

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Diplomová práce

Úprava povrchu řezných materiálů laserem

Laser surface modification of cutting materials

AUTOR: Bc. Jiří Chábera

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

PRAHA 2021



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chábera** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **467440**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Úprava povrchu řezných materiálů laserem

Název diplomové práce anglicky:

Laser surface modification of cutting materials

Pokyny pro vypracování:

1. Přehled řezných materiálů a jejich vlastností.
2. Základy laseru a laserové techniky.
3. Možnosti ovlivnění nástrojových materiálů laserem.
4. Návrh a realizace experimentu ovlivnění vybraného řezného materiálu.
5. Analýza výsledků, zhodnocení přínosů.

Seznam doporučené literatury:

Doporučená literatura:

- [1] Buchfink, G.: The laser as a tool: a light beam conquers industrial production. 1. ed. Würzburg: Vogel, 2007, ISBN 978-3-8343-3072-7
 - [2] Vrbová, M., Jelínková, H., Gavrilov, P.: Úvod do laserové techniky. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1994, s 233.
 - [3] Allmen, M.: Laser-Beam Interactions with Materials. Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 1987, s 232.
 - [4] Ready J.F.: LIA Handbook of Laser Materials Processing. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG, 2001, 717s
 - [5] Bahaa, E., Saleh, A.: Fundamentals of photonics. John Wiley&Sons, 1991, ISBN 0-471-83965-5.
- Dílčí vědecké články na vyžádání u vedoucího a konzultanta práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

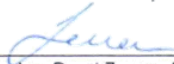
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Tomáš Primus, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ustavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

8.7.2021

Datum převzetí zadání



Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis



Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. za připomínky a cenné rady týkající se zpracování diplomové práce, ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie, za poskytnutí zařízení pro tvorbu a testování vzorků. Současně bych rád poděkoval Ing. Tomáši Primusovi za jeho odborné rady a připomínky v průběhu tvorby této práce. A v neposlední řadě svým blízkým za podporu po celou dobu svého studia.



Anotace

Autor:	Bc. Jiří Chábera
Název DP:	Úprava povrchu řezných materiálů laserem
Rozsah práce:	77 stránek, 35 obrázků, 19 tabulek, 13 grafů
Školní rok vyhotovení:	2021
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí DP:	Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Konzultant DP:	Ing. Tomáš Primus
Klíčová slova:	laserové obrábění, slinuté karbidy, drsnost povrchu, změna metalografické struktury, tepelné zpracování
Anotace:	Diplomová práce se zaměřuje na problematiku laserového obrábění nástrojových materiálů, zejména se zaměřením na slinuté karbidy. V práci jsou popsány druhy a možnosti využití nástrojových materiálů a laserových zdrojů za účelem zlepšení obráběcích schopností nástrojů. Součástí práce je návrh a vyhodnocení experimentu zjišťující vliv laserového obrábění na povrch destičky slinutého karbidu. Pro obrábění bylo využito různých nastavení laserového zdroje. Po provedení experimentu byla měřena drsnost povrchu, změna chemického složení a vliv obrábění na tvrdost povrchu. Z těchto hodnot byl vytvořen závěr shrnující změny, ke kterým v materiálu došlo.



Anotace

Autor:	Bc. Jiří Chábera
Název DP:	Laser surface modification of cutting tools
Rozsah práce:	77 pages, 35 figures, 19 tables, 11 charts
Školní rok vyhotovení:	2021
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí DP:	Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Konzultant DP:	Ing. Tomáš Primus
Klíčová slova:	laser machining, sintered carbide, surface roughness, change of metallographic structure, heat treatment
Anotace:	<p>This thesis focuses on the problematics of machining tool materials by laser, with specific focus on sintered carbides. Thesis describes types of tool materials and laser sources as means to better machining properties of tools. Thesis contains design and evaluation of experiment that aims to find what effects come as a result of laser machining. Machined material is sintered carbide cutting tool. Process of machining was done with several different settings of the laser source. After the machining was carried out, several tests were performed. These tests included measurement of surface roughness, hardness and change in chemical composition of said tool material. From these tests a conclusion was formed describing changes which the material has undergone.</p>



Přehled použitých zkratk

Zkratka	Význam v ČJ	Význam v AJ
HSS	High speed steels	Rychlořezné oceli
WC	Wolfram carbide	Karbid wolframu
PCBN	Polykrystaline cubic boron nitride	Kubický nitrid boru
PCD	Polycrystalline diamond	Polykrystalický diamant
VBD	Exchangable cutting plate	Vyměnitelná břitová destička
HAZ	Heat affected zone	Tepelně ovlivněná zóna
SEM	Scanning electron microscope	Řádkovací elektronový mikroskop
EDX	Energy-dispersive X-ray spectroscopy	Energeticky disperzní rentgenová spektroskopie



Obsah

1. Úvod	3
2. Nástrojové materiály.....	4
2.1. Nástrojové oceli.....	5
2.2. Rychlořezné oceli	6
2.2.1. Stellity.....	6
2.3. Slinuté karbidy.....	7
2.4. Cermety	9
2.5. Řezná keramika	10
2.5.1. Oxidická keramika.....	10
2.5.2. Nitridická (neoxidická) keramika.....	11
2.6. Supertvrdé řezné materiály	11
2.6.1. Kubický nitrid boru (CBN)	11
2.6.2. Polykrystalický diamant (PCD).....	11
2.6.3. Přehled fyzikálních vlastností.....	12
3. Úvod do laserové techniky	13
3.1. Princip laserového obrábění	13
3.2. Fyzikální princip laseru	13
3.3. Dělení laserů	15
3.3.1. Pevnolátkové lasery	16
3.3.2. Plynové lasery	17
3.3.3. Polovodičové lasery.....	18
4. Možnosti ovlivnění nástrojových materiálů laserem.....	20
4.1. Geometrická úprava nástrojů laserem	20
4.1.1. Strukturování – úprava povrchové struktury řezných nástrojů	20
4.1.2. Tvorba utvařeče třísky	21
4.2. Tepelná úprava nástrojových materiálů.....	22
4.2.1. Možnosti úpravy nástrojových a rychlořezných ocelí laserem	22
4.2.2. Možnosti úpravy řezné keramiky	23
4.3. Modifikace slinutých karbidů.....	23
4.3.1. Úprava velikosti zrna.....	24
4.3.2. Úprava drsnosti povrchu.....	26



4.4.	Parametry při laserovém obrábění	27
5.	Experimentální část diplomové práce	29
5.1.	Podoba polotovaru	30
5.2.	Použité laserové zařízení	32
5.3.	Parametry laserového obrábění	32
5.4.	Použité zařízení pro měření drsnosti	34
5.5.	Metodika obrábění experimentu I.....	34
5.6.	Vyhodnocení experimentu I	36
5.6.1.	Měření drsnosti pro experiment I	36
5.6.2.	Snímky povrchu pro experiment I.....	40
5.7.	Metalografická analýza experimentu I	42
5.7.1.	Chemické složení obráběného povrchu	42
5.7.2.	Analýza tepelně ovlivněné oblasti.....	44
5.7.3.	Chemická analýza přetaveného materiálu	46
5.8.	Závěr experimentu I.....	47
5.9.	Metodika obrábění experimentu II	48
5.10.	Vyhodnocení experimentu II	49
5.10.1.	Měření drsnosti pro experiment II	49
5.10.2.	Snímky povrchu pro experiment II.....	51
5.11.	Metodika zjištění mechanických vlastností pro experiment II.....	54
5.11.1.	Zjištění tvrdosti pro experiment II.....	55
5.11.2.	Závěr experimentu II	59
6.	Závěr diplomové práce	60
7.	Použitá literatura.....	62
8.	Seznam obrázků.....	66
9.	Seznam tabulek.....	68
10.	Seznam grafů	69
11.	Seznam příloh	70



1. Úvod

Nástrojové materiály ovlivňují řadu aspektů napříč výrobním procesem. Může se jednat například o nákladnost výroby či výslednou kvalitu vyrobených dílů. Ovlivnění a modifikace nástrojových materiálů slouží ke zlepšení jejich mechanických či chemických vlastností. Právě modifikace slinutých karbidů laserem by mohla přinést efektivní způsob změny těchto charakteristik. Návrh této práce vychází z předpokladu, že za pomoci laseru je možné lokálně ovlivnit strukturu a chemické složení vyměnitelných břitových destiček, což povede ke změně mechanických vlastností. Tato změna by mohla mít za následek výrobu nástrojů, které budou moci odebrat větší množství materiálů, či by mohla být prodloužena jejich životnost.

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi ovlivnění nástrojových materiálů laserem. V teoretické části jsou popsány druhy nástrojových materiálů, jejich vlastnosti a odlišnosti se zaměřením na slinuté karbidy a jejich chemické a metalografické vlastnosti.

Dále jsou zde uvedeny principy fungování laseru a obrábění pomocí laserů. Laserové zdroje jsou zde rozděleny dle principů funkce a podrobně popsány. Součástí této kapitoly je také porovnání laserů.

Poslední část teoretické práce popisuje princip, který stojí za návrhem experimentu. Jedná se o princip ovlivnění povrchu slinutých karbidů a očekávaný výsledek těchto postupů.

V praktické části je čtenář seznámen s návrhem experimentu a jeho celkovým provedením. Tato část práce zahrnuje seznámení s metodikou provádění a vyhodnocování jednotlivých experimentů současně s popisem postupu experimentu a teoretickým odůvodněním jednotlivých výsledků.

V závěru této práce bylo provedeno finální zhodnocení získaných dat a jejich shrnutí. Byl vytvořen také návrh možného postupu při směřování dalšího výzkumu v této oblasti.



2. Nástrojové materiály

V oboru třískového obrábění existuje řada materiálů, každý s unikátními vlastnostmi. Aby bylo možno materiál považovat za vhodný k obrábění, musí mít několik určitých charakteristik. [1]. Mezi ty hlavní patří tvrdost a houževnatost. Bližší popis a další vlastnosti nástrojových materiálů popisuje Tab. 1. V oblasti řezných materiálů neexistuje „ideální“ materiál, který by splňoval všechny uvedené atributy naráz, a používané materiály mají často kombinace charakteristik, které je zvyhodňují ve specifických aplikacích. V některých případech se dokonce atributy vzájemně vylučují, například vlastnosti jako tvrdost a houževnatost. [2] Nástrojové materiály je možno dělit na základě jejich vlastností, ceny a mnoho dalších aspektů. Tato práce bude dále uvažovat dělení na základě chemického složení. V této kapitole budou popsány běžně používané nástrojové materiály a jejich základní charakteristiky.

Tab. 1 Vlastnosti nástrojových materiálu a jejich popis [2]

Vlastnost	Charakteristika vlastnosti a její princip
Tvrdost	Od nástrojových materiálů je očekávána vysoká tvrdost, která umožňuje samotný proces obrábění tím, že dochází k obrábění měkčího předmětu (obrobku) tvrdším (nástrojem). Tvrdost je charakterizována jako odpor kladený materiálem proti vnikání cizího tělesa.
Odolnost proti deformaci	Odolnost proti plastické deformaci je pro nástrojové materiály stěžejní z důvodu opotřebení. Čím vyšší je odolnost vůči plastické deformaci, tím delší bývá životnost nástroje.
Houževnatost	Vysoká houževnatost zaručuje odolnost nástroje vůči rázům a lomům, které jsou jimi způsobené. Při procesu obrábění je toto důležité zejména při přerušovaném procesu obrábění, kdy dochází k opětovným rázům při kontaktu nástroje s obrobkem.
Chemická inerce	Chemická inerce zaručuje, že při procesu obrábění nedojde k chemické reakci mezi obráběným a nástrojovým materiálem. Těmto procesům je nutno zabránit z důvodu ovlivnění jak obrobku, tak nástroje.



Tepelná vodivost	Tepelná vodivost udává schopnost materiálu odvádět teplo z ostří nože do zbytku nástroje. Při obrábění je nutno co nejvíce tepla odvést z místa řezu. Tomu napomáhá chladicí kapalina. Přesto je nutné, aby materiál byl sám o sobě tepelně vodivý.
Creepová odolnost	Tato vlastnost je úzce spjata s odolností proti plastické deformaci, u nástroje udává jeho odolnost proti deformaci za vysokých teplot při stálém či dlouhotrvajícím namáhání.
Tuhost	Tuhost má značný vliv na přesnost rozměrů při procesu obrábění. Čím tužší materiál, tím přesnějších rozměrů je možno dosáhnout. Tato vlastnost je udávána i u obráběcích strojů.
Tření	Tření zde uvažujeme ve smyslu jeho snížení. Pokud by docházelo mezi nástrojem a obrobkem k vysokým hodnotám tření, mohlo by dojít až ke svaření obou předmětů dohromady. Tato vlastnost má také silný vliv na odvod obráběného materiálu z ostří nástroje.

2.1. Nástrojové oceli

Jedná se o oceli s obsahem uhlíku v rozmezí od 1 do 1,2 %. Velkou výhodou těchto materiálů je jejich relativně nízká cena. Přesto je jejich aplikace při třískovém obrábění značně omezena, protože ztrácí své mechanické vlastnosti už při 205 °C. [1] Ke ztrátě vlastností dochází vlivem popouštění, nárůst teploty způsobí snížení pevnosti a nárůst houževnatosti. Tyto nástroje se používají především tam, kde při obrábění nevznikají tak vysoké teploty, například u obrábění plastů či dřeva. [3]



2.2. Rychlořezné oceli

Jedná se o materiál, jenž primárně slouží k výrobě ručních obráběcích nástrojů. Může se tedy jednat například o pilky na železo či monolitní vrtáky. V praxi je možné se s tímto materiálem setkat pod zkratkou HSS. Je dělen do čtyř skupin na základě hlavního legujícího prvku. Prvky, které mají významný vliv na obráběcí proces, jsou wolfram, molybden, vanad, kobalt. Na tyto nástroje bývají také zpravidla nanášeny povlaky metodou PVD, které si kladou za cíl prodloužení jejich životnosti. Pásmo obsahu uhlíku v těchto ocelích se pohybuje v intervalu od 0,3 do 0,8 %. Vzhledem k relativně vysoké houževnatosti v porovnání například s řeznou keramikou je možné tyto materiály používat i na méně tuhých strojích. Představitelé těchto ocelí a jejich charakteristiku zobrazuje Tab. 2. [2]



Obr. 1 Stopková fréza z rychlořezné oceli [28]

2.2.1. Stelity

Tato kategorie materiálů je často uváděna jako podskupina rychlořezných ocelí. Název stelit je obchodní označení, za kterým se skrývají slitiny obsahující vysoká procenta chromu (30–33 %), kobaltu (38–53 %) či wolframu (10–20 %). Tyto materiály v kombinaci s uhlíkem vytvářejí karbidy, které dosahují tvrdosti až 65 HRC [2] a mají maximální pracovní teplotu okolo 600 °C. Hlavní nevýhodou stelitů je jejich složité zpracování, nástroje jsou odlévány



speciálními metodami a jejich následné opracování je možné pouze broušením, což zvyšuje ekonomickou náročnost výroby. [4]

Tab. 2 Charakteristika a příklady vysokorychlostních ocelí [2]

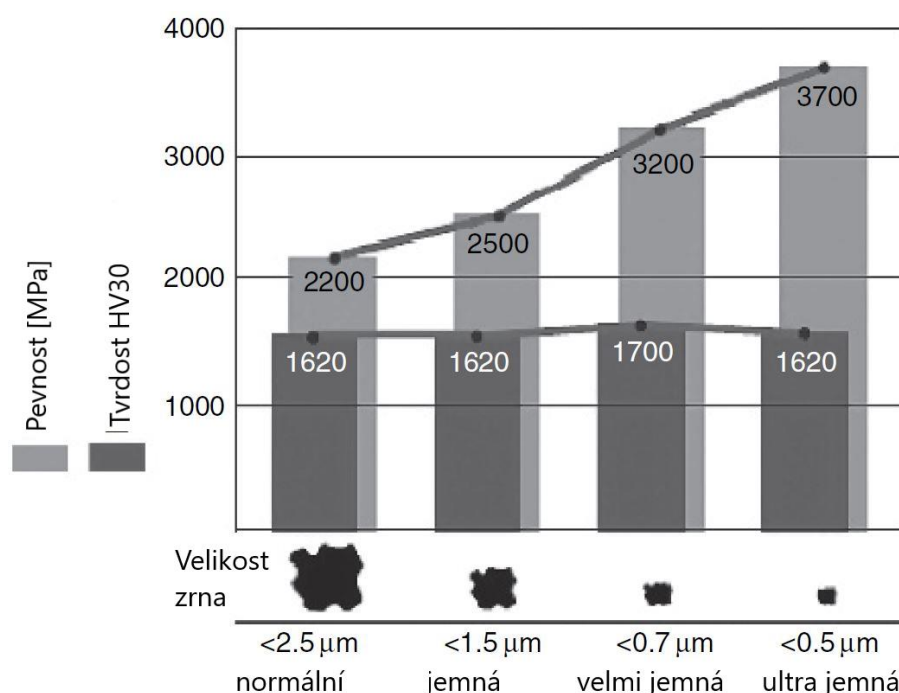
Technický název/obchodní označení	Materiálové označení	Popis aplikace
HSS	13343	Běžný nástrojový materiál, vhodný pro většinou běžných obráběcích aplikací.
HSS-Co	1.3243	Materiál odolný vůči vysokým teplotám, ideální pro operace hrubování či aplikace, kde nedochází k dostatečnému chlazení chladicí kapalinou.
HSS-E	1.3344	Vysoce otěru odolný materiál s dobrou stabilitou bříty, vlivem čehož je možné se s ním často setkat například ve výstružnicích.
P/M HSS-E	1.3207	Materiál s vysokou tvrdostí, vysokou tepelnou odolností a dobrou stabilitou bříty.
HSSE M 42	1.3247	Materiál s vysokou teplotní odolností a tvrdostí, používaný zejména k obrábění těžko obrobitelných povrchů.

