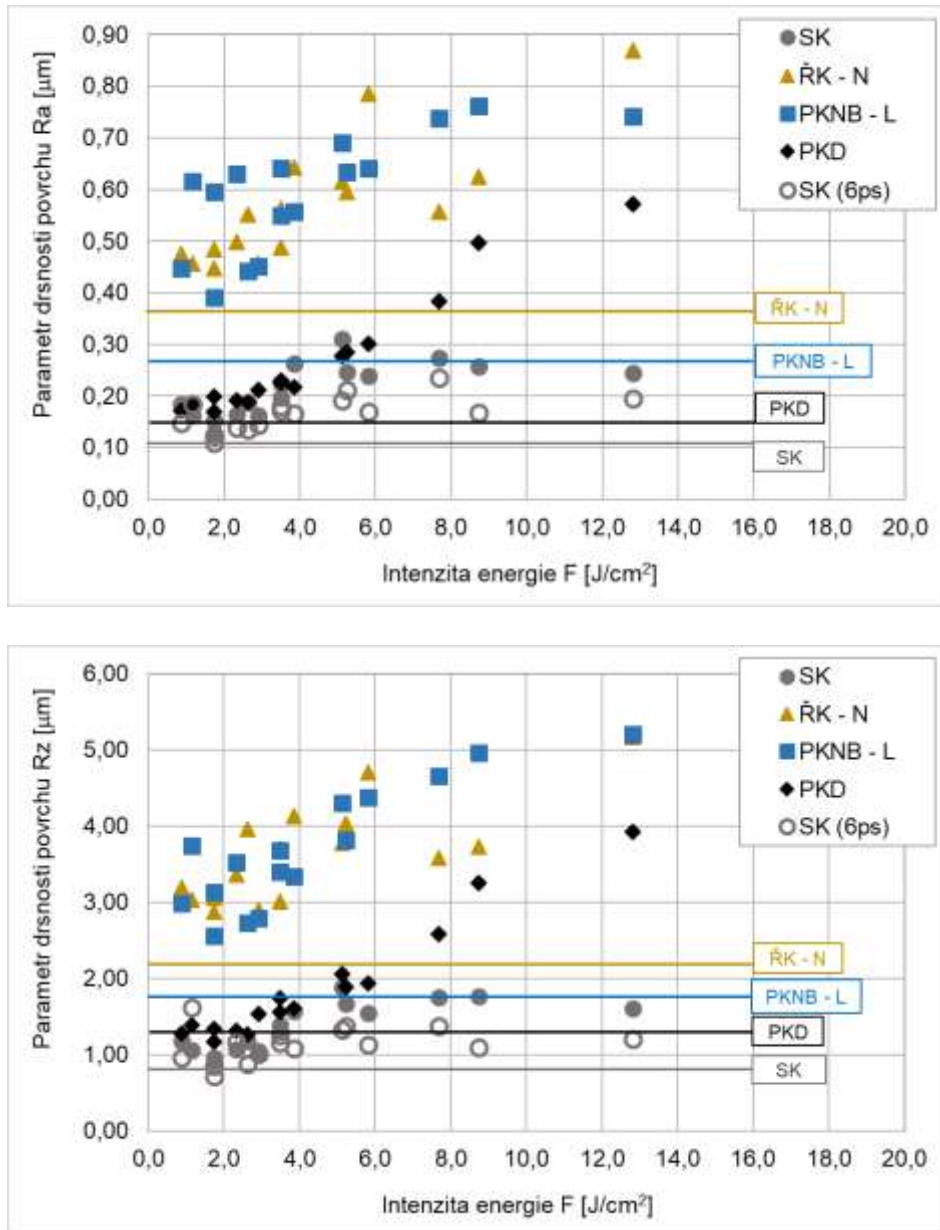
Současně s efektivitou a intenzitou ablace je důležité sledovat i **kvalitu opracování** ploch řezných materiálů laserem. Prvním pohledem na kvalitu je drsnost povrchu, kdy pro hodnocení byly vybrány parametry R_a a R_z . Celkový pohled na vliv intenzity energie na parametr R_a je ukázán na Obr. 41.



Obr. 41: Závislost parametru drsnosti povrchu R_a na intenzitě energie laseru pro čtyři řezné materiály za podmínek: $\lambda=1030$ nm, $\tau_p=245$ fs a 6 ps, $H_x = 90$ %, $H_y = 90$ %.

S rostoucí použitou intenzitou energie narůstala i drsnost povrchu. Pro materiály, které bylo možné efektivněji a intenzivněji ablovat (PKNB – L a ŘK – N) byly při stejné

hodnotě intenzity dosaženy výrazně vyšší hodnoty drsnosti a navíc byl jejich nárůst s F mnohem progresivnější. Opracování PKD a SK vedlo za daných podmínek k podobným hodnotám R_a , přičemž nárůst s intenzitou energie zde nebyl tak výrazný.



Obr. 42: Závislost parametru drsnosti povrchu R_a (nahore) a R_z (dole) na intenzitě energie laseru pro čtyři řezné materiály za podmínek: $\lambda=1030\text{ nm}$, $\tau_p=245\text{ fs}$ a 6 ps , $H_x = 90\%$, $H_y = 90\%$.

Při detailním pohledu na výsledky v rozsahu intenzity energie 0 až $13\text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Obr. 42) je patrné, jaká drsnost povrchu byla dosažena v porovnání s výchozí drsností vzorků, tedy po výrobě konvenčními technologiemi bez použití laseru. Tyto hodnoty jsou v grafech naznačeny vodorovnými čarami. Charakter výsledků pro oba sledované parametry byl

velmi podobný. U vzorků SK (pro obě délky pulsů) a PKD bylo laserovou ablací docíleno velmi podobných hodnot drsnosti Ra i Rz , které vykazovaly vzorky vyrobené bez použití laseru. U diamantu se drsnost s F výrazněji zhoršovala, zatímco pro SK bylo ovlivnění laserem kvalitní prakticky v celém rozsahu intenzity. Naproti tomu výchozí hodnoty pro materiály ŘK – N a PKNB – L byly za daných podmínek laserem nedosažitelné. S rostoucí hodnotou F se navíc rozdíl od výchozí kvality vzorků výrazně zhoršoval. Byla by zde potřeba výrazná změna parametrů záření a strategií pohybu paprsku pro dosažení nižší drsnosti povrchu.

KVALITA ABLACE SLINUTÉHO KARBIDU

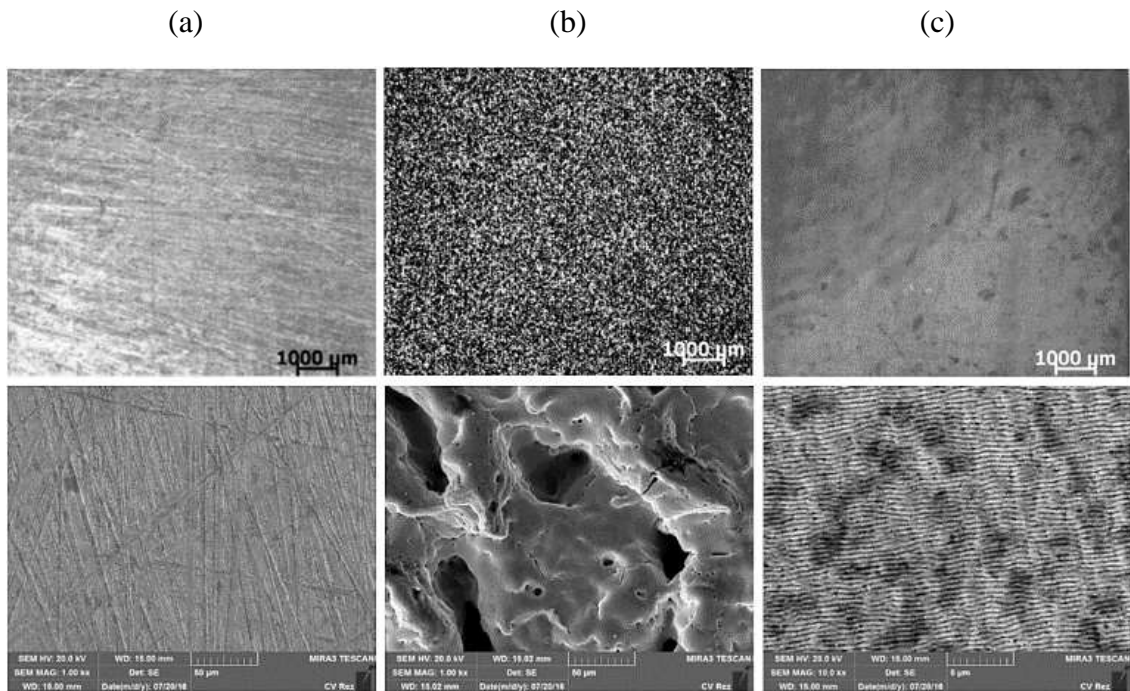
Kvalita opracování povrchu řezného materiálu laserem byla detailněji studována i v rámci dalšího vlastního výzkumu. Jednalo se o **výzkum vlivu různých parametrů laserového záření** (vedoucího buď k termální nebo atermální ablaci) **na kvalitu povrchu** z hlediska jeho struktury, třecích vlastností a únosnosti. Výsledky jsou proto zajímavým doplněním předchozích zjištění.

Pro výzkum byl vybrán stejný vzorek slinutého karbidu jako byl použit ve výzkumech uvedených v předešlých kapitolách. Na Obr. 43 lze v detailu ukázat rozdíly v kvalitě a struktuře povrchu vzorku SK po použití laseru za podmínek termální ablace (Obr. 43b; $\tau_p = 120$ ns, $\lambda = 1064$ nm) a atermální ablace (Obr. 43c; $\tau_p = 12$ ps, $\lambda = 532$ nm). Pro srovnání je uveden i povrch (a), který byl připraven standardní technologií – broušením.

Termální ablace vedla k tavení a rozstříkům materiálu po nově vzniklém povrchu. Po ztuhnutí je povrch hrubý, porézní a obsahuje trhliny, které jsou vzájemně propojeny. Takto vzniklý povrch obsahoval o cca 3,6 hm. % méně kobaltového pojiva v porovnání s výchozím chemickým složením řezného materiálu (Co 6 hm. %). Kobalt byl tedy podmínkami termální ablace významně odpařován. Lze předpokládat, že přítomnost trhlín a úbytek kobaltu se projeví ve vlastnostech řezného materiálu (zvýšení tvrdosti a snížení houževnatosti). Měřením byla potvrzena jak vyšší tvrdost povrchu, tak i s tím související jeho vyšší ošetrivost. Pro velikost zbytkových napětí měřených směrem od povrchu do materiálu bylo typické, že byla v maximech do hodnot 500 MPa a převážně tahového charakteru. Přes uvedené faktory nekvality bylo možné proces termální ablace hodnotit jako velmi produktivní.

Povrch jakožto výsledek atermální ablace materiálu laserem vykazoval kvalitu dokonce vyšší než povrch vytvořený broušením. Oba povrchy měly stejnou tvrdost a velmi

podobné tribologické vlastnosti (měřeno metodou Ball-on-Disc). U laserovaného vzorku zpracovaného atermálním způsobem byl v porovnání s původním chemickým složením materiálu zjištěn pouze malý úbytek kobaltu (o 0,4 hm. %). Působením laseru vznikalo v povrchové vrstvě nízké zbytkové napětí (do 200 MPa) tahového charakteru – tedy ještě nižší než u termálně zpracovaného vzorku. Broušený vzorek ovšem vykazoval na povrchu mnohem příznivější vysoká tlaková napětí o velikosti až 1400 MPa.



Obr. 43: Povrch VBD ze slinutého karbidu: (a) originálně zpracovaný povrch broušením (dole zvětšeno 1000x); (b) povrch opracovaný laserem při $\tau_p = 120$ ns; $\lambda = 1064$ nm (dole zvětšeno 1000x); (c) povrch opracovaný laserem při $\tau_p = 12$ ns; $\lambda = 532$ nm (dole zvětšeno 10 000x).

Uvedené aspekty kvality zpracování slinutého karbidu ukazují, že v porovnání s broušeným povrchem nemusí být opracováním povrchu laserem za vhodně nastavených podmínek atermální ablace snížena řezivost. Nevýhodou atermálního způsobu ablace může být nižší rychlost odebrání materiálu v čase, resp. produktivita zpracování.

5.6.4 TVORBA MAKROGEOMETRIE BŘITU LASEREM

V této oblasti je veden šířeji zaměřený vlastní výzkum, jehož vrcholným cílem je vývoj plně funkčních a v praxi uplatnitelných prototypů rotačních i nerotačních nástrojů ze slinutého karbidu, kubického nitridu boru a diamantu (PKD i CVD-D).

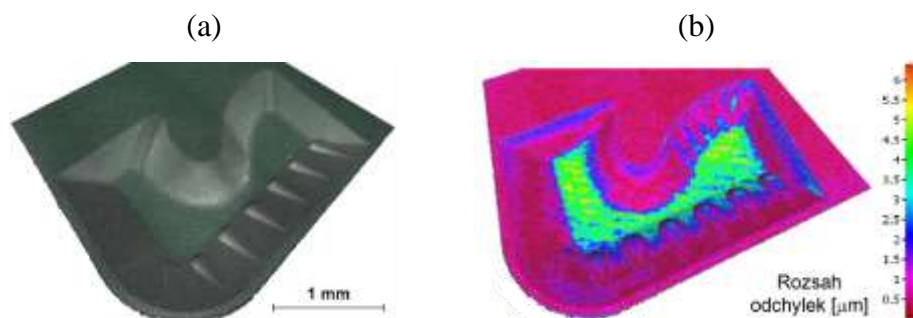
Výzkumně-vývojové úlohy vedou zpravidla na nastavení a optimalizaci parametrů a strategie laserového procesu pro kvalitní a produktivní realizaci bříty nástroje laserem. Je využíváno znalostí uvedených v předchozích kapitolách práce. Součástí výzkumu je zpravidla v konečné fázi i určení přínosu pro řezivost nástroje.

Na několika vybraných příkladech výzkumných úkolů jsou demonstrovány způsoby využití laseru pro tvorbu prototypových utvařečů na čelních plochách VBD ze slinutého karbidu a pro realizaci rotačních nástrojů z kubického nitridu boru a CVD diamantu.

PROTOTYPOVÉ UTVAŘEČE TRÍSEK VE SLINUTÉM KARBIDU

Výsledky prvního uvedeného výzkumu ukazují, že laserované utvařeče bříty ve slinutém karbidu mohou být vyrobeny s větší přesností tvaru a rozměru v porovnání s konvenčními technologiemi lisování a sinterování. Při těch se dle informací od výrobců nástrojů standardní přesnost pohybuje zpravidla v intervalu několika desítek mikrometrů (např. $\pm 0,03$ mm). Přestože je cílem výrobců nástrojů tuto toleranci dále snížit, laserem lze vyrobit opakovaně utvařeč tvarově složitý s odchylkami od požadované podoby v jednotkách mikrometrů - Obr. 44.

Prototypový utvařeč byl laserem vyroben za podmínek atermální ablace: $\tau_p = 10$ ps, $\lambda = 532$ nm, $E_p = 4,75$ μ J, $F = 0,97$ J \cdot cm $^{-2}$, $f_p = 200$ kHz. Dosažená drsnost povrchu ploch utvařeče byla $Ra = 0,3$ μ m, $Rz = 2,65$ μ m. Čas pro výrobu utvařeče byl cca 15 min.

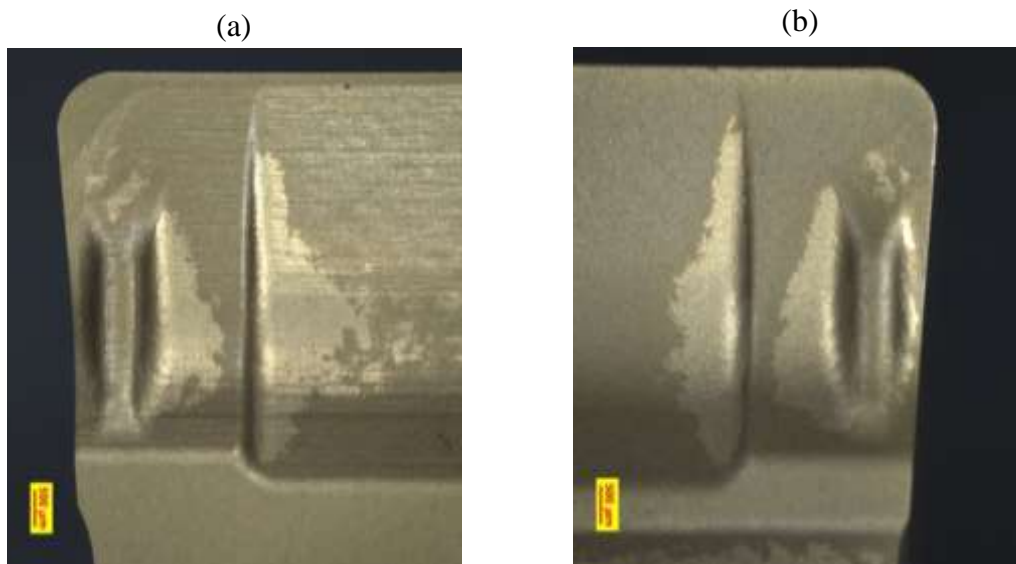


Obr. 44: Výsledek tvorby utvařeče laserem v nástroji z SK (materiál TH10): (a) reálná podoba utvařeče; (b) diferenční analýza utvařeče vyrobeného laserem od výchozího CAD modelu (škála difference v rozsahu 0 až 6,5 μ m).

Cílem jiného výzkumu bylo vytvořit laserem prototypový utvařeč na zapichovací VBD ze slinutého karbidu pro následné ověření funkčnosti provedení geometrie laserem z hlediska utváření třísky. Optimalizačním kritériem výroby zde byla minimalizace času výroby při zajištění ještě akceptovatelné kvality provedení. Současně byl sledován vliv

následných technologických úprav nástroje na změnu kvality provedení. Stejně jako v předchozím případě byly i zde použity podmínky pro atermální ablaci na druhé harmonické vlnové délce, při délce pulsu v jednotkách pikosekund.

Je-li porovnána výsledná kvalita utvařeče laserovaného a toho vyrobeného ve stejné podobě konvenční technologií (lisování a slinování), je průkazné, že kvalita povrchu laserované varianty nástroje je výrazně nižší. V detailech snímků upichovací VBD ze slinutého karbidu (Obr. 45) je rozdíl v kvalitě zřejmý, a to i po následných technologiích pískování a povlakování. Je ovšem evidentní, že u laserovaného utvařeče bylo dosaženo ostřejších kontur 3D tvaru a tedy i větších detailů provedení, a to včetně výrazněji nižšího poloměru ostří (méně než 10 μm). Lisovaná varianta utvařeče vykazovala poloměr ostří na konci procesu 17 μm .

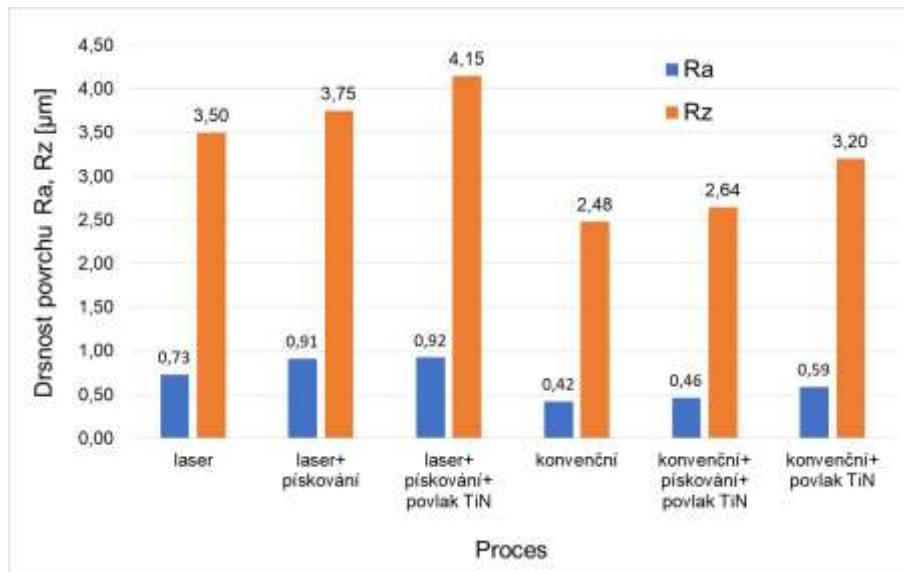


Obr. 45: Porovnání kvality utvařeče zapichovací VBD ze slinutého karbidu vyrobeného: (a) laserem; (b) lisováním a slinováním. Následnými operacemi obou vzorků bylo pískování a povlakování.

Skutečnost horší jakosti povrchu utvařeče vytvořeného laserem v daném případě dokládá i graf hodnot parametrů drsnosti povrchu R_a a R_z měřených opakovaně na ploše utvařeče kolmo na ostří na vzorcích v různých fázích jejich výroby - Obr. 46. Byl-li použit pro tvorbu makrogeometrie laser (proces „laser“), má povrch vyšší drsnost než v případě technologie lisování a slinování („konvenční“), a to i o desítky procent. Takový výchozí stav se promítá i do podoby povrchu po následných technologiích zpracování. Vyšší drsnost povrchu makrogeometrického prvku na nástroji vyrobeného laserem proto není následnými úpravami jednoduše eliminovatelná. Naopak, jak je ukázáno, může se dále

zvyšovat. Stejný trend byl ovšem zaznamenán i pro konvenční způsob výroby utvařeče.

V konečné podobě, tedy po technologiích pískování a povlakování, vykazoval laserovaný vzorek téměř dvojnásobně vyšší hodnoty parametru drsnosti povrchu R_a v porovnání s komerčně vyráběnou variantou. Nicméně analýzou procesu utváření třísky bylo ověřeno, že z hlediska funkce byly oba typy vzorků srovnatelné. Kvalita zpracování tedy byla pro dané použití utvařeče dostatečná. Nižší drsnosti povrchu laserovaného vzorku by bylo možné docílit relativně snadno, avšak za podmínek vedoucích ke snížení produktivity výroby.

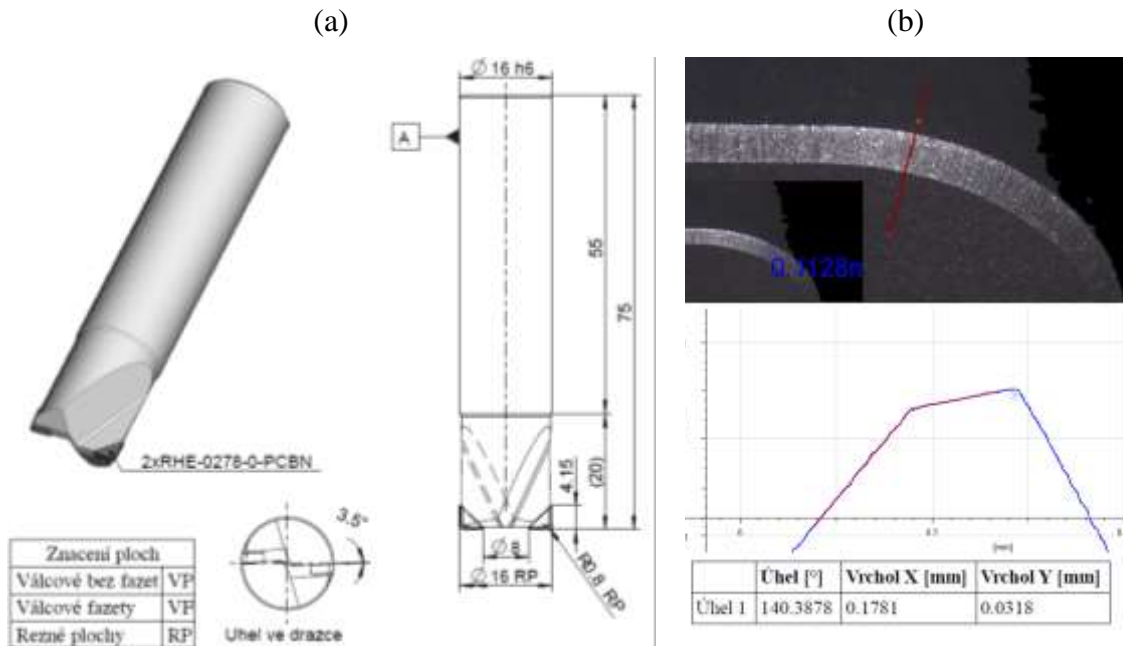


Obr. 46: Vliv technologie výroby a následného zpracování makrogeometrie břitu na drsnost povrchu plochy čela zapichovací VBD ze slinutého karbidu.

ROTAČNÍ PKNB NÁSTROJE

Výzkum vedený v oblasti zpracování PKNB laserem je soustředěn na realizaci nástrojů s břity z HcBN materiálu pro obrábění zejména kalených ocelí a slitin na bázi niklu. U takových nástrojů je laserem tvořena hřbetní plocha a negativní čelní fazeta. V případě smysluplného uplatnění lze vytvořit i funkční utvařeč třísky.

Zde uvedený příklad výzkumu je zaměřen na tu část vývoje nástroje, která byla věnována testování funkčnosti realizovaných prototypů řezných nástrojů. Prototypem byl frézovací nástroj s laserovanou hřbetní a čelní plochou (fazetou) břitu (Obr. 47). Původní konvenční alternativa tohoto nástroje byla v podobné makrogeometrii vyrobena z LcBN materiálu broušením. Nástroj z vysokobsahového PKNB by bylo možné vyrobit v navržené podobě a na dostupných zařízení broušením obtížně a relativně neefektivně.



Obr. 47: Vyvinutý prototyp frézovacího nástroje s makrogeometrií vyrobenou laserem: (a) celková podoba nástroje; (b) detail provedení geometrie břitu – pohled z čela břitu na fazetu a ostří (nahore), profil břitu s vyjádřením úhlu fazety o délce přibližně 0,1 mm (dole). [78]

Prototyp laserovaného nástroje byl testován v konkrétní aplikaci na životnost břitu při suchém nesousledném frézování oceli 19552.4 s tvrdostí 55 HRC podmínkami: $v_c = 700 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,05 \text{ mm}$, $a_e = 12 \text{ mm}$ a $a_p = 0,2 \text{ mm}$. U nástroje se projevil přínos vlastností HcBN materiálu ve zvýšení trvanlivosti laserovaného břitu na 12,9 min z původních 5,5 min pro broušený nástroj z LcBN materiálu se stejnou geometrií břitu. Silové zatížení generované oběma nástroji bylo přitom srovnatelné. Vyvinuté provedení nástroje umožnilo jeho využití v praktické realizaci v podobě plnohodnotné náhrady procesu broušení u dělicí roviny formy z korozivzdorné oceli.

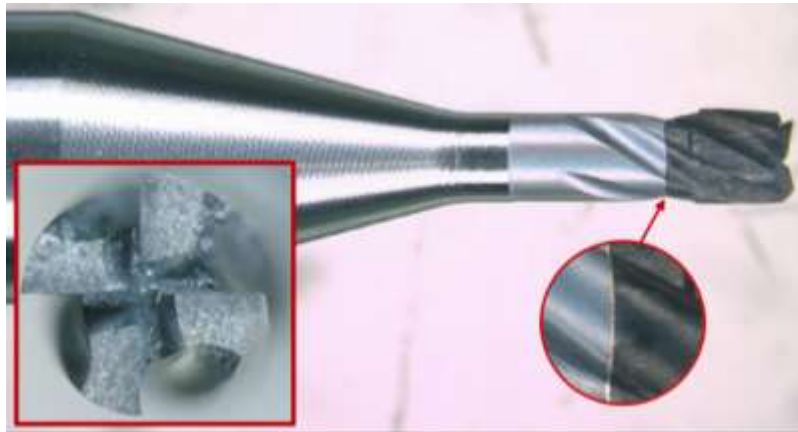
Specifické záběrové podmínky rotačních nástrojů z PKNB vedou na další zcela originální směry použití laseru pro tvorbu nástrojů z tohoto materiálu. Jedním z nich může být tvorba mikroutvařeče třísek přímo na negativní čelní fazetě nástroje. Tato myšlenka je rozpracovávána v navazujících výzkumech.

ROTAČNÍ NÁSTROJ Z MONOLICKÉHO CVD-D

Posledním uvedeným příspěvkem v této kapitole je vývoj malého frézovacího nástroje s průměrem řezné části 1 mm a čtyřmi břity ve šroubovici – Obr. 48. Toto a další možná provedení a způsoby jejich výroby jsou předmětem vlastního patentu [144] a

souvisejícího užitého vzoru [145].

Unikátnost řešení spočívá v provedení frézy, kdy je řezná část vyrobena z monolitického CVD diamantu ve specifické geometrii (obdobné broušené monolitní čelní válcové fréze z SK) a pouze s použitím laseru (podmínky studené ablace, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $\tau_p < 15 \text{ ps}$) a také ve způsobu připojení monolitické části ke zbytku nástroje. Monolitická část je vakuově a v automaticky řízeném procesu napájena na těleso ze slinutého karbidu. Jiným způsobem, než laserem by byl nástroj v této podobě nevyrobitelný.



Obr. 48: Fréza průměru 1 mm se čtyřmi břity ve šroubovici z monolitického CVD-D. Laserem vyrobena řezná část nástroje a část navazujícího tělesa. V detailech je ukázáno provedení pájeného spoje mezi diamantem a SK a axiální pohled na břity frézy. [146]

Byl vytvořen čtyřbřitý nástroj malých rozměrů, který kombinuje výrazně pozitivní geometrii břitu generující nízké mechanické a tepelné zatížení a supertvrký a otěruvzdorný řezný materiál. Aplikační využití spočívá ve vysokorychlostním mikroobrábění hliníkových slitin, plastů a kompozitních materiálů. V případě jiného provedení makrogeometrie, by mohl být nástroj této koncepce využitelný i pro obrábění slinutého karbidu. Stanovení reálného potenciálu tohoto řešení nástroje je předmětem pokračujících výzkumů.

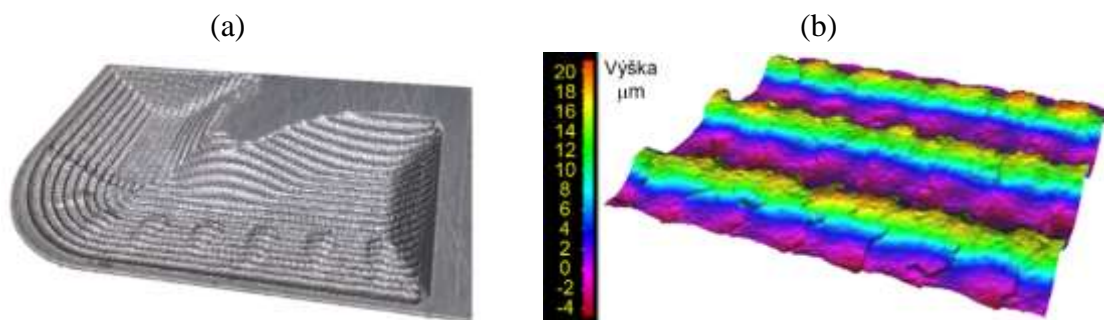
5.6.5 TVORBA MIKROGEOMETRIE BŘITU LASEREM

Pozornost vlastních výzkumně-vývojových aktivit v této oblasti je soustředěna do dvou hlavních směrů. Prvním je **strukturování aktivní části čelních ploch nepovlakovaných nástrojů ze slinutého karbidu**. Pro taková řešení ovlivňující proces tvorby třísky jsou voleny dva základní přístupy: (i) tvorba útvarů pro možnost lepšího přístupu a retence procesního média a (ii) tvorba pravidelně se opakujících vzorů různého designu pro změnu kontaktních podmínek mezi čelem břitu a třískou. Druhou oblastí je **výzkum vlivu**

použití laseru na kvalitu mikrogeometrie bříty nástrojů z PKNB a PKD a dopady jejich provedení pro obráběcí proces. Hlavním cílem vlastních výzkumů je na základě poznatků z interakce laseru s materiálem dosažení funkčních prototypů nástrojů se zvýšenou řezivostí a z toho plynoucím potenciálem pro praktické uplatnění.

STRUKTUROVÁNÍ ČELNÍCH PLOCH SLINUTÝCH KARBIDŮ

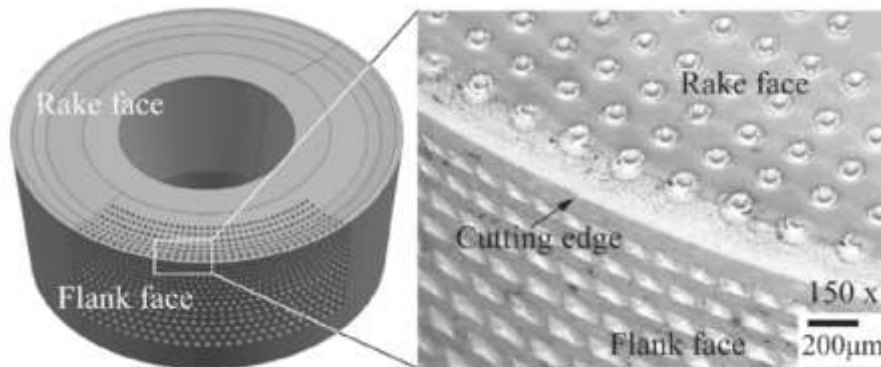
První z ukázek výsledků vlastního výzkumu je tvorba liniových struktur vytvořených na utvařeči bříty VBD ze slinutého karbidu - Obr. 49. Jak makro-, tak i mikrogeometrie bříty byla vytvořena laserem. Utvařeč byl v SK (označení TH10) nejprve vyroben za podmínek studené ablace laserem s délkou pulsu menší než 10 ps. Následně byla vytvořena liniová struktura kopírující tvar řezné hrany. Pro vysokou produktivitu tvorby struktury byl použit laser s parametry: $\tau_p = 120$ ns, $\lambda = 1064$ nm, $P_{ave} = 15$ W, $f_p = 2500$ Hz, $v_f = 100$ mm·s⁻¹. Rozměry výsledné struktury byly přibližně: hloubka = 20 μ m a rozteč = 75 μ m.