2.3. Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou v dnešní době nejvíce zastoupeným nástrojovým materiálem na trhu, kde tvoří více než polovinu všech využívaných nástrojových materiálů. [5] Jsou vyráběny procesem slinování karbidů a několika druhů tvrdých kovů. Tvrdé kovy zde zastávají hlavní úlohu pojiva. Mezi nejčastěji používané karbidy patří karbid wolframu (WC), karbid titanu (TiC) a karbid tantalu (TaC). Jako pojivo je nejvíce používaný kobalt, dále pak nikl. [2]



Stěžejní vliv na vlastnosti nástroje vyrobeného ze slinutých karbidů má počet a velikost tvrdých částic (ty tvoří slinuté karbidy). Výskyt karbidů v kovové matrici se ve většině případů pohybuje v intervalu 40–60 %. [2] Právě změnami parametrů, jako je množství částic, velikost částic a jejich druh, výrobci nejvíce upravují konečné vlastnosti nástrojů. Velikosti zrn se dělí do čtyř skupin: normální (<2,5 μm), jemné (<1,5 μm), velmi jemné (<0,7 μm) a ultra jemné (<0,5 μm). Vliv velikosti zrn je popsán v Graf 1. [2]



Graf 1 Zobrazení vlivu velikosti zrna slinutého karbidu na mechanické vlastnosti [2]

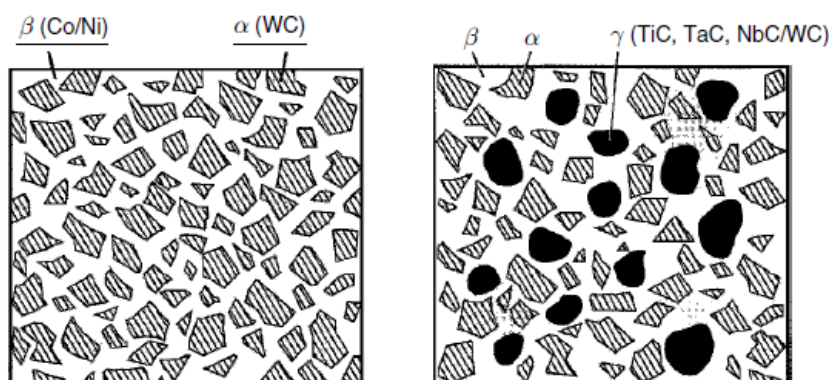
Na trhu jsou nástroje z těchto materiálů rozděleny do tří skupin (dle ISO norem) označené písmenem a specifickou barvou, přičemž každá skupina slouží k obrábění různých materiálů. Toto dělení je popsáno v Tab. 3. [2]

Tab. 3 Označování nástrojů ze slinutých karbidů [2]

Označení	Popis	Chemické složení
P	Pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhé třísky jako jsou například oceli a jejich slitiny.	WC + TiC + Co
M	Pro obrábění materiálů, které tvoří krátké třísky – například železo či neželezné materiály.	WC + TiC + TaC/NbC + Co
K	Pro obrábění nekovových materiálů.	WC + Co



Z pohledu složení je možné karbidy dělit do dvou hlavních skupin – dvoufázové a třífázové karbidy. Dvoufázové karbidy se skládají z α fáze, která obsahuje tvrdé karbidy wolframu a β fáze, ta je složena z kobaltového pojiva. [3] Třífázové karbidy obsahují také fáze α a β , současně jsou však chemicky stabilizovány fází γ . Tato fáze se skládá z více chemicky stabilních karbidů jako například TiC, TaC, NbC. Ty si kladou za cíl snížit kráterové opotřebení vlivem afinity atomů uhlíku k austenitické fázi. Metalografická struktura je znázorněna na Obr. 2. [2]



Obr. 2 Dvoufázová (vlevo) a třífázová struktura (vpravo) karbidů. [2]

2.4. Cermety

Jedná se o nástrojové materiály, jejichž název plyne ze spojení CERamics a METals. Jejich název obsahuje dvě hlavní složky, kterými jsou keramika a kov. [6] Matrici tvoří kov a výztuž tvrdé keramické částice. Princip funkce těchto nástrojů je velmi podobný jako u slinutých karbidů, liší se ale materiály, které jsou zde používány. Jako tvrdé částice slouží například TiC, TiN a jako pojivo slouží směs kobaltu a niklu.

Při srovnání se slinutými karbidy dosahují cermety vyšších obráběcích teplot, lepší odolnosti vůči abrazi a větší chemické stability. Oproti WC však mají nižší houževnatost a stejně tak hůře odolávají rázovým změnám teplot. [2]

Cermety nachází své využití všude tam, kde je možno obrábět při malých posuvech (malé ploše třísky) a vysoké řezné rychlosti. Tyto požadavky je většinou posouvají do kategorie dokončovacích nástrojů. Jsou jimi obráběny oceli a ocelolitiny, v některých případech i litiny. [2]



2.5. Řezná keramika

V dnešní době má řezná keramika podíl na trhu obráběcích nástrojů cca 5 % a je využívána tam, kde není možné či ekonomicky výhodné užití slinutých karbidů. [7] Dva hlavní materiály, se kterými je možné se v oblasti řezné keramiky setkat, jsou oxid hlinitý (Al_2O_3) a nitrid křemičitý (Si_3N_4). Na základě těchto dvou materiálů dělíme tuto skupinu materiálů na keramiku oxidickou a nitridovou (neoxidickou) [7]. Bez ohledu na to, o kterou skupinu se jedná, je možné řeznou keramiku vyztužit vlákny submikronového průměru neboli whiskery. [7] Whiskery jsou krátká vlákna, která zvyšují vlastnosti nástroje jako například pevnost, tepelnou vodivost a odolnost proti vysokoteplotnímu tečení. [2] Whiskery jsou tvořeny materiály jako ZrO_2 , SiC , TiC . [2]

To, co činí nástroje z těchto materiálů unikátní, je jejich maximální pracovní teplota, která dosahuje až $2200\text{ }^\circ\text{C}$ [2], nízká měrná hmotnost, stálost mechanických vlastností za vysokých teplot, chemická netečnost a odolnost vůči opotřebení. [7]

2.5.1. Oxidická keramika

Oxidickou keramiku je možné dělit do dalších čtyř skupin na základě jejího složení. [7]

Čistá oxidická řezná keramika se vyznačuje obsahem Al_2O_3 okolo 99,5 %. Má vysokou tvrdost a ořezuvzdornost a je chemicky stálá, a to i za vysokých teplot. Její hlavní nevýhodou je však vysoká křehkost, která zabraňuje aplikaci v operacích jako je hrubování, vzhledem k velkým rázovým silám a vysokým teplotním skokům. [7]

Polosměsná oxidická keramika obsahuje kromě Al_2O_3 také ZrO_2 . Obsah oxidu zirkoničitého se pohybuje v intervalu mezi 10 a 15 %. Jeho přidáním je docíleno nárůstu houževnatosti materiálu, což vede ke snížení náchylnosti ke vzniku křehkého lomu a umožňuje to tak širší spektrum aplikace nástrojů. [7]

Směsná oxidická keramika obsahuje materiály jako jsou TiN a TiC . Přísada karbidu titanu vede ke zvýšení odolnosti proti tepelným rázům a přidáním TiN dochází k nárůstu pevnostních vlastností nástroje. Současně je zlepšena chemická stabilita při vysokých teplotách. [7]

Kompozitní oxidická keramika se skládá z matrice Al_2O_3 , která je vyztužena whiskery karbidu křemíku. Výztužná vlákna mají průměr v intervalu od 0,1 do $10\text{ }\mu\text{m}$ a délku od 5 do $100\text{ }\mu\text{m}$. Whiskery mají za cíl zvýšit houževnatost materiálu vlivem zabránění šíření



mikrotrhlin v matrici. Současně vedou ke zlepšení ohybových vlastností a nárůstu tvrdosti za tepla. [7]

2.5.2. Nitridická (neoxidická) keramika

Jedná se o keramiku na bázi křemíku a vyskytuje se ve dvou modifikacích, α a β . Neoxidická keramika může dosahovat podobných hodnot odolnosti proti křehkému lomu jako slinuté karbidy. Vysoká pevnost a malý koeficient roztažnosti mají za výsledek dobrou odolnost proti teplotním rázům. Tento materiál představuje jakýsi mezikrok mezi slinutými karbidy a oxidickou keramikou, dokáže vydržet vyšší teploty než slinuté karbidy a dosahuje vyšší pevnosti než oxidická keramika. [2]

2.6. Supertvrde řezné materiály

Vývoj prvních supertvrdých řezných materiálů začal v 70. letech minulého století. Od té doby je možné se setkat s dvěma hlavními zástupci, které tvoří polykrystalické materiály kubický nitrid boru (PCBN) a diamant (PCD). Ovlivnit vlastnosti PCBN je možné hlavně za pomoci změny velikosti zrna a druhu pojiva, které bylo použito. [2]

2.6.1. Kubický nitrid boru (CBN)

CBN je tepelně stálý do teploty 1200 °C a chemicky inertní do 1400 °C. Velikost zrn CBN se pohybuje okolo 1 μ m a méně, což v kombinaci s jejich vysokou tvrdostí vede k náchylnosti ke vzniku mikrotrhlin. Právě proto musí být upraven rádius ostří, popř. fazetka tak, aby toto riziko bylo co nejmenší. Nástroje bývají často dokončovány operací honování, která zanechává povrch méně náchylný ke vzniku mikrotrhlin, což vede k nárůstu pevnosti povrchu nástroje. Aby bylo užití CBN nástroje smysluplné, je nutné je používat pouze na materiály, které dosahují vyšší povrchové tvrdosti než 45 HRC, jinak dochází k rychlému opotřebení nástroje. Mezi obráběné materiály se řadí například kalená ocel, žáruvzdorné slitiny či slinované materiály na bázi kobaltu. [2]

2.6.2. Polykrystalický diamant (PCD)

Nástroje vyrobené z PCD se skládají ze dvou částí. Jsou tvořeny krystaly diamantu, které dosahují tvrdosti až 8000 HV, jsou odolné proti opotřebení třením a mají tepelnou vodivost cca 500 Wm⁻¹K⁻¹. Velikost zrn PCD se pohybuje od 25 μ m výše. Ostří z tohoto materiálu je poté spojeno s tělem VBD, kterou tvoří SK. Hlavní nevýhodou PCD materiálu je relativně nízká teplotní odolnost při maximální pracovní teplotě 600 °C. Nejobvyklejší použití



nástrojů z PCD je pro obrábění různých křemíkových slitin, a to hlavně při dokončovacích operacích. [2]

2.6.3. Přehled fyzikálních vlastností

V rámci této kapitoly jsou popsány klíčové vlastnosti řezných materiálů se zaměřením na slituté karbidy. Přehled těchto vlastností je uveden v Tab. 4. [8] [2] [9] [10] [11] [12]

Tab. 4 Přehled vlastností vybraných materiálů [8] [2] [9] [10] [11] [12]

Vlastnosti	WC	Co	Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄
Typ mřížky	Hexagonální	Hexagonální	Hexagonální	Hexagonální
Parametr mřížky a [nm]	0,2900 až 0,2907		2.241	
Parametr mřížky c [nm]	0,2830		0,56	
Hustota [g/cm ³]	15,67	8,9	3,3	3.17
Tvrdoost Vickers [MPa]	2600	1043	2720	1700÷2200
Modul pružnosti v tahu [GPa]	620÷727	209	215÷413	166÷297
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	262	75		
Modul objemové pružnosti [GPa]		180	137÷324	120÷241
Pevnost v tahu [MPa]	350	675÷1250	215	60÷525
Pevnost v ohybu [MPa]	550÷560		69÷665	
Poissonovo číslo [-]	0,18	0,31	0,21	0,23
Teplota tavení [°C]	2627÷2870	1495	2277÷2369	1900
Teplota vypařování [°C]	6000	2927	2997	
Součinitel délkové roztažnosti [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	4,42÷5,2	13	12÷38,5	3,3
Měrná tepelná vodivost [W m ⁻¹ K ⁻¹]	63,0÷121,8	100	30	15÷43
Měrný odpor [μΩ cm]	17÷53	62,4	18÷24	16÷21



3. Úvod do laserové techniky

První zmínky o laserech pocházejí z roku 1917. Ovšem první rubínový laser byl objeven v roce 1960 T. H. Maimanem. Dnes je možné se s lasery setkat v mnoha aplikacích napříč strojírenským průmyslem, například v rámci svařování, řezání, čištění povrchů a jejich tepelné úpravy. Samotný název LASER je akronym pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu popisuje způsob, kterým lasery fungují, a sice se jedná o proces zesilování světla stimulovanou emisí záření. [13]

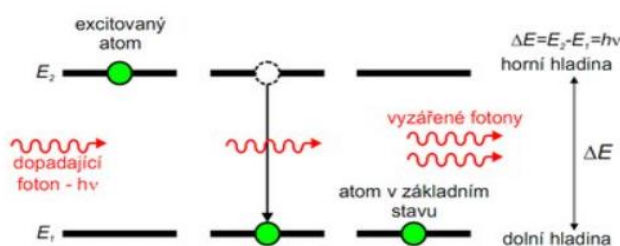
3.1. Princip laserového obrábění

Princip obrábění za pomoci laseru je prakticky stejný napříč všemi jeho aplikacemi, kde dochází pouze ke změně intenzity laserového paprsku a řezných parametrů, jako například overlap, skenovací rychlost, skenovací strategie, výkon, délka pulzu atd. Obrábění či úprava povrchu materiálu laserem funguje na principu ostřelování povrchu urychlenými fotony, jejichž kinetická energie se při kontaktu s materiálem mění na energii tepelnou. V závislosti na parametrech laseru dochází buď k natavení povrchu či jeho vypaření, nebo pouze ohřevu, který vede ke změně struktury ovlivněného materiálu. [13] [14] [15]

3.2. Fyzikální princip laseru

Aby bylo možné vytvořit laserový paprsek, je nutno vybudit atomy do excitovaného stavu. Tento stav označuje přesun atomů na vyšší energetickou hladinu (ne vždy se musí jednat o atomy). Excitované atomy snaží vrátit na svou původní energetickou hladinu do stavu rovnováhy (v tomto stavu se elementy nachází v přírodě), a právě při tomto přechodu dochází k emisi fotonů. [13] [15] [16]

Proces přechodu atomů z excitované na původní energetickou hladinu je odstartován pomocí spontánní emise. Tento proces označuje interakci excitovaného atomu, kdy dojde k přesunu atomu z vyšší energetické hladiny, a přitom dojde k vyzáření fotonu. Následně vyzářený foton interaguje s dalšími excitovanými atomy a stimuluje je k přechodu na nižší hladinu,

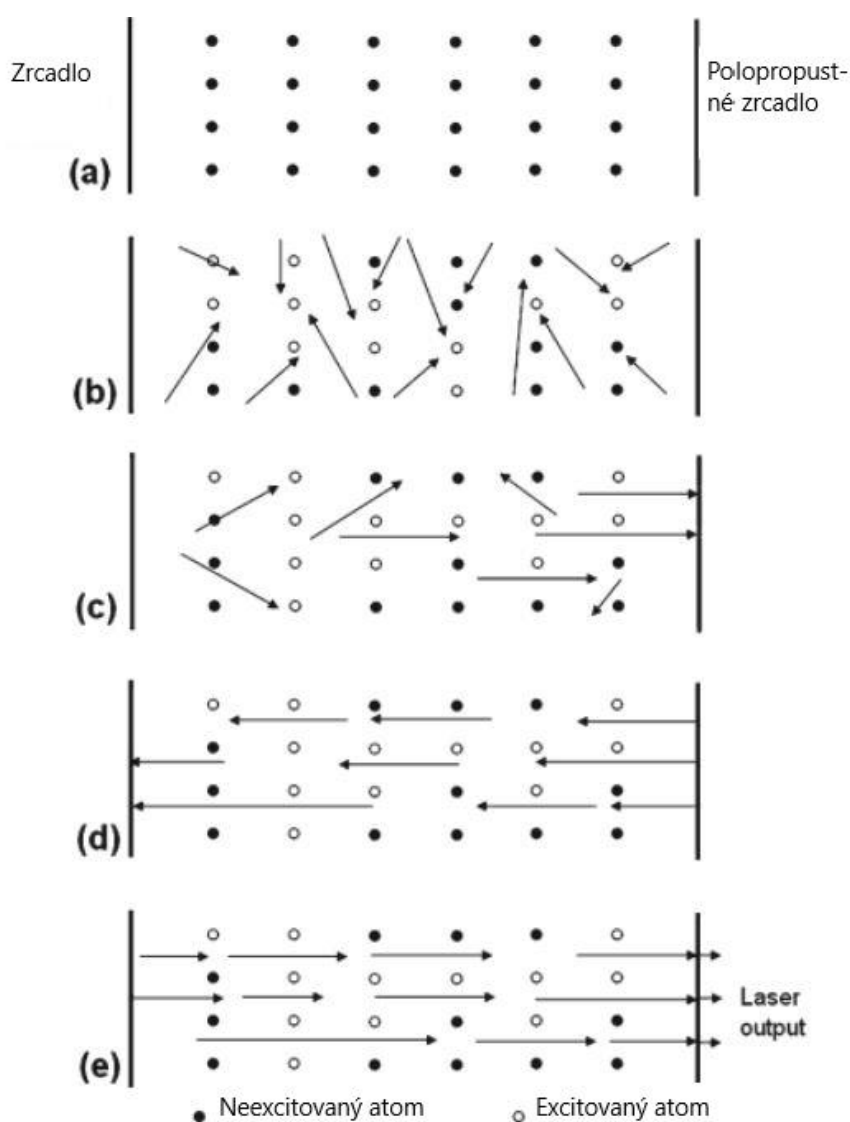


Obr. 3 Princip vzniku laserového paprsku [18]



přičemž dochází k vyzáření dalších fotonů. Tento princip je znázorněn na Obr. 3 [13] [15] [16]

Celý tento proces v případě laserů probíhá v rezonátoru, který je tvořen dvěma zrcadly, aktivním prostředím a zdrojem buzení. Ten celou reakci urychluje a dochází k větší emisi fotonů vzhledem k jejich odrážení od jednoho zrcadla k druhému. Průběh tohoto děje je graficky znázorněn na Obr. 4. Obrázek je rozdělen do pěti fází znázorňujících postupnou tvorbu paprsku. Fáze (a) až (b) jsou popsány v předchozím odstavci. Na Obr. 4 je však jasně vidět, že pouze fotony (znázorněny šipkami) dopadající směrem kolmo na polopropustné zrcadlo prochází skrz. [13] [15] [16]



Obr. 4 Princip vzniku laserového záření [15]



3.3. Dělení laserů

Dělení laserů je možné na základě několika aspektů. Lasery lze dělit dle délky pulzu či aktivního prostředí. Další možností je dělení na základě jejich aplikace (dělení, gravírování, svařování, tepelná úprava apod). [17]

V této kapitole je představeno dělení laserů na základě aktivního prostředí a principy na jakých lasery v jednotlivých prostředích pracují. Konkrétní rozdělení laserů a jejich aktivních prostředí je popsáno Tab. 5. [17]

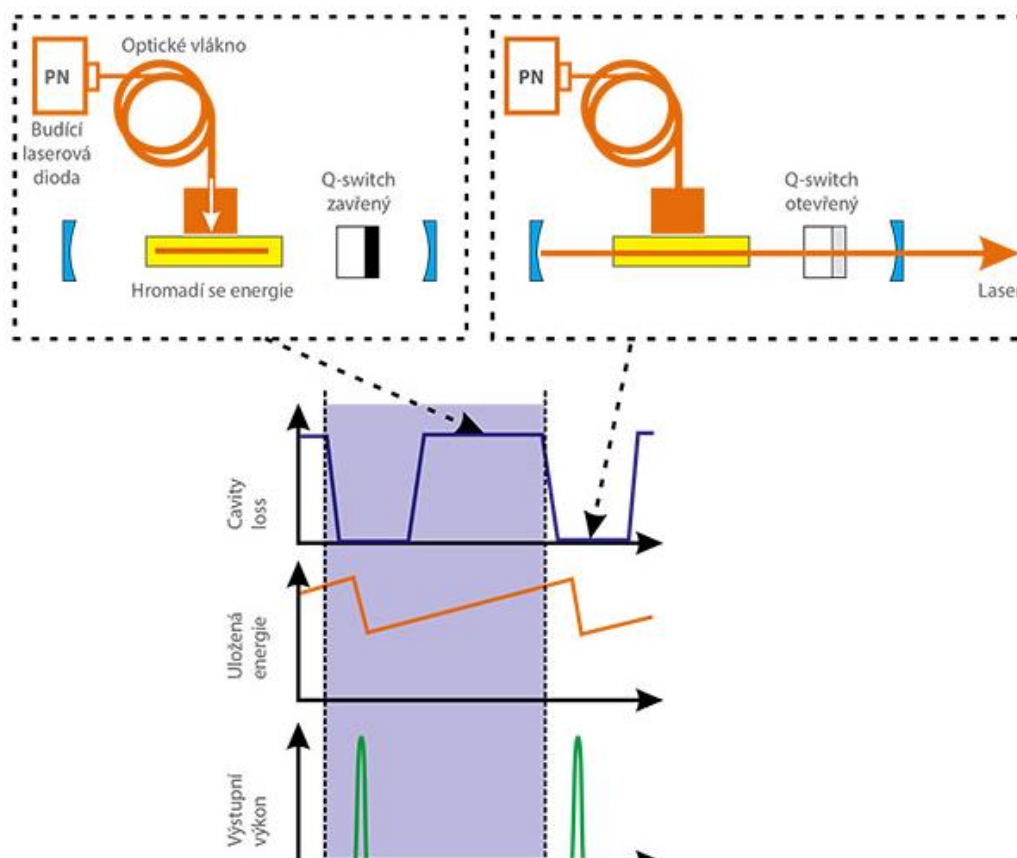
Tab. 5 Dělení aktivních prostředí laserů [15]

Druh prostředí laseru	Složení aktivního prostředí	Vlnová délka [nm]
Pevnolátkové lasery	Nd:YAG	1,064
	Rubínový	694
	Nd:glass	1,062
	Alexandrite	700–820
	Ti-sapphire	700–1,100
	Er:YAG	2,940
	Nd:YLF	1,047
Plynné lasery	HeNe	632,8
	Argon	488 / 514,5
	Krypton	520–676
	HeCd	447,5 / 325
	CO ₂	10,600
	ArF	191
	KrF	249
	XeCl	308
	XeF	351
	Výpary mědi	510,6 / 578,2
	Výpary zlata	628
Polovodičové lasery	InGaAs	980
	AlGaInP	630–680
	InGaAsP	1,150–1,650
	AlGaAs	780–880
Kapalinové lasery	Rhodamine 6G	570–640
	Coumarine 102	460–515
	Stilbene	403–428



3.3.1. Pevnolátkové lasery

V pevnolátkových laserech je aktivním prostředím pevná látka, nejčastěji krystal. Buzení zde zpravidla probíhá opticky či výbojkami. Nejrozšířenějším zástupcem této skupiny je Nd:YAG laser, kde aktivním prostředím je $Y_3Al_5O_{12}$ (monokrystal yttrium aluminium granátu), které je dopováno Nd^{3+} (atomy neodymu), a to do maximální hodnoty 2 %. [13] [15] Dále je možné setkat se s krystaly, které jsou dopovány atomy Erbium (Er^{3+}), Holmia (Ho^{3+}), Ytterbia (Yb^{3+}). Nejdominantnější zastoupení na trhu je však dopování atomy neodymu. [18] Výstup paprsku z pevnolátkových laserů je kontinuální, za pomoci dalších součástek je možno paprsek modifikovat na pulzní. Aby se laser stal pulzním, je potřeba paprsek manipulovat různými prvky. Jeden z těchto prvků může být například Q-switch součást. Q-switch je součást, jež sbírá kontinuální paprsek a transformuje ho na pulzní s vysokým nárůstem energie. Jeho princip je znázorněn na Obr. 5. V případě uzavření Q-switchu dochází k hromadění energie kontinuálního pulzu, ten je v momentě otevření vypuštěn, po čemž je Q-switch znovu uzavřen a celý proces se opakuje znovu. Pevnolátkové lasery mohou být buzeny například diodami, lampami či jiným laserovým paprskem. [15]



Obr. 5 Znázornění principu Q-switch [15]

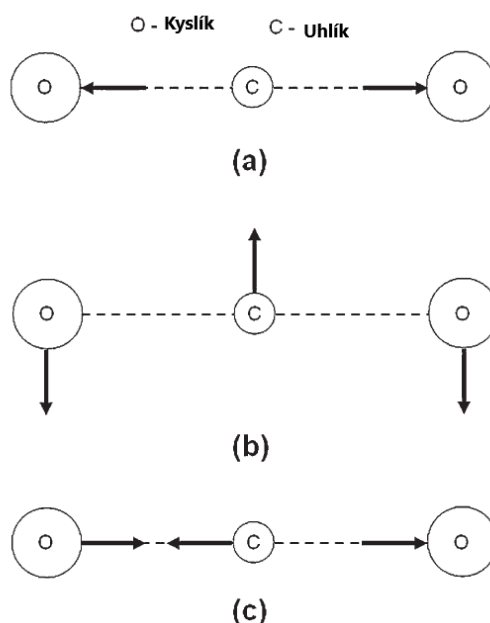


3.3.2. Plynové lasery

Dle názvu kategorie jsou sem zařazeny veškeré lasery s aktivním prostředím v plynné fázi. To přináší mnoho výhod, které s sebou toto skupenství nese. Jedna z nejvýraznějších výhod je, že plynné prostředí je homogenní, což vytváří pro laser ideální médium. Dalším pozitivem je možnost snadného přesunu a výměny či doplnění média. Plyny jsou také ve srovnání s krystaly pro pevnolátkové lasery levnější. [15] Za nevýhodu naopak může být považována velikost, jež je ve většině případů větší než pro pevnolátkové lasery. To je způsobeno vlivem všeobecné nízké hustoty plynů, a tedy nutností použít velké objemy pro vytvoření podmínek pro tvorbu laseru. [15]

Plynové lasery je možné rozdělit do tří skupin s ohledem na to, na jaké úrovni probíhají přesuny energie. Těmito skupinami jsou lasery molekulární, atomární a iontové. [15] V průmyslové praxi je nejvíce zastoupen CO_2 laser. [15]

CO_2 laser je molekulární plynový laser, kde jako aktivní médium slouží směs plynů převážně obsahující oxid uhličitý, dále pak helium či dusík. Molekula CO_2 může projít třemi formami vibrací (soulměrné natahování, ohýbání, nesoulměrné natahování). Tyto formy jsou graficky znázorněny na Obr. 6. [15] Další forma pohybu molekuly je rotace. Ovšem energetická

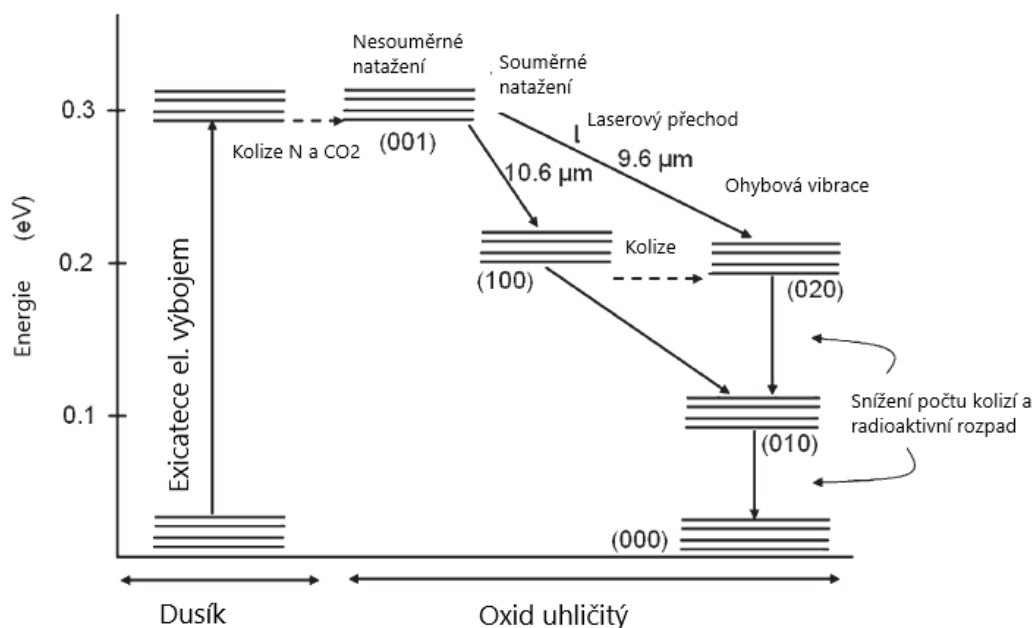


Obr. 6 Varianty pohybu CO_2 molekul a) rovnoměrné natahování, b) ohýbání, c) nesoulměrné natahování [15]

hodnota tohoto pohybu je ve srovnání s vibracemi zanedbatelná. Excitovaný stav CO_2 se odvíjí od přítomnosti jednoho kvanta energie, nebo i více kvant.



Úrovně energetické hodnoty pro jednotlivé kroky CO₂ laseru popisuje Graf 2. Prvním krokem je excitace molekul dusíku elektrickým výbojem. Chování excitovaných molekul dusíku je podobné jako u oxidu uhličitého. Vibrující molekuly dusíku předají svou kinetickou energii molekulám CO₂, vlivem čehož dojde k jejich excitaci. Tato fáze je na grafu znázorněna stavem 001. K emitaci laserového záření dochází mezi stavy na grafu popsanými čísly 001 a 100 až do konečného stavu 020. V praxi je možné setkat se s CO₂ lasery, které využívají kombinaci plynů oxidu uhličitého, dusíku a hélia. Přidáním hélia dosahujeme nárůstu vydané energie. Výrazný vliv na parametry laseru má také způsob proudění plynů ve výbojce. Nejčastěji se používají výbojky s axiálním či radiálním prouděním či jejich kombinací. CO₂ lasery mohou být jak kontinuální, tak pulzní. [15]



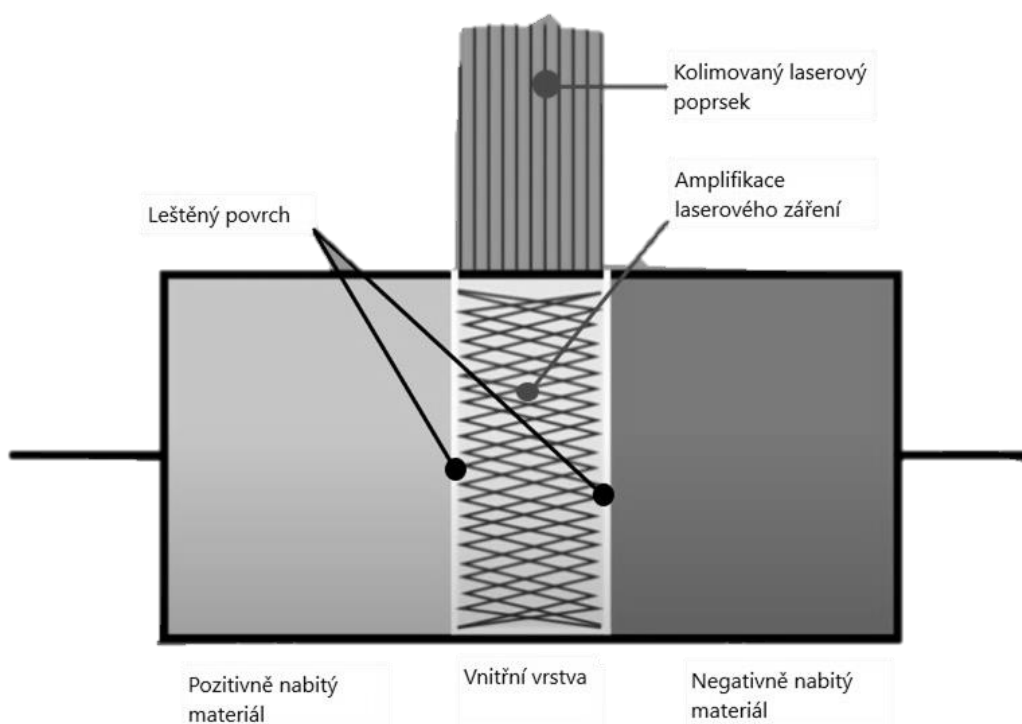
Graf 2 Znárodnění jednotlivých energetických stavů a jejich interakcí v CO₂ laserech [15]

3.3.3. Polovodičové lasery

V případě polovodičových laserů slouží jako aktivní prostředí polovodiče. Polovodič je pevná látka, která mění své vodivé vlastnosti v závislosti na vnitřních nebo vnějších podmínkách. Z definice vyplývá, že se polovodičové lasery řadí mezi lasery pevnolátkové, ovšem princip emise záření se zde odlišuje natolik, že se řadí do zvláštní skupiny. [15] [19].



Polovodičové lasery se od ostatních odlišují tím, že atomy v polovodičových krystalech jsou na sobě navrstveny tak hustě, že emise neprobíhá v energetických hladinách, nýbrž v diskretních pásech. [15] Samotný laserový paprsek je vytvářen diodou typu PIN. Jedná se o obvyklou diodu typu PN, který je rozšířena o vnitřní vrstvu, která je vložena mezi pozitivně a negativně nabitě vrstvy diody. Tato vrstva má natolik vyleštěný povrch, že zde dochází k odražení emitovaných fotonů a jejich koncentraci. Schéma PIN diody je znázorněno na Obr. 7. [19] Laserové záření, které je emitováno touto diodou je monochromatické a koherentní. Koherence v tomto případě znamená, že existuje souvislost mezi amplitudou a fází vlnění. Koherence může být buď prostorová (vlnění vycházející ze dvou různých míst na povrchu tělesa), nebo časová (vlnění vychází z jednoho místa v určitém časovém intervalu). PIN diody je možno nalézt v mnoha variacích skladu a úpravy jejich jednotlivých vrstev, u laserů se nejčastěji setkáváme s dvojitou heterostrukturou, která se skládá z vrstev AlGaAs s vnitřní vrstvou z GaAs. [20]



Obr. 7 Schéma PIN diody emitující laserový paprsek [16]



4. Možnosti ovlivnění nástrojových materiálů laserem

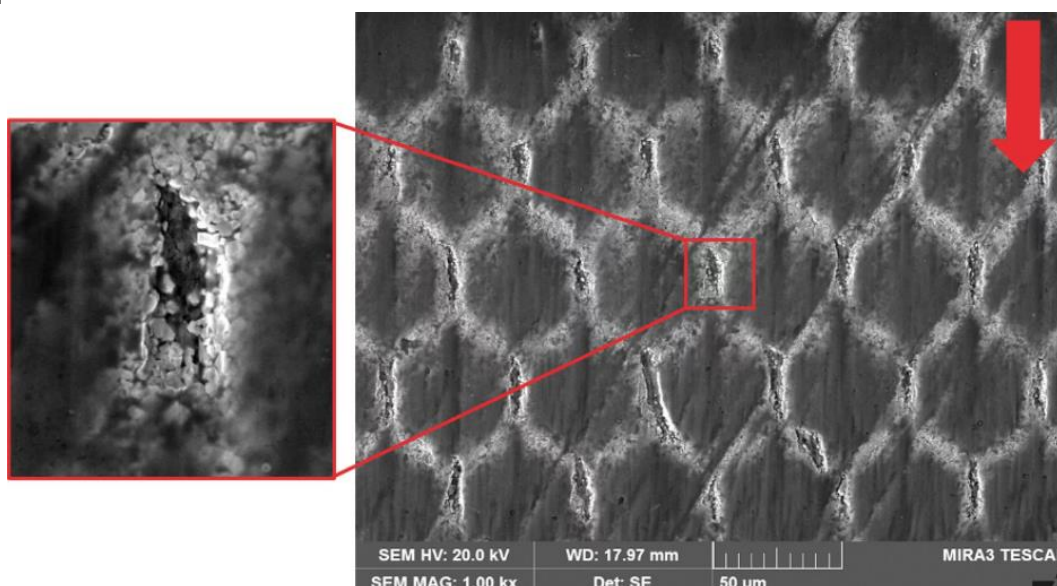
Využití laserů při modifikaci řezných nástrojů je více, má však dva hlavní směry. Jedná se o metody tepelného zpracování, kdy dochází ke změně či úpravě vnitřní struktury a chemického složení materiálu. Druhý směr využívá geometrickou úpravu povrchu laserovým obráběním. K tomuto směru se dají přiřadit například výroba mikrodrážek na povrchu bříty pro lepší odvod chladicí kapaliny či tvorba utvařeče třísek. [21]

4.1. Geometrická úprava nástrojů laserem

Tato kapitola popisuje některé druhy a způsoby geometrické úpravy nástrojů a jejich nástrojových materiálů, při nichž bylo využito laserové techniky.