Obr. 49: Vytvořená liniová struktura laserem na nástroji z SK: (a) reálná podoba utvařeče s nanesenou strukturou – VBD s poloměrem špičky 0,8 mm; (b) rozměrová analýza detailu struktury. [147]

Výsledky testů obráběním při podélném soustružení slitiny Ti6Al4V bez procesní kapaliny tímto prototypem nástroje prokázaly snížení třecí složky síly řezání až o 25 % (v závislosti na konkrétních řezných podmínkách) oproti variantě bříty s utvařečem bez struktury. Test metodou „Pin-on-Disc“ prokázal, že tato struktura má přínos i pro odolnost proti abrazivnímu opotřebení bříty. V neposlední řadě bylo dosaženo snížení kontaktní plochy mezi čelem bříty a zadní stranou třísky (ovlivnění oblasti sekundární plastické deformace), čímž lze předpokládat tok menšího objemu tepla do nástroje a tím redukcí teplem iniciovaných degradačních procesů řezného materiálu. Test dále potvrdil, že kvalita zpracování výsledné struktury nebyla za daných podmínek tak důležitým faktorem, jako samotná přítomnost struktury na nástroji. [147]

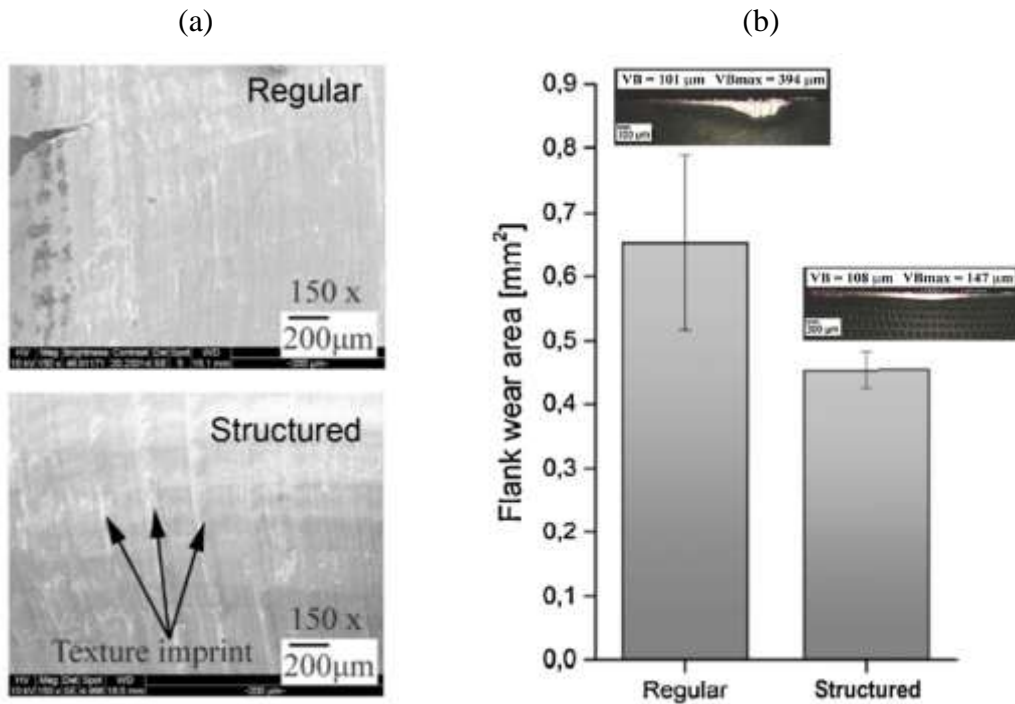
Druhá oblast výzkumných aktivit v tématu je spojena s vývojem optimální struktury povrchu kruhové VBD ze slinutého karbidu pro použití vysokotlakého chlazení řezného procesu (z čela i hřbetu břitu) při čelním soustružení slitiny Inconel 718. V porovnání různých variant provedení struktur s nástrojem bez struktury vykázala nejlepší vlastnosti kombinace dvou různých typů struktur na jednom nástroji – struktura rastru důlků s hrubými okraji na čele břitu a inverzních pyramid na hřbetě břitu (Obr. 50). [85]



Obr. 50: Model a detail zpracování vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu (typ RCMX 1204) se dvěma typy struktur na čele (Rake face) a hřbetě (Flank face) břitu pro ovlivnění procesu tvorby třísky. [85]

„Důlky“ na čele břitu jsou při obrábění vyplněny obráběným materiálem (zde s nízkou tepelnou vodivostí), což tvořilo zárodky výstupků materiálu obrobku působících na nově tvořenou plochu třísky. Existence těchto výstupků je nepřímo průkazná ze snímků zadní strany třísky – Obr. 51a. Ve výsledku je dosaženo odklonu třísky od čela břitu a jeho lepší ochrany před působením tepla. V kombinaci s důsledkem v podobě účinnějšího chlazení břitu je sníženo i opotřebení čela břitu.

Struktury v podobě inverzních pyramid na hřbetě břitu zvyšují aktivní plochu povrchu nástroje, která může být ochlazována řezným prostředím. Tím je docíleno snížení teploty nástroje a snížení intenzity opotřebení břitu. Jak ukazuje graf na Obr. 51b, je ve výsledku oproti variantě břitu bez povrchových struktur zvýšena odolnost proti opotřebení v průměru o přibližně 30 %.

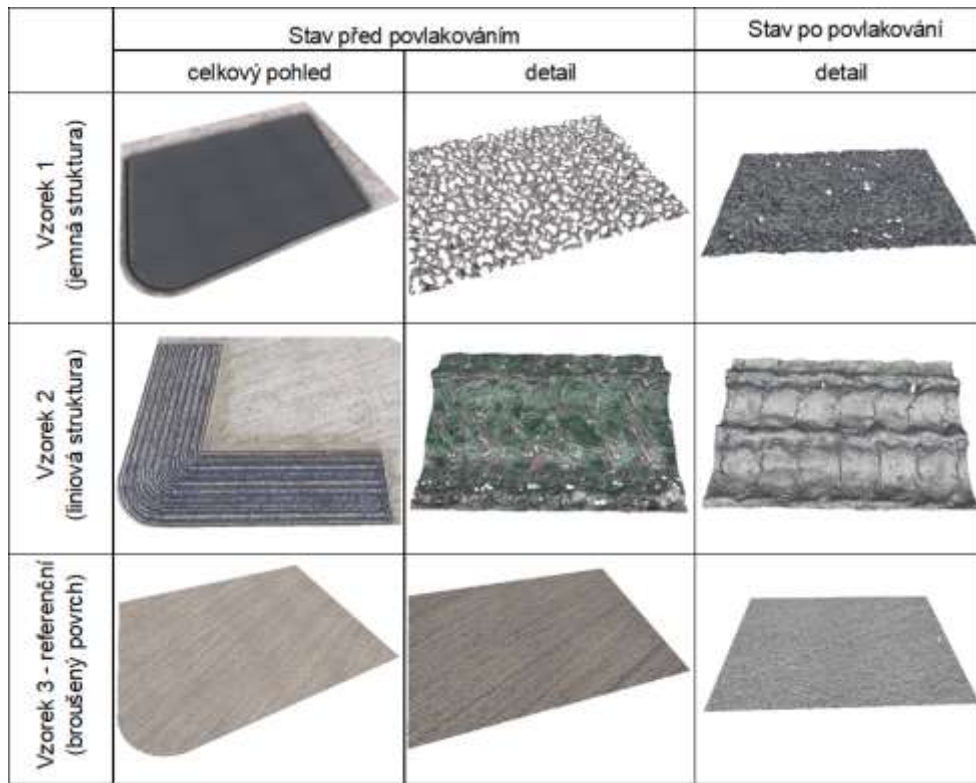


Obr. 51: Výsledky testování řezivosti strukturovaného nástroje: (a) porovnání zadní strany třísky po obrábění standardním (Regular) a strukturovaným (Structured) nástrojem se zvýrazněnými otisky výstupků (Texture imprint); (b) Velikost plochy opotřebení na hřbetě pro obě varianty nástrojů se zobrazením snímku opotřebení hřbetu břitu a hodnot střední (VB) a maximální (VBmax) velikosti plošky opotřebení po stejné době obrábění. [85]

V rámci **třetí skupiny aktivit** byl dále zkoumán přínos struktur na povrchu nástroje pro jeho řezivost [147]. Byl testován vliv dvou různých typů struktur včetně následného povlakování na proces utváření třísky, sil při obrábění a trvanlivost břitu v porovnání s konvenčně vyrobeným vzorkem s povlakovaným broušeným povrchem. Zvolenými podmínkami testů bylo podélné soustružení slitiny Ti6Al4V s chlazením olejovou emulzní kapalinou. Řezným materiálem byl slinitý karbid s označením TH10 v podobě VBD (CNMA 120408 s komerčním povlakem nACRo⁴) v nožovém držáku PCLNR 3225. Podoba vybraných vzorků je na Obr. 52.

Bylo potvrzeno, že struktura na čele břitu může mít výrazný vliv na proces utváření třísky (Obr. 53). Při doporučených podmínkách ($f_{or} = 0,25$ mm, $a_p = 2$ mm a $v_c = 40$ m·min⁻¹) vznikala v případě komerčního referenčního vzorku tříska plynulá soudržná, klasifikovaná jako nevhodně utvářená. Pro strukturované nástroje bylo opakovaně docíleno tvorby krátké, článkovité třísky, dělené i po několika milimetrech délky. Tento typ třísky je klasifikován jako vhodně utvářená a je výsledkem změn třecích podmínek mezi třískou a čelem břitu, a to včetně zmenšení plochy kontaktu třísky a čela břitu.

Pro řeznou rychlost $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ již struktura Vzorku 2 pozbyla z pohledu vznikající třísky svoji funkčnost, nicméně typ struktury na Vzorku 1 byl funkční i za těchto podmínek.

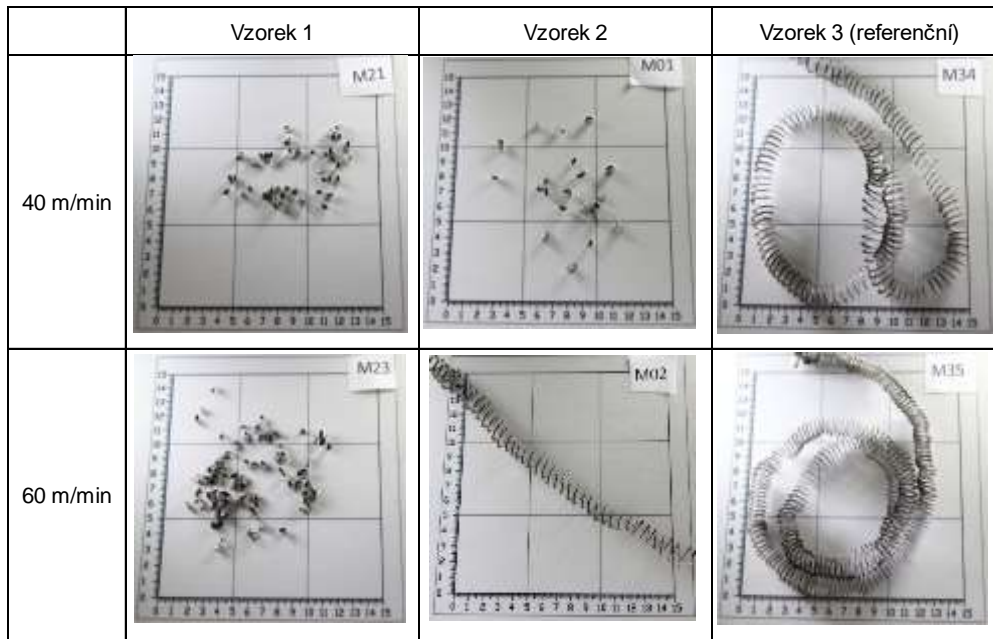


Obr. 52: Přehled vzorků pro testy stanovení vlivu strukturování čela břitu na řezný proces – strukturování čela břitu VBD CNMA 120408. [147]

Popsané chování bylo možné potvrdit i pozorováním velikosti sil při obrábění. Pro Vzorek 1 bylo opakovaným měřením vůči Vzorku 3 zaznamenáno snížení velikosti celkové síly řezání F o 6 % pro $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a o 4 % pro $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Přičemž u jednotlivých složek sil byl pokles:

- F_c o 3 %, F_f o 17 %, F_p o 9 % při $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$;
- F_c o 4 %, F_f o 15 %, F_p o 12 % při $v_c = 60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Dosažené výsledky poklesu sil při obrábění vedou ke sníženému mechanickému i tepelnému namáhání břitu. Na druhou stranu výzkum ukázal, že vytvořené struktury nemusí být v průběhu obrábění dlouhodobě stabilní a dochází k jejich průběžné a různé intenzivní degradaci a ztrátě funkčnosti. Na tuto oblast je proto třeba orientovat návazný výzkum.



Obr. 53: Přehled tvarů třísek pro různou kombinaci struktury povrchu čela VBD a dvě řezné rychlosti. [147]

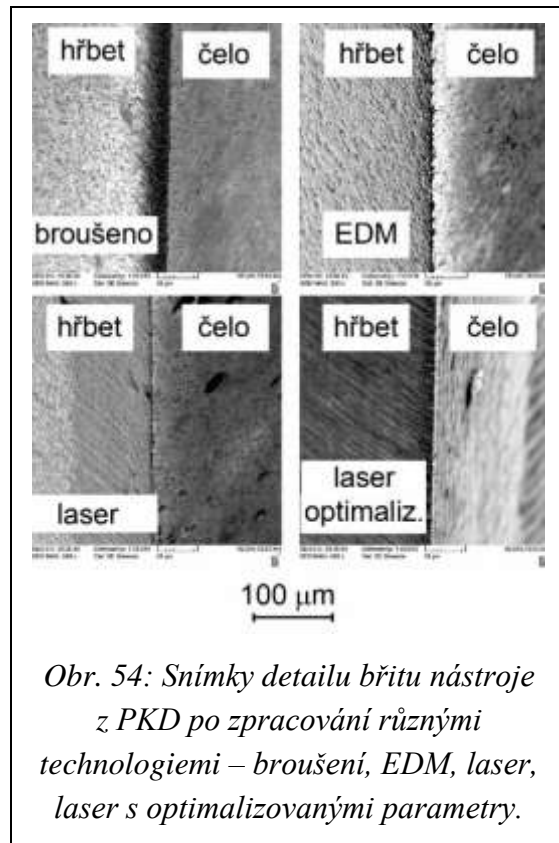
Výzkum mikrogeometrie břitu nástrojů z

PKD vede na výsledky v oblasti kvality provedení břitu vytvořeného laserem. [146]

V případě nástroje určeného pro obrábění materiálů se sklonem k adhezi byly zkoumány možnosti zvýšení kvality ostří při dosažení jeho minimálního poloměru a minimalizaci drsnosti povrchu navazujících hřbetních a čelních ploch. Porovnání řezné hrany vyrobené optimalizovaným laserovým procesem a hrany identických břitů vyrobených metodami broušení, EDM a neoptimalizovanou technologií řezání laserem je uvedeno na Obr. 54.

Zpracování technologiemi broušení a EDM vede v porovnání s laserovými

technologiemi k prokazatelně hrubší struktuře (velké členitosti) řezné hrany a k jejímu většímu poloměru, stejně jako k jednoznačně vyšší drsnosti navazujících ploch hřbetu i čela. Proces opracování laserem lze optimalizovat do stavu, kdy je řezná hrana bez



Obr. 54: Snímky detailu břitu nástroje z PKD po zpracování různými technologiemi – broušení, EDM, laser, laser s optimalizovanými parametry.

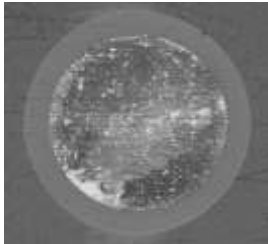
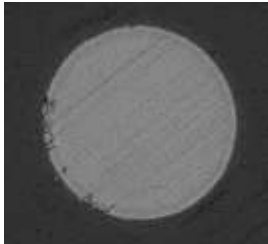
přítomnosti makroskopických defektů a s poloměrem ve velikosti jednotek mikrometrů (snímek vpravo dole $\rho = 4,8 \mu\text{m}$).

Přínos kvality zpracování nástroje (čelní válcová fréza s pájenými břity z materiálu CTB010) s laserovanou geometrií břitu byl v porovnání s ostatními variantami prokázán při frézování hliníkové slitiny. Kvalitnější provedení ostří a navazujících ploch vedlo ke snížení velikosti sil při obrábění, a ke snížení drsnosti obrobeného povrchu. V případě použití vyvinutého nástroje pro frézování vlákny vyztuženého kompozitního materiálu G/PA12 byla výrazně snížena i velikost tvorby delaminace hran testovacích kusů formou otřepů.

5.6.6 ODSTRAŇOVÁNÍ OCHRANNÉHO POVLAKU BŘITU LASEREM

Výzkum a vývoj technologie efektivního odstraňování povlaků laserem je v rámci vlastních aktivit orientován dvěma hlavními směry. Prvním je doplnění prozatím nedostatečného stavu poznání interakce laserového záření a vybraných typů povlaků pro řezné nástroje, a to s ohledem na pohltivost laserového záření a velikost ablačního prahu povlaků. Druhým směrem výzkumu je hledání parametrů laseru umožňujících efektivní a kvalitní odstranění povlaku buď výkonným krátkopulsním laserem (termálně) nebo ultrakrátkopulsním laserem (atermálně). Výsledky výzkumů jsou průběžně publikovány, např. v [148].

Tab. 8: Základní charakteristiky povlaků použitých pro experimenty.

Vzorek	AlTiN	DLC - C
Složení	AlTiN	CrN + DLC
Tloušťka povlaku [μm]	2,9	2,6 (1,1 CrN + 1,5 DLC)
Tvrdość [HV]	3000	675
Součinitel tření proti oceli [-]	0,6	0,08
Podkladový materiál	X155CrVMo12	X155CrVMo12
Struktura povlaku (výsledek metody kalotest)		

Pro výzkum byly vybrány povlaky typu AlTiN a DLC-C připravené technologií magnetronového naprašování firmou AdvaMat, s.r.o. Výběr povlaků byl proveden vzhledem k možnostem použití pro řezné nástroje a současně pro vzájemně velmi odlišné složení a vlastnosti. Povlak AlTiN, případně jeho různé modifikace, je v použití pro řezné nástroje velmi rozšířen. U povlaku typu DLC-C stále roste počet aplikací, ale jeho odstraňování konvenčními postupy je náročné především kvůli jeho chemické inertnosti. Vlastnosti povlaků použitých pro výzkum jsou shrnuty v Tab. 8.

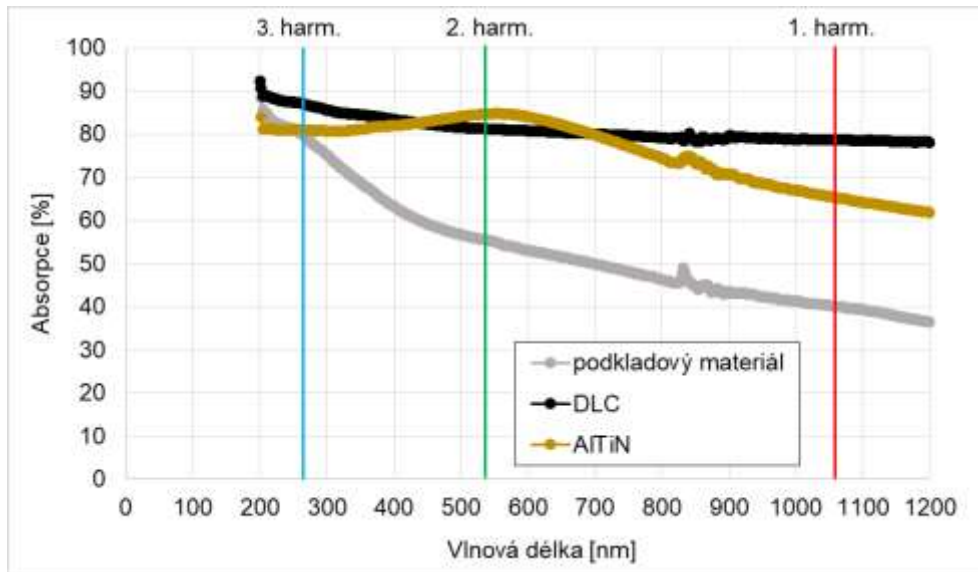
POHLTIVOST ZÁŘENÍ A ABLAČNÍ PRÁH VYBRANÝCH POVLAKŮ

Stanovení procentuální **pohltivosti laserového záření** proběhlo na stejném zařízení a pracovišti, jako v práci dříve popsany experiment pohltivosti záření řeznými materiály. Jak dokládá Obr. 55, vykazuje DLC povlak (černá barva) mírně rostoucí trend se zkracující se vlnovou délkou záření. Tento povlak má velmi dobrou pohltivost i pro první harmonickou vlnovou délku záření. V případě tmavého (modročerného) povlaku typu AlTiN byla pro 1.H délku pohltivost stanovena na přibližně 65 %, zatímco pro 2. a 3.H byla pohltivost blízká hodnotám pro povlak DLC. Z tohoto pohledu se jeví použití druhé harmonické vlnové délky pro odstraňování obou typů povlaků jako nejvhodnější.

Pro interpretaci výsledků je opět třeba zmínit, že hodnoty absorpce povlaků jsou stanoveny za podmínek prvního kontaktu paprsku s materiálem o konkrétním stavu povrchu po předchozím zpracování. Výchozí drsnost povrchu povlaků byla opakovaným měřením určena takto: $Ra = 0,05 \mu\text{m}$, $Rz = 0,32 \mu\text{m}$ pro AlTiN, $Ra = 0,06 \mu\text{m}$, $Rz = 0,4 \mu\text{m}$ pro DLC-C.

Za účelem porovnání hodnot a uvažování možného průniku záření až pod povlak byla stanovena i pohltivost podkladového materiálu. Ve srovnání s oběma povlaky je pro druhou a první harmonickou vlnovou délku pohltivost podkladového materiálu výrazně nižší (důsledek odlišného chemického složení a struktury, šedá barva, broušený povrch s drsností $Ra = 0,8 \mu\text{m}$; $Rz = 3,24 \mu\text{m}$). Skutečnost, že ocelový podklad vzorků pohlcuje záření méně, než povlaky je ovšem pro potřebu odstranění povlaku pozitivní výsledek. Při renovaci řezných nástrojů odpovlakováním je totiž jedním z důležitých požadavků, aby byl procesem co možná nejméně ovlivněn povrch podkladového materiálu.

Dříve v práci stanovený průběh pohltivosti záření slinutým karbidem vykazuje podobný charakter jako pro povlak AlTiN. To může vést ke komplikacím s případným ovlivněním povrchu materiálu pod deponovaným povlakem při odstraňování povlaku laserem.



Obr. 55: Závislost pohltivosti laserového záření na jeho vlnové délce pro povlaky AlTiN a DLC-C a podkladový materiál.

V dalším kroku bylo uskutečněno experimentální **stanovení ablačního prahu** obou povlaků i podkladového materiálu. Stejně jako pro měření F_{th} na řezných materiálech byl použit laserový zdroj Pharos (Příloha 2), zde s nastavením: $\lambda = 1030$ nm, $\tau_p = 245$ fs. Pro povlak typu DLC-C byla za těchto podmínek stanovena prahová hodnota ablace $0,143$ J·cm⁻² a pro vzorek AlTiN mírně vyšší, a sice $0,196$ J·cm⁻². Určité porovnání hodnot s literaturou je možné pouze na základě údajů v [37], kdy pro povlaky typu Ti(C, N) a TiN byly naměřeny ablační prahy $0,4$ J·cm⁻², resp. $0,1$ J·cm⁻². Ablací prahy povlaků pro řezné nástroje proto mohou být podobné, a to i přes jejich velmi rozdílnou strukturu, chemické složení a vlastnosti. Pro potvrzení tohoto závěru je však třeba dále doplňovat znalosti interakce laseru o různých parametrech s různými typy povlaků.

Prahová hodnota podkladového materiálu vzorků byla stanovena na $0,202$ J·cm⁻². Rovněž již dříve v práci uvedené naměřené hodnoty pro slinutý karbid (rozsah $0,1$ až $0,2$ J·cm⁻²) jsou blízké hodnotám pro oba povlaky. Fakt blízkosti prahových hodnot podkladového materiálu a povlaků může komplikovat proces odpovlakování řezných nástrojů laserem.

ODSTRANĚNÍ VYBRANÝCH POVLAČŮ LASEREM

Aktivítám vedoucím ke zvládnutí technologie odstraňování povlaků laserem je pro jejich vysoký potenciál budoucího uplatnění věnováno větší úsilí. Pro výzkum byly zvoleny stejné povlaky jako v předchozí studii, které byly nanášeny na plochých vzorcích ze

stejného podkladového materiálu. Cílem testů bylo v širším spektru parametrů krátkopulsního laseru ($\tau_p = 120$ ns, $r = 0,09$ mm, $P_{ave} = 50$ W), vhodného mimo jiné pro technologii laserového čištění, nalézt závislost efektivity odstranění povlaku na použité intenzitě energie F . Efektivita procesu byla na jedné straně hodnocena jeho produktivitou (rychlost odstranění povlaku z jednotkové plochy) a na straně druhé kvalitou odstranění povlaku (vzhled a parametry drsnosti povrchu). Hlavní výsledky tohoto výzkumu jsou předmětem publikace [148].

Pro každý z povlaků bylo realizováno jeho odstranění při pěti různých podmínkách nastavení procesu. Překrytí pulsů bylo konstantní – podélné i příčné 70 %. Stejně tak byl konstantní průměr svazku v ohnisku (0,18 mm). Konkrétní intenzita energie byla nastavena kombinací průměrného výkonu, frekvence pulsů a skenovací rychlosti, a to na základě výsledků prvotních experimentů. Rozsah hodnot intenzity energie na jednotku plochy byly stanoveny v oblastech vysoko nad ablačním prahem povlaku s ohledem na požadavek odstranit vždy celou tloušťku povlaku při jednom přejezdu paprsku.

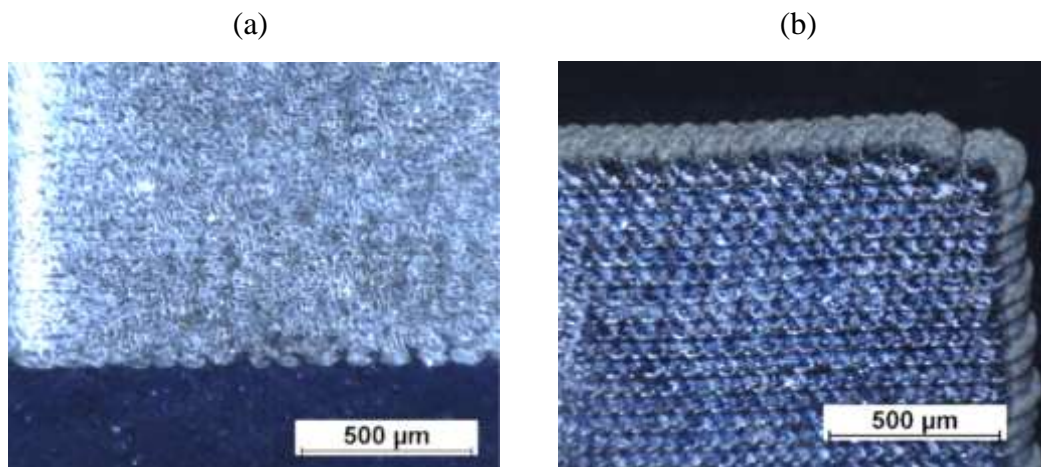
Výsledky experimentů pro povlak AlTiN jsou zachyceny v Tab. 9. První čtyři testy byly realizovány jedním přejezdem laseru. V testu č. 5 byl zkoumán i přínos dodatečného dokončovacího přejezdu na ploše s již z větší části odstraněným povlakem.

Tab. 9: Přehled nastavení a výsledky testů odstranění povlaku AlTiN laserem.

Povlak AlTiN	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	
Průměrný zářivý výkon laseru – P_{ave} [W]	37	37	25	37	37	37
Frekvence pulsů – f_p [kHz]	10	8	5	5	5	50
Energie v pulsu – E_p [mJ]	3,7	4,6	5	7,4	7,4	0,74
Skenovací rychlost – v_f [mm·s ⁻¹]	540	432	270	270	270	2700
Intenzita energie – F [J·cm ⁻²]	14,54	18,18	19,65	29,08	29,08	2,91
Doba odstranění povlaku z 1 cm ² [s]	3,4	5,3	7,7	7,6	7,6	2,5
Max. hloubka vrstvy na 1 přejezd [μm]	4,6	4,0	3,9	4,4	5,0	
Parametr drsnosti povrchu S_a [μm]	1,3	0,56	1,22	1,28	1,18	
Parametr drsnosti povrchu S_z [μm]	6,3	3,2	5,6	6,9	5,5	

Prvním poznatkem je, že povlak standardní tloušťky používané pro řezný nástroj lze z velké části jeho objemu skutečně odstranit v rámci jednoho přejezdu laseru s nastavením pro termální ablaci. Za použitých podmínek je produktivita technologie vysoká – byly třeba jen řádově jednotky sekund (3,4 až 10 s) na odstranění povlaku z plochy 1 cm^2 .

Kvalitu odstranění povlaku lze orientačně deklarovat prostřednictvím optického mikroskopu, kdy je tmavý povlak odebrán až na světlý podkladový materiál – Obr. 56. Jak snímky dokládají, může být kvalita odstranění různá v závislosti na použitých parametrech laserového procesu. Nastavení procesu proto bude záviset i na předpisu požadavku kvality povrchu před opětovným povlakováním. Následně byla kvalita odstranění stanovena ještě EDS analýzou a pozorováním na elektronovém mikroskopu. Byla sledována rezidua prvků tvořících povlak a kyslíku v závislosti na použitých parametrech laseru. Nejmenší množství prvků povlaku bylo na povrchu zaznamenáno při parametrech z testů č. 1 a 2, tedy při nejnižších použitých intenzitách energie.

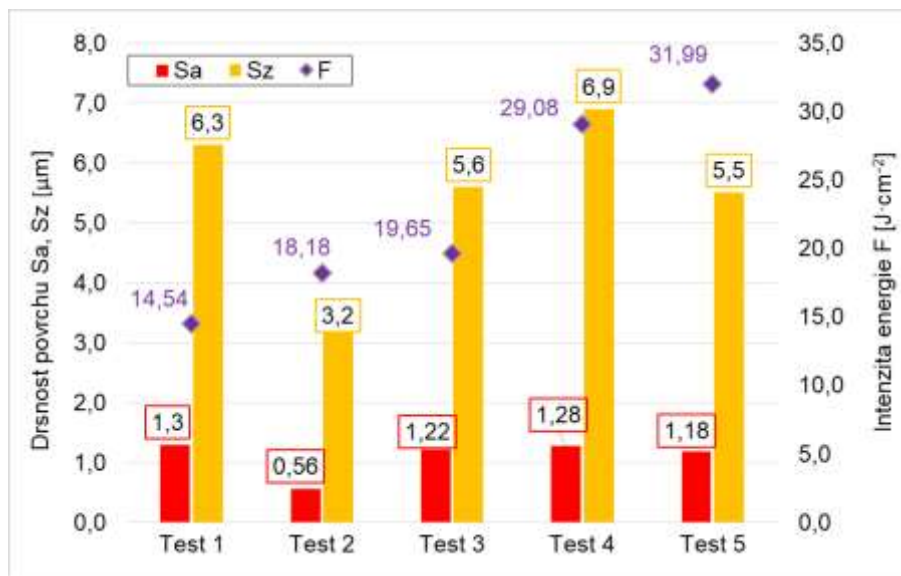


Obr. 56: Porovnání dvou povrchů vzniklých odstraněním povlaku AlTiN laserem (šedivá oblast): (a) povrch z prvotních testů při $F = 3,64 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b) povrch po testu č. 2, tedy při $F = 18,18 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Nepřímo lze indikovat odstranění vrstvy také hloubkou ablace pod původním povrchem. Maximální hloubka odebrané vrstvy jedním přejezdem byla pro všechny testy v rozsahu 3,9 až 5,0 μm . Znamená to, že při tloušťce povlaku 2,9 μm docházelo i k úběru a ovlivnění podkladového materiálu. Největší hloubka byla zaznamenána pro test č. 5.

Hodnocení kvality odstranění povlaku bylo provedeno i na základě stanovení parametru drsnosti povrchu S_a a S_z v závislosti na intenzitě energie - Obr. 57. Ukázalo se, že v takto vysokých intenzitách energie není jednoznačný vztah mezi intenzitou a drsností povrchu.

Při nejnižší intenzitě dané kombinací větší skenovací rychlosti, ale i frekvence pulsů byla drsnost povrchu nejvyšší. Zvýšení intenzity vedlo nejprve k výraznému poklesu drsnosti a s dalším zvyšováním opět k jejímu nárůstu. V testu s dodatečným dokončovacím přejezdem laseru (Test 5) bylo dle předpokladu dosaženo snížení drsnosti povrchu, byť jen mírného. Porovnáme-li drsnost plochy po odstranění povlaku laserem s původním povrchem před povlakováním ($Sa = 0,803 \mu\text{m}$, $Sz = 14,81 \mu\text{m}$) je zřejmé, že i při vysokých hodnotách intenzity energie laseru byl povrch z hlediska velikosti parametrů drsnosti podobný (vyšší Sa a nižší Sz).



Obr. 57: Vztah mezi parametry drsnosti povrchu Sa a Sz vzniklého po odstranění povlaku AlTiN laserem a použitou intenzitou energie.

Pro povlak typu DLC-C jsou podmínky a hlavní výsledky testů zachyceny v Tab. 10. Stejně jako pro předchozí povlak byly první čtyři testy realizovány jedním přejezdem, zatímco v posledním testu byl zkoumán přínos dokončovacího přejezdu.

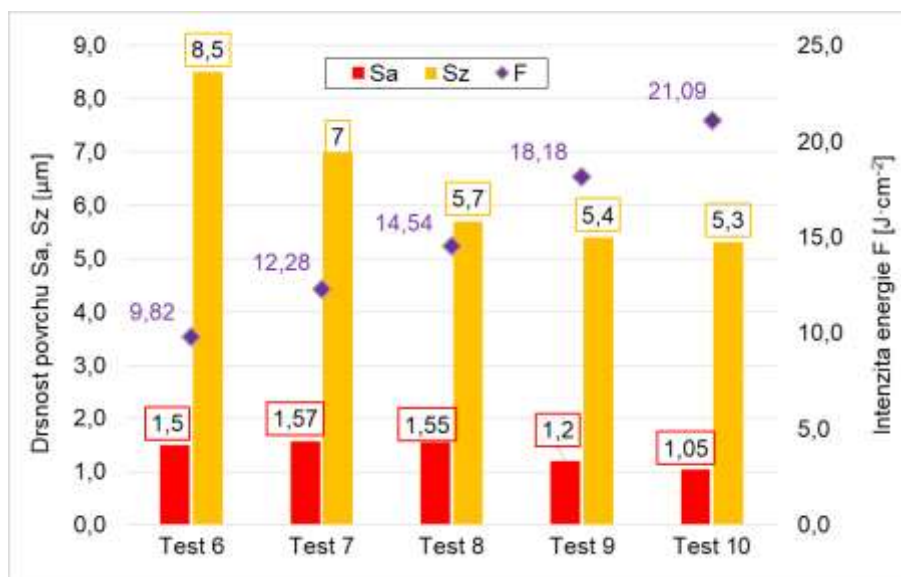
Tento typ povlaku je možné také odstraňovat v celé jeho tloušťce ($2,6 \mu\text{m}$) jedním přejezdem laseru. Použité nastavení vedlo k době odstraňování povlaku z plochy 1 cm^2 v rozmezí 3,4 až 7,8 sekundy. Maximální hloubka odebrané vrstvy jedním přejezdem přitom byla pro všechny testy v rozsahu $5,0$ až $5,6 \mu\text{m}$. Tloušťka povlaku tak byla v maximech překonána přibližně dvojnásobně. Největší hloubka odstranění byla zaznamenána opět pro test s dodatečným dokončovacím přejezdem.

EDS analýza ploch po odstranění povlaku prokázala přítomnost prvků tvořících povlak (Cr, N, C). Nejlepších výsledků z tohoto pohledu bylo dosaženo pro testy č. 8 a 9.

Tab. 10: Přehled nastavení a výsledků testů odstranění povlaku DLC-C laserem.

Povlak DLC-C	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10	
Průměrný zářivý výkon laseru – P_{ave} [W]	20	25	37	37	37	37
Frekvence pulsů – f_p [kHz]	8	8	10	8	8	50
Energie v pulsu – E_p [mJ]	2,5	3,125	3,7	4,625	4,625	0,74
Skenovací rychlost – v_f [mm·s ⁻¹]	432	432	540	432	432	2700
Intenzita energie – F [J·cm ⁻²]	9,82	12,28	14,54	18,18	18,18	2,91
Doba odstranění povlaku z 1 cm ² [s]	5,3	5,3	3,4	5,3	5,3	2,5
Max. hloubka vrstvy na 1 přejezd [μm]	5,0	5,2	5,2	5,4	5,6	
Parametr drsnosti povrchu S_a [μm]	1,50	1,57	1,55	1,20	1,05	
Parametr drsnosti povrchu S_z [μm]	8,5	7,0	5,7	5,4	5,3	

Parametry plošné drsnosti povrchu S_a a S_z měly s nárůstem intenzity energie odlišný průběh, viz Obr. 58. Charakteristika S_z byla s rostoucím F výrazně klesající. Pro test s dokončovacím přejezdem bylo dosaženo až hodnoty 5,3 μm. Parametr S_a měl s rostoucí intenzitou spíše klesající charakter, ale výrazněji až od hodnoty 14,5 J·cm⁻². Nejnižší dosažená hodnota byla $S_a = 1,05$ μm a $S_z = 5,3$ μm. V porovnání s drsností povrchu před povlakováním byly dosaženy vyšší hodnoty pro S_a a nižší pro S_z .



Obr. 58: Vztah mezi parametry drsnosti povrchu S_a a S_z vzniklého po odstranění povlaku DLC-C laserem a použitou intenzitou energie.