4.1.1. Strukturování – úprava povrchové struktury řezných nástrojů

Odebírání materiálů při této úpravě funguje na principu studené ablace. Díky tomuto mechanismu dochází k úběru materiálu prakticky bez tepelného ovlivnění a je možno vytvářet velkou škálu různých struktur. Příklad možné struktury je uveden na obrázku Obr. 8. Tyto struktury mohou mít na základě svých tvarů a velikostí pozitivní vliv jak na lepší adhezi později nanášených povlaků, tak i na frikční vlastnosti. Změna frikčních vlastností může mít pozitivní vliv na lepší odvod materiálu a tvorbu menšího a stabilnějšího nárůstku. [21]



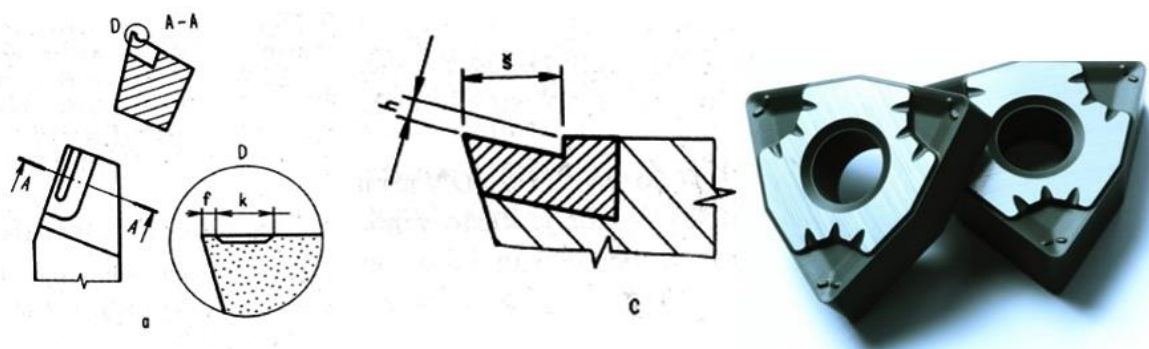
Obr. 8 Struktura na povrchu VBD omezující tvorbu nárůstku. Směr šipky znázorňuje směr odchodu třísek. [21]



I přes velké pokroky tato technologie však stále není dokonalá. Po její aplikaci sice dochází k prodloužení životnosti, nicméně v detailu na levé části obrázku je možné vidět, že stále dochází k obnažení materiálu pod strukturou. V ideálním případě by navržená struktura volená s vhodnou orientací vůči odcházejícím třískám na tyto vady náchylná nebyla. [21]

4.1.2. Tvorba utvařeče třísky

Jedná se o prvek nacházející se na čele nástroje sloužící k dobrému utváření třísky odcházející z místa řezu. Utvařeč je možné jak předlisovat či vybrousit, tak mikroobrábět laserem. Proces mikroobrábění je charakteristický krátkými laserovými pulzami s vysokým výkonem. Tyto dva parametry mají za výsledek paprsek s vysokou hustotou energie, následkem čehož dojde k odpaření materiálu. Vzhled a umístění utvařeče jsou znázorněny na Obr. 9. S mikroobráběním je možné se dále setkat například ve výrobě elektronických součástek. [22] [21] [23]

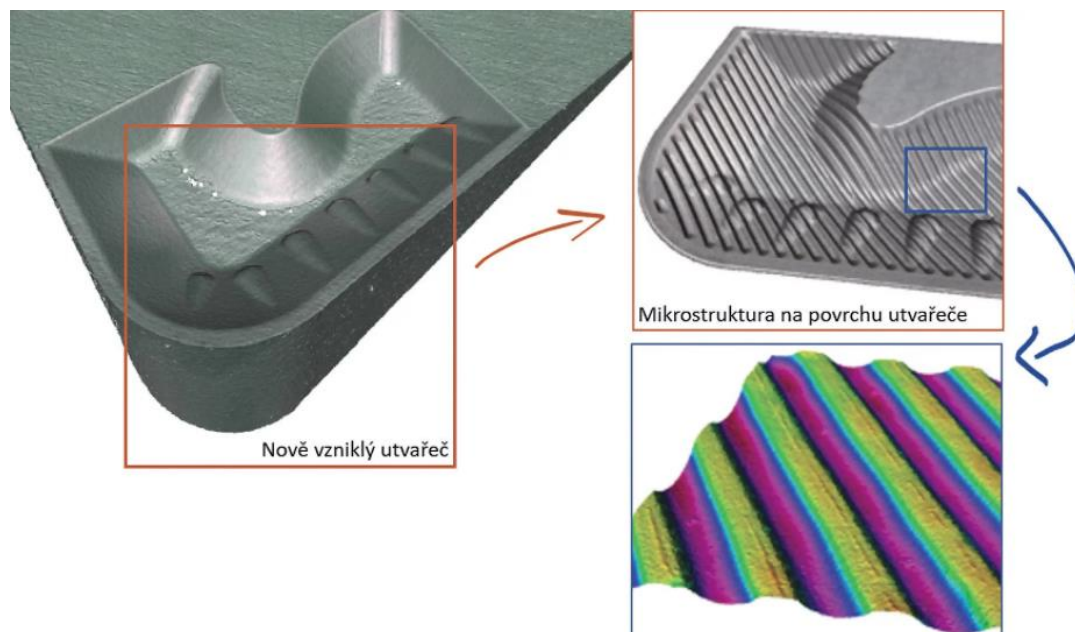


Obr. 9 Zleva žlábkový utvařeč, uprostřed stupínkový utvařeč [21], vpravo VBD z řezné keramiky s utvařečem [23]

Po tvorbě utvařeče je možné jeho povrch dále strukturovat. To má za následek vznik struktur na povrchu, které jsou blíže popsány na předchozí stránce. Tyto struktury mají kladný vliv na proudění řezné kapaliny při procesu obrábění a její lepší navádění do místa řezu.



Díky tomu dochází k menšímu tepelnému namáhání břitu a nárůstu jeho životnosti. Takto upravený utvařeč je na Obr. 10. [21]



Obr. 10 Znárodnění postupné tvorby utvařeče třisek s vlastní mikrostrukturou [21]

4.2. Tepelná úprava nástrojových materiálů

Tepelná úprava vede ke změně vnitřní struktury či úpravě chemického složení nástrojových materiálů. Takto upravené nástroje bývají charakteristické například kalenou vrstvou na povrchu při zachování houževnatého jádra.

4.2.1. Možnosti úpravy nástrojových a rychlořezných ocelí laserem

Principy popsané v kapitole 4.1. je možné aplikovat i při využití nástrojů z nástrojových ocelí. Je zde zejména možné vytvořit struktury, které zlepší adhezi povlaků na povrchu nástroje. [24]

Další možnosti úpravy nástrojových a řezných ocelí je laserové kalení. Tato metoda je nejčastěji využívána u nástrojů jako jsou formy sloužící k ostřihování plechů či jejich lisování. Příklady nástrojů jsou uvedeny na Obr. 11. [24]



Laserové kalení funguje na principu rychlého lokálního ohřevu, což vede ke změně struktury a následnému rychlému ochlazení. Vlivem rychlého ochlazení dojde k zabránění difuze uhlíku a vzniká martenzitická či bainitická struktura vysokých tvrdostí. Ochlazení u tohoto typu kalení neprobíhá pomocí lázni, nýbrž okolím ohřivaného povrchu. Díky intenzivnímu a lokalizovanému ohřevu je teplo odvedeno neovlivněným materiálem, popřípadě do okolní atmosféry. Největší výhodou tohoto procesu je lokální a dobře směřovatelný ohřev. To umožňuje zakalit pouze specifická místa na formách i na relativně tvarově složitých nástrojích. [24]



Obr. 11 Vlevo příklady střížných nástrojů, vpravo forma na lisování plechů [24]

4.2.2. Možnosti úpravy řezné keramiky

Vlastnosti řezné keramiky ji z ní činí ideální materiál pro obrábění bez použití chladicí kapaliny. Nepoužití chladicí kapaliny vede k obrábění, při kterém dochází k vysokým hodnotám tření, což má za následek velký nárůst teploty. Obrábění za těchto podmínek urychluje opotřebení.

To dělá z nástrojů z řezné keramiky ideální volbu pro tvorbu mikrostruktur na povrchu pro snížení koeficientu tření. Tvorba a princip těchto struktur jsou popsány v kapitole 4.1. [25]

Řeznou keramikou je možné za pomoci laserů i tepelně zpracovávat. Při ozařování povrchu femtosekundovým laserem a následném porovnání vlastností řezného nástroje bylo zjištěno, že i když při procesu soustružení byly naměřeny stejné řezné síly, došlo ke snížení teplot generovaných při obrábění. Bylo zjištěno, že laserové ozařování povrchu nástroje vedlo ke zlepšení trvanlivosti. [25]

4.3. Modifikace slinitých karbidů

K úpravě povrchu vyměnitelných břitových destiček se v průmyslu uchyluje za účelem prodloužení trvanlivosti či kvůli možnosti většího navýšení obráběcích parametrů. Stejně jako v případě ostatních materiálů i u slinitých karbidů existují dva druhy úprav. Prvním je



tepelné zpracování samotného karbidu, druhým je úprava povrchu pro zlepšení adheze či jiné ovlivnění povrchových vlastností. [26]

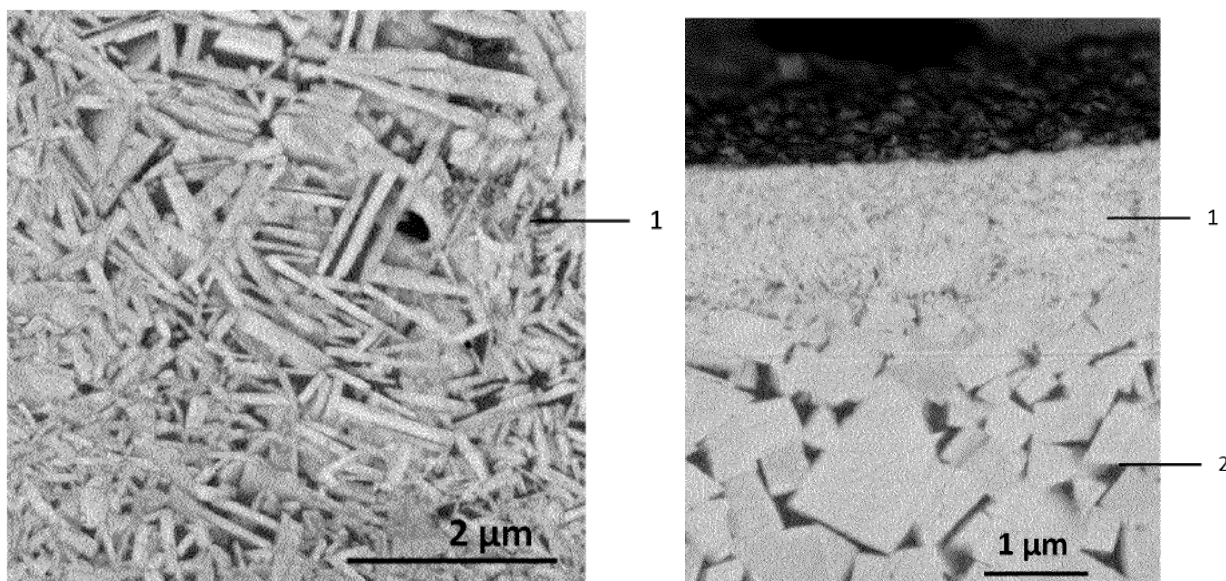
Všech výše zmíněných modifikací je možné více či méně dosáhnout pomocí laseru. Tyto úpravy budou rozebrány v následujících kapitolách.

4.3.1. Úprava velikosti zrna

Úprava velikosti zrna vychází z předpokladu, který je stejný napříč kovovými materiály, a sice, že čím jemnější zrno, tím vyšší tvrdost. S touto premisou se můžeme setkat například u jemnozrnných ocelí, kde je žíháním či řízeným válcováním dosaženo jemného zrna na povrchu polotovarů a hrubšího zrna uvnitř polotovarů. To vede k větší odolnosti proti otěru a vyšší tvrdosti na povrchu při zachování houževnatosti hrubších zrn, které se nachází pod jemnozrnnou vrstvou. [27]

Pro popsání principu u slinutých karbidů je nutné rozdělit si konkrétní VBD na dvě části. První částí je objem destičky, do které je možné zařadit veškerý materiál VBD, který nepřichází do styku s obráběným materiálem. Druhou částí je povrch destičky, kterou je možno definovat jako „obal“ těla destičky o malé tloušťce. [28]

Dle patentu WO 2017/167906 A1 je možné dosáhnout zvýšení odolnosti VBD natavením obalu destičky laserem a následným tepelným zpracováním celé VBD. Tento proces vede ke vzniku menších zrn v obalu destičky a větších zrn v těle destičky. Velikosti zrn v obalu i těle destičky se musí pohybovat v určitém rozmezí, aby bylo dosaženo zlepšení vlastností. Tato zlepšení mají vliv zejména na růst povrchové tvrdosti a celkové pevnosti VBD a s tím spojené zvýšení odolnosti proti otěru. Současně zvýšená tvrdost přináší i výhody při nanášení ochranných povlaků, jimž poskytuje pevnější základ, což vede k jejich delší životnosti při obrábění. Tloušťka přetavené vrstvy obalu destičky by v ideálním případě měla být 0,5–0,15 μm . Tato vrstva se skládá z jehlicovitých či destičkových zrn karbidu wolframu viz Obr. 12. Délka těchto zrn je označována parametrem l_g (grain length) a parametrem t_g (grain thickness). Poměr parametrů l_g/t_g by se měl v ideálním případě pohybovat v intervalu od 4 do 8. [28]



Obr. 12 Snímek vlevo zachycuje jehlicovité útvary zrn karbidu wolframu, zatímco snímek vpravo zobrazuje řez VBD, kde je možné vidět „obalovou“ část VBD označenou číslem 1 a část „těla“ označenou číslem dva. [18]

Průběh tohoto zpracování se skládá ze dvou fází, v první fázi je nutno docílit lokálního ohřevu povrchu destičky, a to na teplotu, která je stejná či vyšší než teplota tavení karbidu wolframu. To vede k natavení zrn karbidu wolframu a souběžně k odpařování pojiva z povrchové vrstvy. K odpařování dochází z důvodu nižší teploty odpařování u pojivového materiálu, než je teplota tavení SK. Současně je nutné dbát zvýšené pozornosti na překrytí paprsku laseru mezi jednotlivými přejezdy, jelikož příliš velké překrytí vede k praskání povrchu a znehodnocení VBD. K tomu dochází z důvodu příliš velkého množství vnesené energie do povrchu destičky. Čím větší je nastavení překrytí, tím větší množství tepla je do povrchu vneseno.

Výsledkem by měla být vrstva obalu, ve které se vyskytují zrna o parametru tg 20–300 nm a kde dojde ke změně poměru karbidu wolframu vůči pojivu. Tato změna by se měla pohybovat v intervalu nárůstu poměru zrn karbidu od 50 do 120 %. [28]

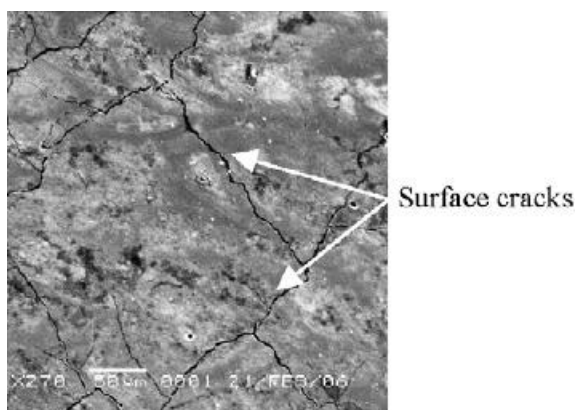
Po první fázi lokálního ohřevu jsou zrna karbidu ve stavu semi-rekrytalizace a obal destičky je oduhličený. Druhým krokem je tedy tepelné zpracování celé destičky, které vede k natavení pojiva a jeho difuze do obalové části VBD, a zároveň dochází k dokončení nukleace karbidu. Tento proces musí probíhat v neutrální či nauhličující atmosféře o tlaku 9 kPa. V nauhličující atmosféře tento proces musí probíhat z toho důvodu, že po první fázi ohřevu dojde k oduhličení. Tato fáze ohřevu trvá 50 až 70 minut, během kterých teplota při umístění vzorků do pece dosahuje 350 °C a následně dochází ke zvyšování teploty o 10 °C za minutu.



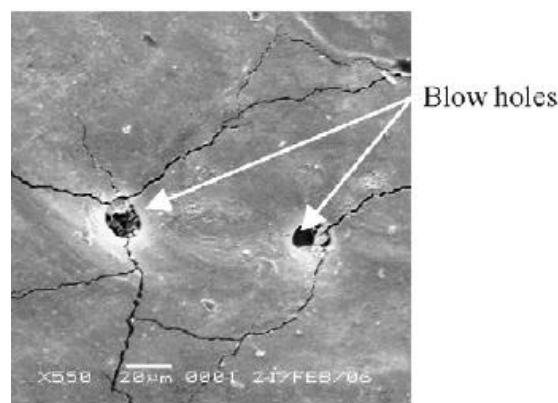
Cílová teplota musí být nižší, než je teplota tavení karbidu wolframu, zároveň však musí dosahovat teploty dostatečné, aby došlo k natavení pojiva destičky. Tato teplota se pohybuje v intervalu od 1050 °C do 1150 °C a výdrž na této teplotě je zhruba jedna hodina. [28]

4.3.2. Úprava drsnosti povrchu

V některých případech může vlivem výroby nástroje či nanášením ochranného povlaku vzniknout povrchová struktura, která nemá požadovanou drsnost. Drsnost povrchu je možné upravovat mechanicky (broušení, lapování atd.), nebo obrobit povrch laserem. Mechanické broušení je v porovnání s laserem energeticky méně náročné, avšak vzniká zde nutnost výroby brusných nástrojů, které jsou velmi drahé a často složité, protože musí kopírovat obráběný povrch. [29] Tomuto problému je možné se vyhnout při použití laserového obrábění. Ovšem i tento způsob obrábění má svá specifika. Při obrábění laserem může dojít ke vzniku vad, kterým je možné se při mechanickém obrábění vyhnout. U některých materiálů dochází vlivem použití velké energie v malém čase k praskání povrchu, což vede k podstatnému zhoršení drsnosti či znehodnocení povrchu. Tento jev je znázorněn na Obr. 14. Další problém, který laser přináší, nastává v momentě, kdy je obráběna slitina, v níž je velký rozdíl v teplotách odpařování mezi jednotlivými složkami. Vlivem natavení povrchu a následné sublimace materiálu s nižší teplotou odpařování dochází k úniku par skrz natavený materiál. To má za následek vznik pórů v povrchu. Tento jev je znázorněn na Obr. 13 a týká se například právě slinutých karbidů. [30]



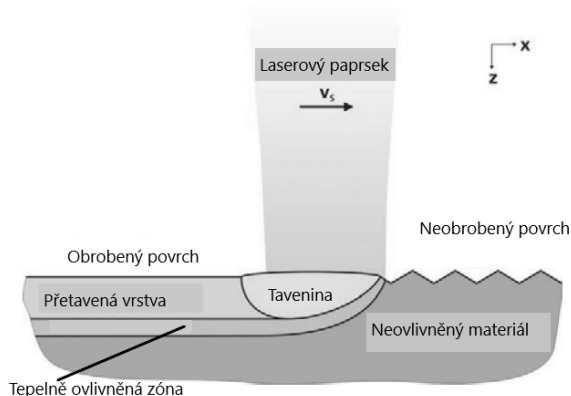
Obr. 14 Popraskaný povrch nástroje ze slinutého karbidu [30]



Obr. 13 Díry v povrchu nástroje z SK vzniklé vlivem unikajících par [30]



Princip úpravy drsnosti povrchu laserem může fungovat na několika principech. Může se jednat například o upalování vrcholů či rovnou o tvorbu celé nové plochy. Dalším z nich je tvorba tzv. přetavené vrstvy fokusovaným paprskem laseru. Tato kapalná fáze následně zatéká do nerovností povrchu a dojde tak ke snížení vrcholů nerovností. Současně však dochází k zaplnění prohlubní materiálem pocházejícím z vrcholů a vzniká jemnější povrch. Tento princip je znázorněn na obrázku 11. [29]

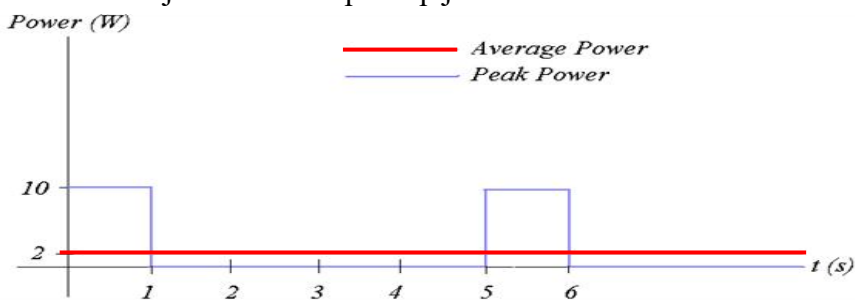


Obr. 15 Schéma principu laserového leštění v řezu [41]

4.4. Parametry při laserovém obrábění

Tato kapitola si klade za cíl uvést jednotlivé parametry, se kterými je možné se setkat při procesu laserového obrábění. Tyto parametry mají zásadní vliv na konečný vzhled a vlastnosti upraveného povrchu.

P-výkon laseru – Výkon laseru udává hodnotu energie, kterou laser vyzáří za určitý čas. Tato hodnota je udávána ve Watech. Při nastavování této hodnoty je možné se setkat s dalšími dvěma podkategoriemi, a to se špičkovou hodnotou výkonu Peak Power a průměrnou hodnotou výkonu Average Power. V případě použití kontinuálních laserů jsou tyto hodnoty velmi podobné, ne-li stejné. Ovšem v případě použití pulzního laseru se jedná o zcela jiný případ. Špičková hodnota výkonu je maximální výkon, který je laser schopen vyvinout. Hodnota průměrného výkonu, představuje množství energie vnesené za jeden pulz a pauzu, než dojde k pulzu následujícímu. Tento princip je znázorněn na Obr. 16.



Obr. 16 Grafické znázornění špičkového výkonu (Peak Power) a průměrného výkonu (Average Power). [37]



Na tomto obrázku je možné vidět, že pro pulzní laser s opakovací frekvencí 5 [s] je hodnota špičkové energie 10 [W] a hodnota průměrné energie 2 [W]. Kdybychom však měli laser s opakovací frekvencí pouze 3 [s], zůstala by špičková energie stejná, ale došlo by ke změně průměrné energie, a to na cca 3,3 [W]. Je to způsobeno tím, že mezi jednotlivými pulzy je pauza, při které nedochází k přenosu žádné energie. [31]

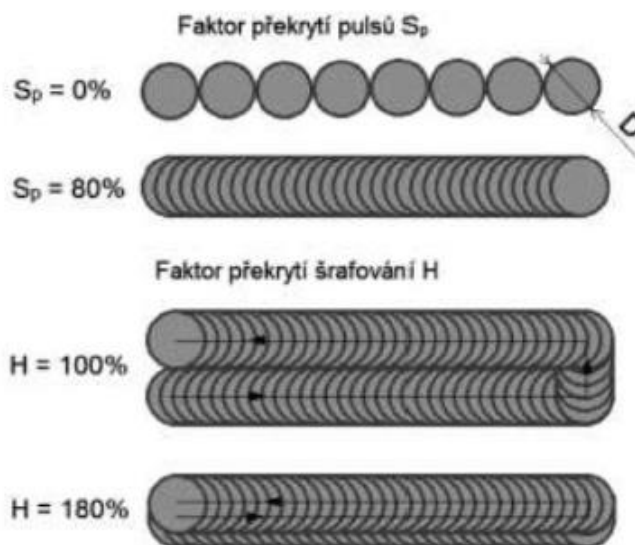
Počet přejetých vrstev – vyjadřuje počet opakování. S vyšším opakováním se zvyšuje čas obrábění, ale zase je možné nastavit laser tak, aby se nepoškozoval materiál a laserový paprsek šel do hloubky. S každým opakováním se odebere/nataví vrstva materiálu a postupuje se hlouběji. [31]

Fokusace paprsku – nastavení ostrosti laserového paprsku. Mimo zaostřovací vzdálenost dojde k rozostření, a tedy zvětšení stopy paprsku. Výkon se rozloží na větší plochu, a je zde tedy menší poškození materiálu. [31]

Skenovací strategie – nastavení skenovací rychlosti a rozteče jednotlivých šrafovů či natočení drah laseru. [31]

Frekvence – pulzní frekvence paprsku určuje počet kmitů za sekundu vyjádřenou v hertzích (Hz). Všeobecně platí, že čím je nižší frekvence pulzů, tím je vyšší energie pulzu. [31]

Overlap – jedná se o hodnotu procentuální překrytí. Tento parametr se dělá na překrytí ve směru vodorovném na osu skenování, který je označován S_p a překrytí kolmé na tuto osu, které je označováno H . Obr. 17 popisuje princip překrytí. [32]



Obr. 17 Znázornění principu parametru Překrytí [32]



5. Experimentální část diplomové práce

Cílem experimentu je zjistit ovlivnění vlastností, jak povrchových, tak mechanických, vybraného řezného materiálu laserem. Tento způsob tepelného zpracování je zkoumán zejména z důvodu možnosti lokálního ohřevu. To by mohlo vést k tvorbě tvrdé a pevné struktury na povrchu VBD a zároveň houževnatého jádra.

Experiment I

V rámci experimentu bude laserem vypáleno několik matic do vzorkového materiálu. Tento proces si klade za cíl ovlivnit strukturu materiálu, a to jak chemickou, tak metalografickou. K ovlivnění chemického složení vzorků by mělo dojít vlivem odpaření pojiva destičky. Změna metalografické struktury je předpokládána z důvodu překročení teploty překrystalisace. Překrystalisace by měla vést k zjemnění zrna. Na těchto maticích bude následně změřena drsnost. Cílem měření drsnosti povrchu je zjistit ovlivnění povrchu při specifických parametrech a případné hledání souvislostí mezi naměřenou drsností povrchu a obráběcími hodnotami. Dalším krokem bude fotografie povrchu a optická kontrola obrobených vzorků. V poslední části prvního experimentu bude vzorek podroben chemické analýze na SEM mikroskopu a současnému pozorování jeho struktury.

Experiment II

Cílem experimentu II je za pomoci hodnot získaných při experimentu I navrhnout takové parametry, které povedou k ovlivnění vnitřní struktury obráběného materiálu a současně dojde k zachování drsnosti povrchu v určitých mezích. Na těchto vzorcích bude následně měřena drsnost povrchu, povrch bude nasnímán a v poslední části experimentu bude na vzorcích měřena tvrdost dle HV 2. Právě měření hodnoty tvrdosti by mělo sloužit k získání informací o změně mechanických vlastností slinutých karbidů při tepelném zpracování laserem.



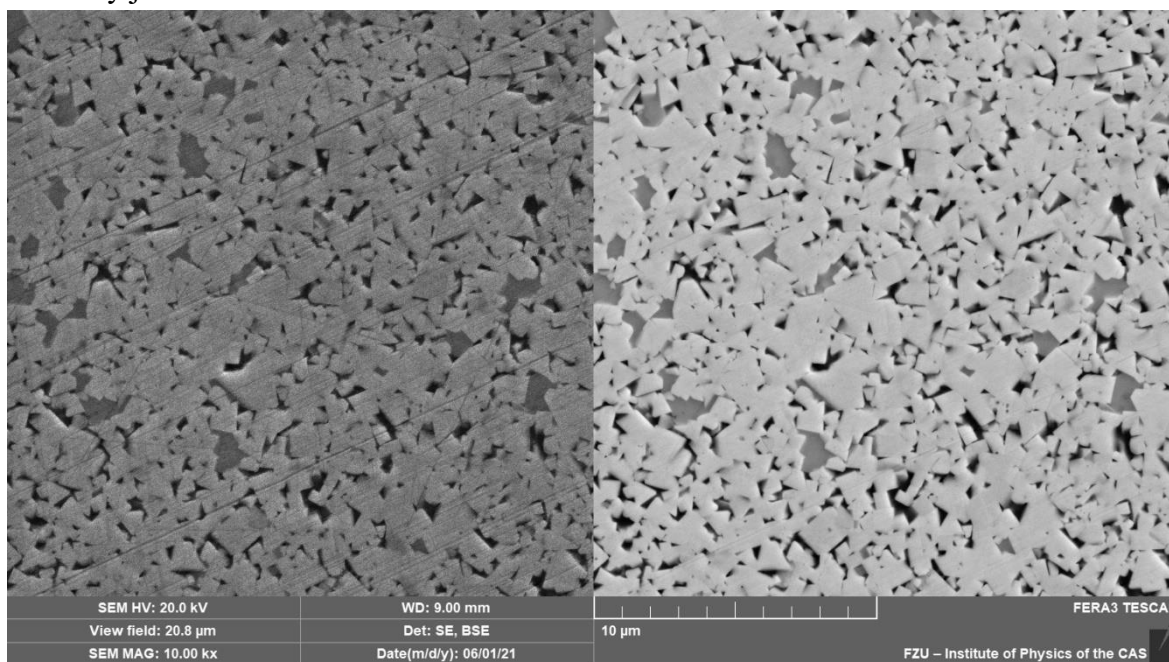
5.1. Podoba polotovaru

Jako vzorky pro experiment byly vybrány soustružnické VBD pro dokončovací obrábění od výrobce TUNGALOY CZECH S.R.O. [33] Obráběná vyměnitelná břitová destička nese označení SNGN120408 TH10. Z označení dle výrobce vyplývá, že se jedná o nepovlakovaný slinutý karbid sloužící k obrábění ocelí a železných či neželezných slitin. Materiál destičky je wolfram karbid a jako pojivo slouží kobalt. Tvar destičky včetně rozměrů je na Obr. 18. [34]



Obr. 18 VBD SNGN120408 TH10 - 6806561 [33]

Pro ověření vlastností experimentálního materiálu byl materiál zkoumán na skenovacím elektronovém mikroskopu s možností EDX analýzy. Z tohoto měření byly získány informace o podobě metalografické struktury a chemickém složení. Vzhled metalografické struktury je možné vidět na Obr. 19.



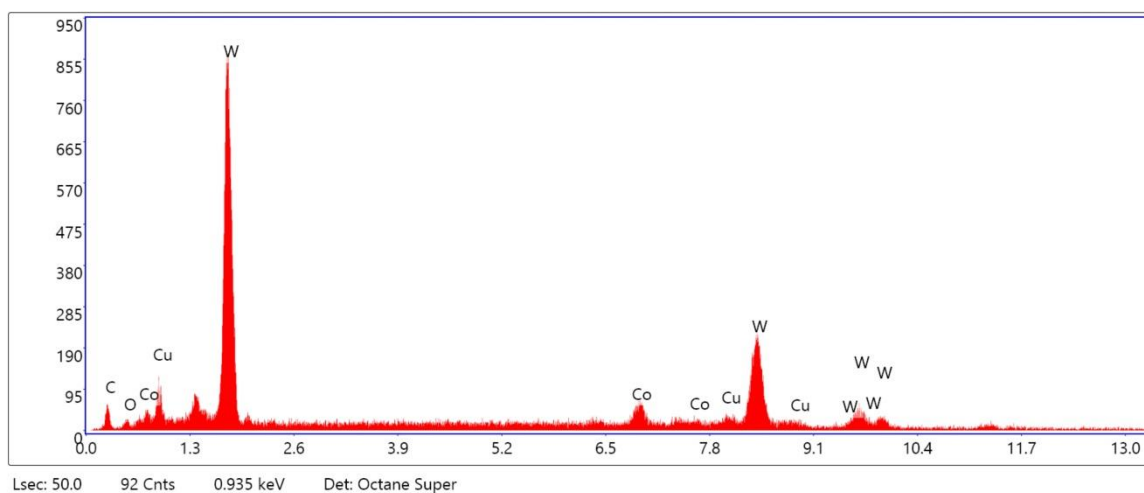
Obr. 19 Obrázek 14 Fotografie neovlivněného povrchu z SEM



Z EDX analýzy bylo získáno i přesné chemické složení. Hodnoty z tohoto měření uvádí Tab. 6. Na Obr. 20 je graficky znázorněný výskyt a poměr prvků. Tab. 6 uvádí přesné naměřené hodnoty včetně hodnoty možné procentuální odchylky.

Tab. 6 Výsledky EDX analýzy poskytující chemické složení

Prvek	Hmotnostní procento [%]	Atomové procento [%]	Procentuální odchylka [%]
Wolfram – W	77,42	21,52	9,4
Uhlík – C	15,42	65,61	13,12
Kyslík – O	2,91	9,28	20,87
Kobalt – Co	2,6	2,26	19,08
Měď – Cu	1,65	1,33	39,6



Obr. 20 Grafické znázornění výsledků EDX analýzy a chemického složení



5.2. Použité laserové zařízení

Zařízení, které bylo pro experiment použito, je pevnolátkový vláknový laser vyvinutý firmou SPI Lasers. Jedná se o zdroj laserového záření, jehož parametry jsou uvedeny v Tab. 7. Parametry nastavení jednotlivých hodnot experimentu jsou uvedeny zvlášť v následující kapitole.

Tab. 7 Hlavní technické parametry laserového zdroje

Parametr	Jednotky	Hodnota
Maximální energie pulzu	[mJ]	1,55
Maximální výkon	[kW]	10
Rozsah délky pulzu	[ns]	10–75
Rozsah frekvence	[kHz]	133–4160
Vlnová délka	[nm]	1059–1069

5.3. Parametry laserového obrábění

Parametry nastavení laseru pro první část experimentu vychází z hodnot obrábění nalezených při rešerši. Na základě získaných informací byly stanoveny hodnoty parametrů plošné hustoty a intenzity energie pulzu, v jejichž blízkém okolí by se parametry měly pohybovat. Předpoklad je takový, že v intervalu takto stanovených hodnot by mělo dojít vlivem vnesení tepelné energie do materiálu k ovlivnění struktury a chemického složení břitové destičky. V ideálním případě by mělo dojít k odpaření pojiva, které tvoří kobalt a k rekrytalizaci karbidu wolframu. Interval hustoty vnesené energie pro experiment byl stanoven na 100 až 200 mJ.

Na základě stanovených hodnot bylo však nutné provést přepočítání pro možné nastavení použitého laserového zdroje. Ten například není schopen nižší frekvence než 133 kHz. Další parametr, který se neshoduje se zdroji v rešerši, je například průměr paprsku.

Z důvodů uvedených v předchozím odstavci byl proveden přepočítání, který vychází z hodnoty energie pulzu, což je hodnota, které je možné dosáhnout i na dostupném zdroji, ovšem s jinými parametry. Přehled parametrů využitých pro výpočet je uveden v Tab. 8.



Tab. 8 Konstantní parametry experimentu

Parametr	Hodnota	Jednotky
Délka pulzu	100	[ns]
Frekvence pulzů	200 000	[Hz]
Průměr paprsku	0,03	[mm]

Pro přepočítání hodnot, které jsou uvedeny v Tab. 8, byly použity vzorce (1) a (2). Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách níže, Tab. 9 obsahuje hodnoty pro frekvenci 200 [kHz], a Tab. 10 obsahuje hodnoty pro 133 [kHz].

$$E_p = \frac{P}{f} \quad (1)$$

Vzorec 1 kde E_p – Hustota energie v pulzu [J]
 f – Frekvence [Hz]
 P – Výkon [W]

$$I_p = \frac{E_p}{S} \quad (2)$$

Vzorec 2 kde I_p – Intenzita energie pulzu [J/cm^2]
 S – Plocha paprsku [cm^2]
 E_p – Hustota energie v pulzu [J]

Tab. 9 Vypočtené hodnoty pro frekvenci 200 [kHz]

Výkon [W]	E_p [mJ]	I_p [MW/cm ³]
20	100	141,471
25	125	176,839
30	150	212,207
35	175	247,574
40	200	282,942



Tab. 10 Vypočtené hodnoty pro frekvenci 133 [kHz]

Výkon [W]	Ep [mJ]	Ip [MW/cm ³]
20	150,376	212,738
25	187,97	265,923
30	225,564	319,108
35	263,158	372,292
40	300,752	425,477

5.4. Použité zařízení pro měření drsnosti

Měření drsnosti proběhlo na zařízení InfiniteFocusG5 plus od firmy Bruker Alicona. Jedná se o skenovací mikroskop. Toto zařízení je zobrazeno na Obr. 21. Zařízení funguje na principu skenování 2D snímku povrchu v mnoha rovinách a následném složení těchto snímků do 3D modelu skenovaného povrchu. [35]



Obr. 21 Skenovací mikroskop InfiniteFocus5G od firmy Alicona [35]

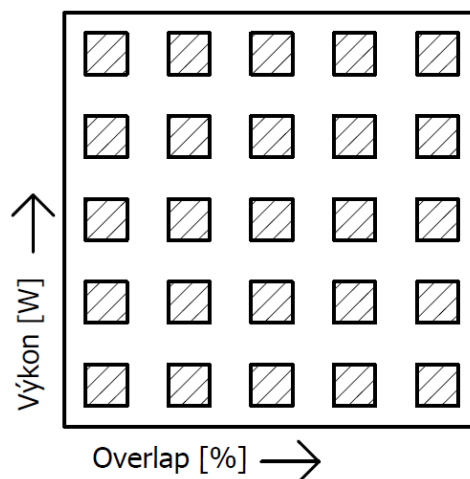
5.5. Metodika obrábění experimentu I

Metodika experimentu I spočívala ve stanovení obráběcích hodnot způsobem, který je popsán v kapitole 5.3 Parametry laserového obrábění. Následně proběhlo nastavení laserového zdroje. Na zdroji bylo nastaveno vždy vypálení matice viz Obr. 22. V experimentu I byly vypáleny celkem tři matice, které nesou označení AX-1, AX-2, AX-3. U všech matic byl ponechán stejný interval výkonu a overlapu. Jednalo se o interval výkonu od 20 do 40 [W] rostoucím po 5 [W] a overlapu v intervalu od 20 do 60 % rostoucím po 10 %. Matice se od sebe odlišují počtem přejezdů či opakovací frekvencí.



Na matici AX – 1 proběhl pouze jeden přejezd o frekvenci 200 kHz. Matice AX-2 byla obráběna dvěma po sobě následujícími přejezdy o frekvenci 200 kHz.

Matice AX – 3 byla obrobena jedním přejezdem, avšak se změnou parametru frekvence na nejnižší možnou hodnotu zdroje, a to 133 kHz.