Výsledky výzkumu metody laserového odstraňování obou typů tenkých ochranných povlaků za podmínek termální ablace ukazují, že proces může být efektivní. Důležité ovšem bude se dále se zaměřovat na zvyšování kvality zpracování vč. využití atermálního způsobu ablace. Byly definovány hlavní aktuální aspekty dalšího výzkumu a vývoje této techniky:

- dodržení potřebné kvality povrchu po odstranění povlaku;
- minimální ovlivnění podkladového materiálu (vč. použití atermálního způsobu odstraňování povlaku);
- optimalizace strategií a parametrů procesu pro různé typy povlaků; (minimalizace potřebné energie; termální i atermální ablace, případně jejich kombinace; získávání empirických dat pro různé povlaky);
- odstraňování povlaků z tvarově komplexních ploch;
- analýza řezivosti nástrojů pro odstranění povlaku laserem a opětovném napovlakování.

Navazující vlastní výzkum výše definované oblasti sleduje. Vznikají proto průběžně další nové poznatky a znalosti, na ně navázané vědecké publikace a i nová, průmyslově využitelná řešení.

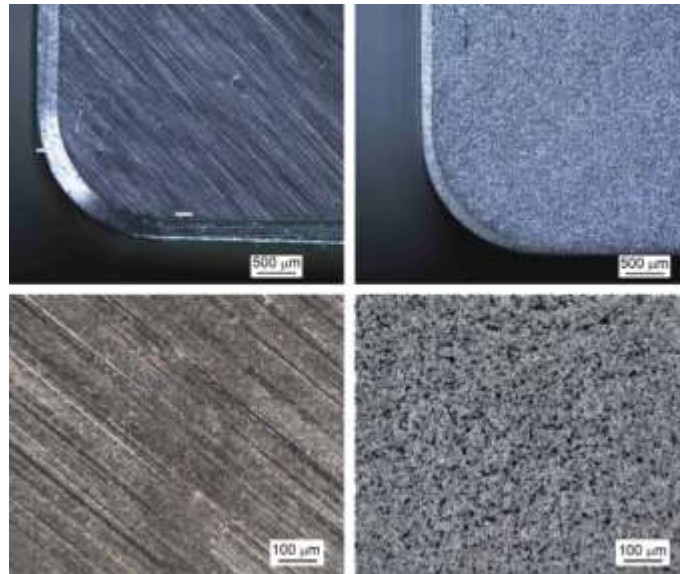
5.6.7 ŘÍZENÉ TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ MATERIÁLU

Řízené tepelné ovlivnění řezných materiálů laserem pro zlepšení jejich vlastností je doposud jen okrajově řešenou problematikou. Vlastní výzkum v této oblasti směřuji do spolupráce se zahraničními výzkumnými týmy, které se zaměřují na vývoj slinutých karbidů nového složení a nového způsobu jejich výroby. Technika přetavení povrchu těchto materiálů laserem může být dalším příspěvkem pro zlepšení vlastností nástrojů. Z uvedené spolupráce prozatím vznikly dvě vědecké publikace [149, 150]. Shrnutí hlavních výsledků z těchto prací zde bude popsáno.

Příspěvek [149] k tématu je cílen na zmapování možného přínosu přetavení povrchu břítu u šesti různých typů slinutého karbidu pro vyšší řezivost. Vzorky VBD byly různého chemického složení, navíc v kombinaci se dvěma způsoby jejich výroby – LPS (Liquid Phase Sintering) a PECS (Pulse Electric Current Sintering). V první fázi výzkumu byly optimalizovány parametry laserového záření pro dosažení efektů přetavení materiálu v kombinaci s dobrou kvalitou povrchu, a to pro všechny zvolené řezné

materiály. Optimalizované parametry byly: $\tau_p = 120$ ns, $\lambda = 1064$ nm, $P_{ave} = 35$ W, $E_p = 2,33$ mJ, $F = 13,2$ J·cm⁻².

Laserovým přetavením povrchu čela a hřbetu VBD (typ SNMA 120416) bylo docíleno vytvoření cca 2,5 μ m silné vrstvy na povrchu materiálu s odlišnou (zjemněnou) strukturou v porovnání se základním substrátem. V porovnání s výchozím broušeným povrchem byl laserovou úpravou změněn i povrch řezné části VBD a jeho vzhled, jak ukazuje příklad na Obr. 59. Zajímavým zjištěním bylo, že každý typ použitého řezného materiálu vytvořil při stejných parametrech laserového záření odlišnou strukturu povrchu.

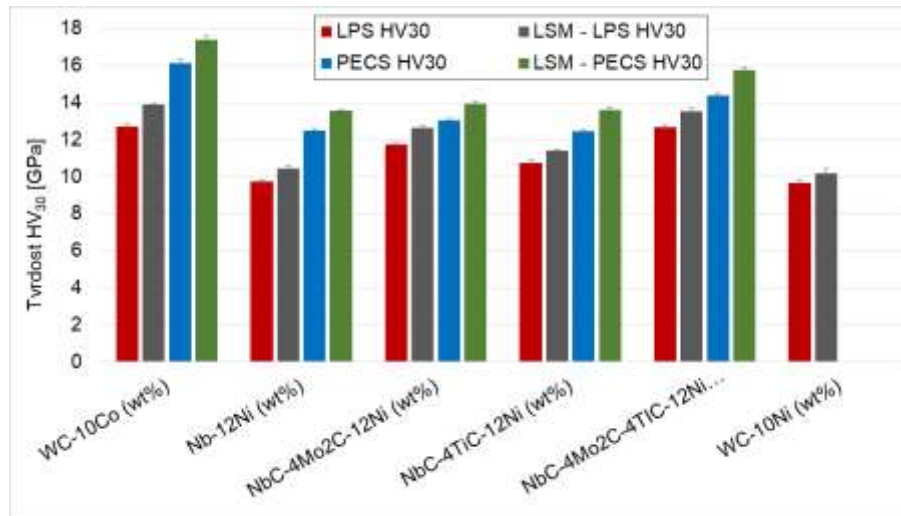


Obr. 59: Vzhled čela břitu VBD ze slinutého karbidu po procesu broušení (vlevo) a po technologii přetavení laserem (vpravo).

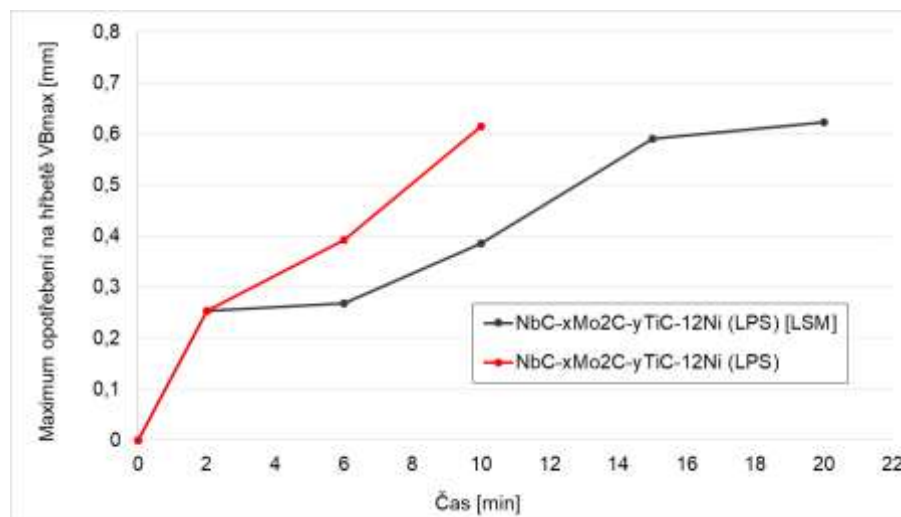
První fáze výzkumu byla zaměřena na hodnocení vlivu přetavení na materiálové charakteristiky. Z grafu na Obr. 60 je zřejmé, že jedněmi podmínkami procesu bylo možné přetavením u všech variant vzorků výrazně zvýšit mikrotvrdotost a tím i otěruvzdornost povrchu nástroje. Velmi podobný přínos byl tedy dosažen bez ohledu na chemické složení a strukturu slinutého karbidu, stejně jako na způsob jeho výroby.

Zmíněný efekt se posléze projevil i při konkrétním testu suchého frézování šedé litiny. Bylo totiž zaznamenáno, že pro většinu variant materiálů a způsobu jejich výroby (kromě WC-10Co (LPS)) byl u laserem ovlivněných vzorků dosažen různě velký přínos ve snížení intenzity opotřebení na hřbetě břitu při podmínkách hrubování. Pro polodokončovací a dokončovací podmínky byl tento efekt pozorován zejména pro všechny karbidy typu NbC. Nejvýznamnější přínos změny intenzity a průběhu opotřebení v čase v důsledku přetavení povrchu VBD laserem je pro jeden z materiálů zachycen na

Obr. 61. Graf ukazuje, že v případě určení kritéria opotřebení hodnotou $VB_{max} = 0,6$ mm byla trvanlivost daného vzorku VBD přetavením povrchu prodloužena o cca 70 %.



Obr. 60: Vliv technologie výroby (LPS a PECS) a metody přetavení povrchu laserem (LSM) na tvrdost povrchu různých typů slinutého karbidu. [149]



Obr. 61: Vliv technologie přetavení povrchu laserem (LSM) na změnu průběhu opotřebení břitu materiálu NbC-4Mo₂C-4TiC-12Ni při suchém frézování šedé litiny (podmínky: $v_c=100$ m·min⁻¹, $f_z=0,1$ mm, $a_p=1,5$ mm). [149]

V navazujícím výzkumu [150] byly vybrány vzorky třech různých složení z výše zmíněného experimentu v kombinaci se dvěma způsoby výroby. Byl zkoumán vliv přetavení povrchu laserem na intenzitu opotřebení břitu nástroje a na silové jevy při suchém podélném soustružení slitiny Ti6Al4V. Použita byla VBD typu SNGN 120416 při hrubovacích ($v_c = 45$ a 60 m·min⁻¹, $a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm) i dokončovacích ($v_c = 120$ m·min⁻¹, $a_p = 0,25$ mm, $f = 0,15$ mm) podmínkách. Vzorky byly přetaveny laserem s identickým nastavením jako v předchozím výzkumu.

Přes opětovně zjištěné zlepšené vlastnosti z hlediska zvýšení tvrdosti laserem ovlivněného povrchu nebyl v tomto případě prokázán významnější přínos tohoto způsobu zpracování na charakter a průběh opotřebení, ani na celkovou dobu trvanlivosti bříty. Důvody pro toto chování byly přisouzeny typu obráběného materiálu, kterým byla těžkoobrobitelná titanová slitina způsobující větší mechanické a tepelné zatížení bříty, než tomu bylo u šedé litiny. V případě, že laserem vytvořená povrchová vrstva vykazuje přes vyšší tvrdost i nižší soudržnost a přítomnost trhlin, bude v důsledku vysokých sil a adhezních jevů, které při se obrábění titanových slitin objevují, pouze malý přínos pro řezivost nástroje. Tento výsledek je důležitým podnětem pro navazující výzkum.

5.7 SHRNU TÍ VLASTNÍCH POZNATKŮ A PŘÍNOSŮ

5.7.1 ZPŮSOBY VYUŽITÍ LASERU PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE

Kromě dnes běžně využívaných způsobů využití laseru pro řezné nástroje (značení a popis, dělení polotovarů břitových segmentů, 3D tisk tělesa nástroje a nástrojového upínače) vzniká významný prostor i pro uplatnění dalšími způsoby a to těmi, které přímo ovlivňují řezivost nástroje. **Přínosem práce je, že byl vytvořen a popsán přehled způsobů využití laseru pro výrobu řezných nástrojů. Vytvořený přehled ukazuje rozdělení technologií dle charakteru vlivu na zpracovávaný materiál – s úběrem, bez úběru a s přidáváním materiálu. V každé z kategorií byly definovány dílčí metody s různě velkým potenciálem budoucího využití. Základem všech specifikovaných technik je interakce paprsku laseru, jakožto zdroje tepla, s materiálem.**

5.7.2 INTERAKCE PAPERSKU LASERU S ŘEZNÝM MATERIÁLEM

Pochopení a znalost pro interpretaci výsledků interakce paprsku laseru (konkrétních vlastností) s vybraným materiálem je klíčem k produktivnímu a kvalitnímu laserovému procesu. Interakce byla z pohledu uživatele laserového zařízení popsána z těchto hledisek: (i) materiálové vlastnosti ovlivňující interakci, (ii) pohltivost laserového záření materiálem a (iii) ablační práh a ablace materiálu.

VLASTNOSTI MATERIÁLU OVLIVŇUJÍCÍ INTERAKCI

Výsledky interakce paprsku laseru s materiálem jsou významně ovlivněny vlastnostmi zpracovávaného materiálu. K těm hlavním patří zejména: chemické složení, tepelná vodivost, tepelná kapacita, teplota tavení, teplota varu, součinitel délkové roztažnosti,

měrné skupenské teplo varu a hustota. Z pohledu hodnot, které tyto charakteristiky nabývají pro řezné materiály, by neměly vznikat zásadní komplikace při opracování laserem v porovnání s běžně laserem zpracovávanými kovy. Specifické bude zpracování řezných materiálů složených z pojivové a tvrdé fáze s odlišnými vlastnostmi ovlivňujícími interakci.

Vlastním výzkum přinesl poznání, že efektivita ablace pro konkrétní vlastnosti laserového záření byla pro různé řezné materiály tím větší, čím menší byla jejich tepelná vodivost. Dále bylo zjištěno, že interakcí laseru se slinutým karbidem za podmínek termální ablace může docházet k zásadní změně chemického složení (méně pojivové fáze) materiálu. Tato skutečnost plyne z výrazně odlišných teplot tavení a varu karbidů a použité pojivové fáze. Při podmínkách atermální ablace byla změna chemického složení SK nevýrazná. Z pohledu uživatele laserového zařízení pro zpracování řezných materiálů proto musí být důležitým hodnotícím kritériem interakce popis změny výsledných vlastností materiálu po interakci a kvality vytvořené povrchové vrstvy. S ohledem na široké spektrum variant řezných materiálů a povlaků existuje prozatím nedostatečná znalost těchto vazeb.

POHLTIVOST LASEROVÉHO ZÁŘENÍ MATERIÁLEM

Pohltivost laserového záření řeznými materiály nebyla doposud výrazněji zkoumána a neexistuje proto dostatečně široký a empiricky ověřený soubor dat. V zásadě by mělo pro řezné materiály platit, že s kratší vlnovou délkou záření se zvyšuje pohltivost a tím i efektivita procesu. Toto tvrzení bylo podpořeno i výsledkem vlastního výzkumu.

Pro řezné materiály typu ŘK (směsná a nitridová) a PKD byla v rozsahu běžně používaných vlnových délek (1. až 3. harmonická) zjištěna počáteční pohltivost záření okolo 90 %. V případě slinutého karbidu mezi 70 a 80 %. Výsledky ukázaly, že kromě materiálových vlastností bude pohltivost ovlivněna stavem povrchu vzorku včetně jeho barvy. Při opakovaném působení laseru na povrch v jednom místě je pravděpodobná změna pohltivosti z důvodu změny stavu a barvy povrchu.

ABLAČNÍ PRÁH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Ablační práh je důležitou charakteristikou pro posouzení interakce paprsku laseru s materiálem. Hodnotu minimálního množství intenzity (hustoty) energie pro ablaci materiálu je třeba znát pro efektivní použití laseru jakožto nástroje pro odebrání i jen

ovlivňování materiálu. Byl vytvořen přehled hodnot ablačních prahů řezných materiálů dostupných v literatuře. Bylo prokázáno, že pro jeden typ materiálu mohou být v různých zdrojích uvedeny výrazně odlišné hodnoty. To je pravděpodobně způsobeno těmito faktory: (i) použitím různých typů laserových zařízení a jejich parametrů, (ii) konkrétními variantami řezných materiálů a různým stavem jejich povrchu a případně (iii) odlišnými metodami pro určení prahové hodnoty intenzity energie.

Důležitým vlastním přínosem jsou výsledky výzkumu pro určení prahových hodnot intenzity energie pro sadu šesti různých typů řezných materiálů (SK, ŘK – nitridová a směsná, PKNB – nízko- a vysokoobsahový, PKD), a to v závislosti na různém nastavení a vlastnostech laserového záření. Bylo zjištěno, že prahové hodnoty materiálů se výrazně liší nejen mezi jednotlivými typy materiálů, ale i mezi jejich variantami – nitridová nebo směsná ŘK, vysoko- nebo nízkoobsahový PKNB. Rovněž použitá vlnová délka záření a frekvence pulsů mají na velikost ablačního prahu významný a dle typu materiálu často rozdílný vliv. Vyšší τ_p vedlo u všech materiálů na vyšší prahové intenzity. Nejvyšší hodnoty ablačního prahu vykazovaly pro různé λ a τ_p materiály: PKD, PKNB – H a ŘK – N.

V práci uvedené hodnoty ablačního prahu mohou být u každého z materiálů použity pro první nastavení efektivních podmínek opracování řezného materiálu laserem. Důležitým přístupem je empirické určování hodnot F_{th} vždy pro danou konkrétní kombinaci řezný materiál - laserové zařízení - metodika měření a vyhodnocení. Z takto získaných dat je třeba postupně tvořit ucelenou databázi znalostí.

ABLACE ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Byla provedena definice typů ablace materiálu laserem s vysvětlením základů odlišností mezi termální a atermální ablací. **V případě ablace řezných materiálů je důležité zabývat se hledisky efektivity, intenzity (resp. rychlosti) a kvality ablace.** Efektivita ablace byla popisována závislostí objemu ablovaného materiálu za čas vztaženo na použitý výkon laseru na poměru použité a prahové intenzity energie. Intenzita ablace byla charakterizována objemem ablovaného materiálu za jednotku času v závislosti na parametrech laseru (např. zářivý výkon, opakovací frekvence, intenzita energie). Kvalita ablace byla hodnocena nejen drsností povrchu po zpracování, která může být u řezných materiálů při velkých rychlostech úběru nedostatečná, ale i dalšími charakteristikami integrity povrchu (homogenita, vady, zbytková pnutí, tvrdost, aj.).

Přínosem pro popis ablace řezných materiálů laserem je provedení a analýza výsledků vlastních experimentů pro čtyři různé řezné materiály. Efektivita i intenzita ablace byla pro každý z materiálů velmi odlišná. Efektivita i intenzita byly tím vyšší, čím nižší byla tepelná vodivost materiálu.

V literatuře zmiňovaný optimální poměr F/F_{th} (cca 5 až 10) pro maximum efektivitu ablace je možné rozšířit až k hodnotě 15. Čím bylo maximum efektivitu ablace nižší, tím větší poměr byl zapotřebí pro dosažení maxima a průběh závislosti byl plošší. Byla rovněž nalezena oblast pro dosažení stejných nebo vyšších hodnot efektivitu ablace, avšak při hodnotách poměru F/F_{th} 100 a více. V těchto podmínkách může být vyšší i intenzita ablace, byť ve spojení s výrazně zhoršenou kvalitou povrchu. Čím nižší byl průměrný zářivý výkon a frekvence pulsů, tím efektivnější byla ablace. U intenzity ablace tomu bylo naopak. Efektivita ablace byla nižší při použití záření s delšími pulsy.

Dosažené výsledky vedou na originální přístup realizovat v jednom procesu obrábění laserem současně rychlou i kvalitní ablaci řezného materiálu. Ablace potřebného objemu řezného materiálu by byla rozdělena do dvou (nebo i více) kroků. Nejprve by byl materiál ablován podmínkami pro vysokou intenzitu úběru s přídavkem rozměrů (větším, než je HAZ), ale s očekávanou nedostatečnou kvalitou zpracování. Ve druhé fázi bude tvar a povrch dokončen podmínkami s menší intenzitou, ale pro výslednou vyšší kvalitu povrchu. Tento přístup by vedl ke zkrácení času opracování vzorku do jeho konečné podoby a tím i k zefektivnění použití laserové technologie.

Vlastní výzkum ukázal, že hledisku kvality je třeba v souvislosti s ovlivněním řezných materiálů laserem věnovat pozornost nejen na úrovni parametrů drsnosti povrchu. Je třeba analyzovat změny chemického složení a struktury povrchu a případnou velikost teplem ovlivněné oblasti včetně charakteristik povrchu v podobě přítomnosti trhlin, velikosti zbytkových napětí, mikrotvrdosti, otěruvzdornosti aj. Bylo prokázáno, že podmínkami atermální ablace je možné připravit vzorek nástroje ze slinutého karbidu v kvalitě povrchu výrazně vyšší než originálním procesem broušení.

5.7.3 TECHNOLOGIE S ÚBĚREM MATERIÁLU

TVORBA MAKROGEOMETRIE BŘITU

Tvorba makrogeometrie břitu je základním přístupem využití laseru s úběrem řezného materiálu. Takové zpracování obráběcích nástrojů je využíváno pro různé řezné

materiály, přičemž komerčně prakticky výhradně pro diamant a ojediněle i PKNB.

Možnosti takového využití u slinutých karbidů bude spočívat v přípravě přesných a unikátních tvarů, především utvařečů třísek, které je obtížné nebo nemožné vyrobit konvenčními výrobními postupy. Uplatnění je rovněž v oblasti vývoje nových nástrojů a ve výrobě prototypových vzorků. Pro tvorbu geometrie břitu v řezné keramice laser prakticky využívaný není, přestože zde, i s ohledem na vysokou efektivitu ablace, potenciál existuje. Pro PKNB, PKD a CVD-D materiály je uplatnění laseru tímto způsobem stále častější. Laser zde může být efektivní a kvalitní alternativou k technologiím broušení nebo elektrojiskrovému obrábění. V případě výroby tvaru břitu v materiálu CVD-D je prakticky jedinou výrobní metodou. Unikátnost použití laseru pro supertvrde materiály spočívá mimo jiné v možnosti tvorby tvarově složité makrogeometrie, která stále častěji nalézá své uplatnění s přínosy pro obráběcí proces. Důležitým hlediskem je přesnost a kvalita opracování laserem.

Vlastní přínos spočívá především v prokázání, že při vhodném nastavení laserového procesu lze vytvořit kvalitnější povrch a přesnější tvary, rozměry a detaily prvků makrogeometrie než zavedenými výrobními postupy – např. pro utvařeče ve slinutém karbidu. Tyto rysy se neztrácejí ani po následných výrobních operacích, jako je pískování a povlakování. Řezivost nástrojů s laserem vytvořenou makrogeometrií může být srovnatelná s konvečními nástroji.

V případě nástrojů s břity ze supertvrdých materiálů lze významný přínos spatřovat v tom, že se společným vývojem s výrobcem nástrojů podařilo vyvinout unikátní nástroje s makrogeometrií břitu vytvořenou laserem. Rotační nástroje z PKNB jsou výkonnou variantou pro obrábění kalených ocelí a niklových slitin. Patentované řešení frézy z CVD-D je v podobě, která je jinou výrobní metodou nerealizovatelná. Byla prokázána nejen samotná elementární funkčnost nástrojů, ale i potenciál komerčního využití. V oblasti je třeba vést pokračující výzkum především pro určení možností a vlivu nastavení laserového procesu na zvýšení produktivity výroby při splnění požadavků kvality. Úsilí je třeba zaměřit i na tvorbu vhodných metodických postupů pro vývoj a realizaci takových nástrojů.

TVORBA MIKROGEOMETRIE BŘITU

Zpracování mikrogeometrie břitu řezných nástrojů laserem je moderním přístupem, jak povýšit účinek tvaru a geometrie břitu na proces utváření třísky. Rozměr, tvar a kvalita

provedení řezné hrany a drsnost ploch aktivní části břitu má v tomto ohledu prokazatelně výrazný vliv. Ve všech řezných materiálech lze laserem vytvářet kvalitní řeznou hranu malých jmenovitých rozměrů s vysokou jakostí povrchu. Tvorba mikrogeometrie břitu laserem je v řezných materiálech SK, PKNB a PKD (ale i v ochranných povlacích) zkoumána také s ohledem na vytvoření povrchových struktur, které ovlivňují proces obrábění změnou třecích podmínek mezi nástrojem, třískou a obrobkem, nebo podporují účinky procesního média v zóně řezání.

Vlastní výzkum pro vytváření geometricky určitých i neurčitých entit malých rozměrů na plochách čela a hřbetu břitu, včetně popisu vlivů na řezný proces. Konkrétní výsledky pro nástroje ze slinutého karbidu ukazují, že takovéto úpravy břitů mohou přinášet významné zvýšení řezivosti z hlediska utváření třísky, trvanlivosti břitů nástroje, sil při obrábění i kvality obrobeného povrchu, a to i v těžkoobrobitelných materiálech (např. Inconel 718 nebo Ti6Al4V). V materiálech typu PKNB a PKD lze laserem vyrobit výrazně jakostnější řeznou hranu bez defektů a s možností minimalizace poloměru ostří, stejně jako kvalitnější povrch navazujících ploch geometrie.

Jelikož je při vytváření struktur laserem odebráno relativně malé množství materiálu, je vývoj a optimalizace procesu především otázkou rychlosti procesu při dosažení požadované kvality zpracování. Nadále je třeba pokračovat ve zkoumání přístupů pro zvyšování efektivity úprav nástrojů a účinků konkrétního provedení struktur pro řezivost ve vazbě na použitý řezný materiál a potenciální aplikace.

ODSTRAŇOVÁNÍ OCHRANNÉHO POVLAKU BŘITU LASEREM

K subtraktivním metodám s použitím laseru patří i odstraňování ochranného povlaku laserem zejména pro renovaci opotřebených nástrojů. Termální nebo i atermální ablace tenkých tvrdých vrstev laserem je výhodná z hlediska rychlosti a použitelnosti pro různé typy povlaků, snížením negativních dopadů na životní prostředí a při vhodně zvolených parametrech procesu je možné docílit minimální ovlivnění podkladového materiálu. Byly definovány nevýhody metody v porovnání s konvenčními technikami. Jsou jimi zejména technická komplikovanost procesu, nehomogenita odstranění povlaku v ploše, zhoršené možnosti opracování tvarových ploch a vyšší náklady přepočtené na jeden nástroj. Metoda je prozatím na úrovni výzkumu a ke konkrétnímu uplatnění v praxi neodchází.

Byly představeny originální výsledky a poznatky jak o interakci laserového svazku (pohltivost, ablační práh), tak i v realizaci samotné techniky odstranění dvou typů ochranných povlaků (AlTiN, DLC-C).

Pohltivost laserového záření byla vyšší pro povlak typu DLC. Povlak AlTiN vykazoval v celém měřeném spektru vlnových délek záření podobnou pohltivost, jakou měl materiál v podobě slinutého karbidu. Blízké hodnoty byly pro oba povlaky a slinutý karbid nalezeny i u ablačního prahu. Zjištěné skutečnosti mohou komplikovat tento způsob použití laseru při potřebě minimálního ovlivnění podkladového materiálu.

Vlastním výzkumem bylo ukázáno, že metoda laserového odstraňování povlaků z řezného nástroje termálním způsobem může být efektivní (řádově vyšší jednotky sekund pro odstranění povlaku z plochy 1 cm² jedním přejezdem paprsku) a se srovnatelnou drsností nově vzniklého a původně povlakovaného povrchu (vyšší Sa, nižší Sz). Je ovšem třeba očekávat výrazné ovlivnění podkladového materiálu teplem a zbytky materiálu. Navrženým krokem pro zvýšení kvality odstranění povlaku může být přístup s atermání ablací.

Metoda odstranění povlaku laserem má potenciál pro uplatnění v praxi zejména pro speciální a cenově náročná řešení nástrojů. Díky pokračujícímu vlastnímu výzkumu v oblasti zefektivnění procesu odstraňování různých povlaků, odstraňování povlaku z tvarově složitých ploch a také ovlivnění podkladového materiálu laserem je alespoň dílčí praktické uplatnění techniky poměrně blízko.

5.7.4 TECHNOLOGIE BEZ ÚBĚRU MATERIÁLU

ZPEVNĚNÍ POVRCHU RÁZOVOU VLNOU

Pro řezné nástroje lze laser využít i jako zdroj energie, který nevyvolává úběr, ale pouze změnu vlastností ovlivňovaného materiálu. Jednou z takových technik je zpevnění povrchu rázovou vlnou (LSP – Laser Shock Peening).

V případě řezných nástrojů se jedná prozatím o počáteční fáze výzkumu a vývoje této experimentální techniky především pro slinuté karbidy. Cílem výzkumů je rovněž ověření, zda je možné zpracovat i tvrdší a křehčí materiály jako je oxidová keramika nebo PKD. V principu je to možné. Potenciál dosažení vyšší tvrdosti povrchu a tím i předpokládané oteruvzdornosti zde existuje. Ovlivnění však přináší komplikace

především v podobě zhoršení drsnosti povrchu, vzniku lomů a trhlin.

Vlastní výzkum této technologie je prozatím pouze ve fázi příprav výzkumně-vývojových témat ve spolupráci s dalšími výzkumnými týmy.

ŘÍZENÉ TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ MATERIÁLU

Druhým způsobem použití laseru pro nástroje kdy nedochází k úběru materiálu, je řízené tepelné ovlivnění materiálu. Technika je v podstatě tepelným zpracováním povrchu řezného materiálu při ohřevu laserem. Jedná se prozatím o ryze experimentální způsob zpracování slinutého karbidu, avšak s nadějnými výsledky. K těm patří především skutečnost, že natavením a opětovným ztuhnutím karbidu různého složení vznikla v povrchové vrstvě tenká zóna (např. několik μm) s výrazně jemnější a homogennější strukturou. Tato vrstva vykazuje vyšší tvrdost, a tedy i ořezuvzdornost. V jádru vzorku přitom houževnatost neklesá. Bylo ovšem prokázáno, že je tento proces doprovázen úbytkem pojiva a vznikem trhlin v povrchových oblastech nástroje. Výzkumy jsou prozatím zaměřeny zejména na popis změn v materiálu a z toho plynoucích vlastností.

Byl prezentován vlastní výzkum tohoto způsobu použití laseru, kterým byla získána originální data o tom, jak může u různých typů SK tato metoda zvýšit mikrotvrdost povrchu a jak tato změna následně ovlivňuje trvanlivost břítu nástroje. Byla prokázána univerzálnost použití způsobu v tom, že pro výrazně odlišné typy slinutých karbidů bylo u všech vzorků docíleno jedním nastavením laserového procesu významné zvýšení tvrdosti a tím i ořezuvzdornosti ovlivněného povrchu. Avšak zatímco při suchém frézování šedé litiny vedlo zpracování k většímu nárůstu trvanlivosti břítu, při podélném soustružení titanové slitiny nebyl přínos pro zvýšení trvanlivosti břítu pozorován.

Výsledky ukázaly na další důležité směry vývoje této techniky. Je to zejména nastavení vhodných parametrů laseru ve vazbě požadované vlastnosti povrchové vrstvy slinutého karbidu v kombinaci s potřebou potlačit nežádoucí jevy doprovázející fázi tuhnutí a chladnutí – vznik trhlin a zhoršenou drsnost povrchu. Následně pak provádět výzkum dopadů pro řezivost takto upravených nástrojů a definovat aplikační potenciál.

6 METODIKA PRO VYUŽITÍ A HODNOCENÍ PŘÍNOSŮ LASERU PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE

Pro efektivní, kvalitní a celkově přínosnou integraci laserových technologií, jakožto výrobního procesu přímo ovlivňujícího řezivost nástroje, je důležité sjednocení a vzájemné propojení dílčích procesů, postupů, metod měření a výpočtů a hodnocení účinků v rámci zobecněného přístupu – metodiky. **Metodika zahrnuje postup vývoje, realizace a hodnocení funkčního, efektivního a konkurenceschopného obráběcího nástroje vyráběného nebo modifikovaného s využitím laserové technologie.** Tento nástroj přitom svými vlastnostmi splňuje požadované zadání. Tvorba metodiky logicky navazuje na poznatky z předchozích částí práce.

Vytvořená metodika je popsána v těchto hlavních částech: stav implementace laserového procesu do výrobního řetězce nástrojů, motivace pro tvorbu metodiky, návrh metodiky a popis jejích částí a příklady její aplikace, funkčnosti a přínosů.

6.1 STÁVAJÍCÍ PŘÍSTUPY A MOTIVACE PRO TVORBU METODIKY

6.1.1 IMPLEMENTACE LASEROVÉ TECHNOLOGIE PRO VÝROBU NÁSTROJŮ

Využití laseru pro výrobu a modifikaci řezných nástrojů je různorodé. Vedle již výše popsaných způsobů využití laseru, je možné na jeho uplatnění nahlížet také z pohledu, zda bude využit **s vědeckým nebo komerčním záměrem**. Laser je tedy nasazen buď pro přípravu originálních i zcela unikátních vzorků nástrojů pro výzkumně-vývojové experimentální práce, nebo nástrojů jakožto konkurenceschopných tržních produktů. Každé z uplatnění má odlišné zadání, průběh řešení i požadavky na výsledné vlastnosti vzorků.

Požadavky na **komerční produkty** v podobě řezných nástrojů jsou náročnější z hlediska funkčnosti, opakovatelnosti a stability vlastností, kvality, produktivity i velikosti výrobních nákladů, tržního potenciálu, a tedy v konečném důsledku i na zvládnutí a optimalizaci výrobních postupů. Konvenční způsoby výroby řezných nástrojů jsou dnes díky dlouhodobému vývoji efektivní a produktivní, avšak mohou být limitované použitým materiálem, přesností výroby a podobou makro- i mikrogeometrie břitů. Tato omezení se projeví ve vlastnostech nástroje. Vzniká tím prostor pro laserové technologie.

Proces vývoje a uvedení na trh nových **skladových (tzv. katalogových) nástrojů**, tj. těch, ze kterých si pro danou aplikaci vybíráme ten nejvhodnější, je v principu jednoznačný. Sestává se z těchto postupných kroků:

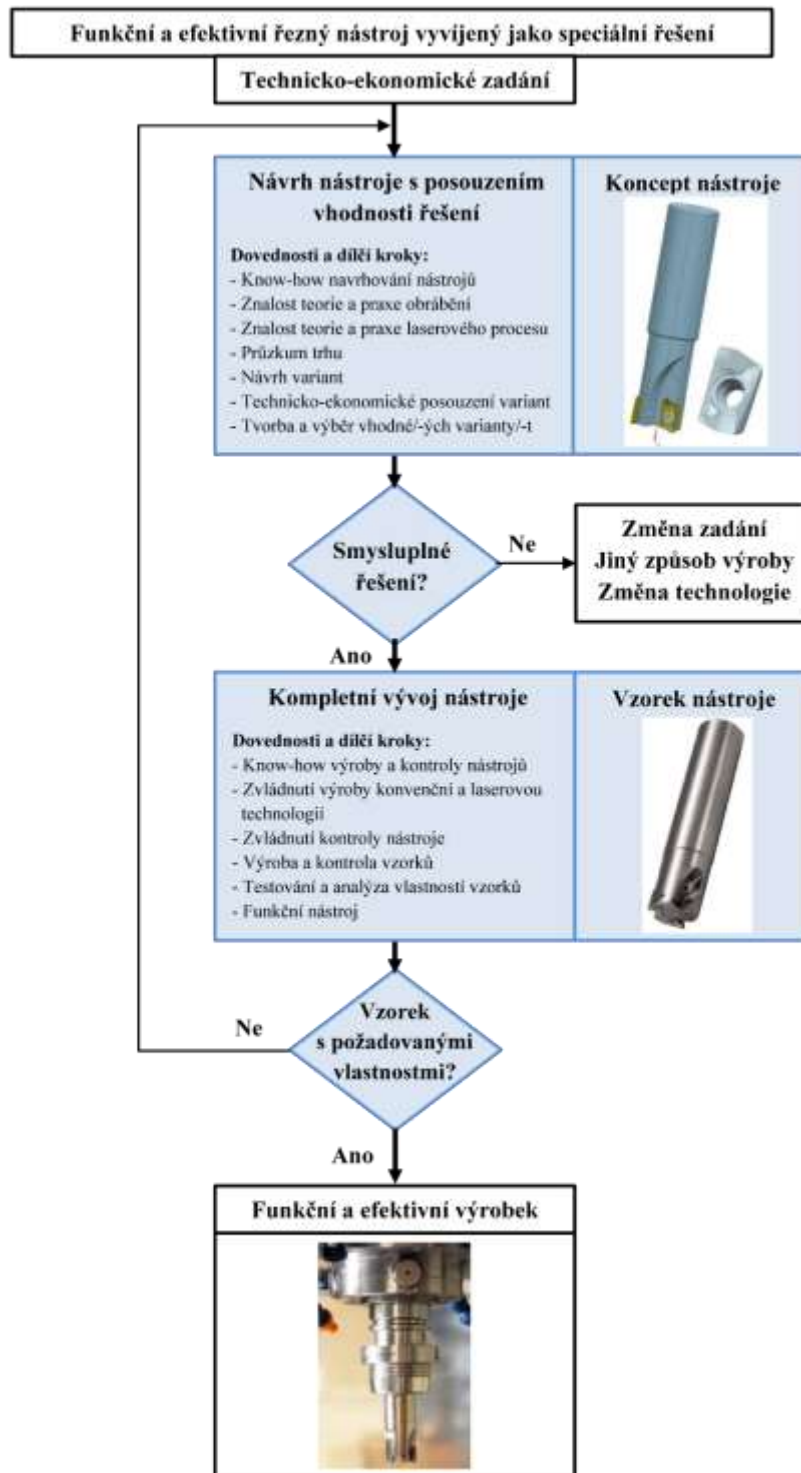
- technické zadání (definice oblasti budoucího použití);
- návrh provedení nástroje;
- výroba prototypových variant;
- testování prototypů a výběr výsledného provedení;
- příprava a optimalizace sériové výroby;
- zařazení do sortimentu;
- sériová výroba, vč. kontroly a použití.

Laserové technologie lze u standardních nástrojů nasadit jak při výrobě prototypových vzorků, tak teoreticky i při samotné sériové výrobě nástrojů. Výroba makrogeometrie břítu prototypových vzorků s použitím laseru je již předními firmami v oboru využívána. Přínosy spojené s nasazením laseru jsou při jeho správném způsobu použití očekávány jednak ve zlepšené funkčnosti, ale především v celkově efektivnější přípravě vzorků. Nasazení laseru pro výrobu a modifikaci skladových produktů ve velkých počtech kusů není aplikováno.

Složitějším zadáním je **realizace speciálního nástroje** na míru konkrétní aplikaci. V rámci tohoto postupu je třeba jednak řešením nástroje reagovat na konkrétní, někdy i nekompletní, zadání a také uplatnit potřebné know-how pro originální řešení nad rámec katalogových produktů. Dále je zpravidla potřeba do výrobního řetězce vložit technicky, časově a finančně náročnou fázi testování a hodnocení konkrétního vzorku před jeho plným a opakovaným uplatněním. U speciálních nástrojů vyráběných většinou v jednotkách až desítkách kusů lze ovšem do výroby efektivně začlenit i některý z laserových procesů. Jeho podíl na výrobě nástroje přitom může být v některých případech i dominantní.

Laserové procesy jsou zejména díky vysokým nákladům na pořízení, provoz a údržbu zařízení zpravidla nákladné. Laserem je ovšem možné parametry konvenčně vyráběných nástrojů dále zlepšovat nebo vyrábět nástroje s unikátními vlastnostmi. Kromě technických parametrů musí takový nástroj splnit i ekonomické ukazatele. Tyto aspekty musí být zohledněny a řízeny pro úspěšnou integraci laserové technologie do výrobního řetězce.

Základní schéma vývoje funkčního zákaznického řešení obráběcího nástroje (včetně použití laseru) je vytvořeno na Obr. 62. Laserové technologie jsou sice nasazovány ve fázi přípravy, výroby a testování nástroje, znalosti těchto technologií, jejich možnosti a limity je však třeba zohlednit již při návrhu nástroje pro smysluplné varianty řešení.



Obr. 62: Schéma vývoje a realizace speciálního řezného nástroje s možností uplatnění laserové technologie.

6.1.2 MOTIVACE PRO TVORBU METODIKY

Předchozí části práce ukázaly, že laser lze využít ve výrobě řezných nástrojů pro zlepšení jejich vlastností včetně řezivosti. Přes intenzivně vedený výzkum některých způsobů využití a prokázáný potenciál, je zatím takové uplatnění malé. Důvody pro to spočívají jak v stále nedostatečných odborných znalostech s ohledem na přínosy, způsob použití a očekávaný výsledek laserové technologie, přenosu existujících znalostí do praxe, tak i v přímém tlaku na výrobní náklady a cenu nástroje.

Širší uplatnění laseru v popisované oblasti vede hlavně přes intenzivní výzkum elementárních poznatků a následnou realizaci hmotných výsledků výzkumu (např. patentů, prototypů, funkčních vzorků, ověřených technologií), a jejich použití v praxi, a to až k opakovaně vyrobiteľnému a komerčně úspěšnému řešení nástroje. **Nedílnou součástí výzkumu a vývoje se proto musí stát optimalizovaný postup výroby, hodnocení vlastností nástroje a kvality, produktivity a výrobních nákladů.** To je nezbytné pro to, aby vznikla objektivní technicko-ekonomická data, na základě kterých bude možné přínos laserové technologie jednoznačně demonstrovat.

Má-li být využití laseru při vývoji a výrobě nástrojů celkově přínosné, je třeba při jeho zavádění postupovat podle určitého systému a schématu – metodiky. Bez použití metodiky může docházet k chybám a nevhodnému způsobu uplatnění laserové technologie, stejně jako k realizaci zbytečných nebo naopak nutně opakovaných aktivit. Jelikož je zvládnutí implementace laserové technologie technicky, časově i finančně náročné bude v důsledku uvedených skutečností docházet k prodražení vývoje nástroje a nedosažení technických parametrů řešení, a tedy i potenciálu využití laserové technologie.

Zobecněná metodika použití laseru pro výrobu řezných nástrojů doposud nebyla popsána. Motivací práce proto je navrhnout a ověřit vlastní metodiku, kterou by bylo možné aplikovat pro vývoj a výrobu efektivního řezného nástroje s použitím laseru a objektivně zhodnotit vlastnosti nástroje. Aplikace metodiky umožní omezit nebo i zcela eliminovat nedostatky laserových procesů, využít jejich přednosti, reflektovat a uplatnit nejnovější vědecké poznatky a dosáhnout širšího uplatnění s výstupem konkurenceschopných řezných nástrojů s unikátními nebo zlepšenými vlastnostmi. Proces výroby nástroje bude metodikou podchycen od fáze návrhu vhodného řešení, až po ověření jeho vlastností.

Cílem této metodiky je vytvořit obecný postup umožňující systematický návrh, provádění a analýzu výstupů laserové technologie použité jako součást výrobního procesu speciálního obráběcího nástroje. Zaměření je na laserové technologie, které přímo ovlivňují funkční vlastnosti nástroje – zejména jeho řezivost. Metodika nebude v rámci práce rozpracována do všech detailů a možných variant vyplývajících z rozdílnosti zařízení, technologií, přístupů a úrovně existujícího know-how výrobců řezných nástrojů.

6.2 NÁVRH METODIKY A JEJÍ POPIS

Metodika je navržena a vytvořena především na základě dlouholetého vlastního výzkumu a z něho plynoucích nabytých zkušeností a závěrů, přičemž některé z nich již byly popsány v předchozích kapitolách práce. Pro tvorbu metodiky bylo důležité i to, že jsou dílčí výzkumná témata řešena ve spolupráci s několika předními výrobci řezných nástrojů v ČR. Tento faktor umožnil pro návrh metodiky zachytit pohled ve vztahu k průmyslové praxi při zohlednění a dalším rozvoji již zavedených přístupů vývoje řezných nástrojů a využití laserového zařízení pro jejich výrobu.

6.2.1 NÁVRH METODIKY

Navržená metodika je množinou výzkumných, vývojových, výrobních a inspekčních činností, a to včetně jejich dílčích kroků zahrnujících mimo jiné nastavení a optimalizaci laserové technologie. Metodika by měla respektovat a naplňovat tyto obecné skutečnosti:

- obrábění je složitý proces, kdy pro dosažení akceptovatelného výsledku zpravidla existuje velké množství různých variant vhodných řešení a přístupů, vč. nástrojů;
- pro zajištění požadované funkce a konkurenceschopnosti nástroje velmi pravděpodobně existuje více vhodných řešení a výrobních postupů;
- obor laserové techniky a aplikací se progresivně vyvíjí, což vede na široké spektrum typů laserů, zlepšování jejich vlastností a změny způsobu provozování;
- laserový proces je definován velkým množstvím proměnných, u kterých zpravidla není zcela známý jejich vliv na výsledek ovlivnění materiálu.

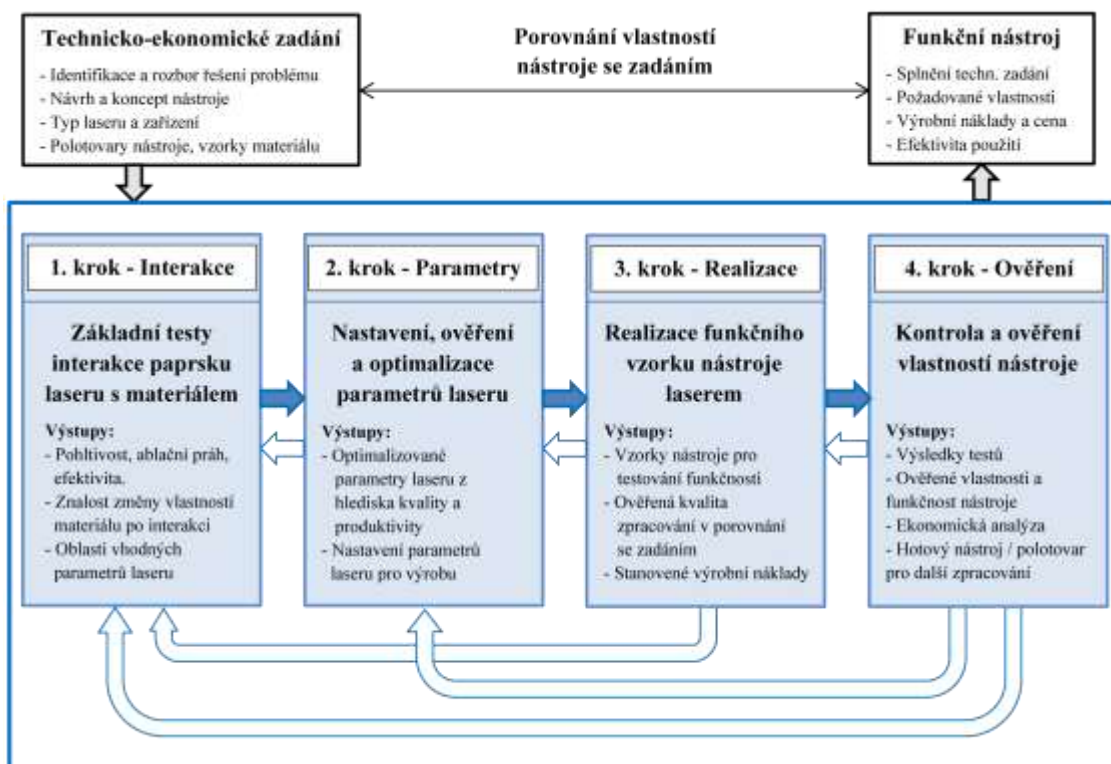
Na výrobu nástroje lze dle schématu na Obr. 63 nahlížet jako soubor zařízení, procesů a činností vyžadujících vstupy v podobě lidských zdrojů, technicko-ekonomických dat, výrobního a inspekčního zařízení, energií, materiálu (polotovaru) a generující požadovaný výstup (nástroj) a vedlejší výstupy (odpadní materiál, teplo a emise). Podíl laserové technologie, jakožto součásti uceleného výrobního procesu obráběcích nástrojů,

může být různě velký. I v případech, kdy výroba laserem zaujímá v celém procesu dominantní roli, jsou zpravidla třeba i další výrobní metody, např. pro přípravu vstupních polotovarů, mezioperační úpravy a dokončení a kontrolu nástrojů. Způsobů konkrétního vzájemného propojení konvenční a laserové technologie výroby je mnoho.



Obr. 63: Schematické znázornění procesu výroby nástroje s možnou implementací laserových technologií a jejich interakcí s konvenční výrobní technologií.

V jistém zjednodušení lze v uvedeném schématu na laserovou technologii pohlížet jako na samostatný proces vyžadující stejný charakter vstupů jako konvenční výrobní proces, jehož žádaným výstupem je nástroj v určité fázi dokončení, tj. buď polotovar nástroje pro další zpracování, nebo hotový produkt s požadovanými vlastnostmi. V takovém případě je možné základ metodiky zpracovat do podoby znázorněné na Obr. 64.



Obr. 64: Schéma metodiky pro využití laserové technologie při výrobě obráběcích nástrojů.

Metodika vychází z konkrétního technicko-ekonomického zadání. V tomto zadání je nejprve proveden rozbor technologického problému, na který má nově vyvíjený nástroj reagovat s návrhem možných řešení. Součástí této aktivity by měl být i průzkum trhu, ověření vlastností stávajících nástrojů a analýza budoucího tržního potenciálu. Následně je navrženo řešení řezného nástroje vyráběného nebo modifikovaného laserem, které teoreticky splňuje požadavky obráběcího procesu.

Základem metodiky jsou čtyři hlavní oblasti řazené za sebou v postupných krocích, kdy u každého lze definovat vstupy, procesy a výstupy, které jsou současně vstupem pro krok následující. V rámci postupu aplikace metodiky se lze v případě potřeby vracet o jeden nebo i více kroků zpět, hledat nové varianty řešení a provádět tak postupný vývoj a optimalizaci. Rovněž lze některé kroky či dílčí procesy a činnosti vynechávat v případě, že jsou z již známa relevantní a přesná data k danému řešení nebo, že pro dané řešení nejsou zapotřebí. Součástí postupu je kromě realizace technických aspektů výroby nezbytná i průběžná analýza ekonomických parametrů.

Na výstupu metodiky je výsledek – buď polotovár nástroje pro další zpracování, nebo již plně funkční obráběcí nástroj splňující zadání a jehož použití povede k pozitivním efektům pro řezný proces s výhodnými ekonomickými parametry.

Je třeba zmínit, že nedílnou součástí metodiky a jejích jednotlivých kroků jsou i subaktivity a postupy související s testováním a analýzou vznikajících vzorků a nástrojů, zvládnutí procesu kontroly a ověření vlastností výstupu a stanovení velikosti výrobních nákladů.

Klíčové aspekty úspěšného použití metodiky jsou především:

- přesnost a správnost technicko-ekonomického zadání;
- definice potřebných vstupů a parametrů výstupu;
- správnost provádění procesů a analýzy dat;
- nastavení vhodných nebo optimálních parametrů výroby pro dosažení požadovaných výstupů;
- minimalizace časové náročnosti postupu podle metodiky – minimum nezbytných kroků a iterací, zkracování doby výroby, testování, kontroly a ověřování vlastností;
- uchování znalostí a tvorba databáze údajů získaných v průběhu používání metodiky.

6.2.2 POPIS METODIKY

Dále budou detailněji rozebrány a popsány dílčí kroky a části metodiky. Pro každý z kroků a dílčí činnost přitom musí být snaha o efektivní řešení s minimem nezbytných aktivit a dosažené výsledky a výstupy by se měly stát součástí znalostí a dat přenositelných i na další případy tak, aby byl proces navrhování a výroby nástrojů laserem průběžně zefektivňován.

TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZADÁNÍ

Zadání je reakcí na problém spojený s obráběcím procesem, který je třeba řešit. **Je důležité správně definovat a popsat jak problém samotný, tak i jeho příčiny a způsoby pro jeho odstranění.** Zmiňovaný problém z hlediska obrábění může být v zásadě kategorizován jako nedostatečná kvalita, produktivita nebo hospodárnost procesu, případně jejich kombinace. V rámci zadání je ovšem třeba rozklíčovat technické detaily daného problému (např. krátká trvanlivost břitu, nevhodné utváření třísky, vibrace při obrábění, zhoršená jakost povrchu obrobku aj.) a jeho příčiny.

V návaznosti na identifikovaný problém je proveden návrh způsobu jeho nápravy, kdy jeden z uvažovaných přístupů může být prostřednictvím nové podoby nástroje vyrobeného prostřednictvím laseru. V takovém případě je třeba navrhnout nástroj (již jeho základní koncept) tak, aby v dostatečné míře eliminoval obtíže vznikající při obrábění a současně byl předpoklad dosažení efektivnosti při jeho použití.

Návrh funkčního a celkově efektivního laserovaného nástroje, vyžaduje znalosti a zkušenosti, jak v oblasti samotného obráběcího procesu, tak i výrobních a kontrolních postupů včetně laserové technologie. Návrh podoby nástroje a způsobu jeho výroby jsou důležitou součástí technického zadání stejně jako návrh způsobu využití laseru (ablace, strukturování, technologie LSP, přetavení materiálu, odstranění povlaku, a další – viz kap. 5). Tuto specifikaci je nezbytné přizpůsobit dostupným výrobním zařízením nebo je třeba nadefinovat jiné vhodné laserové zařízení. Nedílnou součástí vstupních parametrů je i ekonomické hledisko – limit ceny nástroje, počet vyrobených kusů, výrobní dávka atp.

K technickému zadání patří rovněž **příprava polotovarů nástroje a vzorků řezného materiálu,** které budou použity při výrobě nástroje laserem. Polotovar nástroje může být bez nebo s přechodí úpravou některou z konvenčních technologií (např. řezná část nástroje může být předem upravena lisováním, broušením, leštěním, EDM, řezáním

laserem aj.). Vzorčky řezného materiálu, které nemusí být tvarem a rozměry přímo vhodné pro samotný nástroj, jsou v dalších krocích použity pro testy interakce paprsku laseru s materiálem a pro ověření a optimalizaci parametrů laseru. Polotovary a vzorky je efektivní posléze využít i pro výrobu vlastních nástrojů.

Součástí zadání by měla být i **výchozí analýza uplatnitelnosti nového nástroje** u zákazníka, z ní plynoucí aplikovatelná cenová hladina a v konečném důsledku i velikost výrobních nákladů. Přístupy pro stanovení těchto aspektů mohou být různé a u každého z výrobců specifické a je nad rámec práce se jim detailněji věnovat. V zásadě je ovšem třeba řešit členění výrobních nákladů a jejich kalkulaci na produkt a řízení nákladů tak, aby bylo řešení konkurenceschopné [151].

Je-li zadání cíleno na vývoj jednoho specifického nástroje pro jednu konkrétní aplikaci, může být tato část zadání zúžena na problém stanovení a dodržení maximální úrovně výrobních nákladů, resp. ceny nástroje tak, aby byl dodržen předpoklad podílu nákladů na nástroj na jeden vyrobený dílec. Tímto a na základě předchozích zkušeností lze celý proces zadání pro vývoj nástroje zjednodušit a zkrátit.

Výstupem technicko-ekonomického zadání je koncept nástroje v podobě CAD dat (modelů, výrobních výkresů), rámcový výrobní postup nástroje, definice materiálů, polotovarů a vzorků a jejich příprava a specifikace použitého zařízení. Tyto výstupy jsou současně vstupem pro uplatnění navrhované metodiky.

KROK 1 - ZÁKLADNÍ TESTY INTERAKCE PAPRSKU LASERU S MATERIÁLEM

První krok v rámci metodiky vede na **stanovení, jakým způsobem paprsek laseru interaguje s vybraným řezným materiálem a jaké změny v něm způsobuje**. Tato znalost spočívá v experimentálním určení vlivu typu a parametrů laseru na:

- pohltivost laserového záření materiálem;
- ablačního prahu materiálu;
- změny materiálových a mechanických vlastností;
- dosahovanou kvalitu zpracovávaného povrchu.

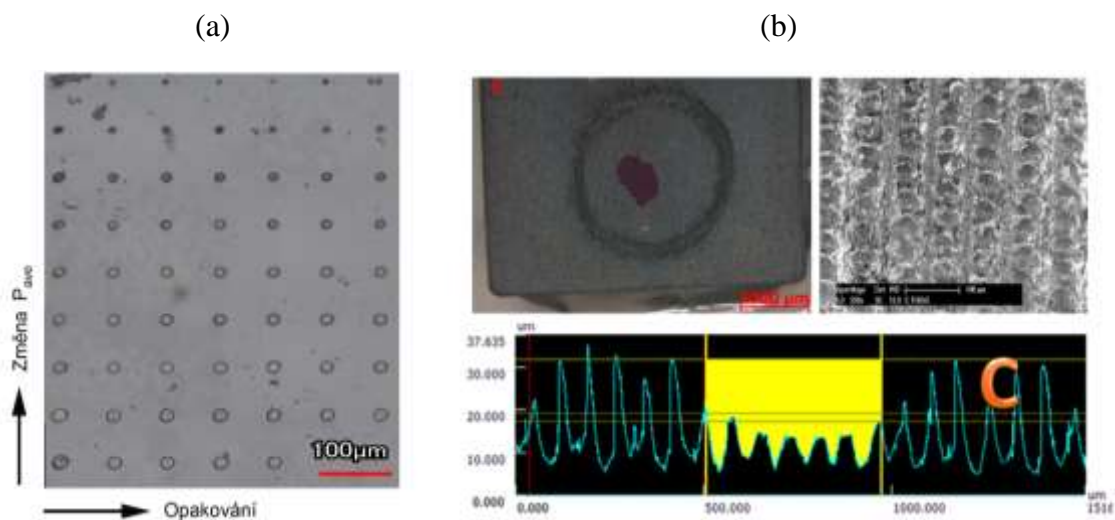
Problematika stanovení podmínek a výsledků interakce byla rozebrána v kap. 5.2 a 5.6. a vychází z popsaných skutečností, výsledků vlastního výzkumu a nabytých znalostí.

V případě, že je používáno zařízení s laserovým zdrojem a optickou cestou bez možnosti automatické analýzy nebo korekce změn vlastností paprsku v čase, je žádoucí před

použitím nejprve ověřit jeho aktuální stav. K základním metodám patří změření průměrného výkonu pro široké spektrum frekvencí, kvality paprsku včetně průměru a tvaru svazku v ohnisku. Pro správné a opakovatelné nastavení technologie je nezbytné znát aktuální stav zařízení a jeho vlastnosti upravit na požadované hodnoty.

Důležitou součástí prvního kroku je nadefinování experimentu vhodného rozsahu, metodiky vyhodnocení a interpretace výsledků. Experimenty probíhají dle zavedených a optimalizovaných postupů, a to na vzorcích ze stejného materiálu, jako je materiál pro vyvíjený nástroj. Použité experimentální metody jsou aplikovány dle charakteru použití laseru, která bude při výrobě nástroje nasazena – ablace řezného materiálu, LSP, přetavení povrchu, odstranění povlaku aj. Nad získanými poznatky jsou následně určeny oblasti vhodných parametrů laseru pro možnost jejich optimalizace v následujících fázích.

Žádoucí je rovněž již v této fázi stanovit vliv zkoumaných oblastí parametrů laserového záření na vlastnosti povrchu z hlediska kvality a mechanických a materiálových vlastností, jako jsou např. drsnost a stav povrchu, přítomnost / velikost HAZ, otěruvzdornost, chemické složení, tvrdost, lomová houževnatost, zbytková napětí a další.



Obr. 65: Příklady analýzy interakce laserového záření s materiálem: (a) rastr stop na vzorku PKD pro určení ablačního prahu; (b) VBD z SK s laserem vytvořenou povrchovou strukturou po analýze únosnosti povrchu metodou Pin-on-Disc (celkový pohled na povrch s kruhovou stopou opotřebení, detail a profil stopy opotřebení).

Výstupem prvního kroku je znalost interakce laseru s materiálem a z toho plynoucí výběr vhodné konfigurace laserového zařízení a jeho optimální nastavení, určení vlnové délky a délky pulsů laserového záření a vhodných rozsahů charakteristik záření a procesu pro experiment v rámci kroku 2.

KROK 2 – NASTAVENÍ, OVĚŘENÍ A OPTIMALIZACE PARAMETRŮ LASERU

V pořadí druhý krok vývoje nástroje při naplňování metodiky souvisí s volbou, ověřením a optimalizací parametrů laserového záření a strategií pohybu paprsku pro opracování plošných entit v řezném materiálu. V rámci již definovaných hodnot τ_p , λ a doporučených oblastí F je třeba analyzovat **vliv vhodných strategií a parametrů laseru** (frekvence pulsů, průměrný výkon, příčné a podélné překrytí pulsů a rotace při překrytí drah) **na produktivitu (intenzitu) úběru nebo ovlivnění materiálu a na vlastnosti vzniklého povrchu z hlediska kvality.**

Definování tohoto kroku navazuje na výzkumné aktivity prováděné v souvislosti se způsoby použití laseru a plynoucích znalostí popsaných v kap. 5.3, 5.4, 5.5 a 5.6.

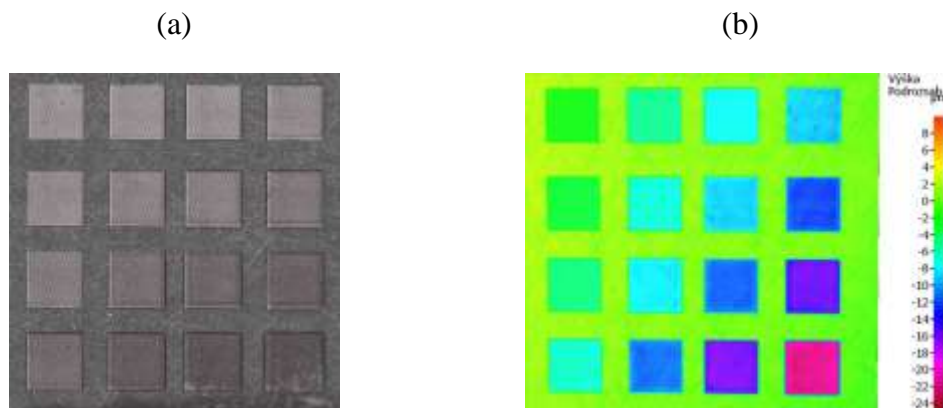
Experimentální práce lze v této fázi provádět i bez zahrnutí vlivu konečného tvaru bříty výsledného nástroje, a tedy i na vzorcích shodných se vzorky z kroku 1. Experimenty zpravidla spočívají v kombinování různých parametrů laseru při ovlivňování jednotkových geometricky jednodušších útvarů (např. čtverec o rozměru strany 2 mm), které jsou na ploše rozmístěny formou rastru – Obr. 66a.

V případě potřeby provedení více pracovních přejezdů paprskem v jednom místě je předmětem nastavení a optimalizace, kromě skladby drah laseru a jednotlivých pulsů přes sebe (H_x , H_y), také způsob překrytí a pootočení jednotlivých vrstev přejezdů.

Vyhodnocení vytvořených útvarů probíhá prostřednictvím optických mikroskopů zpravidla za účelem analýzy rozměrů a tvarů entit a dále drsnosti a celkového stavu povrchu. Při potřebě optimalizace ablačních procesů, je důležitou vyhodnocovanou charakteristikou hloubka úběru materiálu na jednu vrstvu Z . Ta je rovna podílu celkové dosažené hloubky (Obr. 66b) a počtu vrstev přejezdů. V případě optimalizace neablačních procesů je důležitou charakteristikou změna drsnosti povrchu a případně dalších jeho vlastností (chemické složení, přítomnost trhlin, změny struktury, mikrotvrdość, otěruvzdornost, hloubka a průběh zpevnění, zbytková napětí aj.). Na základě získaných údajů lze provést orientační analýzu času výroby celého nástroje a posoudit v prvním přiblížení smysluplnost a aplikovatelnost řešení. Úloha je pak koncentrována na problematiku nalezení takových parametrů laseru, které budou optimem z hlediska produktivity a kvality výroby.

Výstupem této části je sada parametrů potřebných k nastavení laserového záření a strategií jeho pohybu pro následnou realizaci konkrétního řešení. Důležitou částí výstupu

je, že na základě znalosti parametrů produktivity při obrábění jednotkových entit můžeme alespoň orientačně stanovit výrobní čas nástroje realizovaného v následující fázi.



Obr. 66: Rastr čtvercových polí (2×2 mm) vytvořených laserem v řezném materiálu různými parametry procesu: (a) reálný vzhled vzorku; (b) hloubková analýza pro stanovení velikosti úběru na jednu vrstvu – parametru Z.

KROK 3 – REALIZACE FUNKČNÍCH VZORKŮ NÁSTROJE LASEREM

Následujícím krokem je **realizace funkčních vzorků požadovaného nástroje**, případně jeho více variant, s použitím laserové technologie. Je zde navržen a zpracován způsob a postup výroby nástroje ve všech detailech. Následně je uskutečněna výroba. Výrobu je možné realizovat i v několika iteracích mezi nastavením technologie a výrobkem. Podnětem pro iteraci mohou být jak nedostatky kvality výrobku (drsnot povrchu, tvarová a rozměrová přesnost), tak i hledisko skutečného času výroby.

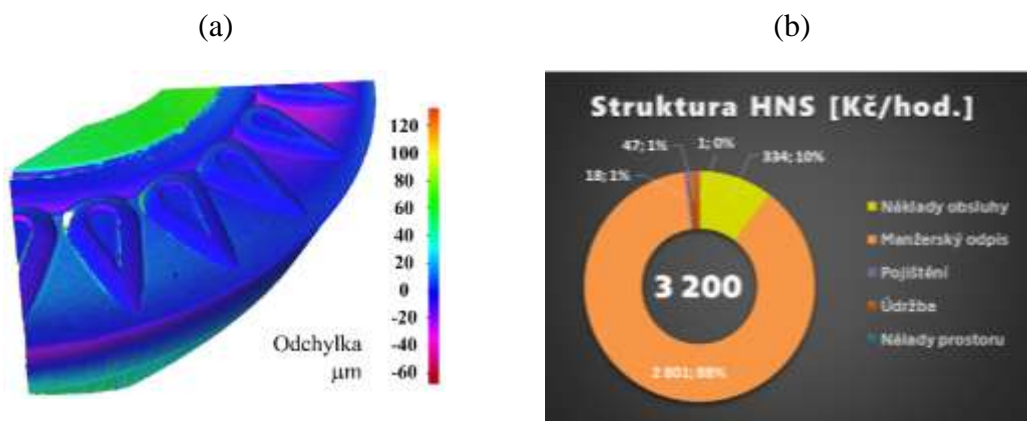
Nástroje je třeba důkladně analyzovat s ohledem na splnění požadavků technického zadání, viz příklad na Obr. 67a. Důležitou zmínkou je, že výroba kompletního nástroje může zahrnovat potřebu využití i některé z dalších výrobních technologií, při kterých není používán laser - např. broušení, EDM, dokončení a rektifikace řezné hrany, pískování, leštění, ultrazvukové čištění, povlakování aj. Detailní analýza materiálových vlastností povrchu po interakci s laserem v této fázi již realizována nebývá, pakliže povrch při inspekci nevykazuje anomálie nebo nepředpokládané vlastnosti.

Návrh této části metodiky podpořily konkrétní výsledky výzkumu v podobě funkčních vzorků nástrojů ze supertvrdeho materiálu, kdy dva příklady takových výsledků již byly představeny v rámci kap. 5.6.4.

V této části realizace nástroje by mělo dojít také k přesné kalkulaci výrobních nákladů a z toho plynoucích dat pro určení ceny výsledného produktu nebo alespoň podílu

provedeného způsobu výroby na celkových nákladech. Správnost výpočtu výrobních nákladů, včetně zahrnutí nákladů obsluhy, kapacity stroje a fixních nákladů se všemi důležitými detaily je pro posouzení konkurenceschopnosti nástroje zásadním hlediskem. Laserová zařízení totiž vykazují kombinaci vysokých pořizovacích a provozních nákladů, stejně jako vyžadují kvalifikovanou obsluhu. Tato skutečnost znamená velký podíl nákladů zařízení a jeho provozu na celkových výrobních nákladech. Problematika zpřesněného stanovení výrobních nákladů ve spojení s použitím laserových zařízení je rovněž jedním ze směrů vlastního výzkumu. Na Obr. 67b proto může být ukázán příklad struktury hodinové nákladové sazby (HNS) pro vybrané sériově vyráběné laserové zařízení. Právě v neznalosti nebo nepřesném určení výrobních nákladů a ceny nástroje může spočívat jedna z hlavních příčin omezeného použití laseru pro výrobu řezných nástrojů.

Výstupem třetího kroku je vzorek nástroje (zpravidla více kusů a případně i více variant) splňující svým tvarem, rozměry, kvalitou a výrobními náklady zadání. Nedílnou součástí tohoto kroku je ověření a dokumentace kvality zpracování vzorků nástrojů.



Obr. 67: (a) Příklad výstupu v podobě porovnání přesnosti výroby vzorku nástroje laserem vůči zadanému CAD modelu – utvařec na čele břitů nástroje z PKD; (b) Příklad členění hodinové nákladové sazby (HNS) stanovené pro konkrétní laserové zařízení určené pro výrobu řezných nástrojů umístěné ve výrobním provozu. [152]

KROK 4 – KONTROLA A OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ NÁSTROJE

Ověření vlastností vyrobeného nástroje pro nasazení v konkrétní operaci je cílem posledního kroku metodiky. Nástroj musí splňovat technické zadání, ale především musí mít požadovanou funkčnost a splnit účel, za kterým byl vyvinut. Pakliže by bylo nyní zjištěno, že nástroj neplní požadovaný účel, je třeba se ve fázích jeho vývoje vracet zpět.

Testování funkčnosti a řezivosti nástroje je v zásadě možné provést ve dvou fázích: (i) modelové testy funkčnosti nástroje a (ii) testy nástroje v požadované operaci. V případě potřeby urychlení procesu vývoje a výroby nástroje je možné přistoupit přímo k druhé fázi testování.

Základní (tj. modelové) testy nástroje (Obr. 68a) jsou ideálně prováděny na stejném obráběném materiálu, ve stejném pracovním prostředí a na stroji alespoň podobných parametrů, jako jsou ty pro očekávanou aplikaci. Je proveden soubor testů pro nalezení limitů z hlediska mechanické a tepelné únosnosti břítu nástroje a vhodného rozsahu parametrů použitelnosti daného řešení nástroje. Cílem testů tedy není vytvořit konkrétní výrobek. Pro určení vhodných oblastí řezných podmínek bývá nejčastěji voleno jedno nebo kombinace více těchto kritérií:

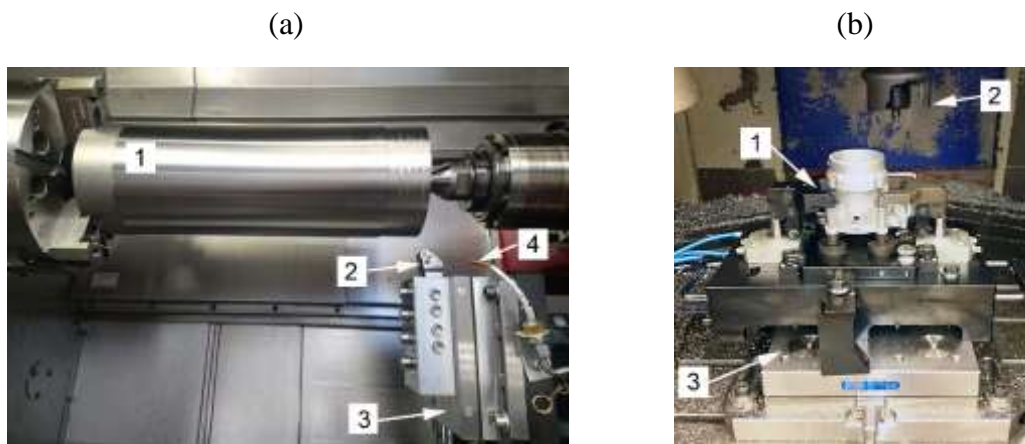
- způsob utváření třísky;
- intenzita opotřebení břítu;
- velikost silového zatížení;
- dosahovaná kvalita obrobeného povrchu a přesnost tvaru.

Poznatky z chování nástroje při modelových testech jsou uplatněny v další fázi testování. Ta souvisí s nasazením vzorků nástroje přímo v dané aplikaci, pro kterou byl vytvořen – Obr. 68b. Pracovní podmínky jsou stanoveny dle vymezených oblastí potenciálně vhodných řezných podmínek z předchozího experimentu s respektováním možností výrobního stroje a upnutí obrobku. Testy jsou vedeny způsobem nalezení pracovních podmínek pro: (i) dosažení kvalitního obrobku a výrobního času dle požadavků technicko-ekonomického zadání a (ii) optimalizace řezných podmínek pro zvýšení efektivity použití nástroje. Tato fáze testování probíhá zpravidla již přímo u zákazníka případně jinde, ale za podmínek v maximálně možné míře shodných s podmínkami reálné aplikace.