Obr. 22 Skica uspořádání vypálené matice

Parametry obrábění vypočteny pro všechny pole matice a následně vnesenou energii na plochu pole nejsou v práci uvedeny vzhledem k velikosti tabulek. Jsou však zpracovány formou přílohy č. 2 PARAMETRY EXPERIMENTU I.

Na laserem obrobených plochách bylo následně provedeno měření drsnosti a optické pozorování povrchů, jehož součástí bylo i pořízení snímků povrchu. Na základě obou těchto faktorů byly vybrány specifické parametry, které by mohly přinést slibné výsledky v oblasti natavení a ovlivnění povrchové struktury slinutého karbidu.

Dalším krokem bylo opakování vybraných parametrů za účelem zvětšení zkoumané plochy pro možnost přípravy metalografického výbrusu. Nastavení každého vybraného vzorku bylo opakováno na ploše 1 cm². Metalografický výbrus následně umožnil pozorování těchto vzorků elektronovým mikroskopem. Cílem tohoto pozorování bylo zjištění, zda došlo k ovlivnění struktury materiálu. Pozorovaná struktura byla zkoumána hlavně s ohledem na fakt, zda došlo k přetavení, či nikoliv. Přetavená struktura by znamenala, že nutně muselo dojít k odpaření pojivového materiálu a procesu rekrystalizace slinutého karbidu.

Po provedení a vyhodnocení všech těchto experimentů a zpracování dat při nich získaných byl navržen návazný experiment II. Metodika experimentu II je popsána v kapitole 5.9 Metodika obrábění experimentu II.

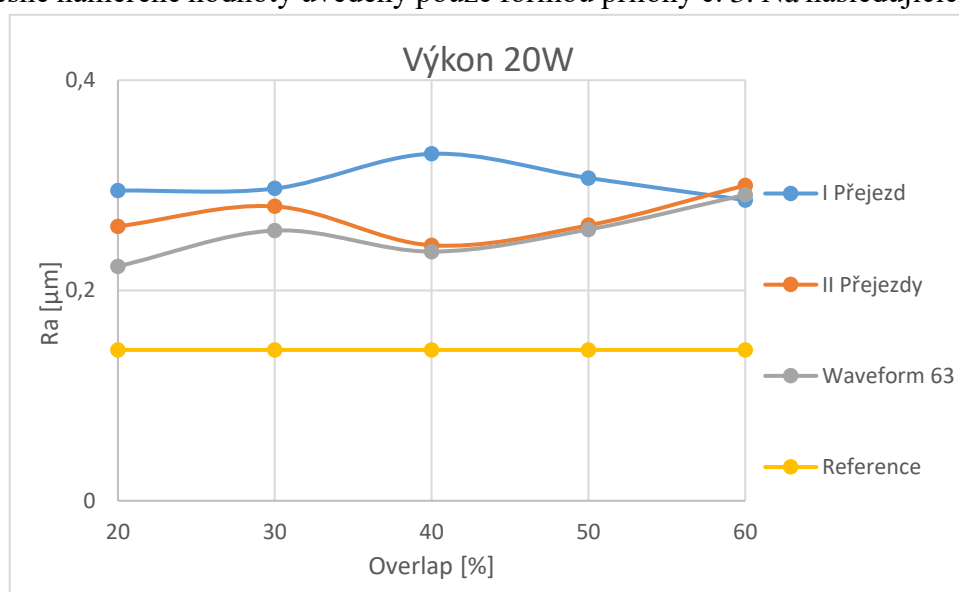


5.6. Vyhodnocení experimentu I

Následující kapitola popisuje metodiku, zařízení a získané hodnoty při vyhodnocování výsledků experimentu I.

5.6.1. Měření drsnosti pro experiment I

Hodnota drsnosti byla zjišťována ve formátu Ra a Rz. Vzhledem k množství získaných dat práce obsahuje grafické zpracování pouze parametru Ra. Veškeré naměřené hodnoty jsou dostupné formou přílohy Příloha č.3 MĚŘENÍ DRSNOSTI EXP 1. Parametr Ra označuje průměrnou aritmetickou odchylku posuzovaného profilu. [35] Vzhledem k množství dat jsou přesné naměřené hodnoty uvedeny pouze formou přílohy č. 3. Na následujících grafech

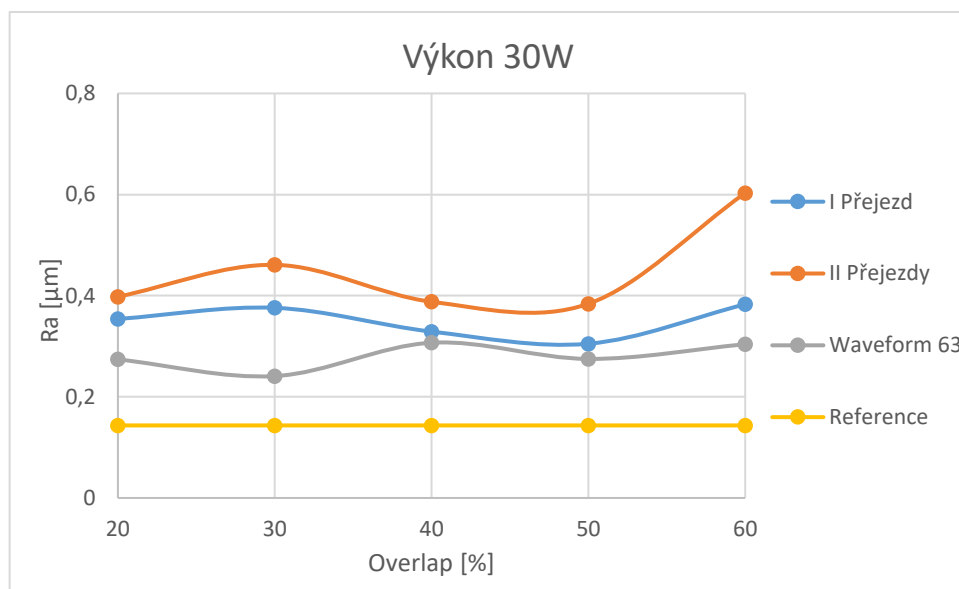


Graf 3 Grafické zpracování naměřených hodnot při výkonu 20 [W]

je znázorněno grafické zpracování hodnot. Graf 3 znázorňuje hodnoty drsnosti naměřené při výkonu 20 [W]. Z naměřených hodnot je zřejmé, že došlo k nárůstu drsnosti oproti neovlivněnému povrchu. Nejvyšší naměřené hodnoty drsností povrchu Ra 0,33 [µm] bylo dosaženo při jednom přejezdu a overlapu 40 [%]. Oproti tomu nejnižší drsnosti povrchu Ra 0,237 [µm] bylo dosaženo při frekvenci 133 [kHz] a tedy nastavení parametru Waveform 63.



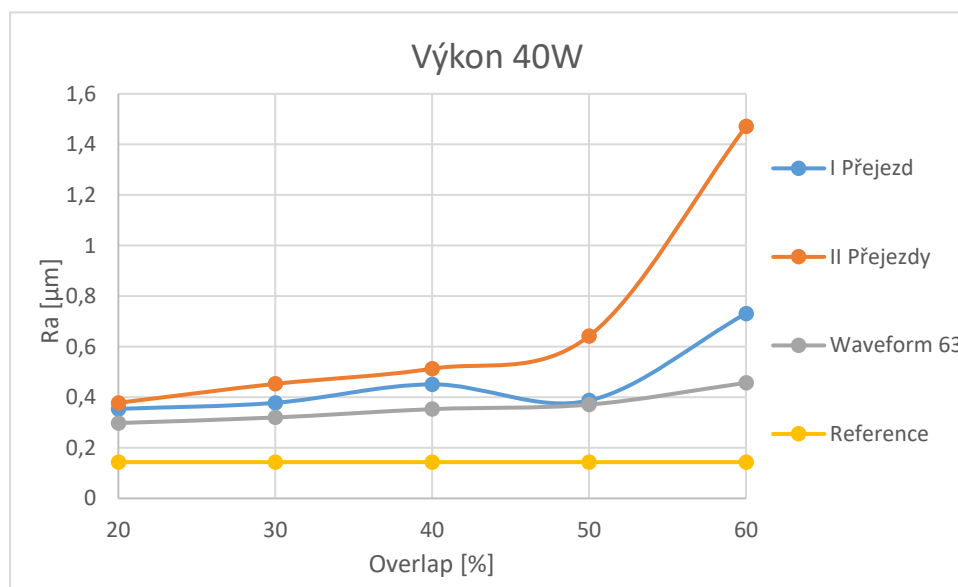
Graf 4 zobrazuje hodnoty drsnosti povrchu naměřené při výkonu 30 [W]. Při tomto výkonu se opakuje trend z měření při opracování s výkonem 20 [W], kdy došlo k nárůstu hodnoty drsnosti povrchu oproti neovlivněnému povrchu. Nejvyšší hodnoty drsnosti povrchu Ra 0,603 [μm] bylo dosaženo při overlapu 60 [%] a dvou přejezdech. Nejnižší hodnoty bylo dosaženo stejně jako v předchozím případě při parametru Waveform 63.



Graf 4 Grafické zpracování naměřených hodnot při výkonu 30 [W]

V tomto případě byla drsnost povrchu naměřena na Ra 0,241 [μm]. Ve srovnání s naměřenými hodnotami při výkonu 20 [W] došlo k celkovému nárůstu hodnot.

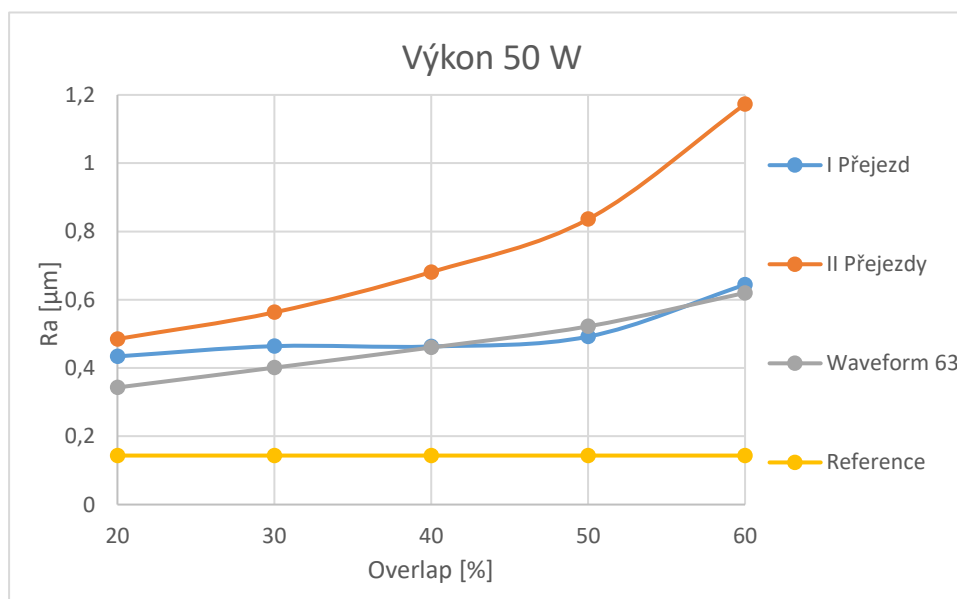
Graf 5 obsahuje hodnoty drsnosti povrchu naměřené při výkonu 40 [W]. Hodnoty drsnosti povrchu na ovlivněném povrchu jsou stejně jako v předchozích případech vyšší než



Graf 5 Grafické zpracování naměřených hodnot při výkonu 40 [W]



referenční hodnoty neovlivněného povrchu. Stejně jako v obou předchozích měřeních bylo nejvyšší drsnosti povrchu R_a 1,471 [μm] dosaženo při dvou přejezdech a overlapu 60 [%]. Nejnižší naměřené hodnoty drsnosti povrchu R_a 0,298 bylo opět dosaženo při jednom přejezdu s nastavením parametru Waveform 63. Z grafu je patrné, že k nejvýraznějšímu nárůstu drsnosti povrchu dochází od overlapu 50 [%], a to pro všechna nastavení.



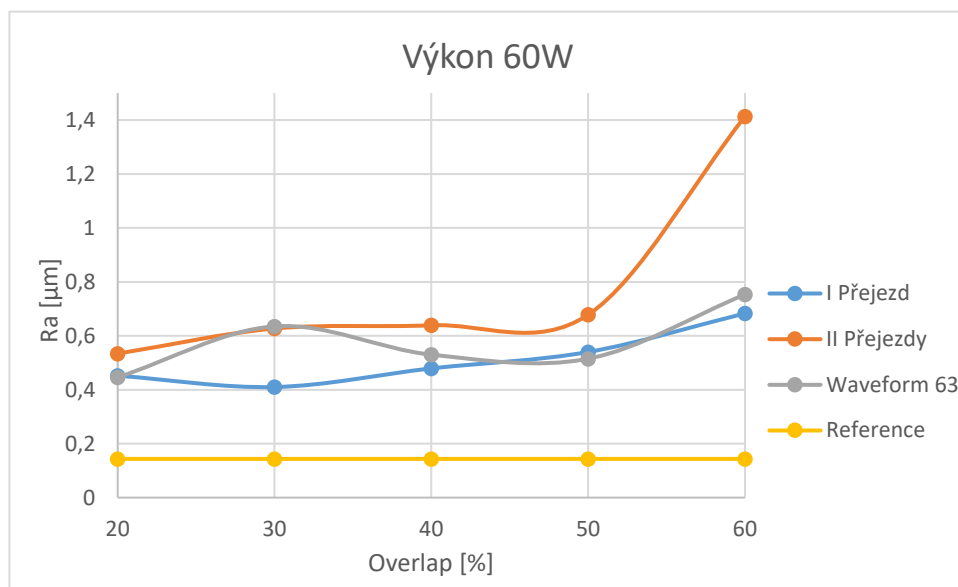
Graf 6 Grafické zpracování naměřených hodnot při výkonu 50 [W]

Graf 6 zobrazuje hodnoty naměřené při výkonu 50 [W]. Opět je zde vidět, že s rostoucím výkonem pro obrábění dochází i k nárůstu drsnosti povrchu.

Nejvyšší drsnost povrchu R_a 1,173 [μm] byla znovu naměřena při dvou přejezdech a překryvu 60 [%]. Nejnižší hodnoty R_a 0,343 [μm] bylo opět dosaženo při jednom přejezdu s nastavením parametru Waveform 63. Na grafu je možné pozorovat plynulejší nárůst hodnot než v případě obrábění při výkonu 40 [W]



Graf 7 znázorňuje naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro výkon 60 [W]. Při tomto výkonu byla nejvyšší naměřená hodnota drsnosti povrchu Ra 1,413 [μm]. Bylo jí dosaženo stejně jako v předchozích případech, mimo obrábění výkonem 20 [W], dvěma přejezdy a overlapu 60 [%]. Nejnižší hodnoty Ra 0,41 [μm] bylo oproti všem předchozím měřením dosaženo jedním přejezdem při 30 [W]. Při tomto obrábění nedošlo k výraznému nárůstu nejvyšší naměřené hodnoty, oproti tomu ale došlo k značnému nárůstu nejnižších hodnot. Veškeré naměřené hodnoty se pohybují na hranici Ra 0,4 [μm].



Graf 7 Grafické zpracování naměřených hodnot při výkonu 60 [W]

Z grafů je patrné, že nejvyšších drsností povrchu bylo dosaženo při dvou přejezdech s overlapem 60 [%], současně hodnoty rostou s rostoucím výkonem. Dále z hodnot vyplývá, že jakékoliv pro tento experiment zvolené parametry nevedly ani v jednom případě ke zlepšení kvality povrchu. Tyto informace však pouze udávají, že se nastavenými parametry nepodařilo zlepšit kvalitu povrchu z hlediska jeho drsnosti. Dalšími faktory pro postup v návazném experimentu jsou informace o vzhledu ovlivněného povrchu. Na základě vzhledu povrchu je možné odhadnout, zda došlo k přetavení povrchu, či nikoliv. Přetavení povrchu je stěžejní pro vybrání vzorků, které budou následně zpracovány do formy metalografického výbrusu a budou na nich pozorovány změny, ke kterým došlo v oblasti chemického složení a vzhledu vnitřní struktury materiálu.

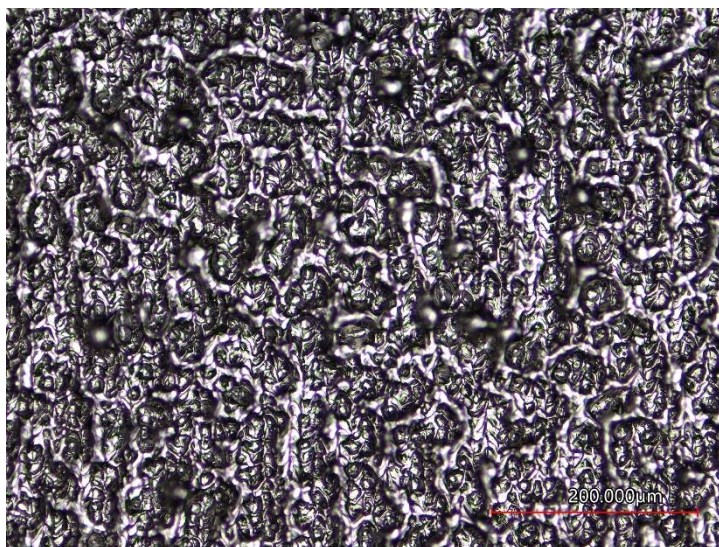


5.6.2. Snímky povrchu pro experiment I

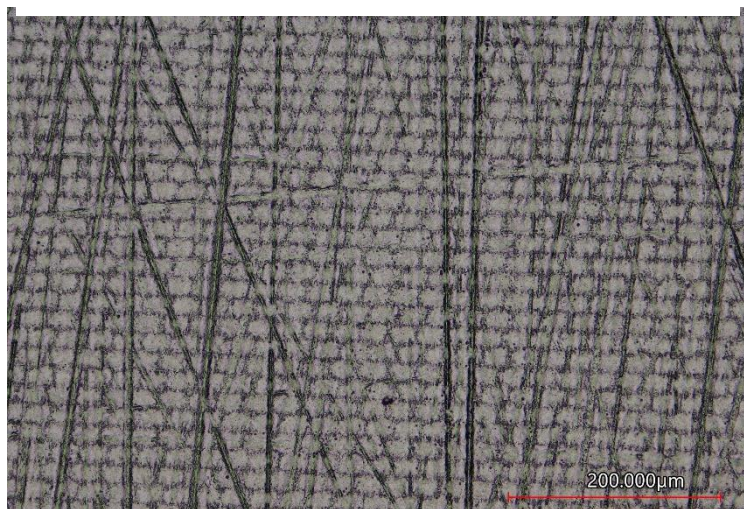
Po naskenování povrchů a zjištění jejich drsnosti byl povrch snímků fotografován za účelem optického srovnání. Cílem této části experimentu bylo vytipování vzorků, u kterých došlo k přetavení povrchové vrstvy.