Vytvoření struktury tohoto kroku metodiky je založeno na vlastních bohatých zkušenostech s testováním obráběcích nástrojů nejrůznějších provedení a při různých procesech a pracovních podmínkách, a to jak způsobem modelových testů, tak i testů nástroje v požadované operaci. Zaměření a cíle testování mohou být různorodé a velmi specifické. To vyžaduje sofistikovaný přístup k návrhu, realizaci a vyhodnocení testů nástrojů. Jedním z příkladů takového přístupu je vytvoření vlastní metodiky komplexního testování obráběcích nástrojů při ortogonálním soustružení – zdroj [153].

Současně s ověřením technických vlastností nástroje, je důležité provést i zhodnocení ekonomické stránky nového výrobku, a to především ve vztahu k plánované velikosti výrobních nákladů a splnění požadavků na velikost produkce. Není-li dosaženo požadovaných vlastností, je nezbytné se v procesu vývoje a výroby nástroje vrátit zpět.

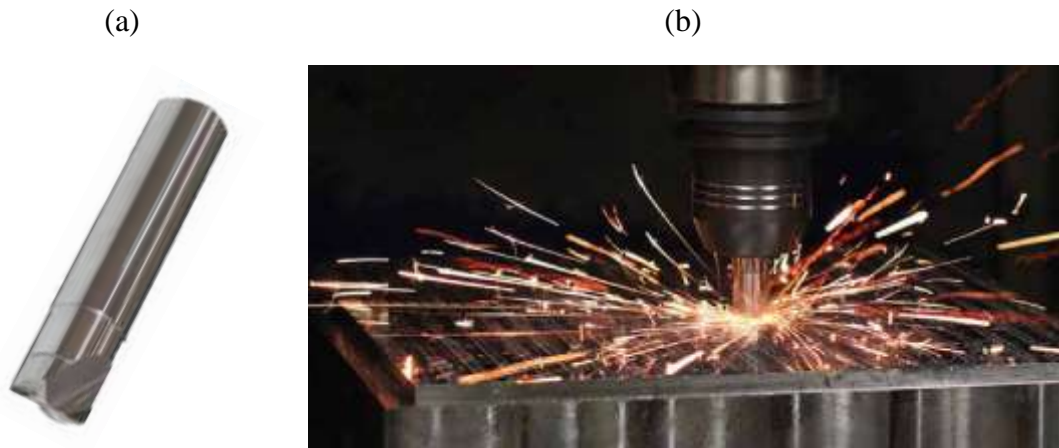
Výstupem posledního kroku vývoje nástroje jsou dva hotové produkty. Jedním je kvalitní dílec vzniklý za podmínek výroby, které jsou zákazníkem akceptovatelné a druhým efektivní a konkurenceschopný řezný nástroj s optimalizovanými parametry použití v dané operaci.



Obr. 68: Příklady experimentálního ověření vlastností nástroje: (a) modelové testy trvanlivosti bříty a měření sil při soustružení (1 – obrobek, 2 – nástroj s VBD vyrobenou laserovou technologií, 3 – dynamometr, 4 – přívod procesní kapaliny) [147]; (b) testy vzorku speciálního frézovacího nástroje v konkrétní frézovací operaci (1 – dílec v přípravku pro upnutí, 2 – nástroj, 3 – dynamometr).

FUNKČNÍ NÁSTROJ

Plně **funkční a konkurenceschopný nástroj** vyrobený nebo modifikovaný s použitím laserové technologie je výsledkem použití metodiky. Ve fázi, když již existuje vhodné řešení a k němu doporučené parametry výroby je možné při opakované výrobě stejného nástroje laserem provádět další úpravy procesu jeho výroby pro to, aby mohly být dále snižovány výrobní náklady, a tedy i cena nástroje. Další podněty pro optimalizaci nástroje a jeho použití mohou vyvstávat z výroby celé ověřovací série obrobků ještě před plnohodnotným zavedením technologie. V tomto ohledu je na základě ověřených poznatků z fungování nástroje možné provést i úpravy technicko-ekonomického zadání a v návaznosti na to upravit vstupy metodiky a následně provést změny ve vybraných fázích realizace nástroje.



Obr. 69: Příklad funkčního řešení a reálné aplikace nástroje z PKNB vyráběného s použitím laseru: (a) reálná podoba nástroje; (b) použití nástroje ve výrobě. [78]

6.3 PŘÍKLADY UPLATNĚNÍ A OVĚŘENÍ METODIKY

Navržená metodika byla doposud aplikována a ověřena při vývoji pěti různých prototypů řezných nástrojů reagujících na konkrétní zadání z průmyslu. Prototypy byly vyrobeny s použitím laseru a byly výsledky aplikovaného výzkumu mezi výzkumnou organizací a průmyslovým podnikem s cílem následného komerčního uplatnění.

V práci uvádím dva příklady aplikace metodiky – vývoj prototypů nástrojů s břity z PKD a z PKNB. S ohledem na důvěrnost a citlivost údajů vycházející z podstaty kolaborativního výzkumu a navazující komercializace výsledků není možné u uvedených příkladů zmiňovat veškeré detaily řešení prototypu, nastavení technologie pro jeho výrobu a dosažených výsledků a ekonomických parametrů. Pro demonstraci použití a ověření metodiky to však není klíčové.

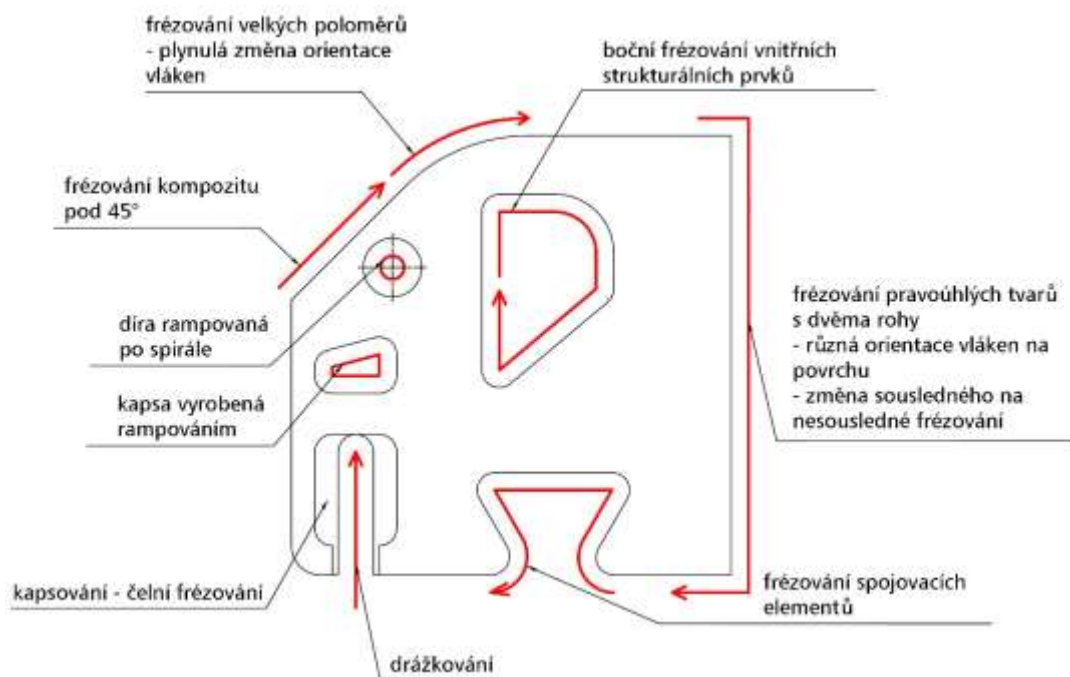
6.3.1 NÁSTROJ Z PKD PRO FRÉZOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

POPIS TECHNICKÉHO ZADÁNÍ

Cílem vývoje byl nástroj s břity z PKD připájenými ke karbidovému tělu pro možnost frézování desek kompozitního materiálu s termoplastickou maticí (FRTP) s označením G/PA12 (tканá atlasová vazba s podílem vláken 50 %). Materiál je relativně špatně obrobitelný, protože kombinuje tvrdá a pevná skelná vlákna (pevnost v tahu: 1900 MPa) a měkkí matici s nízkou teplotou tavení (170 °C). Tyto vlastnosti vedou na možnost

nežádoucího ovlivnění obrobeného povrchu nadlimitní teplotou a na vznik delaminace III. typu (otřep neodříznutých vláken s matricí). Eliminace obou těchto faktorů je však při potřebě zvyšování produktivity pro obrábění FRTP materiálů zásadní.

K zadání pro vytvoření konceptu nového provedení řezného nástroje patřila i skutečnost, že jeden nástroj by měl umět pracovat v několika režimech – ořezávání vnějších a vnitřních kontur, tvorba drážky a osazení a zanořování do materiálu pohybem po spirále. Pro demonstraci všech těchto funkcí nástroje a hodnocení možností jeho uplatnění byl navržen demonstrační dílec (Obr. 70) s předpokládanou tloušťkou 3 mm a maximálními rozměry 150 x 150 mm. Podrobné informace k dílci jsou uvedeny v Příloze 3.



Obr. 70: Návrh demonstračního dílce z materiálu G/PA12 pro ověření vlastností PKD nástroje vyráběného s použitím laseru s naznačením trajektorií nástroje. [146]

Řešením nástroje pro výrazné snížení tepelného zatížení a delaminace a schopnosti pracovat v různých režimech při vysoké produktivitě byl prototyp s těmito vlastnostmi:

- vysoká kvalita řezné hrany (minimální poloměr ostří, tvarová přesnost, celistvost);
- nízká drsnost ploch čela a hřbetu;
- výrazně pozitivní makrogeometrie břitů;
- větší počet břitů nástroje;
- přesnost celkového provedení nástroje.

Dosažení kvalitního provedení řezné hrany bylo možné kombinací volby řezného materiálu s označením CTM302 místo standardně využívaného CTB010 (výrobce obou materiálů: společnost Element Six). Zvolený materiál je multizrného typu – zrna s různou velikostí (2 až 30 μm). Pro tvorbu geometrie břitu byl použit laser. Tato kombinace umožnila přípravu kvalitní řezné hrany s minimem defektů, poloměrem v jednotkách mikrometrů a nízkou drsností povrchu navazujících ploch pro omezení adheze obráběného materiálu.

Pro výrazné snížení tepla generovaného při obrábění je třeba výrazně snížit silové zatížení plynoucí z procesu a zvolit vhodnou strategii obrábění. Síly je možné v tomto případě při stejných řezných podmínkách redukovat použitím výrazně pozitivní geometrie břitu, tj. utvařečem na čele břitu. Ten byl vytvořen laserovou ablací PKD. Současně byl břitový element v lůžku orientován s nulovým úhlem sklonu ostří (tzv. osový úhel) pro další omezení delaminace současně na horní i spodní hraně kompozitu. Zvolenou strategií obrábění bylo nesousledné frézování, které umožňuje dále snižovat tepelné ovlivnění obrobené plochy při obrábění kompozitních materiálů.

Vyšší produktivity lze v tomto případě dosáhnout buď zvyšováním řezných podmínek (v případě FRTP materiálu je to problematické kvůli limitní teplotě řezání) nebo zvýšením počtu břitů frézy. Stopkové frézy s pájenými břity z PKD segmentů menších průměrů bývají v naprosté většině případů vyráběny technologií ručního pájení. To má za následek, že takové frézy jsou zpravidla vybaveny pouze dvěma zuby. Pro navržený nástroj byla použita metoda vakuového pájení s automatickým režimem, což umožnilo osadit nástroj jmenovitého průměru 12 mm čtyřmi břity s vysokou kvalitou pájeného spoje a přesností ustavení řezných elementů.

Pro návrh vlastního konceptu nástroje, který bude svými vlastnostmi unikátní, byla provedena analýza jiných vhodných a na trhu již existujících nástrojů s břity z PKD. V portfoliu speciálních nebo katalogových produktů předních světových výrobců nástrojů tohoto typu nebylo nalezeno řešení kompletně splňující potřeby zadání. Detaily provedení doporučených nejvhodnějších alternativních řešení jsou ukázány na Obr. 71a.

Výroba vyvíjeného PKD nástroje je tvořena více kroky – výroba polotovarů a broušení karbidového tělesa a stopky, výroba polotovarů segmentů, pájení segmentů a laserové obrábění geometrie břitu a kontrola. Popis je zde soustředěn jen na technologii tvorby makro- a mikrogeometrie břitu nástroje laserem. Pro výrobu nástroje bylo k dispozici

laserové zařízení Laser Line Ultra (společnost EWAG AG) s pěti mechanickými a třemi optickými souvisle řízenými osami. Zařízení je osazeno laserovým zdrojem s délkou pulsu v řádu pikosekund. Ostatní důležité parametry zařízení jsou uvedeny v Příloze 4.

Na základě zde popsaného zadání byl navržen koncept nástroje s detaily provedení geometrie břitu, 3D model řezné části nástroje, výrobní postup a byly připraveny polotovary a vzorky pro testování. Koncept nástroje je v podobě z CAD modelu znázorněn na Obr. 71b. Přehled hlavních parametrů nástroje je obsahem Přílohy 5.

Nástroj	Konkurent 1	Konkurent 2	Konkurent 3	Konkurent 4	Vzorek
Typ	katalogový	speciální	katalogový	katalogový	speciální
Počet zubů [-]	2	2	2	2	4
Průměr nástroje [mm]	12	8	12	12	12
Osový úhel [°]	R=2	L=4	R=4,5	R=4	0
1. úhel hřbetu na obvodu [°]	10	17	6	12,5	13
2. úhel hřbetu na obvodu [°]	20	21	13	14	18
1. úhel hřbetu na čele [°]	8,5	9,5	10	7	6
2. úhel hřbetu na čele [°]	8,5	9,5	10	14	6
Axiální úhel čela [°]	x	x	1	0,5	0
3D utvařec třísky	NE	ANO	NE	NE	ANO
Poloměr zaoblení ostří [μm]	8,2	x	5,9	10	4



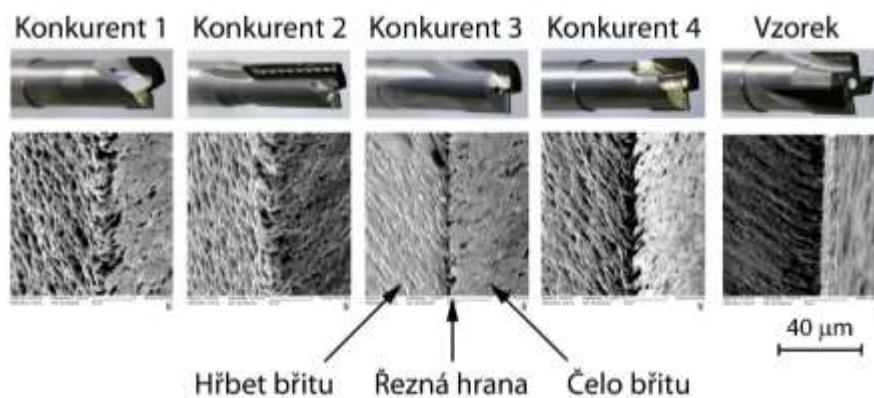
Obr. 71: (a) Porovnání provedení konkurenčních nástrojů a vyvíjeného vzorku nástroje; (b) koncept vlastního vyvíjeného řešení. [146]

POSTUP UPLATNĚNÍ METODIKY

V tomto případě byla metodika uplatňována v části kroku 2 a následně v krocích 3 a 4. Základní testy pro poznání interakce laserového paprsku s materiálem zde nebyly realizovány, jelikož pro dané zařízení a materiál (CTM302) již byly tyto údaje známy z předchozích realizací. Stejně tak již byly dříve optimalizovány parametry laseru s ohledem na kvalitu a produktivitu ablace tohoto typu PKD. Tyto parametry byly proto použity pro návrh strategií výroby nástroje laserem v následujícím kroku.

Realizace kroku 2 spočívala zejména v definici drah a parametrů paprsku pro dvě základní strategie: (i) tangenciální pro výrobu ostří a navazujících hřbetních ploch a (ii) radiální pro výrobu utvařeče třísek na čele břitu. Každá ze strategií byla rozdělena na dílčí operační úseky – hrubovací, polodokončovací a dokončovací. Pro každý úsek byly použity specifické podmínky z hlediska průměrného výkonu laseru, frekvence pulsů a rychlostí pohybu paprsku (resp. příčného a podélného překrytí pulsů). Výsledky testů

nastavení strategií ablace materiálu laserem byly průběžně analyzovány na přístroji pro měření a seřizování nástrojů a na optickém mikroskopu s možností tvorby 3D modelu vzorku a porovnáním s výchozím CAD modelem. Na stejném zařízení byla rovněž hodnocena drsnost povrchu a kvalita a rozměr řezné hrany. Výsledkem bylo optimální nastavení laseru a jeho strategie pro následnou výrobu funkčních vzorků daného nástroje. Fáze realizace funkčních vzorků nástroje (**krok 3**) znamenala zpracování pěti identických vzorků kompletním řetězcem výrobních operací. Laserová technologie byla uskutečněna za, v předchozích fázích optimalizovaných, podmínek. U připravených vzorků nástrojů byla provedena analýza kvality provedení a její porovnání s vybranými konkurenčními nástroji. Poloměr řezné hrany se u vzorků pohyboval v rozmezí od 3 do 4,5 μm , což byla v porovnání s konkurenčními řešeními výrazně nižší hodnota (5,9 až 10 μm , resp. 16 μm pro variantu vlastního standardního nástroje s broušeným břitem). Rovněž kvalita řezné hrany a navazující čelní a hřbetní plochy je v porovnání s alternativními nástroji výrazně vyšší, jak dokládá Obr. 72.



Obr. 72: Porovnání kvality provedení řezné hrany a plochy čela a hřbetu břitu vyvíjeného vzorku nástroje a vybraných konkurenčních nástrojů.

Součástí výroby funkčních vzorků nástroje bylo stanovení velikosti výrobních nákladů pro jeden kus nástroje na konkrétních výrobních zařízeních. Na základě stanovení HNS daného laserového pracoviště [152] a času výroby jednoho kusu bylo možné určit příspěvek laserové technologie pro výrobní náklady celého nástroje. Příspěvek činil 4226 Kč / kus a byl připočten k celkovým výrobním nákladům. V případě, že by pro výrobu základní geometrie břitu nástroje (ovšem bez utvařeče třísek) byla použita konvenční technologie broušení, byl by tento příspěvek 2266 Kč / kus. V případě standardního tedy doposud vyráběného nástroje, který byl v daném průměru dvoubřitý s broušenou geometrií bez utvařeče tento příspěvek činil pouze 1259 Kč / kus. Rozdíl celkových

výrobních nákladů mezi uvedenými nástroji nebyl tak výrazný s ohledem na skutečnost, že výroba makrogeometrie laserem tvořila cca 40 % podíl celkových výrobních nákladů. Cena materiálu a ostatních výrobních operací by byla pro všechny nástroje velmi podobná.

Použití laseru vedlo na výrazně vyšší výrobní náklady, ovšem nástroj byl v provedení (kvalita ostří a navazujících ploch; utvařič třísky), které nebylo možné broušením docílit. Uvedené aspekty mohou ovlivnit obráběcí proces natolik, že použití nástroje s laserem vytvořenou geometrií břitu může být z celkového pohledu efektivnější. Jen skutečnost použití dvojnásobného počtu břitů oproti doposud používanému řešení teoreticky 2x zvyšuje produktivitu obrábění vyvíjeným nástrojem. Tyto skutečnosti byly experimentálně ověřeny.

Ve shodě s náplní **kroku 4** metodiky byly testy nástroje rozděleny na modelové testy frézováním a na testy výroby konkrétního dílce. Obě sady testů proběhly na materiálu G/PA12.

Modelové testy nástroje byly prováděny s cílem stanovit relativní řezivost vůči variantě nástroje, která byla ve stejné velikosti vyrobena konvenčním přístupem, tj. bez použití laserové technologie. Jednalo se o dvoubřitý nástroj vyrobený podobným způsobem, avšak s tvorbou geometrie břitu broušením a bez utvařiče třísek. Relativní řezivost byla posouzena z hlediska:

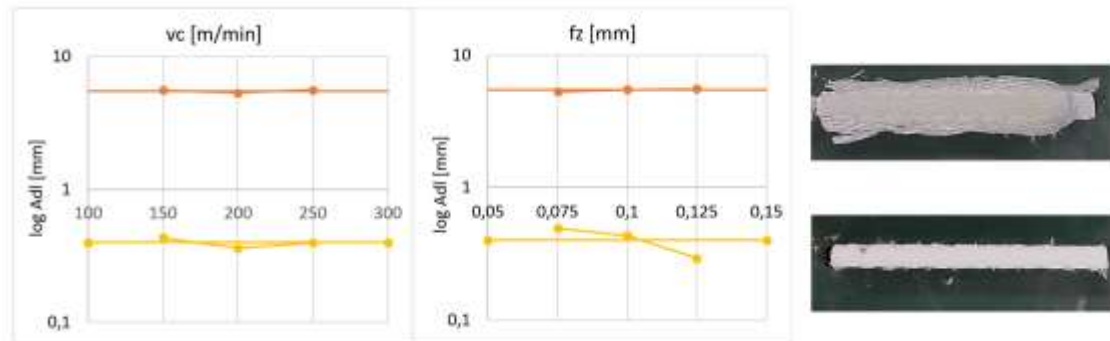
- velikosti sil při obrábění;
- delaminace povrchu vzorků materiálu (horní i dolní strana dílce);
- drsnost obrobeného povrchu.

Testy suchého sousledného frézování při lineárním pracovním přejezdu proběhly za těchto řezných podmínek: $v_c = 150, 200$ a $250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,075, 0,1$ a $0,125 \text{ mm}$, $a_p = 3 \text{ mm}$, $a_e = 1$ až 12 mm .

Z výsledků modelových testů vyplynulo, že vyvíjeným prototypem nástroje je možné při $a_e = 4 \text{ mm}$ snížit výslednou sílu řezání o 50 až 58 % a sílu F_c o 20 až 30 % v porovnání se standardním nástrojem. Pro obě síly byl naměřen vyšší rozdíl mezi oběma nástroji s rostoucím f_z . Řezná rychlost neměla na změnu velikosti sil výraznější vliv.

Vyhodnocení delaminace bylo vyjádřeno parametrem A_{dl} – průměrnou délkou delaminace, tj. plochou neodříznutých vláken s matricí (otřepu) vztaženou na délku hrany vzorku. Zatímco pro standardní nástroj byla hodnota A_{dl} rovna cca 5,5 mm, pro vyvíjený

nástroj to bylo 0,4 mm – Obr. 73. Řezná rychlost zde neměla výraznější vliv. Pro vyvíjený nástroj byla hodnota délky otřepu s rostoucím posuvem klesající. Se změnou parametru a_e se přitom delaminace výrazněji neměnila.



Obr. 73: Vliv řezných podmínek na průměrnou délku otřepů (oranžová barva – standardní nástroj, žlutá barva – vyvíjený prototyp). Vpravo jsou uvedeny snímky obrobeneho povrchu a delaminace hran vzorků po obrábění za identických podmínek (nahore – po obrábění standardním nástrojem, dole – po obrábění vyvíjeným prototypem). [146]

Posledním sledovaným kritériem byly parametry drsnosti obrobeneho povrchu R_a a R_z . Řezná rychlost neměla na velikost obou parametrů výraznější vliv. Nově vyvíjený nástroj vykazoval v závislosti na hodnotě posuvu snížení R_a o 38 až 46 % a R_z o 28 až 34 % oproti nástroji standardnímu.

Modelovými testy bylo potvrzeno, že řezivost vyvíjeného nástroje je ve všech důležitých parametrech výrazně vyšší v porovnání s doposud používaným standardním nástrojem. Vyvíjený nástroj prokázal potenciál pro výrazně produktivnější a kvalitnější obrábění materiálu G/PA12. Byly stanoveny oblasti podmínek, které budou sloužit k otestování nástroje při obrobení konkrétního dílce: $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ nebo vyšší, $f_z = 0,125 \text{ mm}$ nebo vyšší, $a_e = 4 \text{ mm}$, sousledné frézování.

Ověření funkce nástroje proběhlo při obrábění demonstračního dílce (Obr. 70). Nejprve bylo realizováno testování pro upřesnění nejvhodnějších řezných podmínek vedoucích k vysoké produktivitě při požadované kvalitě dílce. Několika optimalizačními kroky byly pro kompletní obrobení dílce stanoveny tyto podmínky: $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (limit použitého obráběcího stroje) a $f_z = 0,15 \text{ mm}$.

Aby byl objektivně definován potenciál vyvíjeného nástroje bylo použito srovnání s konkurenčními produkty pracujícími za stejných, případně odlišných (výrobce nástroje doporučených) řezných podmínek a s již dříve testovaným standardním

nástrojem. Hlavními hledisky pro vyhodnocení potenciálu nástroje byla velikost plochy otřepu (delaminace) hran dílce a čas pro jeho obrobení.

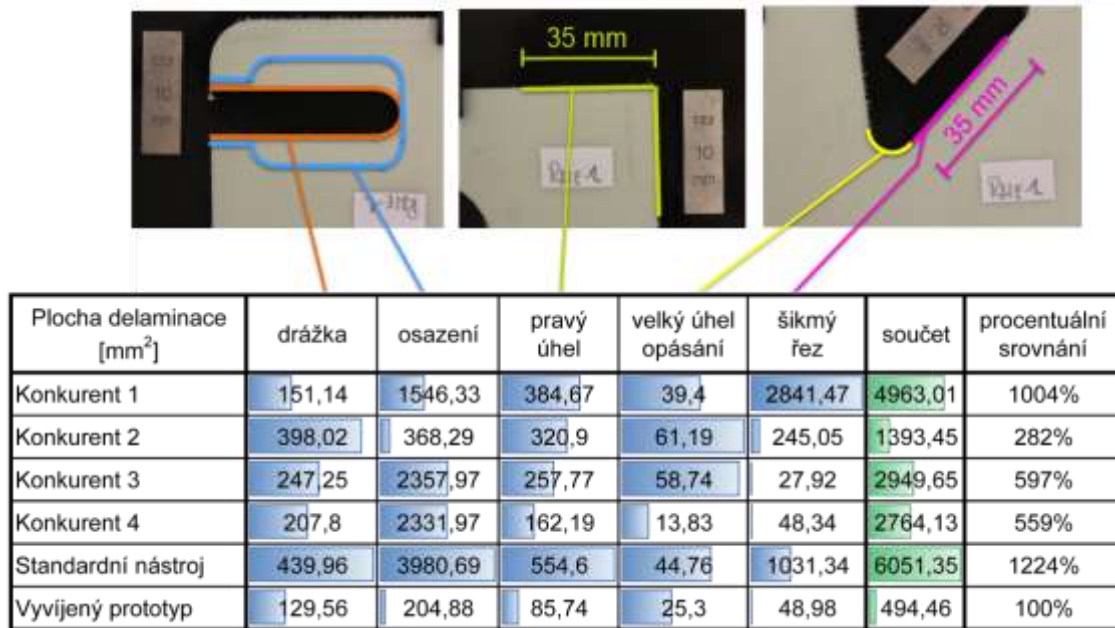
Obrábění probíhalo ve dvou operacích s jedním přeupnutím dílce na pětiosém frézovacím centru DMU 50 Ecoline (Obr. 74). Nástroje byly upnuty v hydraulickém upínači TENDO SDF-E compact s upínacím rozhraním SK 40.



*Obr. 74: (a) Příprava dílce a jeho upnutí na obráběcím stroji: (a) první operace – výroba vnitřních prvků; (b) druhá operace – dokončení dílu výrobou vnějších prvků.
[146]*

Porovnání kvality vyráběného dílce jednoznačně prokázalo, že plocha delaminace na dílci v součtu pro horní i spodní hranu dílce byla zdaleka nejnižší pro vyvíjený nástroj - Obr. 75 a Obr. 76. Z výsledků je patrné, že vhodně navržená a pozitivní geometrie břity s vysokou kvalitou řezné hrany je pro minimalizaci delaminace na tomto typu materiálu rozhodujícím faktorem.

I z hlediska produktivity obrábění ukázal vyvíjený prototyp nástroje vyráběný prostřednictvím laseru nejlepší výsledky. Jelikož bylo zvládnuto osazení nástroje celkem čtyřmi břity, bylo při stejných nebo podobných řezných podmínkách dosaženo v porovnání s ostatními nástroji výrazného zkrácení strojního času při výrobě dílce. Pro vyvinutý prototyp se podařilo dosáhnout času obrobení dílce v trvání 2,32 min. To je úspora 13 % oproti vlastnímu standardnímu nástroji a 10 % v porovnání s nejlepším konkurenčním nástrojem. Větší úspora času nebyla možná pouze s ohledem na limity dynamiky pohybů obráběcího stroje.



Obr. 75: Výsledky vyhodnocení plochy delaminace dílce při obrábění vyvíjeným prototypem nástroje a porovnání s konkurenčními nástroji.

Zhodnocení vyvinutého funkčního řešení nástroje v rámci metodiky lze nakonec doplnit i o rozbor jeho použití v konkrétní zákaznické aplikaci. Nástroj v téměř identické podobě byl na základě výsledků dosažených při testování úspěšně nasazen pro konkrétní zákaznickou technologii – frézování tenkostěnného dílce z kompozitního materiálu s měděnou drátovou sítí. Mimo jiné bylo v porovnání s konkurenčními produkty dosaženo 10x nižší delaminace obrobeneých hran dílce. Přesto, že zde nelze uvést bližší údaje o použití a výsledcích, byl PKD nástroj vyrobený laserem úspěšně používán.



Obr. 76: Porovnání kvality vybraných dílců z hlediska plochy delaminace (zleva): Standardní nástroj; Konkurent 2; Vyvíjený prototyp.

6.3.2 NÁSTROJ Z PKNB PRO FRÉZOVÁNÍ KALENÉ OCELI

POPIS TECHNICKÉHO ZADÁNÍ

V druhém případě byl cílem vývoje s uplatněním metodiky prototyp frézovacího nástroje s břity z PKNB, který by mohl být používán jako efektivní alternativa a případně plná náhrada procesu rovinného broušení. Obráběnými materiály by měly být kalené oceli s tvrdostí vyšší než 50 HRC. Nástroj by měl být univerzálnějšího použití, kterým by bylo možné obrobit jak větší rovinné plochy, tak i části obrobků v podobě osazení a kapes.

Pro ověření funkčnosti nástroje byl určen konkrétní dílec – střižník z kalené nástrojové oceli (ocel 19573.4, tvrdost 60 HRC) s funkční rovinnou plochou o rozměrech 185 x 115 mm – Obr. 86a. Jednalo se renovaci funkčního povrchu dílce, která je standardně prováděna broušením. Nevýhodou stávajícího způsobu renovace tohoto dílce je celkově delší výrobní čas související s nezbytným přenosem dílce z frézovacího centra (po opracování technologické základny frézováním) na broušící stroj. To resultuje v delší přípravné a výrobní časy. Je proto možné uvažovat o náhradě technologie broušení tvrdým frézováním a dílce kompletně renovovat na jednom stroji.

Tvrdé frézování kalených ocelí nástroji s břity z PKNB je již zavedenou technologií. Aby však bylo skutečně alternativní technologii k broušení, je třeba frézováním docílit vysoké kvality drsnosti povrchu, tvarové a rozměrové přesnosti a opakovatelnosti výroby. Vysoké tepelné a proměnné silové zatížení břitu frézovacích nástrojů při obrábění kalených materiálů resultuje ve vysokou intenzitu opotřebení břitu. Při použití materiálů, které odolávají vyšším teplotám (řezná keramika nebo PKNB) je kritickým faktorem nízká pevnost břitu ve spojení s nízkou lomovou houževnatostí. Určitým posunem v možnostech tvrdého frézování je využití nových typů PKNB materiálů tedy těch, které obsahují vyšší podíl tvrdé fáze různé zrnitosti na úkor obsahu pojiva – HcBN materiály.

Byla realizována vlastní materiálová analýza dvou PKNB materiálů, které je možné dle doporučení výrobce nasadit pro dokončovací frézování kalených dílců. Standardním materiálem je DCN450 (LcBN; výrobce: Element Six Ltd.) s obsahem tvrdé fáze 45 %, submikronovou velikostí zrn a pojivem TiCN. Druhý materiál s označením SB100 (HcBN; výrobce: společnost ILJIN Group) má obsah tvrdé fáze 93 %, se zrny různé velikosti až do 10 μm a pojivo AlN. Opakovaným měřením bylo zjištěno, že tvrdost HcBN materiálu byla vyšší o 15 % a lomová houževnatost až o 45 % v porovnání s LcBN materiálem. [78]

Koncept vyvíjeného prototypu nástroje byl navržen do podoby dvoubřité stopkové frézy o jmenovitém průměru 16 mm s tělesem ze slinutého karbidu s napájenými břitovými segmenty minimálních rozměrů z materiálu SB100. Vzhledem k vysokému podílu tvrdé fáze různé velikosti je ovšem materiál obtížně a neekonomicky brouditelný do konečné podoby geometrie charakterizované výraznou čelní negativní fazetou. Z tohoto důvodu byla geometrie břitu vytvořena laserovou ablací. Pro zpevnění břitu a zvýšení odolnosti proti rázům byla navržena negativní fazeta o délce 0,1 mm s úhlem čela $\gamma_0 = -25^\circ$. Poloměr



Obr. 77: Koncept vyvíjeného řešení PKNB nástroje.

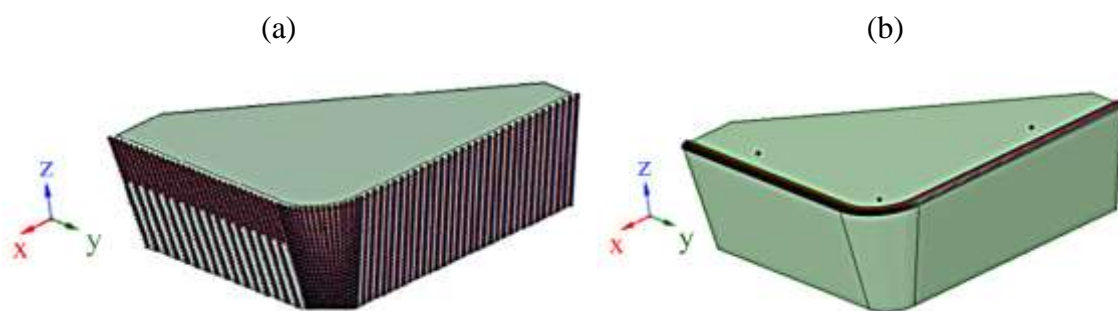
špičky byl navržen na hodnotu 0,8 mm. Koncept nástroje je ukázán na Obr. 77. Znázornění nástroje s vyznačením hlavních charakteristik je obsahem Přílohy 6.

Spolu s konceptem nástroje byly připraveny polotovary a vzorky pro následující testy a byl rovněž navržen výrobní postup pro všechny fáze výroby. Výroba PKNB nástroje se opět skládala z více kroků – příprava a broušení karbidového tělesa a stopky, výroba polotovarů segmentů, pájení segmentů a laserové obrábění geometrie břitu segmentu. Stejně jako u předchozího příkladu bylo použito laserové zařízení Laser Line Ultra.

POSTUP UPLATNĚNÍ METODIKY

První krok uplatnění metodiky spočíval v ověření hodnot ablačního prahu daného řezného materiálu. Pro vlnovou délku záření (1064 nm) generovaného laserovým zdrojem a délku pulsu v řádech pikosekund (<15 ps) byla hodnota F_{th} stanovena na $0,35 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ (kap. 5.6.2). S ohledem na, v předchozích částech práce již uvedená, data z měření efektivity ablace různých řezných materiálů (i PKNB, viz kap. 5.6.3) bylo určeno, že výchozí podmínky pro tvorbu geometrie břitu laserovou ablací budou zvoleny pro intenzitu energie v intervalu $(7,5 \text{ až } 12,5) \times F_{th}$, tedy $F = 2,6 \text{ až } 4,4 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Horní hranice intenzity přitom byla preferována pro režim s potřebou intenzivnějšího úběru materiálu a nižší hodnoty v rámci intervalu pak byly použity pro dosažení vysoké kvality povrchu. Pro dané výrobní zařízení byly na základě intenzity energie navrženy hodnoty použitého výkonu, frekvence pulsů, překrytí pulsů a z toho vyplývajících rychlostí pohybu svazku.

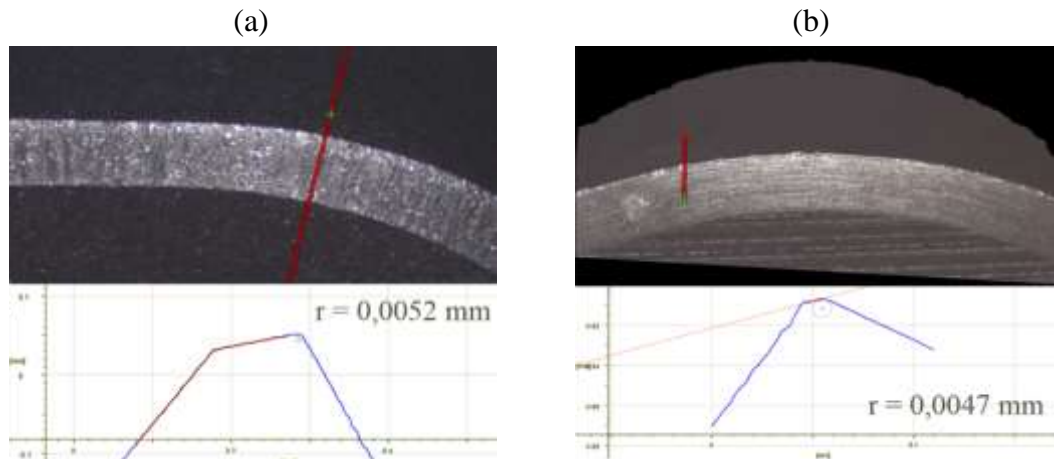
Při řešení **2. kroku** byla nejprve navržena tangenciální strategie opracování hřbetu bříty (operace 1) a následně čelní negativní fazety (operace 2) - Obr. 78. Každá ze strategií byla rozdělena na dílčí operační úseky – hrubovací, polodokončovací a dokončovací, pro které byly experimentálně nalezeny vhodné podmínky z hlediska výkonu laseru, frekvence pulsů a rychlostí pohybu paprsku (resp. příčného a podélného překrytí pulsů). Výsledky testů nastavení strategií ablace materiálu laserem byly průběžně analyzovány na optickém mikroskopu s možností inspekce kvality a rozměrů řezné hrany, čelní fazety a hřbetu. Výsledkem bylo optimální nastavení laseru a jeho strategie pro následnou výrobu funkčních vzorků daného nástroje.



Obr. 78: Dvě tangenciální operace pro vytvoření geometrie bříty PKNB segmentu laserem: (a) strategie tvorby hřbetní plochy; (b) strategie pro výrobu čelní fazety.

Ve **3. kroku** uplatnění metodiky byla zvládnuta kompletní výroba nástroje, kdy součástí procesu byla i laserová technologie při parametrech optimalizovaných v předchozí fázi. Vyvinutým výrobním postupem bylo zpracováno deset identických vzorků nástrojů s břitou z materiálu SB100. Dále bylo připraveno i pět vzorků nástrojů stejné konstrukce a geometrie bříty, avšak vyrobených standardním postupem, kdy řezným materiálem byl DCN450 (typ LcBN) a hřbetní plocha a čelní fazeta byly broušeny.

Jak je zřejmé z Obr. 79 laserované nástroje vykazovaly v porovnání s broušenými kvalitnější provedení ostří z hlediska jeho tvaru a přítomnosti defektů. Průměrná hodnota poloměru ostří na obou typech nástrojů byla sice podobná (cca 6 μm), avšak u broušeného nástroje se na ostří vyskytovaly defekty a z toho plynoucí nekvalita tvaru hrany. Tyto defekty výrazně zvyšovaly rozptyl hodnot poloměru ostří (např. na jednom nástroji v intervalu 3,2 až 8 μm). Optimalizovanými parametry bylo možné opakovaně vytvářet laserem čelní fazetu s drsností povrchu v průměru $Ra = 0,6 \mu\text{m}$, $Rz = 2,8 \mu\text{m}$. Drsnost povrchu fazety po broušení byla ovšem výrazně nižší – $Ra = 0,1 \mu\text{m}$, $Rz = 0,4 \mu\text{m}$.



Obr. 79: Snímky břítu nástrojů (popisováno odshora – hřbetní plocha, řezná hrana, čelní fazeta a čelo břítu; dole – řez břitkem červenou úsečkou): (a) vzorek vyvíjeného nástroje z materiálu SB100 vyrobený s použitím laseru; (b) vzorek nástroje z materiálu DCN450 vyrobený broušením.

Při výrobě funkčních vzorků vyvíjeného prototypu nástroje optimalizovanými procesy byl stanoven příspěvek výrobních nákladů laserové technologie vztažený na jeden kus. Výrobní náklady byly určeny na základě znalosti času výroby a HNS laserového pracoviště. Příspěvek byl kalkulován na 2265 Kč / kus a byl připočten k celkovým výrobním nákladům. Na základě znalosti výrobních nákladů ostatních výrobních procesů a ceny materiálu bylo možné stanovit celkové výrobní náklady na jeden vzorek nástroje. Broušení materiálu DCN450 do stejné geometrické a rozměrové podoby nástroje by znamenalo 1359 Kč / kus. Náklady na ostatní fáze výroby by pro oba nástroje byly shodné. Oba procesy byly přibližně stejně časově náročné. Rozdíl nákladů tak vznikl především díky odlišným HNS obou výrobních pracovišť. Vzniklý rozdíl v neprospěch laserované varianty nástroje by měl být ideálně kompenzován výrazně vyššími funkčními vlastnostmi a zvýšenou kvalitou provedení a řezivostí spojenou i s možností použití vhodnějšího typu řezného materiálu.

Vlastnosti obou nástrojů byly ověřeny modelovými testy v rámci **kroku 4**. Testy byly zaměřeny na vliv strategie frézování (nesousledné, sousledné) a řezných podmínek na chování dvou výše zmíněných typů nástrojů z hlediska:

- opotřebení břítu a jeho trvanlivosti;
- velikosti sil při obrábění;
- drsnosti obrobeného povrchu.

Materiálem obrobku byla ocel 19552.4 (tvrdost 55 HRC). Nastavení experimentu na vertikálním obráběcím centru MCFV 5050LN (výrobce Tajmac ZPS, vřeteno o max. výkonu 18 kW a max. otáčkách $15\,000\text{ min}^{-1}$) je na Obr. 80. Pro testy bylo použito přirozené řezné prostředí. Při modelových testech byly vzorky nástrojů osazeny vždy jen jedním břitem pro vyloučení vlivu rozdílné přesnosti usazení a dokončení břitů nástroje.



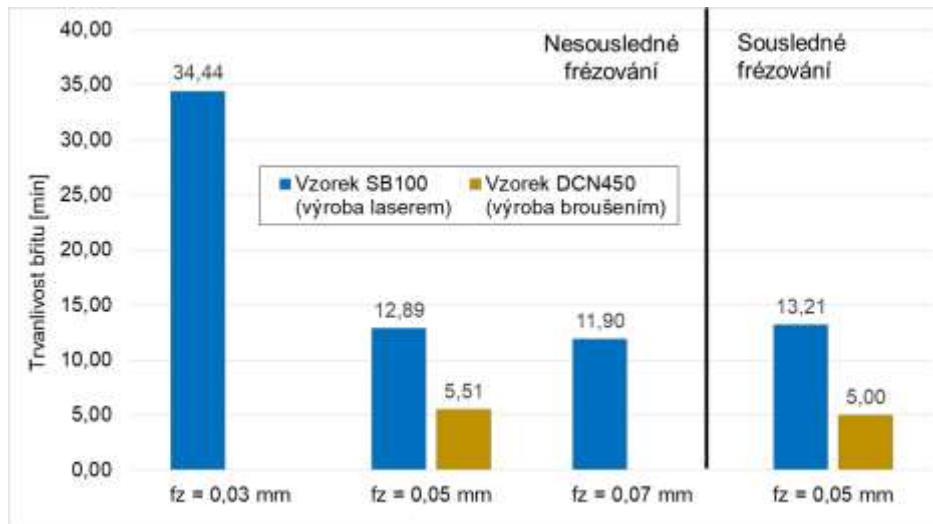
Obr. 80: Nastavení experimentu pro modelové testy frézovacích nástrojů z PKNB: 1 – testovací obrobek pro měření trvanlivosti břitu; 2 – obrobek ze stejného materiálu upnutý na dynamometru pro měření silového zatížení.

Testy trvanlivosti břitu standardního nástroje a nově vyvíjeného prototypu proběhly za těchto podmínek: $v_c = 700\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f_z = 0,03, 0,05$ a $0,07\text{ mm}$, $a_p = 0,2\text{ mm}$, $a_e = 12\text{ mm}$, sousledné a nesousledné frézování. Vyhodnocení vycházelo z normy ISO 3685. Kritériem opotřebení (konec trvanlivosti břitu) bylo dosažení velikosti opotřebení na hřbetě některého z vyhodnocovaných parametrů (VB_{max} , VB_N , VB_C , VB_b) $0,5\text{ mm}$. Pro každé použité podmínky obrábění byla provedena celkem 3 měření a výsledná hodnota trvanlivosti byla jejich aritmetickým průměrem.

Výsledky provedených testů jsou zachyceny na Obr. 81. Při nesousledném frézování bylo u obou vzorků dosaženo podobné trvanlivosti břitu jako při strategii sousledného frézování. Vzorek z materiálu SB100 zpracovaný laserem vykazoval při střední hodnotě posuvu 2,3 a 2,6 x delší trvanlivost břitu v porovnání se vzorkem z materiálu DCN450. Tento přínos nelze jistě přisuzovat pouze výrobní technologii, ale spíše použití tvrdší a houževnatější varianty řezného materiálu pro výrobu laserem.

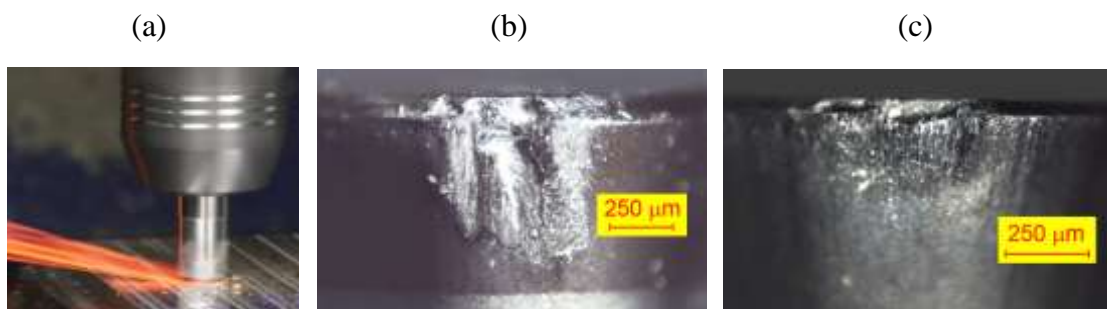
Z Obr. 82 je patrný rozdíl charakteru a intenzity opotřebení obou typů nástrojů. Na příkladu nesousledného frézování při $f_z = 0,05\text{ mm}$ je zjevné, že standardní nástroj s břity z materiálu DCN450 vykazoval sklon ke katastrofickému poškození břitu formou lomu –

snímek (b). Při porovnání s laserovanou geometrií břitu vyvíjeného prototypu z materiálu SB100 je po stejné době obrábění (5 minut) za stejných podmínek jednoznačný vliv vyšší pevnosti břitu a jeho odolnosti proti mechanickým rázům vznikajícím při frézování. To vede na výrazně nižší intenzitu opotřebení takového nástroje – Obr. 82c.



Obr. 81: Vliv strategie obrábění a posuvu na zub na hodnoty trvanlivosti břitů obou testovaných typů nástrojů.

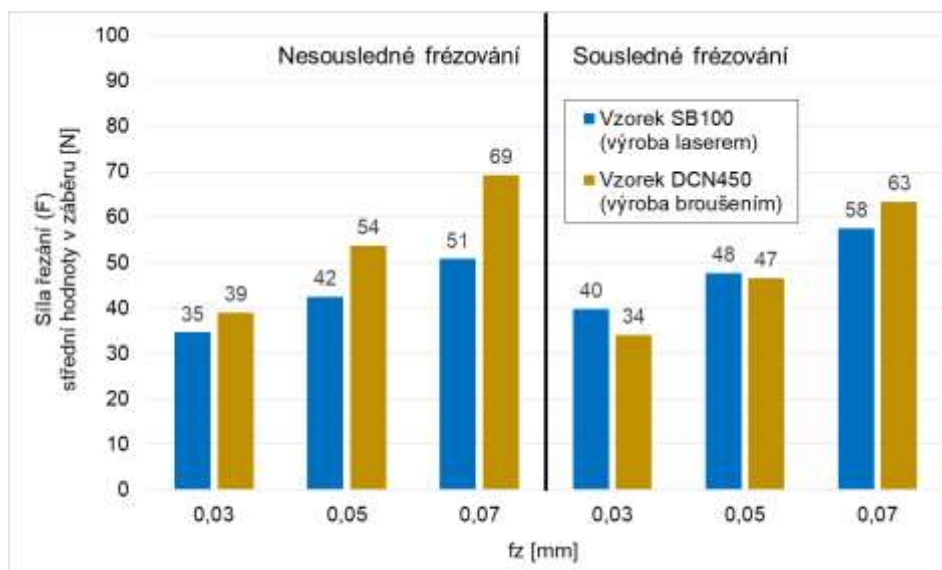
Testy pro stanovení vlivu řezných podmínek a strategie frézování na velikost silového zatížení byly uskutečněny za stejných řezných podmínek jako předchozí test. Pro oba nástroje byla vyhodnocována a porovnávána průměrná a maximální hodnota celkové síly řezání v záběru a jejich složek. Každá z hodnot síly byla aritmetickým průměrem 10 x 3 hodnot (10 po sobě následujících záběrů v jednom měření, 3 různá měření).



Obr. 82: Velikost a charakter opotřebení při nesousledném frézování a $f_z = 0,05$ mm: (a) detail průběhu testů; (b) opotřebení hřbetu břitu nástroje z materiálu DCN450 po 5 minutách obrábění; (c) opotřebení hřbetu břitu nástroje z materiálu SB100 po 5 minutách obrábění.

Celková síla řezání byla v průměrných hodnotách v záběru u obou typů testovaných nástrojů velmi podobná pro sousledné i nesousledné frézování - Obr. 83. Naopak

maximální hodnoty síly pro sousledné frézování byly bez ohledu na typ nástroje větší v intervalu o 1 až 15 %. Typ řezného materiálu a způsob jeho výroby se projevil zejména při nesousledném frézování, kdy zřejmě kvalita zpracování řezné hrany a její rozměr znamenaly v závislosti na zvoleném posuvu na zub u vyvíjeného prototypu snížení střední hodnoty síly mezi 10 až 26 % a maximální hodnoty síly o 4 až 18 % v porovnání se standardním nástrojem. Rozdíl se přitom v obou případech zvyšoval s rostoucí hodnotou posuvu na zub. Tyto rozdíly vznikaly především v souvislosti s rozdíly v pasivní síle (F_p) působící ve směru osy rotace nástroje. Při srovnání s řeznou silou a řeznou silou normálovou byla tato složka u obou testovaných variant a při všech kombinacích řezných podmínek výrazně největší.

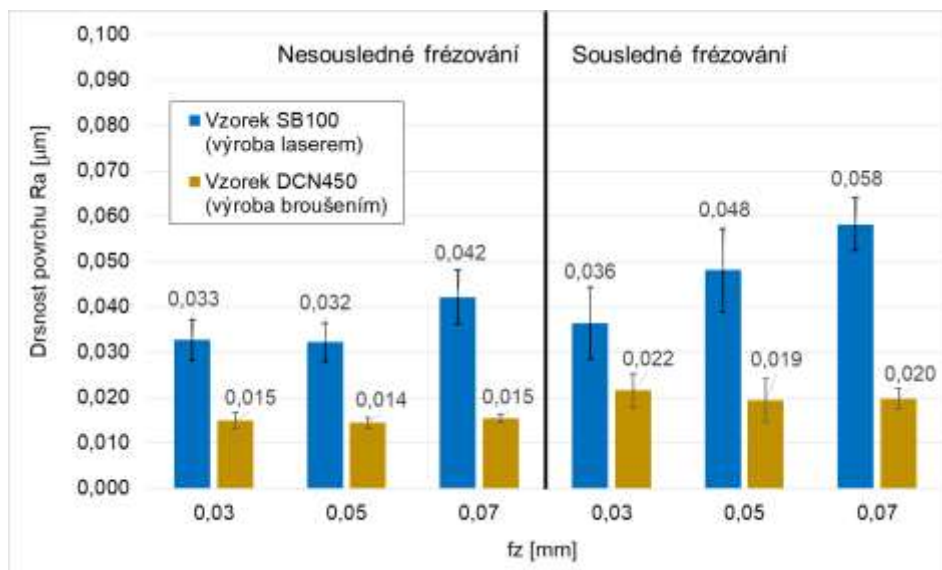


Obr. 83: Vliv strategie obrábění a posuvu na zub na hodnoty celkové síly řezání pro oba testované typy nástrojů.

Poslední částí modelových testů byl experiment pro určení vlivu strategie frézování a řezných podmínek na drsnost obrobeného povrchu. Nastavení řezných podmínek bylo identické jako v předchozích dvou testech. Pro každé podmínky bylo provedeno celkem 10 opakovaných měření parametrů R_a a R_z dle ČSN EN ISO 4287 s nastavením pro periodický povrch. Měření bylo prováděno rovnoběžně se směrem posuvu nástroje v místě maximální hodnoty tloušťky odřezávané vrstvy ($a_e = D_n / 2$, kde D_n – průměr nástroje), kde lze teoreticky předpokládat nejvyšší drsnost povrchu.

Drsnost povrchu hodnocená parametry R_a a R_z byla pro oba vzorky velmi nízká. To je důsledek více faktorů především: (i) použití jednoho břitu (neprojevuje se axiální přesazení jednotlivých břitů vícebřitého nástroje, (ii) vysoké řezné rychlosti (drsnost

povrchu je zpravidla klesající s nárůstem řezné rychlosti), (iii) nižších hodnot posuvu na zub (drsnost povrchu je zpravidla rostoucí s posuvem), (iv) kombinace malé hloubky řezu a většího poloměru špičky a (v) vysoké teploty řezání v důsledku kombinace přirozeného prostředí a negativní geometrie bříty. Uvedené aspekty vedly na skutečnost, že např. drsnost povrchu Ra se v závislosti na strategii obrábění a f_z pohybovala v rozmezí od 0,032 do 0,058 μm pro nově vyvíjený prototyp nástroje a 0,015 až 0,022 μm pro nástroj vyrobený standardními postupy. Je však třeba předpokládat, že takto nízké hodnoty nebudou na reálném dílci vícebřitým prototypem nástroje navíc v průběhu celé jeho trvanlivosti dosažitelné.



Obr. 84: Vliv strategie obrábění a posuvu na zub na hodnoty parametru drsnosti povrchu Ra pro oba testované typy nástrojů s vynesemím velikosti směrodatné odchylky naměřených hodnot.

Jak ukazuje Obr. 84, lze při sousledném obrábění pro oba typy nástrojů očekávat mírně zhoršenou drsnost povrchu. Ve všech případech obrábění pak bylo nově vyvíjeným prototypem nástroje dosahováno vyšší drsnosti povrchu a to nejen u parametru Ra , ale obdobně i pro parametr Rz (mezi 0,165 a 0,271 μm pro vyvíjenou variantu; mezi 0,077 a 0,11 μm pro broušený nástroj). Příčina tohoto chování může být paradoxně jednak v kvalitnějším provedení řezné hrany menšího rozměru u vyvíjeného prototypu a dále v jeho výše deklarované vyšší drsnosti čelní fazety, ale prokazatelně i hřbetní plochy po použití laseru v porovnání s broušením. Snížení drsnosti těchto ploch lze docílit rektifikací bříty nástroje omíláním. Chování obou nástrojů z hlediska drsnosti povrchu obrobku mohlo ovlivnit i intenzivnější opotřebení bříty nástroje z materiálu DCN450.

Modelovými testy bylo potvrzeno, že řezivost vyvíjeného nástroje je oproti standardní variantě vyšší z pohledu trvanlivosti břitu. Skutečnost, zda je nástroj identické geometrie břitu vytvořen laserem nebo broušením, stejně jako typ PKNB materiálu a kvalita provedení řezné hrany naopak nemělo významnější vliv na velikost silového zatížení. Drsnost obrobeného povrchu lze při použití nástroje s břitem vyráběným laserem sice očekávat zhoršenou, avšak i tak lze uvažovat o



Obr. 85: Obrobený povrch vytvořený při modelových testech vyvíjeného prototypu nástroje.

aplikacích nástroje při tvrdém frézování jakožto náhrady operací broušení – jednobřitým nástrojem byl totiž dosažen povrch s parametry pro zrcadlový lesk - Obr. 85. Výsledky testů umožnily zvolit doporučené pracovní podmínky nově vyvíjeného nástroje pro výrobu konkrétního dílce v další fázi tohoto kroku metodiky.

Pro ověření funkce nově vyvíjeného prototypu (řezný materiál SB100, s geometrií břitu vytvořenou laserem a následným omletím pro rektifikaci břitu) byla určena technologie frézování pro renovaci funkční plochy kaleného střižníku. Zadáním bylo vytvoření povrchu s drsností menší než $Ra = 0,4 \mu\text{m}$ a rovinnosti plochy do 0,1 mm. Navržené řezné podmínky byly: nesousledné frézování s nájezdy do řezu po kruhové dráze, $v_c = 550 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (limit obráběcího stroje), $f_z = 0,05 \text{ mm}$, $a_p = 0,1 \text{ mm}$, $a_e = 12 \text{ mm}$. Obrábění proběhlo na stroji DMG DMC 100U duoBlock (nástrojové rozhraní SK 50, max. otáčky vřetene $12\,000 \text{ min}^{-1}$). Nástroj byl upnut v upínači TENDO SDF-E compact. Doba obrábění celé plochy frézováním byla 3,5 minuty. Trvanlivost břitu nástroje umožnila za daných podmínek zrenovovat dva obrobky a následně musí být nástroj osazen novými PKNB segmenty. Zvýšení počtu obrobených kusů za jednu trvanlivost břitu by bylo možné použitím stroje umožňujícím dosažení vyšší hodnoty řezné rychlosti a také další úpravou strategií obrábění s minimalizací počtu nájezdů a výjezdů nástroje mimo plochu dílce. Při najíždění nástroje do řezu totiž dochází k nevhodnému mechanickému zatížení břitu. Celkovou efektivitu nástroje v této operaci tak lze dále zvyšovat. V porovnání s procesem broušení dílce bylo možné zkrátit čas výroby (včetně přípravy a seřízení) jednoho dílce o 27 %.



Obr. 86: Renovace kaleného povrchu střížníku: (a) stav povrchu po obrobení vyvinutým prototypem nástroje vyráběného s pomocí laseru (rozměr obrobené plochy 185 x 115 mm); (b) stav čela břitu nástroje na konci trvanlivosti.

Drsnost povrchu po frézování ve směru posuvu frézy byla opakovaným měřením stanovena na $Ra = 0,1 \mu\text{m}$ a $Rz = 0,5 \mu\text{m}$. Rovinnost plochy byla měřením stanovena na hodnotu 0,086 mm. Obě kritéria kvality dílce tedy byla splněna. Technologie broušení byla optimalizována na splnění kritérií a umožňovala dosažení $Ra = 0,4 \mu\text{m}$ a rovinnosti plochy 0,07 mm.

Ekonomické hodnocení vyvinutého prototypu nástroje lze provést porovnáním výrobních nákladů na daný operační úsek na jednom dílci při zpracování frézováním a broušením. V případě, že nástroj v jedné trvanlivosti zrenovuje povrch dvou dílců, jsou celkové výrobní náklady dílce 5157 Kč, přičemž největší podíl zde tvoří náklady na nástroj. Při broušení je to 1940 Kč. Při bližším pohledu na náklady při frézování je třeba přihlédnout ke skutečnostem, že: (i) se jednalo o prototyp nástroje, kdy jeho opakovaná výroba by náklady na nástroj dále snížila; (ii) nástroj byl kalkulován v podobě, kdy je trvanlivost břitu rovna i jeho životnosti lze jej však ve skutečnosti renovovat a opakovaně používat karbidové tělo nástroje a nové břitové segmenty; (iii) obráběcí operaci lze dále optimalizovat s ohledem na omezení nájezdů a výjezdů nástroje do řezu, čímž dojde ke zvýšení počtu vyrobených kusů jedním nástrojem. Zpřesněná kalkulace se zahrnutím výše uvedených faktorů ukázala, že srovnatelné náklady na operační úsek pro obě technologie budou srovnatelné již při obrobení třech dílců v jedné trvanlivosti nástroje.

6.4 SHRUTÍ VYTVOŘENÉ METODIKY A JEJÍHO UPLATNĚNÍ

6.4.1 NÁVRH METODIKY A JEJÍ POPIS

Byla vytvořena a popsána obecná metodika pro vývoj, realizaci a hodnocení specifických řešení řezných nástrojů s využitím laserové technologie pro jejich výrobu. Metodika je v plné šíři vlastním řešením a její vytvoření reflektuje a navazuje na poznatky z předchozích částí práce. Metodika je teoreticky uplatnitelná pro různé způsoby využití laseru uvážené v kap. 5.3, 5.4 a 5.5.

Nejprve jsou uvedeny stávající přístupy výroby nástrojů a motivace pro tvorbu obecné metodiky se zpracováním schématu vývoje a realizace speciálního nástroje v případě, že je třeba použít laserovou technologii pro jeho výrobu - Obr. 62. V návrhu metodiky je ukázán princip implementace laserové technologie do výrobního řetězce se specifikací interakcí s konvenčními (resp. ostatními) výrobními procesy (Obr. 63). Laserovou technologii lze využít jako jediný, ale zpravidla jako dílčí, výrobní proces nástrojů. Důležitým bodem řešení je vytvoření struktury metodiky samotné zpracované do podoby schématu na Obr. 64. Návrh vychází ze čtyř základních kroků (Interakce, Parametry, Realizace, Ověření) a ze sady nezbytných vstupů a konečných výstupů. V rámci návrhu byly stanoveny i klíčové aspekty pro úspěšné a celkově efektivní použití metodiky.

Jednotlivé části metodiky v podobě technicko-ekonomického zadání, kroků realizace 1. až 4. a výstupu představujícího funkční nástroj jsou následně popsány s ohledem na potřeby, procesy a výstupy každé z částí.

6.4.2 PŘÍKLADY UPLATNĚNÍ A OVĚŘENÍ METODIKY

Jeden z dílčích cílů práce je naplněn popisem dvou konkrétních případů vývoje speciálních řezných nástrojů, při kterém byla v dominantní míře využita laserová technologie. Přestože metodika v každém z příkladů nemusela být s ohledem na předchozí znalosti uplatněna v plném rozsahu, bylo aplikací laseru dosaženo vzniku nástrojů s výrazně vyššími užitnými vlastnostmi a s originálním a efektivním uplatněním.

VÝVOJ PROTOTYPU NÁSTROJE Z PKD

Uplatněním metodiky pro použití laseru při vývoji a výrobě řezného nástroje z PKD byl vytvořen plně funkční prototyp nástroje splňující technické zadání, což bylo ověřeno jak modelovými testy, tak i testy v konkrétní operaci.

Předchozí znalosti interakce paprsku konkrétního laserového zařízení s konkrétním řezným materiálem umožnily zefektivnit postup vývoje a navázat až řešením části kroku 2 a plnohodnotně v krocích 3 a 4 metodiky. V procesu uplatnění metodiky nebylo nutné vracet se ve vývoji nástroje zpět. Časově nejnáročnější částí aplikace metodiky bylo experimentální ověřování vlastností a aplikačních oblastí vyvinutého nástroje před jeho uplatněním.

Výsledné vlastnosti nástroje byly výrazně vyšší v porovnání jak s původním standardním řešením, tak i vybranými konkurenčními nástroji předních světových (!) výrobců. Při stejných pracovních podmínkách vedlo použití prototypu ke snížení delaminace obrobených hran dílce, přičemž současně byl o více než 10 % snížen výrobní čas. Přestože byly výrobní náklady ve spojení s laserovou technologií kalkulovány vyšší než v případě použití broušení pro výrobu podobného řešení, nebylo by možné nástroj této funkčnosti konvenčními postupy vůbec vytvořit. Unikátnost funkce plyne z pozitivní geometrie v podobě tvarově složitého utvařeče třísek v kombinaci s vysoce kvalitním provedením řezné hrany s malým poloměrem zaoblení.

V celkovém zhodnocení tedy nástroj splnil zadání a je efektivní. Následné komerční uplatnění prototypu nástroje proběhlo v leteckém průmyslu na konkrétním dílci z FRTP materiálu. Tím byla ověřena jeho konkurenceschopnost. Nabyté znalosti při uplatnění metodiky v tomto případě mohou sloužit pro vývoj dalších nástrojů obdobného provedení. Lze tak docílit dalšího urychlení a zkvalitnění aplikace metodiky.

VÝVOJ PROTOTYPU NÁSTROJE Z PKNB

Uplatněním metodiky pro použití laseru při výrobě řezného nástroje z PKNB **byl vytvořen funkční prototyp dvoubřité frézy z HcBN řezného materiálu.**

Pro nově použitý materiál břítu byla nalezena oblast vhodných parametrů laserového záření a v následném kroku byla navržena a optimalizována i strategie výroby břítu laserem. Velký prostor byl při uplatňování věnován analýze řezivosti nově aplikovaného materiálu v porovnání se standardním, doposud používaným, typem. Následovala fáze testování v konkrétní operaci. V procesu uplatnění metodiky byla při postupu mezi kroky 2, 3 a 4 nezbytná iterace pro optimalizaci makro- a mikrogeometrie břítu. Na základě získaných znalostí lze při vývoji dalších obdobných řešení nástrojů tuto fázi výrazněji zefektivnit.

Testy bylo ověřeno, že nástroj splnil technické zadání. Třebaže byly výrobní náklady na takový nástroj v porovnání se standardně vyráběným nástrojem z LcBN materiálu výrazně vyšší, výroba laserem umožnila efektivní použití odolnějšího řezného materiálu v kombinaci s kvalitnějším provedením ostří. To mělo za následek významný přínos z pohledu opotřebení břitu a jeho trvanlivosti při modelových testech. Uplatnění nástroje bylo demonstrováno při obrábění konkrétního dílce pro možnost náhrady procesu broušení. Při prvním použití nástroje bez optimalizace podmínek bylo dosaženo požadované kvality dvou po sobě obroběných dílců a vyšší produktivity výroby (o 27 %) v porovnání s původní technologií. Vyšší výrobní náklady na konkrétní operační úsek při frézování plynou ze skutečností, že: (i) v rámci uvedených testů nebylo možné detailněji optimalizovat frézovací strategie a pracovní podmínky, (ii) cena nástroje byla kalkulována bez faktoru výroby ve více kusech, (iii) nástroj nebyl renovován. Tato hlediska jsou pro konkurenceschopnost nástroje zásadní.

Při celkovém zhodnocení lze konstatovat, že uplatnění metodiky vedlo na vývoj a výrobu nového řešení nástroje, který splnilo technické zadání. Získané znalosti při uplatnění metodiky lze v tomto případě použít i pro vývoj dalších nástrojů s břity z HcBN materiálu jak frézovacích, tak i soustružnických. To povede k dalšímu zefektivnění použití metodiky.

7 PŘÍNOSY PRÁCE A VÝHLED DALŠÍHO VÝZKUMU

Habilitační práce je zaměřena na vytvoření nových vědeckých poznatků pro oblast výroby kvalitnějších a efektivnějších nástrojů laserem. Téma je samo o sobě široké, proto je práce postavena na třech hlavních tematických pilířích, které vycházejí z dlouhodobého vlastního výzkumu a z něho plynoucích znalostí.

První tematickou oblastí je samotný řezný nástroj s popisem definice nástroje jakožto klíčového prvku systému obrábění. Součástí této pasáže je neméně důležitý popis základních principů, charakteristik a parametrů laserového záření, a to z pohledu potřeb uživatele laserového zařízení pro použití a hodnocení interakce záření s materiálem.

Druhá oblast je věnována stanovení možností uplatnění laserové technologie ve výrobě řezných nástrojů. Zpracování práce je zde založeno na nově vytvořeném přehledu možných uplatnění a následně i jejich popisu ve vztahu k nejnovějším znalostem a existujícím aplikacím. V této části je popsán **vlastní výzkum interakce paprsku laseru s řeznými materiály a povlaky a rovněž výzkum použití laseru vybranými způsoby pro metody s úběrem a bez úběru materiálu. Na základě výzkumu byly získány četné nové poznatky.**

Znalosti ze zpracování předchozích dvou částí umožnily vytvoření **vlastní obecné metodiky pro návrh, implementaci, použití a hodnocení laserové technologie při výrobě speciálního nástroje**, tj. takového, který je připravován v přímé vazbě na konkrétní aplikaci. V konečné fázi návrhu a popisu metodiky bylo ukázáno její použití pro dva vybrané příklady vyvíjených a v praxi využitelných obráběcích nástrojů.

7.1 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDECKÉ POZNÁNÍ OBORU

Hlavním přínosem práce pro vědecké poznání oboru je, že byly vytvořeny **nové vědecké poznatky pro výsledek interakce paprsku laseru se sadou moderních řezných materiálů a dvou typů ochranných povlaků. Důležité nové poznatky byly získány také pro oblast kvality zpracování a řezivosti funkčních vzorků řezných nástrojů vyráběných laserem.** Konkrétní přínosy pro vědecké poznání oboru jsou rozvedeny níže.

Byl vytvořen a popsán úplný přehled způsobů využití laseru pro realizaci řezných nástrojů. Způsoby použití laseru jakožto lokálního a intenzivního zdroje tepla lze podle přehledu na Obr. 9 kategorizovat v těchto základních oblastech: (i) s úběrem materiálu,

(ii) bez úběru materiálu a (iii) s přidáváním materiálu. Do uvedených oblastí lze mimo jiné zařadit i dnes již dobře prostudované a v praxi aplikované techniky dělení řezného materiálu pro výchozí polotovary břitů, identifikace nástrojů a 3D tisk těles a upínačů. Bylo určeno, že využití laseru je ovšem mnohem rozmanitější. V každé ze základních oblastí byly stanoveny dílčí způsoby využití laseru přímo ovlivňující funkční vlastnosti a řezivost nástroje. Některé z takových způsobů přitom nebyly doposud dostatečně studovány a popsány. U každé z definovaných metod pro výrobu a ovlivnění řezných částí obráběcích nástrojů laserem byl proto proveden i stručný popis principu se shrnutím současného stavu vědeckého poznání.

Byly získány a analyzovány charakteristiky pohltivosti záření, prahové intenzity energie pro ablaci, efektivitu, intenzity a kvality ablace pro řezné materiály. Výsledky ukazují, že různé řezné materiály interagují s laserovým zářením odlišně a vykazují specifika opracování v porovnání s jinými materiály. Konkrétní důležité poznatky jsou: (i) prokázání vysoké pohltivosti řezných materiálů, která je s klesající vlnovou délkou záření rostoucí, (ii) řezné materiály mají výrazně odlišné ablační prahy, a to i v závislosti na volbě délky pulsů a vlnové délce záření, (iii) typ ablace může zásadně ovlivnit chemické složení, strukturu a integritu povrchové vrstvy slinutého karbidu, (iv) efektivita ablace je tím větší, čím menší je tepelná vodivost řezného materiálu a je při stejné intenzitě energie závislá i na opakovací frekvenci a zářivém výkonu, (v) optimum efektivnosti ablace se nacházelo přibližně v rozsahu 5 až 15 F/F_{th} , (vi) oblast vysokých intenzit úběru materiálu lze nalézt i v hodnotách 100 a více tohoto poměru. Na základě posledního uvedeného bodu **byl navržen vlastní přístup pro zvýšení efektivnosti ablace řezných materiálů kombinací režimu s vysokou intenzitou ablace a s následným nastavením procesu pro dosažení vysoké kvality povrchu.**

Výzkum využití laseru pro technologie s úběrem materiálu pro tvorbu makrogeometrie břitů vedl na poznání, že vhodným nastavením laserového procesu lze docílit vyšší přesnosti tvaru a rozměrů prvků a kvality povrchu v porovnání se zavedenými konvenčními technologiemi. Řezivost nástrojů tak může být tímto způsobem dále zvyšována.