Na Obr. 23 je možné vidět povrch s nejnižší drsností povrchu po obrobení. Obr. 24 naopak zobrazuje povrch s nejvyšší drsností povrchu, které bylo při experimentu I dosaženo.

Na základě naměřené drsnosti povrchu a jeho vzhledu byly vybrány ty vzorky, u kterých byl předpoklad kvalitního přetavení povrchu. Struktura, na níž je možné očekávat přetavení je zobrazena na Obr. 24. Těchto pět vybraných vzorků je zobrazeno v Tab. 11.



Obr. 24 Snímek povrchu při výkonu 30 [W], overlapu 60 [%], frekvenci 200 [kHz], dva přejezdy; Rz 9,15 [μm]

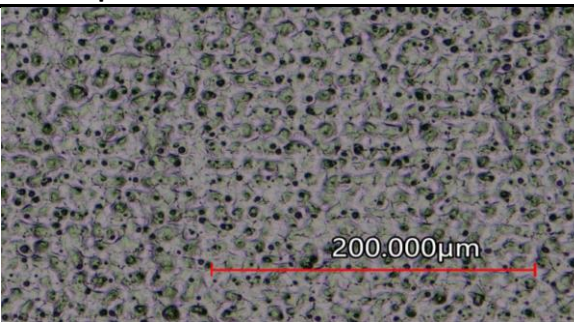
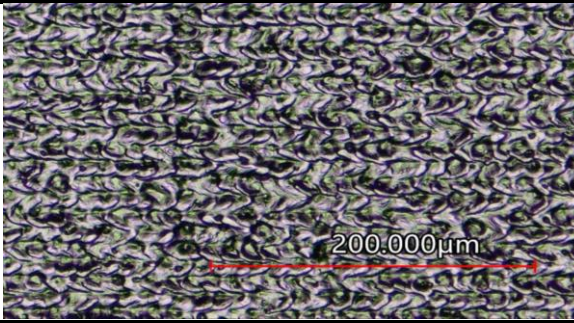
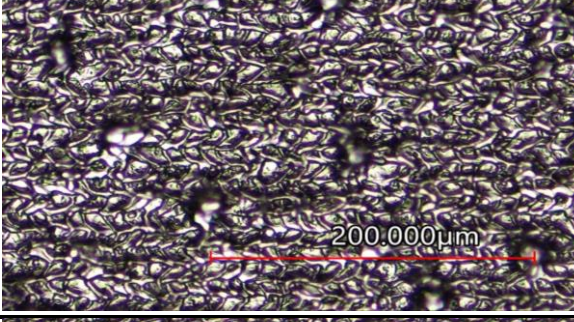
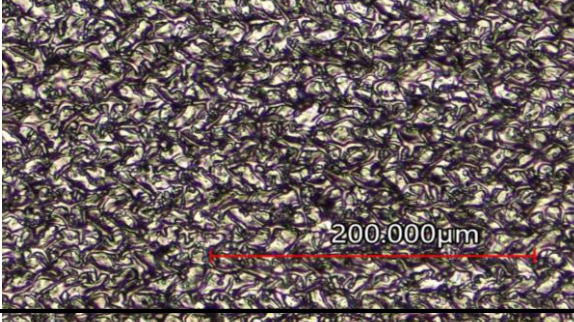
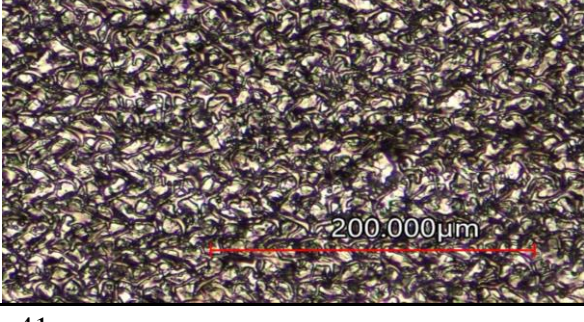


Obr. 23 Snímek povrchu při výkonu 20 [W], overlapu 40[%], frekvenci 133 [kHz], jeden přejezd; Rz 1,46 [μm]



Po porovnání drsnosti a vzhledu všech povrchů bylo vybráno pět nastavení vhodných pro přípravu vzorků na skenovací elektronový mikroskop. Tyto vzorky a jejich parametry jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11 Vybrané vzorky pro SEM

Označení	Drsnosti		Obráběcí parametry	Snímek povrchu
A5	Ra	0,29	Overlap [%] - 60 Výkon [W] - 20 Frekvence [kHz] - 200	
	Rz	1,93		
B5	Ra	0,38	Overlap [%] - 60 Výkon [W] - 25 Frekvence [kHz] - 200	
	Rz	2,6		
C5	Ra	0,73	Overlap [%] - 60 Výkon [W] - 30 Frekvence [kHz] - 200	
	Rz	5,65		
D4	Ra	0,49	Overlap [%] - 50 Výkon [W] - 35 Frekvence [kHz] - 200	
	Rz	3,04		
E4	Ra	0,54	Overlap [%] - 60 Výkon [W] - 40 Frekvence [kHz] - 200	
	Rz	4,83		



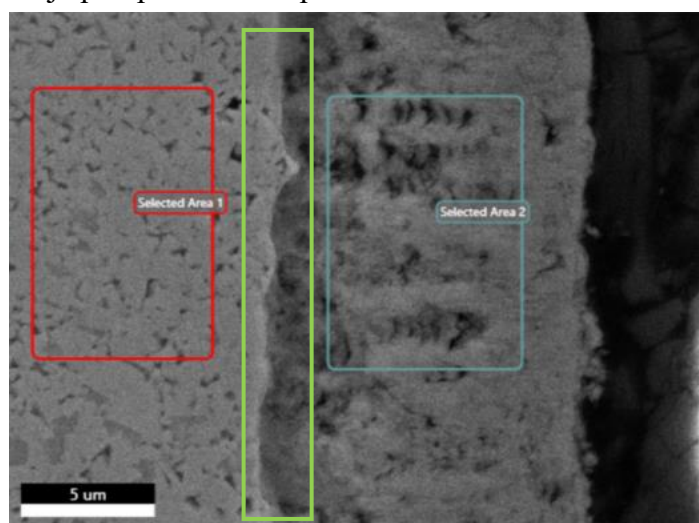
5.7. Metalografická analýza experimentu I

Vybrané vzorky byly s obdobnými parametry vypáleny do čtverců o rozměrech 10x10 mm. Tyto vzorky byly následně řezány, zapuštěny do formy a jejich zkoumaný povrch byl broušen a leštěn. Po tomto procesu proběhlo zjištění metalografické struktury na skenovacím elektronovém mikroskopu.

Veškerá data z tohoto měření jsou zpracována formou přílohy č.1. Data získaná z tohoto měření byla například chemické složení, které je uvedeno v kapitole 5.1 Podoba polotovaru. Dále bylo zjištěno složení jak tepelně ovlivněné vrstvy, tak jednotlivých struktur, které se v těle destičky vyskytují.

5.7.1. Chemické složení obráběného povrchu

Teoretický předpoklad měření byl, že by v TOO mělo dojít ke značnému, či dokonce úplnému odpaření kobaltového pojiva vzhledem k jeho nižší teplotě odpařování oproti karbidu wolframu. Ačkoliv se tento předpoklad naplnil, vyskytují se mezi naměřenými hodnotami výrazné anomálie. Například se ve struktuře objevuje značné procento mědi, které zde bylo předtím pouze stopové, avšak s velkou měrou chyby. Chemické složení VBD je popsáno v Tab. 11, která zároveň porovnává složení v neovlivněném materiálu. Na Obr. 25 je fotografie, jež označuje místa, ve kterých proběhlo měření chemické analýzy. Červený obdélník označuje tepelně neovlivněný materiál, světle modrý obdélník označuje materiál, který se nepodařilo blíže specifikovat. Tato masa je dále označována jako obalová vrstva. V zeleném obdélníku je předpokládaná tepelně ovlivněná oblast.



Obr. 25 Místa měření chemického složení SEM

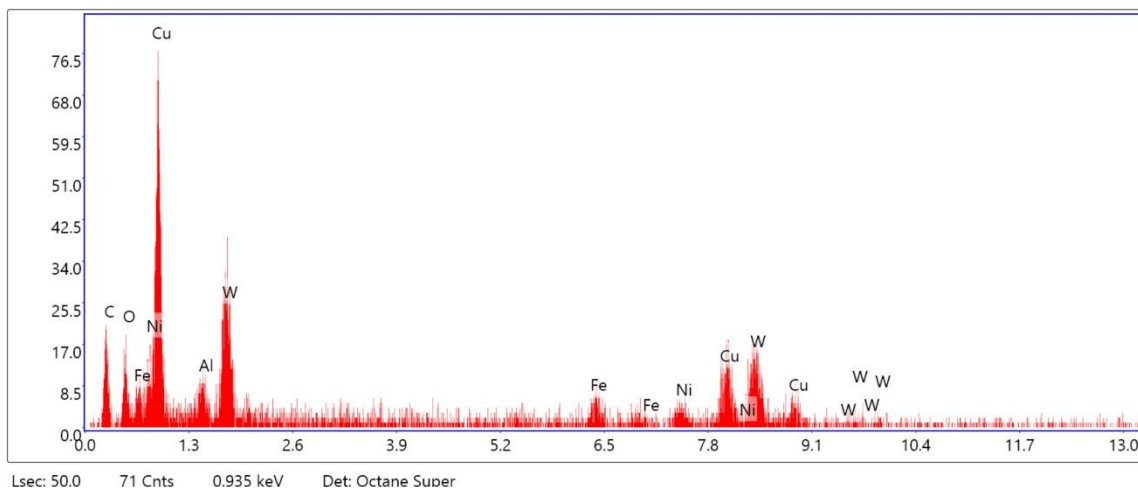


Na Obr. 26 je graficky znázorněn poměr jednotlivých prvků. Tento obrázek je výsledným protokolem chemické analýzy metody SEM. Nejvýraznější z těchto prvků je zde měď, která by se v materiálu neměla vyskytovat buď vůbec, nebo jen ve stopovém množství.

Možné vysvětlení výskytu prvků ve vzorku je difuze z okolí při procesu obrábění či detekce prvků z držáku vzorku v SEM. Dalším faktorem je velikost obalové vrstvy. Vrstva, která je na Obr. 25, je celková vrstva, ve které došlo k ovlivnění. Je tedy možné, že se do chemického složení může projevit i zalévací hmota, která je nedílnou součástí přípravy vzorku pro SEM. Vzhledem k této úvaze jsou v Tab. 12 zvýrazněny zelenou barvou prvky, jejichž hodnoty jsou dle očekávaného chemického složení relevantní pro náš experiment. Pro další výzkum by však bylo vhodné tato měření opakovat.

Tab. 12 Výsledky chemické analýzy dle SEM

Prvek	Hmotnostní procento [%]		Atomové procento [%]		Procentuální odchylka [%]	
	Neovlivněný materiál	Obalová vrstva	Neovlivněný materiál	Obalová vrstva	Neovlivněný materiál	Obalová vrstva
Wolfram – W	77,42	41,97	21,52	6,28	9,4	23,69
Uhlík – C	15,42	28,96	65,61	66,29	13,12	15,55
Kyslík – O	2,91	10,88	9,28	18,7	20,87	20,36
Kobalt – Co	2,6	0	2,26	0	19,08	-
Měď – Cu	1,65	11,51	1,33	4,98	39,6	13,11
Hliník – Al	0	0,99	0	1,01	-	50,87
Železo – Fe	0	3,1	0	1,53	0	27,34
Nikl – Ni	0	2,59	0	1,21	0	35,15

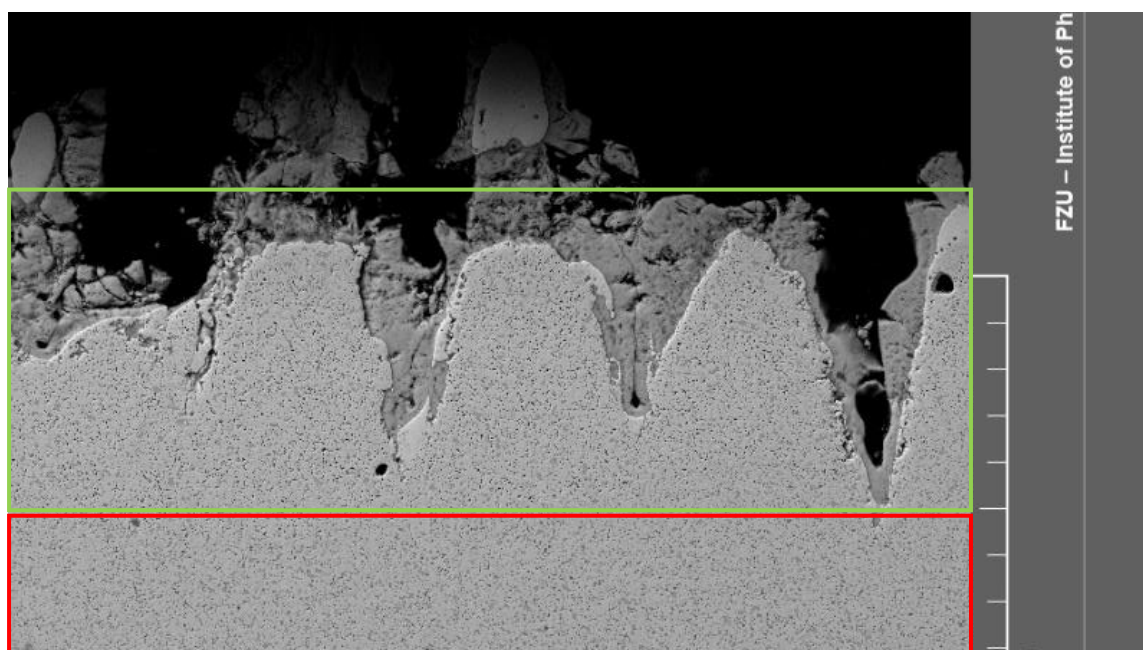


Lsec: 50.0 71 Cnts 0.935 keV Det: Octane Super

Obr. 26 Grafické znázornění poměrů prvků dle SEM

5.7.2. Analýza tepelně ovlivněné oblasti

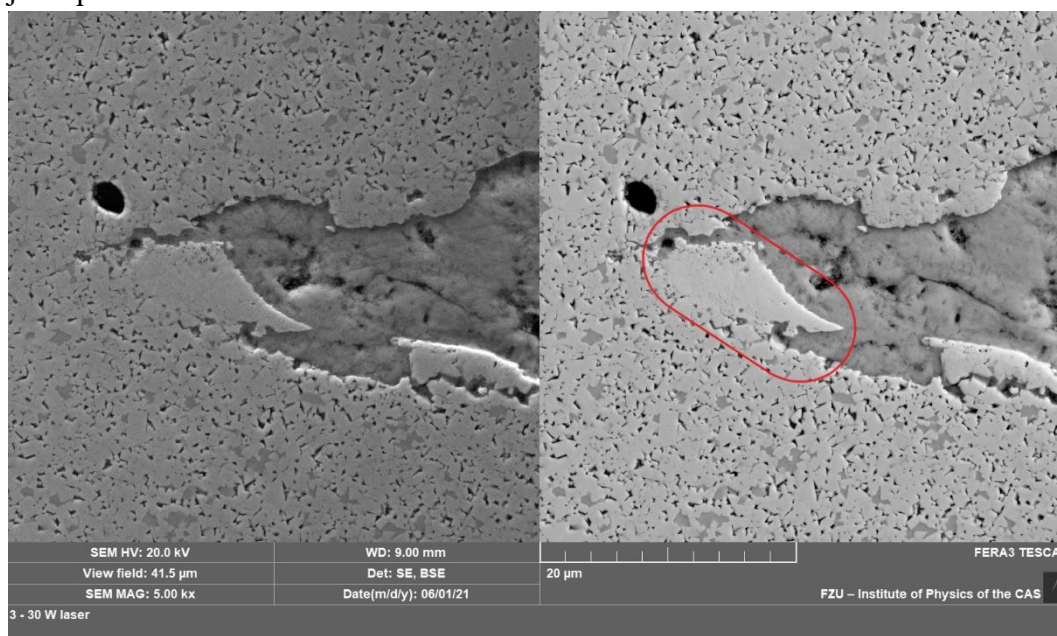
V předešlé kapitole byla zkoumána celá obalová vrstva. Tato kapitola se zaměřuje na zkoumání přetavené oblasti, a tedy tepelně ovlivněné zóny. V teoretické části práce je tento princip rozváděn. Jedná se o natavení struktury, čímž dojde k odpaření pojivového materiálu a rekrystalizaci slinutých karbidů. Při experimentu obráběcí parametry způsobily značně viditelnou změnu na povrchu vzorků, viz kapitola 5.6.2., a výraznou změnu drsnosti popsanou v kapitole 5.6.1. Ovšem snímky pořízené při pozorování vzorků SEM ukazují, že tepelně ovlivněná vrstva není rovnoměrná, a na většině vzorků není materiál přetaven vůbec. Celou ovlivněnou plochu je možné vidět na Obr. 27. Červený obdélník obsahuje tepelně neovlivněný materiál. V oblasti zeleného obdélníku je možné pozorovat ovlivněný povrch.



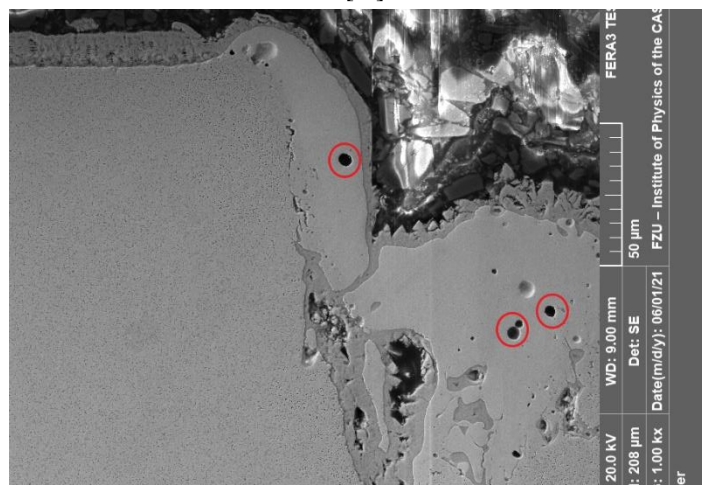
Obr. 27 Snímek SEM části ovlivněné struktury při jednom přejezdu, výkonu 20 [W], frekvenci 200 [kHz];
overlapy 60 [%]



Jednotlivé oblasti nashromážděného přetaveného materiálu jsou zvětšeny na Obr. 28 a Obr. 29. Na Obr. 28 je možno jasně vidět shluk přetaveného materiálu, který je zvýrazněný červeným obtáhem. Z obrázku je také možné pozorovat povrch, na kterém buď přetavená vrstva materiálu není vůbec, či je velmi tenká. Obr. 29 zobrazuje další snímek přetavené hmoty. Na tomto obrázku je možné pozorovat póry (kapsle plynu) zachycené v přetavované struktuře a zvýrazněny červenými kruhy. Tento jev je u nástrojů silně nežádoucí a v budoucím výzkumu by mu měla být věnována pozornost. Dalším nežádoucím jevem jsou samotné prohlubně. Přítomnost těchto prohlubní pravděpodobně způsobil velký tepelný rozdíl. Dá se očekávat, že kvůli jejich přítomnosti dojde ke značnému snížení trvanlivosti nástroje vlivem nárůstu náchylnosti k šíření křehkého lomu vlivem koncentrace napětí v jejich špičkách.