Na výsledcích vlastního výzkumu byl popsán přínos řízené **tvorby mikrogeometrie břitů laserem** pro zvýšení řezivosti nástroje, a to jak pro slinutý karbid, tak i pro supertvrdé materiály (PKNB a PKD). Vhodným strukturováním ploch čela a hřbetu bylo dosaženo významného zvýšení trvanlivosti břitů při soustružení slitiny Inconel 718

a podstatných změn v utváření třísky při soustružení slitiny Ti6Al4V se souvisejícím snížením velikosti silového zatížení nástroje.

Technologie odstraňování povlaků laserem byla zkoumána za účelem reálných možností renovace nástrojů tímto způsobem. Byly stanoveny základní vlastnosti interakce mezi laserovým zářením a dvěma typy povlaků z hlediska pohltivosti záření a velikosti ablačního prahu. Hodnoty charakteristik jsou podobné interakci záření s podkladovým materiálem typu slinutý karbid. Byl realizován výzkum termálního způsobu odstranění povlaků s výsledkem efektivního, i když méně kvalitního procesu.

Metody pro **ovlivnění povrchu nástroje laserem bez úběru materiálu** byly zkoumány z pohledu řízeného tepelného ovlivnění povrchové vrstvy. V případě většího počtu různých typů slinutého karbidu bylo tímto způsobem dosaženo zvýšení mikrotvrlosti povrchu všech vzorků při jednom nastavení laserového procesu. V souvislosti s tím lze očekávat vyšší otěruvzdornost a výslednou řezivost takových nástrojů. Významný přínos byl ovšem prokázán prozatím jen v případě suchého frézování šedé litiny. Změny chemického složení povrchové vrstvy, zhoršení drsnosti povrchu a vznik trhlin jsou podněty pro nutný navazující výzkum.

7.2 PŘÍNOS PRÁCE PRO PRAXI

Hlavní přínos práce pro praxi spočívá v první řadě v možnosti **využití nových vědeckých poznatků, které tato práce přináší**. Tento přínos byl mimo jiné prokázán vznikem nových řešení nástrojů v podobě prototypů, národního patentu a užitého vzoru. Přímým a důležitým přínosem pro praxi je rovněž možnost **využití vytvořené metodiky pro vývoj, realizaci a hodnocení funkčních a konkurenceschopných řešení speciálních řezných nástrojů** s přidanou hodnotou, která vzniká použitím laseru při jejich výrobě.

Vývoj a výroba řezných nástrojů laserem by měly být uskutečňovány ve vazbě na efektivitu, kvalitu a výrobní náklady při realizaci a použití nástroje. Z uvedených důvodů byla v práci **vytvořena a popsána obecná metodika pro vývoj, realizaci a hodnocení vlastností řezných nástrojů vyrobených s použitím laserové technologie**. Metodika vznikla na základě návrhu integrace laserové technologie do celého výrobního řetězce nástroje a je tvořena čtyřmi postupnými kroky (Interakce, Parametry, Realizace, Ověření), Obr. 64. Vstupem je technicko-ekonomické zadání a výstupem buď plně funkční, efektivní a kvalitní nástroj nebo dílčí produkt určený pro zpracování dalšími technologiemi. Aplikace obecné metodiky s modifikací pro konkrétní podmínky výroby

by měla umožnit zkrácení a celkové zefektivnění vývoje a uplatnění speciálního nástroje, pro jehož výrobu nebo úpravu je některým ze způsobů laser využit.

Metodika byla ověřena na dvou případech vývoje prototypů řezných nástrojů. U těchto nástrojů bylo přes vyšší výrobní náklady v důsledku použití laserové technologie dosaženo významného zvýšení řezivosti. Nový způsob výroby umožnil změny v celkové koncepci nástrojů, vyšší kvalitu zpracování, uplatnění vhodnějších materiálů a realizaci specifických prvků makro- a mikrogeometrie bříty. Nástroje ve stejné podobě by byly konvenčními technologiemi zpracovatelné jen obtížně. Některé prvky by pak byly i jiným způsobem nevyrobitelné.

Vytvořená metodika pro vývoj a plnohodnotné a efektivní komerční uplatnění nástroje je v jistém ohledu přenositelná a použitelná i **výrobci katalogových nástrojů**, tj. takových, které nejsou navrhovány a vyráběny v přímé reakci na konkrétní problém na straně uživatele nástroje. Metodiku lze v tomto případě aplikovat především při vývoji nových řešení budoucích nástrojů pro fázi rychlého a hospodárného prototypování různých výchozích vývojových variant.

Použití laseru pro výrobu obráběcího nástroje přináší v řadě ohledů pozitivní výsledky ve vazbě na chování nástroje při obrábění. **K zobecnitelným poznatkům a výsledkům pro praxi** z použití laseru při realizaci řezného nástroje patří zejména skutečnosti, že lze:

- (i) docílit vyšší přesnosti a kvality zpracování v porovnání s konvenčními technologiemi;
- (ii) vytvářet jinými způsoby nevyrobitelná a originální řešení;
- (iii) efektivněji opracovávat supertvrdé řezné materiály;
- (iv) použitím laseru pro opracování bříty nástroje významně zvyšovat řezivost nástroje, jak z pohledu trvanlivosti bříty, velikosti řezných sil, tak i drsnosti obrobeného povrchu;
- (v) realizovat málo známé metody (např. strukturování a přetavení povrchu řezného materiálu laserem), které mohou přinášet další zlepšení vlastností bříty nástroje, a mnoho dalších dílčích poznatků.

7.3 VÝHLED DALŠÍHO VÝZKUMU VE ZKOUMANÉ OBLASTI

Díky záměrně širšímu tematickému zaměření může práce posloužit jako výchozí **odkaz pro budoucí výzkum v dané oblasti** realizovaného i jinými vědeckými týmy.

Představené výsledky deklarují, že využití laserové technologie pro zvyšování efektivity a kvality nástrojů má opodstatnění a může se v řadě způsobů stát předmětem navazujících výzkumů vedoucích k následnému průmyslovému uplatnění.

Výzkum by měl pokračovat **směrem k zefektivňování způsobů použití laseru při zajištění požadované kvality zpracování nástrojů**. Základem tohoto směru je hlubší mapování poznatků a tvorba znalostní databáze výsledků interakce laserového záření s dalšími typy a variantami řezných materiálů, a to ve vztahu k charakteristikám laserového záření, strategiím a nastavení procesu a vlastnostem materiálu. Využití těchto poznatků by mělo být orientováno pro **účelné a efektivní ovlivnění řezné části nástroje laserem**. Vhodnými konkrétními oblastmi pokračujícího výzkumu se jeví být především:

- výzkum a vývoj vyšší efektivity ablace řezných materiálů laserem;
- výzkum a vývoj strukturování aktivních částí nástroje laserem;
- výzkum a vývoj technologie odstraňování povlaků laserem;
- přetavení povrchu laserem a zpevnění povrchu rázovou vlnou řezného materiálu nebo jiných částí nástroje;
- výzkum vlivů výše uvedených způsobů použití laserové technologie na funkční vlastnosti nástroje a průběh a výsledek obráběcího procesu.

V uvedených oblastech lze aktuálně spatřovat nejvyšší potenciál pro následné aplikační uplatnění. Nedílnou součástí řešení těchto oblastí je další vývoj metod a technik pro hodnocení účinků laserového záření. Těmito směry dále pokračuje i vlastní výzkum autora práce.

8 ZÁVĚR

Řezný nástroj je důležitým prvkem systému obrábění. Vlastnosti a způsob použití nástroje, jsou klíčovými aspekty pro dosažení žádané efektivity, produktivity a kvality obrábění. Hledání vhodných nebo přímo optimálních podmínek pro použití nástroje je náročný proces. S ohledem na tuto skutečnost nebývá vždy plně využit potenciál, který nástroje pro danou aplikaci mají. Pro udržitelné a konkurenceschopné třískové obrábění je proto třeba mimo jiného zdokonalovat řezné nástroje a následně lépe využívat jejich potenciálu. Jedním ze způsobů dalšího zdokonalování nástrojů je i využití laserové technologie při jejich výrobě.

Uplatnění laseru pro výrobu řezných nástrojů je perspektivní směr poskytující nové příležitosti pro výzkum. Do této oblasti byla zaměřena vlastní výzkumná aktivita a její výsledky se staly předmětem vlastních publikací a hmotných výsledků a jsou také uvedeny v této habilitační práci.

Habilitační práce je zaměřena na vytvoření uceleného přehledu základních oblastí a konkrétních způsobů možného použití laseru pro výrobu řezných částí obráběcích nástrojů. Popis způsobů, aktuálních vědeckých poznatků a vlastní výzkum a z něho plynoucí poznatky ukazují, že použití laseru tímto způsobem je velmi rozmanité a přináší v řadě aspektů pozitivní výsledky ve vazbě na chování nástroje při obrábění. Využití laseru pro nástroje je přitom třeba dále zkoumat a vyvíjet směrem k využití v praxi. Bylo prokázáno, že použití laseru je vhodnou alternativou nejen pro speciální nástroje nebo pro jinými technologiemi nevyrobitelná řešení.

Vývoj a výrobu nástroje je třeba vždy posuzovat ve vztahu k efektivitě použití laseru a k chování nástroje v dané aplikaci. Z uvedených důvodů byla v práci vytvořena a popsána obecná metodika pro vývoj, realizaci a hodnocení vlastností řezných nástrojů vyrobených s použitím laserové technologie. Použití obecné metodiky s modifikací pro konkrétní podmínky výrobce nástroje by mělo umožnit zkvalitnění a celkové zefektivnění vývoje speciálního nástroje, pro jehož výrobu nebo úpravu je některým ze způsobů laser využit.

Habilitační práce přinesla nové poznatky pro lepší a širší uplatnění laseru při výrobě řezných nástrojů s vyšší kvalitou a efektivitou. Práce tím přispívá k naplnění rozvoje a udržitelnosti efektivních obráběcích technologií.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MÁDL, Jan, Jan JERSÁK, František HOLEŠOVSKÝ, Václav KOUTNÝ a Vítězslav RÁZEK. *Jakost obráběných povrchů*. Ústí nad Labem: Universita J. E. Purkyně, ÚTRV, 2003. ISBN 80-7044-539-4.
- [2] KOLEKTIV AUTORŮ. *Terminologie obrábění a montáže*. Ústí nad Labem: Universita J. E. Purkyně, ÚTRV, 2004. ISBN 80-7044-616-1.
- [3] TLUSTY, J. High-Speed Machining. *CIRP Annals* [online]. 1993, **42**(2), 733–738. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)62536-0.
- [4] TÖNSHOFF, Hans Kurt, Thomas FRIEMUTH, Philipp ANDREA a Raouf Ben AMOR. High-Speed or High-Performance Cutting – a Comparison of New Machining Technologies. *Production Engineering*. 2001, **VIII**(1), 5–8. ISSN 0944-6524.
- [5] BYRNE, G., E. AHEARNE, M. COTTERELL, B. MULLANY, G. E. O'DONNELL a F. SAMMLER. High Performance Cutting (HPC) in the New Era of Digital Manufacturing – A Roadmap. *Procedia CIRP* [online]. 2016, **46**(2016), 1–6. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.05.038.
- [6] WEINERT, K., I. INASAKI, J. W. SUTHERLAND a T. WAKABAYASHI. Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. *CIRP Annals* [online]. 2004, **53**(2), 511–537. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)60027-4.
- [7] ČSN 220012. *Obráběcí nástroje. Termíny a definice základních pojmů*. Praha: Český normalizační institut, 1991.
- [8] ČSN ISO 3002/2. *Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení. Časť 2: Geometria aktívnej časti rezných nástrojov. Všeobecné prevodové vzorce, vzťahujúce sa na nástrojové a pracovné uhly*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [9] ČSN ISO 5419. *Rezné nástroje. Skrutkovicové vrtáky. Termíny, definície a typy*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [10] ČSN ISO 3002/1. *Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení Časť 1: Geometria aktívnej časti rezných nástrojov. Základné termíny, súradnicové systémy, nástroje a pracovné uhly, lamače triesky*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [11] ČSN 220016. *Řezné nástroje. Frézy. Názvosloví*. Praha: Český normalizační institut, 1992.
- [12] ČSN ISO 3002/3. *Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení. Časť 3: Geometrické a kinematické veličiny pri rezaní*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [13] ČSN ISO 1832. *Vyměnitelné břitové destičky pro řezné nástroje - Označení*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [14] ZEMAN, Pavel. *Experimentální a simulační výzkum vlivu řezné rychlosti na proces tvorby třísky se zaměřením na plastické deformace obráběného materiálu*. Praha, 2005. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [15] *Laser – WikiSkripta* [online]. 1. lékařská fakulta Univerzity Karlovy, ©2020. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Laser>.

- [16] BUCHFINK, Gabriela. *The laser as a tool: a light beam conquers industrial production*. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2007. ISBN 978-3-8343-3072-7.
- [17] *Encyklopedie fyziky: Emise a absorpce světla* [online]. 2021, [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>.
- [18] *Laser - Stimulovaná emise* [online]. 2021. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/stimulovana-emise.html>.
- [19] *Laser a jeho využití: Princip laseru* [online]. ČEZ, a. s., ©2019. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>.
- [20] *Einsteinovy koeficienty. Princip činnosti laseru* [online]. Fyzikální ústav UK, ©2021. [vid. 2021-05-07]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Princip_cinnosti_laseru.pdf.
- [21] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser-prez.pdf>
- [22] ČERMÁK, Adam. *LASER v procesech mikroobrábění řezných nástrojů*. Plzeň, 2017. Disertační práce. ZČU v Plzni, Fakulta strojní.
- [23] SCAGGS, Michael. *Beam Delivery: M2, BPP, Spot Size & Why You Should Care – Laser Chirp* [online]. ©2016. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.laserchirp.com/2016/11/beam-delivery-m2-bpp-spot-size-why-you-should-care/>.
- [24] BRAJER, Jan, Michal STEJSKAL, Stanislav HOSNEDL a Jiří SOVA. *Laserové technologie. Lasery jako výrobní stroje*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní. 2016.
- [25] DAHOTRE, B. Narendra a Sandip P. HARIMKAR. *Laser Fabrication and Machining of Materials*. Boston: Springer, 2008. ISBN 978-0-387-72344-0.
- [26] HAUSCHWITZ, Petr. *Large surface functionalization by laser-induced micro and nanostructures*. Praha, 2020. PhD Thesis. ČVUT v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
- [27] RUNG, Stefan, Johannes BARTH a Ralf HELLMANN. Characterization of laser beam shaping optics based on their ablation geometry of thin films. *Micromachines* [online]. 2014, 5(4), 943–953. ISSN 2072666X. Dostupné z: doi:10.3390/mi5040943.
- [28] LOPEZ, John, Konstantin MISHCHIK, Bruno CHASSAGNE, Clémentine JAVAUX-LEGER, Clemens HÖNNINGER, Eric MOTTAY a Rainer KLING. Glass cutting using ultrashort pulsed Bessel beams. In: *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics: ICALEO 2015 Proceedings* [online]. Atlanta, United States: Laser Institute of America, 2015, s. 60–69. ISBN 978-1-940168-05-0. Dostupné z: doi:10.2351/1.5063208.
- [29] PASCHOTTA, Rüdiger. *RP Photonics Encyclopedia: Pulsed Lasers* [online]. ©2021. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/pulsed_lasers.html.
- [30] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Fundamentals of Photonics*. 2nd edition. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2007. ISBN 978-0-471-35832-9.

- [31] ALDRICH, Robert. *Laser Fundamentals* [online]. ©2021. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://fas.org/man/dod-101/navy/docs/laser/fundamentals.htm>.
- [32] ČSN ISO 80000-7. *Veličiny a jednotky - Část 7: Světlo*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [33] PASCHOTTA, Rüdiger. *RP Photonics Encyklopedia: Optical Intensity* [online]. ©2021. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/optical_intensity.html.
- [34] GAMALY, E. G. The physics of ultra-short laser interaction with solids at non-relativistic intensities. *Physics Reports* [online]. 2011, **508**(4), 91–243. ISSN 0370-1573. Dostupné z: doi:10.1016/j.physrep.2011.07.002.
- [35] KRAMER, Thorsten, Stefan REMUND, Beat JÄGGI, Marc SCHMID a Beat NEUENSCHWANDER. Ablation dynamics – from absorption to heat accumulation/ultra-fast laser matter interaction. *Advanced Optical Technologies* [online]. 2018, **7**(3), 129–144. ISSN 2192-8584. Dostupné z: doi:10.1515/aot-2018-0010.
- [36] HARRISON, Paul M., Matthew HENRY a Michael BROWNELL. Laser processing of polycrystalline diamond, tungsten carbide, and a related composite material. *Journal of Laser Applications* [online]. 2006, **18**(2), 117–126. ISSN 1042-346X. Dostupné z: doi:10.2351/1.2164472.
- [37] DUMITRU, G., V. ROMANO, H.P. WEBER, M. SENTIS a W. MARINE. Femtosecond ablation of ultrahard materials. *Applied Physics A* [online]. 2002, **74**(6), 729–739. ISSN 1432-0630. Dostupné z: doi:10.1007/s003390101183.
- [38] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [39] FÜRbacher, Ivan, Karel MACEK, Josef STEIDL a KOL. *Lexikon technických materiálů*. Praha: Verlag Dashöfer, nakladatelství, s.r.o., 2002. ISBN 80-86229-02-5.
- [40] MIKULČÁK, Jiří, Bohdan KLIMEŠ a Václav ŠŮLA. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: SPN, n.p., 1988. ISBN 14-257-89.
- [41] ROMOLI, L., F. FISCHER a R. KLING. A study on UV laser drilling of PEEK reinforced with carbon fibers. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2012, **50**(3), 449–457. ISSN 0143-8166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2011.10.008
- [42] ZHANG, D. a L. GUAN. 4.06 - Laser Ablation. In: Saleem HASHMI, Gilmar Ferreira BATALHA, Chester J. VAN TYNE a Bekir YILBAS, ed. *Comprehensive Materials Processing* [online]. Oxford: Elsevier, 2014, s. 125–169. ISBN 978-0-08-096533-8. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.00406-4.
- [43] KURZYNOWSKI, Tomasz, Edward CHLEBUS, Bogumiła KUŹNICKA a Jacek REINER. Parameters in selective laser melting for processing metallic powders. In: *SPIE LASE: Proc. SPIE 8239, High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications* [online]. San Francisco, California, United States: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2012. ISBN 978-0-8194-8882-4. Dostupné z: doi:10.1117/12.907292.
- [44] 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* [online]. 2014, **56**, 8th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering LANE 2014, 951–962. ISSN 1875-3892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2014.08.115.
- [45] WEBER, Marvin J. *Handbook of Optical Materials*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2002. ISBN 978-0-8493-3512-9.
- [46] LEITZ, Karl-Heinz, Benjamin REDLINGSHÖFER, Yvonne REG, Andreas OTTO a Michael SCHMIDT. Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses. *Physics Procedia* [online]. 2011, **12**, Lasers in Manufacturing 2011 - Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing, 230–238. ISSN 1875-3892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.128.
- [47] MANNION, Paul, Jonathan MAGEE, Edward COYNE a Gerard M. O'CONNOR. Ablation thresholds in ultrafast laser micromachining of common metals in air. In: *Opto-Ireland 2002: Optics and Photonics Technologies and Applications: Proceedings of the SPIE* [online]. Galway, Ireland: International Society for Optics and Photonics, 2003, s. 470–478. ISBN 0-8194-4657-2. Dostupné z: doi:10.1117/12.463744.
- [48] SANNER, N., O. UTÉZA, B. BUSSIERE, G. COUSTILLIER, A. LERAY, T. ITINA a M. SENTIS. Measurement of femtosecond laser-induced damage and ablation thresholds in dielectrics. *Applied Physics A* [online]. 2009, **94**(4), 889–897. ISSN 1432-0630. Dostupné z: doi:10.1007/s00339-009-5077-6.
- [49] STANKEVIČ, Valdemar, Adam ČERMÁK, Saulius MIKALAUSKAS, Pavel KOŽMÍN, Simonas INDRIŠIŪNAS a Gediminas RAČIUKAITIS. Processing of ultra-hard materials with picosecond pulses: From research work to industrial applications. *Journal of Laser Applications* [online]. 2018, **30**(3), 1–7. ISSN 1042-346X. Dostupné z: doi:10.2351/1.5040633.
- [50] KIM, Sung Hoon, Ik-Bu SOHN a Sungho JEONG. Ablation characteristics of aluminum oxide and nitride ceramics during femtosecond laser micromachining. *Applied Surface Science* [online]. 2009, **255**(24), Proceedings of the Sixth International Conference on Photo-Excited Processes and Applications(6-ICPEPA), 9717–9720. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2009.04.058.
- [51] PERRIE, W., A. RUSHTON, M. GILL, P. FOX a W. O'NEILL. Femtosecond laser micro-structuring of alumina ceramic. *Applied Surface Science* [online]. 2005, **248**(1), 4th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications, 213–217. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2005.03.005.
- [52] DUMITRU, Gabriel, Valerio ROMANO, Heinz P. WEBER, Marc SENTIS a Wladimir MARINE. Ablation of carbide materials with femtosecond pulses. *Applied Surface Science* [online]. 2003, **205**(1), 80–85. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/S0169-4332(02)00906-6.
- [53] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Praha: ČVUT v Praze, 1998. ISBN 80-01-01108-9.
- [54] ZHENG, Buxiang, Gedong JIANG, Wenjun WANG, Xuesong MEI a Fangcheng WANG. Surface ablation and threshold determination of AlCu4SiMg aluminum alloy in picosecond pulsed laser micromachining. *Optics & Laser Technology* [online]. 2017, **94**, 267–278. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2017.02.003.

- [55] *Enhancing laser thin-film ablation* [online]. Industrial Laser Solutions for Manufacturing, ©2015. [vid. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/micromachining/article/16485551/enhancing-laser-thinfilm-ablation>.
- [56] AURICH, J. C., M. ZIMMERMANN a L. LEITZ. The preparation of cutting edges using a marking laser. *Production Engineering* [online]. 2011, **5**(1), 17–24. ISSN 1863-7353. Dostupné z: doi:10.1007/s11740-010-0275-9.
- [57] JAEGGI, B., B. NEUENSCHWANDER, M. SCHMID, M. MURALT, J. ZUERCHER a U. HUNZIKER. Influence of the Pulse Duration in the ps-Regime on the Ablation Efficiency of Metals. *Physics Procedia* [online]. 2011, **12**, Lasers in Manufacturing 2011 - Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing, 164–171. ISSN 1875-3892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.118.
- [58] CHENG, Jian, Chang-sheng LIU, Shuo SHANG, Dun LIU, Walter PERRIE, Geoff DEARDEN a Ken WATKINS. A review of ultrafast laser materials micromachining. *Optics & Laser Technology* [online]. 2013, **46**, 88–102. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2012.06.037.
- [59] MISHRA, Sanjay a Vinod YADAVA. Laser Beam MicroMachining (LBMM) – A review. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2015, **73**, 89–122. ISSN 0143-8166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2015.03.017.
- [60] JAEGGI, B., B. NEUENSCHWANDER, S. REMUND a T. KRAMER. Influence of the pulse duration and the experimental approach onto the specific removal rate for ultra-short pulses. In: *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXII: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXII* [online]. San Francisco, California, United States: International Society for Optics and Photonics, 2017. ISBN 978-1-5106-0623-4. Dostupné z: doi:10.1117/12.2253696.
- [61] DANIEL, Christian, Sven OSTENDORF, Sina HALLMANN a Claus EMMELMANN. 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* [online]. 2016, **28**. ISSN 1938-1387. Dostupné z: doi:10.2351/1.4931930.
- [62] MAO, Cong, Xiaoli SUN, Han HUANG, Chengwei KANG, Mingjun ZHANG a Yueqin WU. Characteristics and removal mechanism in laser cutting of cBN–WC–10Co composites. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2016, **230**, 42–49. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.11.014.
- [63] NECPAL, Martin a Maroš MARTINKOVIČ. The usage of laser machining for manufacturing of the cutting insert prototype. In: *Strojírenská technologie Plzeň 2015: Strojírenská technologie Plzeň 2015: sborník abstraktů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Katedra technologie obrábění, 2015, s. 167–173. ISBN 978-80-261-0304-2.
- [64] LI, Tiejun, Qihong LOU, Jingxing DONG, Yunrong WEI a Jingru LIU. Modified surface morphology in surface ablation of cobalt-cemented tungsten carbide with pulsed UV laser radiation. *Applied Surface Science* [online]. 2001, **172**(3), 331–344. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/S0169-4332(00)00881-3.

- [65] RIHAKOVA, L. a H. CHMELICKOVA. Laser Micromachining of Glass, Silicon, and Ceramics. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2015, **2015**(2), 1–6. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2015/584952.
- [66] NEDIALKOV, Nikolay N., P. A. ATANASOV, M. SAWCZAK a G. SLIWINSKI. Ablation of ceramics with ultraviolet, visible, and infrared nanosecond laser pulses. In: *XIV International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers: Proc. SPIE 5120* [online]. Wroclow, Poland: SPIE, 2003, s. 703–708. ISBN 978-0-8194-4980-1. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1117/12.515847.
- [67] KAMAKIS, Dmitris, Graham RUTTERFORD, Martyn KNOWLES, Todor DOBREV, Petko PETKOV a Stefan DIMOV. High quality laser milling of ceramics, dielectrics and metals using nanosecond and picosecond lasers. In: *Photon Processing in Microelectronics and Photonics V: Proc. SPIE 6106* [online]. San Jose, California, United States: SPIE, 2006, s. 1–11. ISBN 978-0-8194-6148-3. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1117/12.515847.
- [68] WANG, X. C., H. Y. ZHENG, P. L. CHU, J. L. TAN, K. M. TEH, T. LIU, Bryden C. Y. ANG a G. H. TAY. Femtosecond laser drilling of alumina ceramic substrates. *Applied Physics A* [online]. 2010, **101**(2), 271–278. ISSN 1432-0630. Dostupné z: doi:10.1007/s00339-010-5816-8.
- [69] HO, Ching-Yen, Yu-Hsiang TSAI, Cheng-Sao CHEN a Mao-Yu WEN. Ablation of aluminum oxide ceramics using femtosecond laser with multiple pulses. *Current Applied Physics* [online]. 2011, **11**(3), 301–305. ISSN 1567-1739. Dostupné z: doi:10.1016/j.cap.2011.01.030.
- [70] NTK Cutting Tools USA [online]. *NTK Cutting Tools General Catalogue*. ©2021 [vid. 2021-06-21]. Dostupné z: <http://www.ntkcuttingtools.com/catalog/download.html>.
- [71] BRANDT, Gunnar N. a Jorgen V. WIMAN. Ceramic whisker-reinforced cutting tool with preformed chipbreakers for machining. US5238334A. 8 1993. Sandviken.
- [72] KENNAMETAL INC. *Ceramics cutting tool with chip control* [online]. AHUJA, Deepak P., Craig W. BEEGLY, Pankaj Kumar MEHROTRA a Kenneth L. NIEBAUER. Appl. no. EP0563045B1. October 1993. European Patent Office. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/59/a3/52/2332ffa36037f4/EP0563045B1.pdf>.
- [73] BIČIŠŤOVÁ, Radka. *Výzkum 3D gravírování laserem*. Výzkumná zpráva. V-10-055. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, VCSVTT. 2010.
- [74] BIČIŠŤOVÁ, Radka. *Výzkum využití 3D gravírování laserem pro výrobu zkušebních utvařečů třísky na vyměnitelných břitových destičkách*. Výzkumná zpráva. V-11-044. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, VCSVTT. 2011.
- [75] *PCBN Chip Breaker Inserts – A New Generation of PCBN Inserts* [online]. Seco Tools, ©2012-2013, [vid. 2021-05-05]. Dostupné z: <http://cbnexpert.blogspot.com/2013/03/pcbn-chip-breaker-inserts-new.html>.
- [76] *Nástroje PCBN a PCD: T-CBN / T-DIA* [online]. Tungaloy Corporation, ©2021. [vid. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/31511125-Nastroje-pcbn-a-pcd-t-cbn-t-dia.html>.

- [77] MAŠEK, Petr, Petr KOLÁŘ a Pavel ZEMAN. Optimization of trimming operations for machining carbon fibre reinforced thermoplastic composite. In: *International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies NEWTECH 2013*. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2013, s. 73–82. ISBN 978-91-7501-892-8.
- [78] VÍTEK, Pavel, Pavel ZEMAN, Milan HOLUB, Antonín NOVOTNÝ, Petr VAVRUŠKA, Jan MALÝ, Petr MAŠEK a Michal KOUDELA. *Výzkumná zpráva o řešení projektu FV10282 „Hybridní technologie výroby nástrojů z ultratvrdých materiálů“ za rok 2017*. Výzkumná zpráva. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2017.
- [79] BOUZAKIS, K. D., E. BOUZAKIS, S. KOMBOGIANNIS, S. MAKRIMALLAKIS, G. SKORDARIS, N. MICHAILIDIS, P. CHARALAMPOUS, R. PARASKEVOPOULOU, R. M'SAOUBI, J. C. AURICH, F. BARTHELMÄ, D. BIERMANN, B. DENKENA, D. DIMITROV, S. ENGIN, B. KARPUSCHEWSKI, F. KLOCKE, T. ÖZEL, G. POULACHON, J. RECH, V. SCHULZE, L. SETTINERI, A. SRIVASTAVA, K. WEGENER, E. UHLMANN a P. ZEMAN. Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2014, **7**(3), 264–273. ISSN 1755-5817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2014.05.003.
- [80] TAMIL ALAGAN, Nageswaran, Tomas BENO, Philipp HOIER, Uta KLEMENT a Anders WRETLAND. Influence of Surface Features for Increased Heat Dissipation on Tool Wear. *Materials* [online]. 2018, **11**(5). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11050664.
- [81] DENKENA, B., J. KÖHLER a B. BERGMANN. Development of cutting edge geometries for hard milling operations. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2015, **8**, 43–52. ISSN 1755-5817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2014.10.002.
- [82] VOSS, Robert, Marcel HENERICHS, Gianluca CAPRICANO, Friedrich KUSTER a Konrad WEGENER. Post-Coating Treatment of Cutting Edge for Drilling Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP). *Procedia CIRP* [online]. 2016, **46**, 7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting, 161–164. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.03.173.
- [83] DENKENA, B. a D. BIERMANN. Cutting edge geometries. *CIRP Annals* [online]. 2014, **63**(2), 631–653. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2014.05.009
- [84] LI, Ning, Yongjie CHEN, Dongdong KONG a Shenglin TAN. Experimental investigation with respect to the performance of deep submillimeter-scaled textured tools in dry turning titanium alloy Ti-6Al-4V. *Applied Surface Science* [online]. 2017, **403**, 187–199. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2017.01.166.
- [85] ALAGAN, Nageswaran Tamil, Pavel ZEMAN, Philipp HOIER, Tomas BENO a Uta KLEMENT. Investigation of micro-textured cutting tools used for face turning of alloy 718 with high-pressure cooling. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, **37**, 606–616. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2018.12.023.

- [86] SASI, Roshan, S. KANMANI SUBBU a I. A. PALANI. Performance of laser surface textured high speed steel cutting tool in machining of Al7075-T6 aerospace alloy. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2017, **313**, 337–346. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2017.01.118.
- [87] SUGIHARA, Tatsuya, Yuki NISHIMOTO a Toshiyuki ENOMOTO. Development of a novel cubic boron nitride cutting tool with a textured flank face for high-speed machining of Inconel 718. *Precision Engineering* [online]. 2017, **48**, 75–82. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2016.11.007.
- [88] KAWASEGI, Noritaka, Kazuma OZAKI, Noboru MORITA, Kazuhito NISHIMURA a Makoto YAMAGUCHI. Development and machining performance of a textured diamond cutting tool fabricated with a focused ion beam and heat treatment. *Precision Engineering* [online]. 2017, **47**, 311–320. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2016.09.005.
- [89] HOIER, P., U. KLEMENT, N. TAMIL ALAGAN, T. BENO a A. WRETLAND. Characterization of tool wear when machining alloy 718 with high-pressure cooling using conventional and surface-modified WC–Co tools. *Journal of Superhard Materials* [online]. 2017, **39**(3), 178–185. ISSN 1934-9408. Dostupné z: doi:10.3103/S1063457617030054.
- [90] ALAGAN, Nageswaran Tamil, Tomas BENO a Anders WRETLAND. Investigation of Modified Cutting Insert with Forced Coolant Application in Machining of Alloy 718. *Procedia CIRP* [online]. 2016, **42**, 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), 481–486. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.02.236.
- [91] VOEVODIN, A. A. a J. S. ZABINSKI. Laser surface texturing for adaptive solid lubrication. *Wear* [online]. 2006, **261**(11), 1285–1292. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2006.03.013.
- [92] PAKUŁA, D., M. STASZUK, M. DZIEKOŃSKA, P. KOŽMÍN a A. ČERMÁK. Structure and properties of coating obtained by Chemical Vapour Deposition with the laser microstructuring. *Vacuum* [online]. 2018, **153**, 184–190. ISSN 0042-207X. Dostupné z: doi:10.1016/j.vacuum.2018.03.037.
- [93] HOFMEISTER, s.r.o. *Břit ve tvaru klínu s povrchovou mikrostrukturou u řezného nástroje* [online]. Původci: KOŽMÍN, Pavel, Jiří SYROVÁTKA a Adam ČERMÁK. Česká republika. Užité vzor CZ 2016–32605. 2016-11-29. Úřad průmyslového vlastnictví. Dostupné z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0030/uv030072.pdf>.
- [94] RAZAB, Mohammad Khairul Azhar Abdul, An'amt MOHAMED NOOR, Mohamad SUHAIMI JAAFAR, Nor Hakimin ABDULLAH, Fatanah Mohamad SUHAIMI, Mazlan MOHAMED, Noraina ADAM a Nik Alnur AULI NIK YUSUF. A review of incorporating Nd:YAG laser cleaning principal in automotive industry. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* [online]. 2018, **11**(4), 393–402. ISSN 1687-8507. Dostupné z: doi:10.1016/j.jrras.2018.08.002.
- [95] MARIMUTHU, S., A. M. KAMARA, D. WHITEHEAD, P. MATIVENGA a L. LI. Laser removal of TiN coatings from WC micro-tools and in-process monitoring. *Optics & Laser Technology* [online]. 2010, **42**(8), 1233–1239. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2010.03.016.

- [96] SUNDAR, M., D. WHITEHEAD, P. T. MATIVENGA, L. LI a K. E. COOKE. Excimer laser decoating of chromium titanium aluminium nitride to facilitate re-use of cutting tools. *Optics & Laser Technology* [online]. 2009, **41**(8), 938–944. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2009.04.003.
- [97] SEE, Tian Long, Dimitrios CHANTZIS, Raphael ROYER, Ioannis METSIOS, Mohammad ANTAR a Sundar MARIMUTHU. Ultraviolet-Diode Pump Solid State Laser Removal of Titanium Aluminium Nitride Coating from Tungsten Carbide Substrate. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2017, **4**(3), 93–107. ISSN 2196-7237. Dostupné z: doi:10.1007/s40516-017-0039-x.
- [98] ZIVELONGHI, A., L. GIORLEO, M. GELFI, E. CERETTI a G. M. LA VECCHIA. Laser decoating of DLC films for tribological applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, **93**(5), 1715–1724. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-0482-z.
- [99] GENERAL LASERTRONICS CORPORATION. *Methods for Stripping and Modifying Surfaces with Laser-Induced Ablation* [online]. THOMAS, James, Robert CARGILL a Mitchell WOOL. Appl. no. WO/2008/118365. August 2008. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2008118365>.
- [100] NGEEN ANN POLYTECHNIC. *A laser cleaning apparatus and method* [online]. KWEE, Tiaw Joo a Guoxin CHEN. Appl. no. WO2013141810A1. September 2013. [vid. 2021-05-08]. World Intellectual Property Organization. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/WO2013141810A1/pt>.
- [101] SPECTRUM TECHNOLOGIES PLC. *Laser removal of layer or coating from a substrate* [online]. THOMAS, Adrian, Jonathan DAVIES a Peter Hugh DICKINSON. Appl. no. EP1641572B1. December 2011. European Patent Office. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/EP1641572B1/en>.
- [102] LOCKHEED IDAHO TECHNOLOGIES. *Laser ablation system, and method of decontaminating surfaces* [online]. FERGUSON, Russell L., Martin C. EDELSON a Ho-ming PANG. US5780806A. US Patent. July 1998. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/88/17/12/e35c8bc9e5cd2c/US5780806.pdf>.
- [103] GENERAL LASERTRONICS CORPORATION. *Laser ablation for the environmentally beneficial removal of surface coatings* [online]. THOMAS, James W., Mitchell R. WOOL a Robert L. CARGILL. US9895771B2. US Patent. February 2018. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/21/c5/7a/232256173e00b7/US9895771.pdf>
- [104] BRAJER, Jan. *Vliv metody laser shock processing na integritu povrchu*. Praha, 2018. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [105] *Laser Shock Peening* [online]. HiLASE, ©2021. [vid. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.hilase.cz/nabizime/sluzby/laser-shock-peening/>.
- [106] *Laser Peening Benefits & Applications* [online]. LSP Technologies Inc., ©2021. [vid. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.lsptechnologies.com/why-laser-peening/>.

- [107] GUJBA, Abdullahi K. a Mamoun MEDRAJ. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening. *Materials* [online]. 2014, **7**(12), 7925–7974. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma7127925.
- [108] SHUKLA, Pratik, Philip SWANSON a Colin PAGE. Laser Shock Peening and Mechanical Shot Peening Processes Applicable for the Surface Treatment of Technical Grade Ceramics: A Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2014, **228**(5), 639–652. ISSN 20412975. Dostupné z: doi:10.1177/0954405413507250.
- [109] PFEIFFER, Wulf a Johannes WENZEL. Shot Peening of Brittle Materials - Status and Outlook. *Materials Science Forum* [online]. 2010, **638–642**, 799–804. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.799.
- [110] WANG, Chengxi, Chuanhai JIANG, Fei CAI, Yuantao ZHAO, Kaiyuan ZHU a Ze CHAI. Effect of shot peening on the residual stresses and microstructure of tungsten cemented carbide. *Materials & Design* [online]. 2016, **95**, 159–164. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.01.101.
- [111] DENKENA, Berend, Bernd BREIDENSTEIN, Lothar WAGNER, Manfred WOLLMANN a Mansour MHAEDE. Influence of shot peening and laser ablation on residual stress state and phase composition of cemented carbide cutting inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2013, **36**, Special Section: Recent Advances of Functionally Graded Hard Materials, 85–89. ISSN 0263-4368. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrmhm.2012.07.005.
- [112] ZHANG, Ling Feng, Yong Kang ZHANG a Ai Xin FENG. The Fracture Microphology of the Ceramics by Strong Laser Shock Processing. *Materials Science Forum* [online]. 2006, **532–533**, 137–140. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.532-533.137.
- [113] DENG, Cheng a Pal MOLIAN. Laser shock wave treatment of polycrystalline diamond tool and nanodiamond powder compact. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, **63**(1), 259–267. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-012-3904-y.
- [114] UNIVERSITY OF THE WITWATERSRAND, JOHANNESBURG. *Method and System for Improving the Surface Fracture Toughness of Brittle Materials, and a Cutting Tool Produced by Such Method* [online]. POLESE, Claudia, Daniel GLASER, Lesley A. CORNISH a Rodney M. GENGA. Appl. no. WO/2018/215996. April 2020. World Intellectual Property Organization. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.freepatentsonline.com/y2020/0102634.html>.
- [115] BREIDENSTEIN, Bernd, Berend DENKENA, Marc-Andre DITTRICH a Benjamin BERGMANN. Influence of Laser Preparation on Surface Integrity and Performance of Cermet Cutting Inserts. In: *Conference: EURO PM Congress & Exhibition: Euro PM2015 Proceedings*. Reims, France: European Powder Metallurgy Association (EPMA), 2015. ISBN 978-1-899072-47-7.
- [116] KARATAS, C., B. S. YILBAS, A. ALEEM a M. AHSAN. Laser treatment of cemented carbide cutting tool. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2007, **183**(2), 234–240. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.10.012.

- [117] DENKENA, Berend, Alexander KRÖDEL a Thilo GROVE. Influence of pulsed laser ablation on the surface integrity of PCBN cutting tool materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2019, **101**(5), 1687–1698. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-018-3032-4
- [118] READY, John F., D. F. FARSON a T. FEELEY, ed. *LIA Handbook of Laser Materials Processing*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. ISBN 978-3-540-41770-5.
- [119] PRAMET TOOLS S.R.O. *Surface hardening of cemented carbide body* [online]. FLASAR, Petr. Appl. no. WO2017167906A1. October 2017. World Intellectual Property Organization. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/WO2017167906A1/en>.
- [120] YILBAS, B. S., S. Z. SHUJA a S. M. A. KHAN. Laser repetitive pulse heating of tool surface. *Optics & Laser Technology* [online]. 2011, **43**(4), 754–761. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2010.12.013.
- [121] KARIMZADEH, Abdossalam, Mahmood ALIOFKHAZRAEI a Frank C. WALSH. A review of electrodeposited Ni-Co alloy and composite coatings: Microstructure, properties and applications. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2019, **372**, 463–498. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2019.04.079.
- [122] *Titanium Carbide (TiC) Nanoparticles – Properties, Applications* [online]. AZoNetwork, ©2000-2021. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3379>.
- [123] ABRÃO, A. M., D. K. ASPINWALL a M. L. H. WISE. A Review of Polycrystalline Cubic Boron Nitride Cutting tool Developments and Application. In: A. K. KOCHHAR, ed. *Proceedings of the Thirtieth International MATADOR Conference: held in Manchester 31st March – 1st April 1993*. London: Macmillan Education UK, 1993, s. 169–180. ISBN 978-1-349-13255-3.
- [124] DIVAKAR, C. Boron Nitride based cutting tools. *Metals Materials And Processes*. 2000, **12**(2 & 3), 197–214. ISSN 0970423X.
- [125] LIEW, W. Y. H., S. YUAN a B. K. A. NGOI. Evaluation of machining performance of STAVAX with PCBN tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2004, **23**(1), 11–19. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-002-1520-y.
- [126] PÖTSCHKE, Johannes, Christian BERGER, Hans-Jürgen RICHTER, Uwe SCHEITHAUER a Steven WEINGARTEN. Additive manufacturing of hardmetals. In: *International Powder Metallurgy Congress and Exhibition: Proceedings of Euro PM 2017 Congress & Exhibition*. Milan, Italy: European Powder Metallurgy Association (EPMA), 2017, s. 1–6. ISBN 978-1-899072-49-1.
- [127] YANG, Yongqiang a H. C. MAN. Microstructure evolution of laser clad layers of W–C–Co alloy powders. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2000, **132**(2), 130–136. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:10.1016/S0257-8972(00)00909-9.
- [128] KENNAMETAL INC. *Cutting Tool Made by Additive Manufacturing* [online]. STOYANOV, Pantcho. US20160332236A1. US Patent. November 2016. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/4a/32/7e/7011aa03291b54/US9975>

182.pdf.

- [129] U.S. SYNTHETIC CORPORATION. *Chip breaker design using cubic boron nitride* [online]. MIESS, Davie, Robert G. KINKAID a John HARDY. Appl. no. WO/2001/060552. August 2001. World Intellectual Property Organization. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6c/4c/dc/3a5e81886de1d4/WO2001060552A1.pdf>.
- [130] BOYER, Ronald E. *Composite cutting tool*. USOO6402438B1. US Patent. June 2002.
- [131] VALSECCHI, B., B. PREVITALI, M. VEDANI a G. VIMERCATI. Fiber Laser Cladding with High Content of WC-Co Based Powder. *International Journal of Material Forming* [online]. 2010, **3**(1), 1127–1130. ISSN 1960-6214. Dostupné z: doi:10.1007/s12289-010-0970-2.
- [132] LENGAUER, Walter, Ivica DURETEK, Viktoria SCHWARZ, Christian KUKLA, Michael KITZMANTEL, E. NEUBAUER, Clemens LIEBERWIRTH a Vincent MORRISON. Preparation and Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Hardmetal and Cermet Parts. In: *Euro PM 2018 - Hard Metals AM: Euro PM2018 Congress Proceedings*. Bilbao, Spain: European Powder Metallurgy Association (EPMA), 2018. ISBN 978-1-899072-50-7.
- [133] *Introduction to optical diagnostics for PLD* [online]. Oxford Instruments plc, ©2021. [vid. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.oxinst.com/learning/view/article/pulsed-laser-deposition>.
- [134] MORINTALE, E, Cătălin-Daniel CONSTANTINESCU a M. DINESCU. Thin films development by pulsed laser-assisted deposition. *Annals of the University of Craiova, Physics*. 2010, **20**(1), 43–56. ISSN 12236039.
- [135] *Pulsed Laser Deposition (PLD) System – Blue Wave Semi* [online]. Blue Wave Semiconductors Inc, ©2021. [vid. 2021-05-07]. Dostupné z: <http://www.bluewavesemi.com/product/pulsed-laser-deposition-system/>.
- [136] *PVD-Pulsed Laser Deposition* [online]. Plasmionique Inc, ©2019. [vid. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.plasmionique.com/pvd-pulsed-laser-deposition>.
- [137] JULIEN, Christian M. a Alain MAUGER. Pulsed Laser Deposited Films for Microbatteries. *Coatings* [online]. 2019, **9**(6), 1–51. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings9060386.
- [138] KOUSSEI, Erieta-Katerina, Florent BOURQUARD, Teddy TITE, Damien JAMON, Florence GARRELIE a Yves JOURLIN. Synthesis of vanadium oxides by pulsed laser deposition and rapid thermal annealing. *Applied Surface Science* [online]. 2020, **521**, 1–8. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2020.146267.
- [139] LU, Y. F., Z. M. REN, T. C. CHONG, B. A. CHEONG, S. K. CHOW a J. P. WANG. Ion-assisted pulsed laser deposition of aluminum nitride thin films. *Journal of Applied Physics* [online]. 2000, **87**(3), 1540–1542. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.372046.
- [140] KORHONEN, Hannu, Arto KOISTINEN a Reijo LAPPALAINEN. Improvements in the thread cutting torque for a 6082-T6 aluminum-based alloy with tapping tools utilizing diamond coating. *Machining Science and Technology*

- [online]. 2018, **22**(4), 696–728. ISSN 1091-0344. Dostupné z: doi:10.1080/10910344.2017.1402930.
- [141] CHERUKURI, Ram, Melissa WOMACK, Pal MOLIAN, Alan RUSSELL a Yun TIAN. Pulsed laser deposition of AlMgB14 on carbide inserts for metal cutting. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2002, **155**(2), 112–120. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:10.1016/S0257-8972(02)00050-6.
- [142] BOUZAKIS, Konstantinos-Dionysios, Nikolaos MICHAILIDIS, Georgios SKORDARIS, Emmanouil BOUZAKIS, Dirk BIERMANN a Rachid M'SAOUBI. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization. *CIRP Annals* [online]. 2012, **61**(2), 703–723. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2012.05.006.
- [143] YOU, Yu, Akihiko ITO, Rong TU a Takashi GOTO. Low-temperature deposition of α -Al₂O₃ films by laser chemical vapor deposition using a diode laser. *Applied Surface Science* [online]. 2010, **256**(12), 3906–3911. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2010.01.048.
- [144] ČVUT v Praze, Fakulta strojní; SANBORN a.s. a ROTANA a.s. *Diamantový rotační obráběcí nástroj pro třískové obrábění a způsob jeho výroby* [online]. Původci: VÍTEK, Pavel, Pavel ZEMAN, Milan HOLUB, Antonín NOVOTNÝ, Jan MALÝ a Michal KOUDELA. Česká republika. Patent CZ 307969. 2019-08-07. Dostupné z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Patents/FullDocuments/307/307969.pdf>.
- [145] ČVUT v Praze, Fakulta strojní, ROTANA a.s. a SANBORN a.s. *Diamantový rotační obráběcí nástroj pro třískové obrábění* [online]. Původci: VÍTEK, Pavel, Pavel ZEMAN, Milan HOLUB, Antonín NOVOTNÝ, Jan MALÝ a Michal KOUDELA. Česká republika. Užitený vzor CZ 32187. 2018-10-16. Úřad průmyslového vlastnictví. Dostupné z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0032/uv032187.pdf>
- [146] VÍTEK, Pavel, Pavel ZEMAN, Milan HOLUB, Antonín NOVOTNÝ, Petr VAVRUŠKA, Jan MALÝ, Petr MAŠEK a Michal KOUDELA. *Výzkumná zpráva o řešení projektu FV10282 „Hybridní technologie výroby nástrojů z ultravrdých materiálů“ za rok 2018*. Výzkumná zpráva. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2018.
- [147] ZEMAN, Pavel, Jan BRAJER, Jan MALÝ, Jiří STUHLÍK a Matěj PEŠICE. *Technologie mikrostrukturování laserem*. Výzkumná zpráva. V-17-069. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2017.
- [148] PRIMUS, Tomáš, Josef HLAVINKA, Pavel ZEMAN, Jan BRAJER, Martin ŠORM, Adam ČERMÁK, Pavel KOŽMÍN a František HOLEŠOVSKÝ. Investigation of Multiparameter Laser Stripping of AlTiN and DLC C Coatings. *Materials* [online]. 2021, **14**(4), 951. Dostupné z: doi:10.3390/ma14040951.
- [149] GENGA, R. M., P. ROKEBRAND, L. A. CORNISH, P. ZEMAN, J. BRAJER, M. WOYDT, A. Janse VAN VUUREN a C. POLESE. Roughing, semi-finishing and finishing of laser surface modified nickel bonded NbC and WC inserts for grey cast iron (GCI) face-milling. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2020, **86**, 1–14. ISSN 0263-4368. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.105128.

- [150] GENGA, R. M., P. ZEMAN, J. BRAJER, N. L. OFEM, P. ROKEBRAND, L. A. CORNISH, N. NELWALANI, A. Janse VAN VUUREN a C. POLESE. Effects of Mo₂C, Ni binder and laser surface modification on WC inserts for turning Ti-6Al-4V. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2020, **87**, 1–11. ISSN 0263-4368. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.105145.
- [151] FREIBERG, František a Martin ZRALÝ. *Ekonomika podniku*. Vydání druhé. Praha: ČVUT v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04144-4.
- [152] ZEMAN, Pavel, Jan MALÝ, Petr MAŠEK, Josef KEKULA a Petr VAVRUŠKA. *Dílčí výzkumná zpráva o řešení projektu FV40324 „Nová generace obráběcích nástrojů z pokročilých materiálů s využitím laserové technologie při jejich výrobě“ za rok 2020*. Výzkumná zpráva. V-20-033. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2020.
- [153] MAŠEK, Petr, David BURIAN, Pavel ZEMAN a Jan MALÝ. *Metodika provádění a hodnocení experimentů obráběním při ortogonálním soustružení*. Výzkumná zpráva. V-20-045. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2020.
- [154] Laser Line Ultra, Tool Processing Machines. *Laser Line Ultra, Tool Processing Machines* [online]. EWAG AG, ©2021. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.ewag.com/en/tool-processing-machines/detail-view/product/laser-line-ultra/>.

10 SEZNAM PRACÍ AUTORA K TÉMATU PRÁCE

Nejedná se o úplný přehled autorovy publikační činnosti. Uvedeny jsou pouze autorovy práce relevantní tématu habilitační práce.

10.1 PUBLIKACE V ODBORNÝCH ČASOPISECH A PŘÍSPĚVKY NA KONFERENCÍCH

- [155] MAŠEK, Petr, Petr KOLÁŘ a Pavel ZEMAN. Optimization of trimming operations for machining carbon fibre reinforced thermoplastic composite. In: *International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies NEWTECH 2013*. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2013, s. 73–82. ISBN 978-91-7501-892-8.
- [156] MAŠEK, Petr, Pavel ZEMAN a Petr KOLÁŘ. Development of a cutting tool for composites with thermoplastic matrix. *MM Science Journal*. 2013, **2013**(3), 423–427. ISSN 1212-2572. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2013_10_201312
- [157] BOUZAKIS, K. D., E. BOUZAKIS, S. KOMBOGIANNIS, S. MAKRIMALLAKIS, G. SKORDARIS, N. MICHAILEDIS, P. CHARALAMPOUS, R. PARASKEVOPOULOU, R. M'SAOUBI, J. C. AURICH, F. BARTHELMÄ, D. BIERMANN, B. DENKENA, D. DIMITROV, S. ENGIN, B. KARPUSCHEWSKI, F. KLOCKE, T. ÖZEL, G. POULACHON, J. RECH, V. SCHULZE, L. SETTINERI, A. SRIVASTAVA, K. WEGENER, E. UHLMANN a P. ZEMAN. Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2014, **7**(3), 264–273. ISSN 1755-5817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2014.05.003
- [158] BRAJER, Jan, Jan MÁDL, Zdeněk PITRMUC, Roman ŠVÁBEK a Pavel ZEMAN. Application of laser shock processing. *Manufacturing Technology*. 2015, **15**(3), 278–285. ISSN 1213-2489.
- [159] ZEMAN, Pavel. Nové řezné nástroje pro hospodárné obrábění vláknových kompozitů. *Technický týdeník*. 2015, **2015**(6). ISSN 0040-1064.
- [160] ZEMAN, Pavel. Efektivnější obrábění díky lepšímu využití potenciálu řezných nástrojů. *MM Průmyslové spektrum*. 2015, **2015**(5), 37–38. ISSN 1212-2572.
- [161] ZEMAN, Pavel, Petr KOLAR a Petr MASEK. Experimental Investigations into Machining of FRP Material. *Materials Science Forum*. 2016, **836–837**, 29–35. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.836-837.29
- [162] ZEMAN, Pavel. Výzkum progresivních laserových technologií. *MM Průmyslové spektrum*. 2017, **2017**(9), 55–56. ISSN 1212-2572.
- [163] STUHLÍK, Jiří, Ladislav SEIDL, Jan BRAJER a Pavel ZEMAN. Laserové technologie na ČVUT v Praze. In: *Laser57: Sborník příspěvků multioborové konference LASER57*. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., 2017. ISBN 978-80-87441-21-3.
- [164] BRAJER, J., J. KAUFMAN, M. BÖHM, P. ZEMAN a J. MÁDL. Laser shock processing for novel applications. In: *Laser58: Sborník příspěvků multioborové*

konference LASER58. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., 2018. ISBN 978-80-87441-24-4.

- [165] PRIMUS, Tomáš, Jan BRAJER, Pavel ZEMAN a Jiří STUHLÍK. Vybrané laserové technologie na ČVUT v Praze. In: *Laser58: Sborník příspěvků multioborové konference LASER58*. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., 2018, s. 1–2. ISBN 978-80-87441-24-4.
- [166] ZEMAN, Pavel. Výkonné nástroje z ultratvrdých materiálů. *MM Průmyslové spektrum*. 2019, **2019**(6), 86–87. ISSN 1212-2572.
- [167] TAMIL, Alagan Nageswaran, Pavel ZEMAN, Philipp HOIER, Tomas BENO a Uta KLEMENT. Investigation of micro-textured cutting tools used for face turning of alloy 718 with high-pressure cooling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019, **37**, 606–616. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2018.12.023
- [168] GENGA, R. M., P. ROKEBRAND, L. A. CORNISH, P. ZEMAN, J. BRAJER, M. WOYDT, A. Janse VAN VUUREN a C. POLESE. Roughing, semi-finishing and finishing of laser surface modified nickel bonded NbC and WC inserts for grey cast iron (GCI) face-milling. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2020, **86**, 1-14. ISSN 0263-4368. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.105128
- [169] GENGA, R. M., P. ZEMAN, J. BRAJER, N. L. OFEM, P. ROKEBRAND, L. A. CORNISH, N. NELWALANI, A. Janse VAN VUUREN a C. POLESE. Effects of Mo2C, Ni binder and laser surface modification on WC inserts for turning Ti-6Al-4V. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2020, **87**, 1-11. ISSN 0263-4368. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.105145
- [170] PRIMUS, Tomáš, Josef HLAVINKA, Pavel ZEMAN, Jan BRAJER, Martin ŠORM, Adam ČERMÁK, Pavel KOŽMÍN a František HOLEŠOVSKÝ. Investigation of Multiparameter Laser Stripping of AlTiN and DLC C Coatings. *Materials*. 2021, **14**(4), 1-16. Dostupné z: doi:10.3390/ma14040951

10.2 VÝZKUMNÉ ZPRÁVY

- [171] BRAJER, Jan, Pavel ZEMAN, Jan MALÝ a Jiří STUHLÍK. *Laserové vrtání mikrootvorů do nástrojů ze slinutého karbidu a nerezové trubičky*. Výzkumná zpráva. V-15-066. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2015.
- [172] ZEMAN, Pavel, Jan MALÝ, Jan BRAJER a Jaroslav ČERVENKA. *Laserové vrtání mikrootvorů do slinutého karbidu*. Výzkumná zpráva. V-14-057. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2015.
- [173] BRAJER, Jan, Pavel ZEMAN, Jan MALÝ a Jiří STUHLÍK. *Testy funkčnosti vzorků opracovaných laserem*. Výzkumná zpráva. V-16-078. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2016.
- [174] BRAJER, Jan, Pavel ZEMAN, Jiří STUHLÍK, Abhinav GARG, Jan MALÝ a Petr KOLÁŘ. *Laser Machining Of Cutting Materials*. Výzkumná zpráva. V-16-074. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2016.
- [175] BRAJER, Jan, Pavel ZEMAN, Jan MALÝ a Jiří STUHLÍK. *Technologie laserového obrábění komplexních 3D tvarů*. Výzkumná zpráva. V-16-042. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2017.


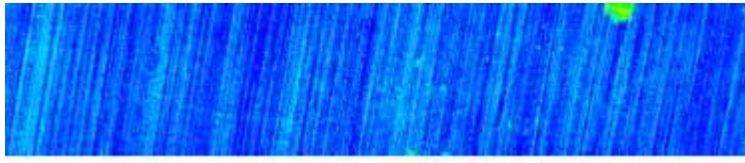


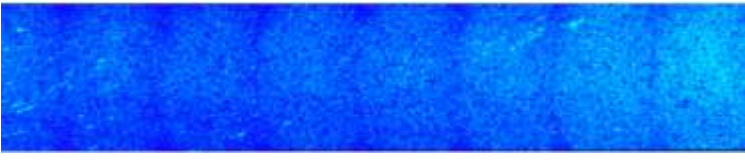

- [176] ZEMAN, Pavel, Petr VAVRUŠKA, Jan MALÝ a Petr MAŠEK. *Dílčí výzkumná zpráva o řešení projektu FV10282 „Hybridní technologie výroby nástrojů z ultratvrdých materiálů“ za rok 2016*. Výzkumná zpráva. V-16-058. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2016.
- [177] ZEMAN, Pavel, Petr MAŠEK a Jan MALÝ. *Dílčí výzkumná zpráva o řešení projektu FV10282 „Hybridní technologie výroby nástrojů z ultratvrdých materiálů“ za rok 2017*. Výzkumná zpráva. V-17-068. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2017.
- [178] ZEMAN, Pavel, Jan MALÝ, Petr MAŠEK a Petr VAVRUŠKA. *Dílčí výzkumná zpráva o řešení projektu FV10282 „Hybridní technologie výroby nástrojů z ultratvrdých materiálů“ za rok 2018*. Výzkumná zpráva. V-18-027. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2018.
- [179] ZEMAN, Pavel, Jan MALÝ, Petr MAŠEK, Josef KEKULA a Petr VAVRUŠKA. *Dílčí výzkumná zpráva o řešení projektu FV40324 „Nová generace obráběcích nástrojů z pokročilých materiálů s využitím laserové technologie při jejich výrobě“ za rok 2019*. Výzkumná zpráva. V-19-042. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2019.
- [180] ZEMAN, Pavel, Jan MALÝ, Petr MAŠEK, Josef KEKULA a Petr VAVRUŠKA. *Dílčí výzkumná zpráva o řešení projektu FV40324 „Nová generace obráběcích nástrojů z pokročilých materiálů s využitím laserové technologie při jejich výrobě“ za rok 2020*. Výzkumná zpráva. V-20-033. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2020.
- [181] ZEMAN, Pavel, Jan BRAJER, Jan MALÝ, Jiří STUHLÍK a Matěj PEŠICE. *Technologie mikrostrukturování laserem*. Výzkumná zpráva. V-17-069. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2017.
- [182] MAŠEK, Petr, David BURIAN, Pavel ZEMAN a Jan MALÝ. *Metodika provádění a hodnocení experimentů obráběním při ortogonálním soustružení*. Výzkumná zpráva. V-20-045. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT. 2020.

11 PŘÍLOHY

- Příloha 1: Analýza povrchu vzorků před testy interakce laseru s materiálem
(kapitola 5.6.1)
- Příloha 2: Technické parametry laserového zdroje Pharos provozovaného na
pracovišti HiLASE centrum (AV ČR)
(kapitola 5.2.2 a 5.6.6)
- Příloha 3: Specifikace demonstračního obrobku z materiálu G/PA12
(kapitola 6.3.1)
- Příloha 4: Technické parametry laserového zařízení Laser Line Ultra, EWAG AG
(kapitola 6.3.1)
- Příloha 5: Podoba a základní technické údaje vyvinutého nástroje z PKD
(kapitola 6.3.1)
- Příloha 6: Podoba a základní technické údaje vyvinutého nástroje z PKNB
(kapitola 6.3.2)

PŘÍLOHA 1:**Analýza povrchu vzorků před testy interakce laseru s materiálem**

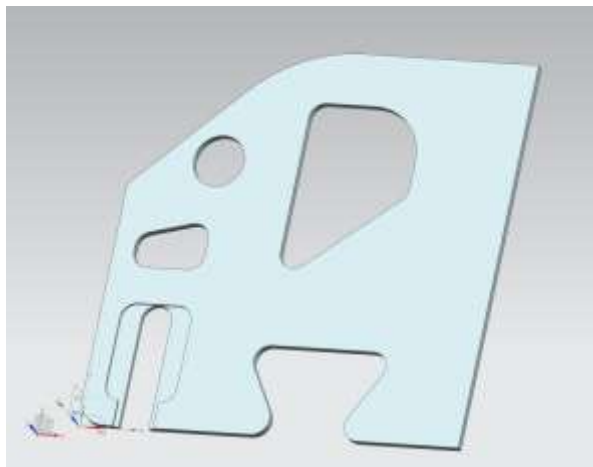
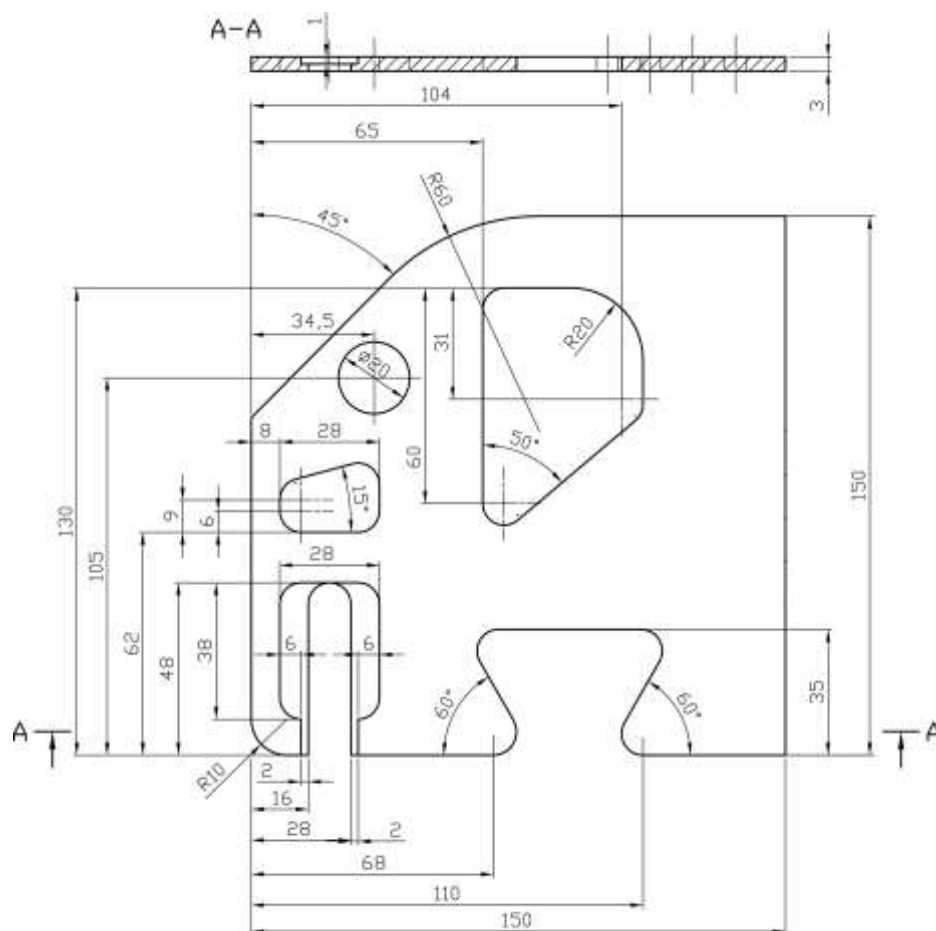
Vzorek	Snímek povrchu, výšková analýza povrchu, Profil drsnosti povrchu	Drsnost povrchu
SK		<p>Ra = 0,106 µm Rz = 0,809 µm</p>
ŘK - N		<p>Ra = 0,370 µm Rz = 2,17 µm</p>

<p>ŘK - S</p>	   <p>Výška profilu μm</p> <p>Hloubka [μm]</p> <p>Vyhodnocovaná délka [mm]</p>	<p>Ra = 0,131 μm Rz = 0,897 μm</p>
<p>PKD</p>	   <p>Výška profilu μm</p> <p>Hloubka [μm]</p> <p>Vyhodnocovaná délka [mm]</p>	<p>Ra = 0,130 μm Rz = 1,219 μm</p>

PŘÍLOHA 2:**Technické parametry laserového zdroje Pharos
provozovaného na pracovišti HiLASE centrum (AV ČR)**

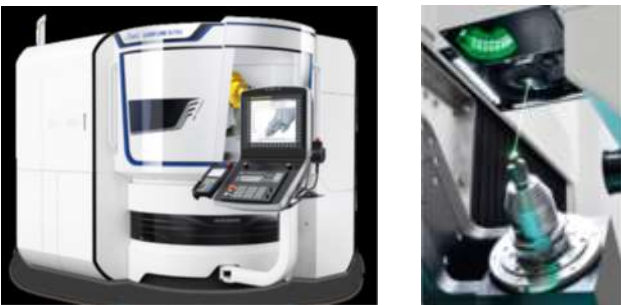
Parametr	Hodnota
Maximální průměrný výkon	20 W
Délka pulsu (Gaussovo rozdělení intenzity svazku)	< 190 fs
Nastavitelný rozsah délky pulsu	190 fs až 20 ps
Maximální energie v pulsu	> 2 mJ
Opakovací frekvence	1 kHz až 1 MHz
Vlnová délka	1030 nm ± 10 nm
Polarizace	Lineární, horizontální
Kvalita svazku	TEM ₀₀ ; M ² <1,3
Stabilita svazku	< 20 μrad/°C
Generátor harmonických vlnových délek	515 nm, 343 nm, 257 nm, 206 nm
Rozměry (délka x šířka x výška)	730 x 419 x 233 mm



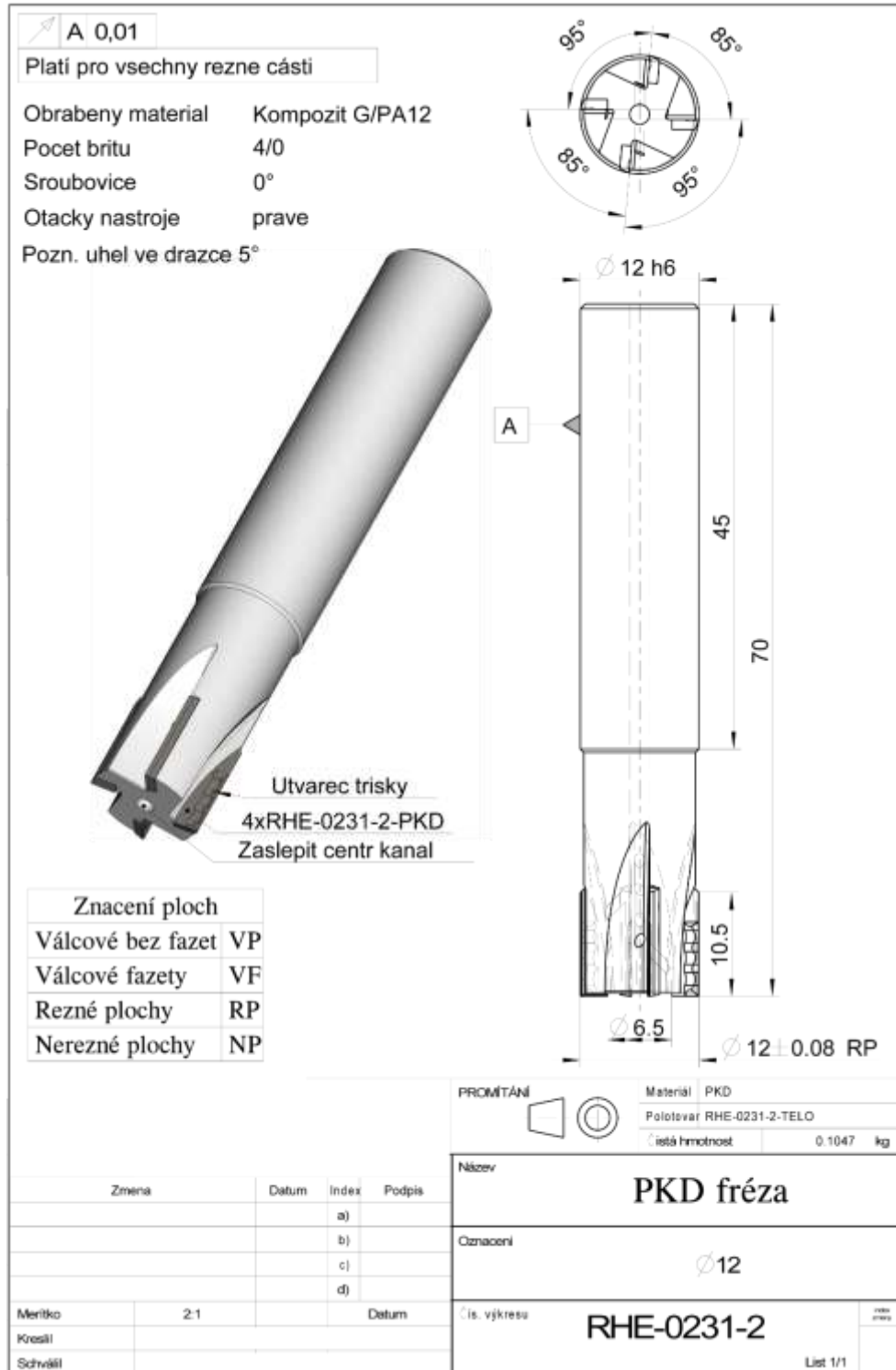
PŘÍLOHA 3:**Specifikace demonstračního obrobku z materiálu G/PA12***CAD model dílce.**Základní rozměry dílce.*

PŘÍLOHA 4:**Technické parametry laserového zařízení Laser Line Ultra,
EWAG AG**

[154]

Skupina parametrů	Parametr	Hodnota
Mechanické osy	Osa X	440 mm
	Osa Y	140 mm
	Osa Z	170 mm
	Osa B	$\pm 110^\circ$
	Osa C	∞
	Rychlopohyb v osách X, Y	15 m/min
Optické osy	Maximální rozměr skenovaného pole	50 x 50 mm
	Automatické posunutí polohy ohniska	± 4 mm
	Maximální rychlost vychýlení paprsku	10 m/s
Laserový zdroj	Vlnová délka	1064 nm
	Opakovací frekvence	0,2 až 1 MHz
	Délka pulsu	< 15 ps
	Profil a kvalita svazku	TEM ₀₀ ($M^2 < 1,5$)
Ostatní	Rozlišení lineárních os	0,0001 mm
	Rozlišení rotačních os	0,0001°
	Spotřeba energie při 400 V / 50 Hz	cca 11 kVA
	Maximální průměr rotačního nástroje	200 mm
	Maximální délka nástroje	250 mm
	Upínací rozhraní	HSK 63 A
		

PŘÍLOHA 5: Podoba a základní technické údaje vyvinutého nástroje z PKD



PŘÍLOHA 6:

Podoba a základní technické údaje vyvinutého nástroje z PKNB