Obr. 28 Přetavená struktura při jednom přejezdu, výkonu 20 [W], frekvenci 200 [kHz]; overlapu 60 [%]

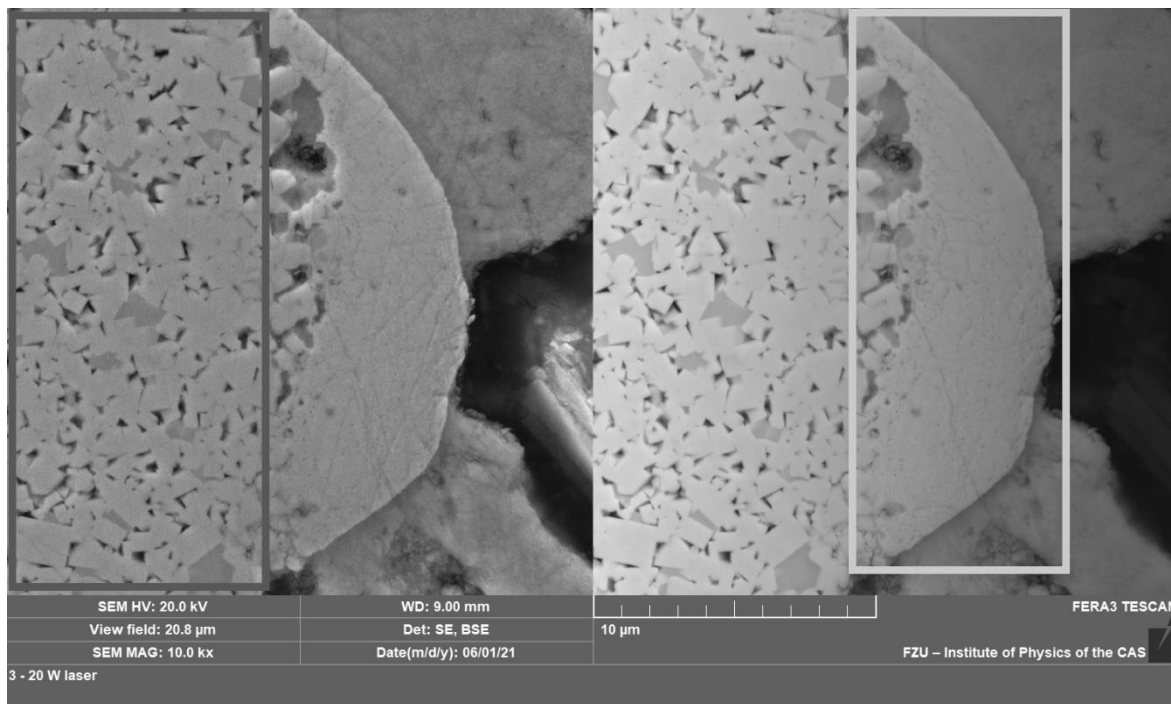


Obr. 29 Přetavená struktura při jednom přejezdu, výkonu 40 [W], frekvenci 200 [kHz]; overlapu 60 [%]



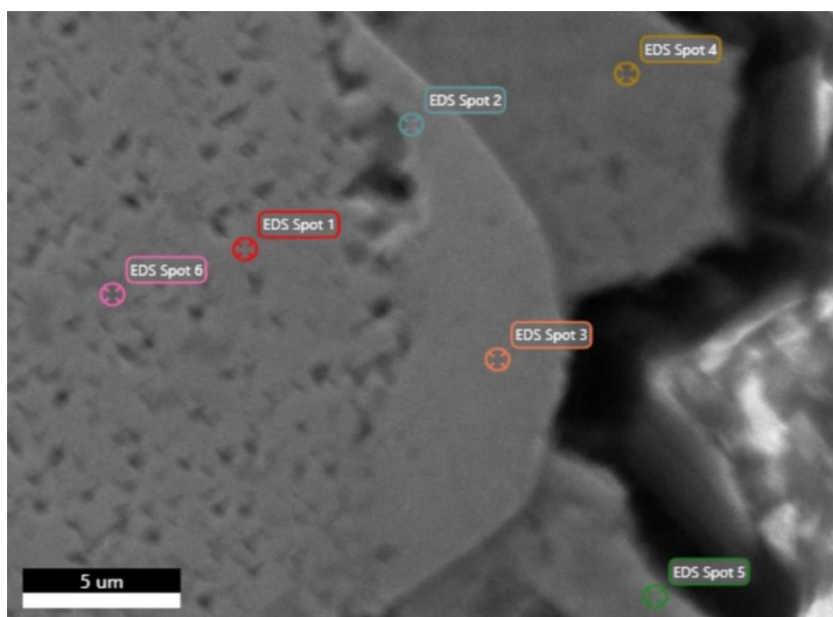
5.7.3. Chemická analýza přetaveného materiálu

Na obrázku Obr. 30 je možné vidět přetavenou strukturu. Struktura označená tmavě šedivým obdélníkem je původní, zatímco struktura označená světle šedivým rámečkem je struktura přetavená.



Obr. 30 Částečně přetavená struktura při jednom přejezdu výkonu 20 [W]; overlapu 60 [%]; frekvenci 200 [kHz]

Obr. 31 je snímek přiblížené přetavené struktury, která je zachycena na Obr. 30. Jednotlivé body označují místa, na kterých byla provedena EDS bodová analýza.



Obr. 31 Body EDS analýzy



Pro zjištění informací o chemickém složení přetavené zóny byla provedena chemická analýza jednotlivých bodů na snímku. Celý protokol této analýzy je zpracován formou přílohy č. 1. Tab. 12 obsahuje chemické složení dle SEM analýzy, toto chemické složení platí pro bod označený EDS spot 3 na Obr. 31 Body EDS analýzy.

Tab. 13 Výsledky SEM chemické analýzy přetavené vrstvy

Prvek	Podíl hmotnosti [%]	Podíl atomárního objemu [%]	Hodnota případné odchylky při měření [%]
Uhlík – C	25,58	59,31	14,68
Kyslík – O	9,21	16,03	16,65
Hliník – Al	5	5,168	13,35
Železo – Fe	1,1	0,55	41,41
Wolfram – W	24,24	3,67	21,82

5.8. Závěr experimentu I

V rámci experimentu I byly laserem obráběny vzorky při různých parametrech. Následně byla na vzorcích změřena drsnost povrchu a pořízeny snímky povrchu. V poslední fázi experimentu byla provedena chemická analýza vzorku. Ze zjištěných parametrů vyplývá, že došlo k nežádoucímu nárůstu hodnot drsnosti povrchu, což je v praxi, konkrétně při procesu obrábění, nepřijatelné. Fotografie povrchu udávají informaci o vzhledu a případném potvrzení ovlivnění materiálu, či případném vyloučení popraskaných vzorků. Chemická analýza byla provedena z důvodu zjištění samotného složení zkoušeného materiálu a její stěžejní výsledek je částečné potvrzení teoretického předpokladu snížení podílu wolframu v povrchové vrstvě struktury.

Celkově však z provedeného experimentu vyplývá, že povrchová vrstva není přetavena rovnoměrně a k přetavení došlo pouze na specifických místech. To směřuje k nedostatečnému vnesení energie do povrchu vzorku.

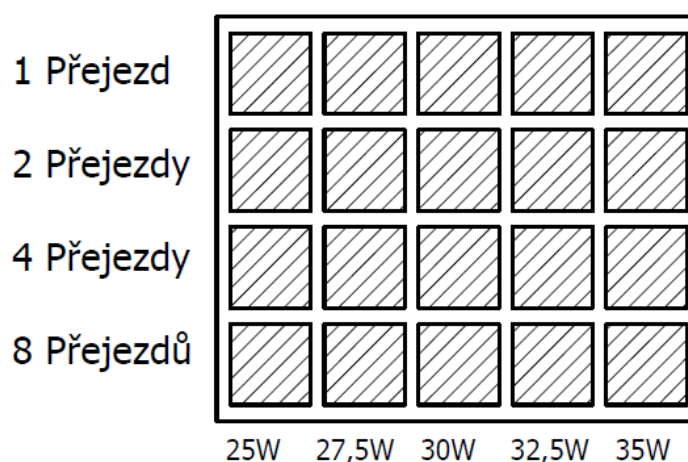


5.9. Metodika obrábění experimentu II

Jak uvádí kapitola 5.8., v rámci experimentu byl zjištěn značný nárůst drsnosti povrchu a nerovnoměrné rozmístění přetaveného materiálu na povrchu. Experiment II si klade za cíl vnesení většího množství energie do povrchu za účelem tvorby přetavené vrstvy, který by pokrývala celý povrch vzorku při minimalizaci nárůstu drsnosti. Pro vnesení většího množství energie byla zvolena kombinace menšího výkonu s větším množstvím přejezdů a větším overlapem. Větší počet přejezdů zaručí větší množství vnesené energie a díky menšímu výkonu a většímu overlapu její pozvolnější rozprostření.

Další částí experimentu je ověření mechanických vlastností povrchové struktury po obrobení laserem.

Prvním krokem experimentu II bylo vypálení celkem dvou matic. Matice jedna byla vypalována s hodnotou overlap 50 % a matice dva byla vypálena při nastavení overlap 80 [%]. Rozprostření vzorků je znázorněno na Obr. 32 . Ve vodorovném sloupci byly vzorky vypalovány s rostoucím výkonem v intervalu od 25 [W] do 35 [W]. Na horizontálním sloupci byly vzorky vypalovány s rostoucím počtem přejezdů, a sice 1; 2; 4; 8.



Obr. 32 Schéma matice pro experiment II



Parametry nastavení a na jejich základě přepočtené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 14. Po vypálení matic bude změřena povrchová drsnost a následně pořízeny snímky obrobené plochy. Po vyhodnocení a zpracování těchto dat budou vzorky podrobeny zkoušce tvrdosti za účelem zjištění změny mechanických vlastností na ovlivněném a neovlivněném povrchu.

Tab. 14 Přepočtené teoretické parametry pro experiment II

Výkon [W]	Teoretické hodnoty	
	Ep [mJ]	Ip [MW/cm ³]
25	125	265,9
27,5	137,5	292,5
30	150	319,1
32,5	162,5	345,7
35	175	372,3

5.10. Vyhodnocení experimentu II

Následující kapitola popisuje principy, zařízení a postupy, které byly využity pro vyhodnocení experimentu II.

5.10.1. Měření drsnosti pro experiment II

Měření drsnosti povrchu proběhlo stejným způsobem jako v případě experimentu I. Veškerá zařízení a metodika měření je popsána v kapitole 5.6.1. V rámci tohoto experimentu byly měřeny hodnoty Ra a Rz. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 15 a Tab. 16.

Tab. 15 Naměřené hodnoty drsnosti pro experiment II s overlapem 50%

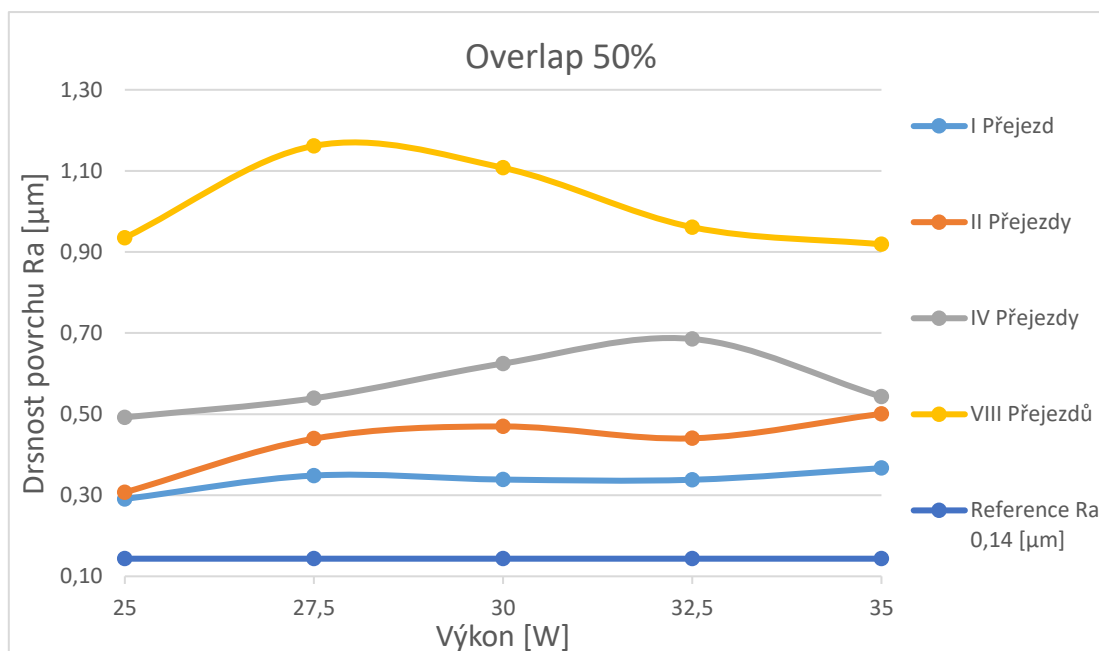
P. přejezdů	Overlap 50%									
	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
1	2,03	0,29	2,43	0,35	2,36	0,34	2,35	0,34	2,55	0,37
2	2,14	0,31	3,06	0,44	3,27	0,47	3,07	0,44	3,49	0,50
4	3,43	0,49	3,75	0,54	4,35	0,62	4,77	0,69	3,78	0,54
8	6,51	0,94	8,09	1,16	7,71	1,11	6,69	0,96	6,40	0,92
Výkon	25		27,5		30		32,5		35	



Tab. 16 Naměřené hodnoty drsnosti pro experiment II s overlapem 80%

P. přejezdů	Overlap 80%									
	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
1	6,98	1,00	9,41	1,35	11,26	1,62	12,75	1,83	13,31	1,91
2	13,44	1,93	20,98	3,01	17,23	2,48	16,25	2,34	18,15	2,61
4	33,55	4,82	44,05	6,33	40,10	5,76	27,74	3,99	26,59	3,82
8	53,35	7,67	67,76	9,74	68,66	9,87	59,31	8,52	57,27	8,23
Výkon [W]	25		27,5		30		32,5		35	

Graf 8 zobrazuje graficky zpracované výsledky měření drsnosti pro overlap 50 %. Z grafu vyplývá, že s každým nárůstem přejezdů dochází ke zvýšení drsnosti povrchu. Dále je z grafu možné vyčíst, že hodnoty drsnosti jsou srovnatelné s předchozím experimentem, i přes větší množství vnesené energie. Díky snížení a rozptřeni výkonu nedochází oproti předchozím případům ke skokovému nárůstu energie s rostoucím výkonem.

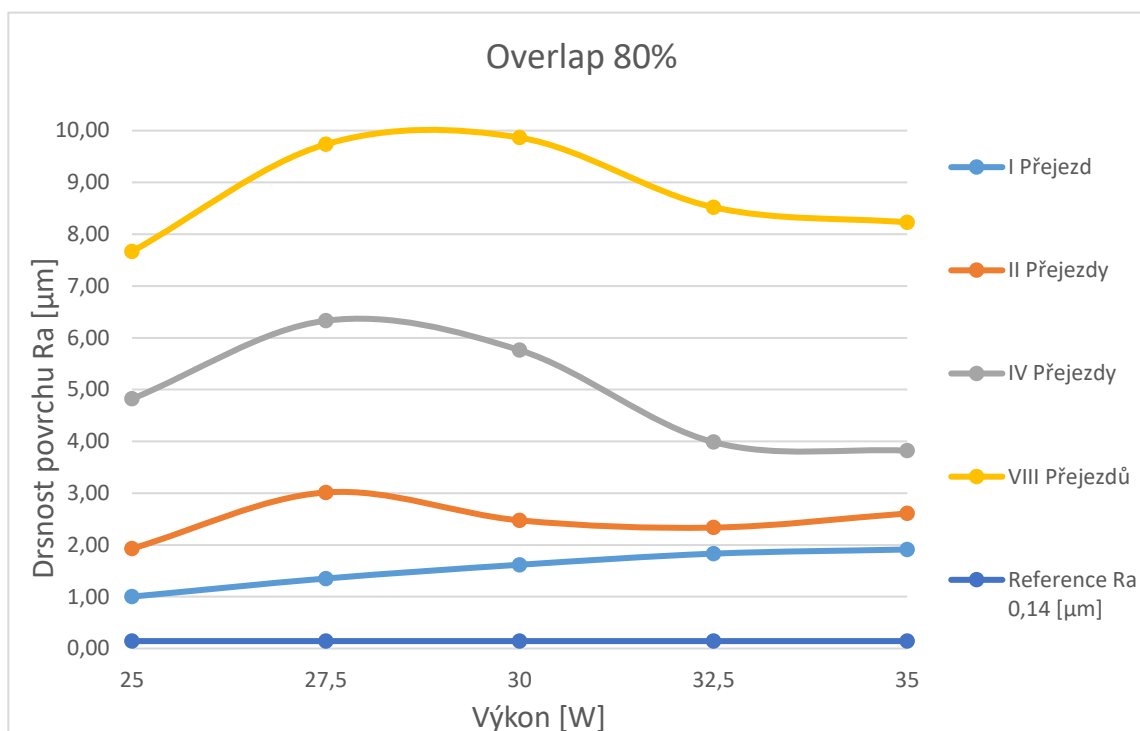


Graf 8 Grafické zpracování hodnot drsnosti povrchu při overlapu 50 [%] pro experiment II

Největší drsnost Ra 1,16 [μm] byla zaznamenána při výkonu 27,5 [W] a osmi přejezdech. Oproti tomu nejnižší hodnota Ra 0,31 [μm] byla naměřena při dvou přejezdech a 25 [W].



Graf 9 zobrazuje zpracování hodnot pro vzorek s 80[%] overlapem. Dle naměřených hodnot je povrch tohoto vzorku z větší části zhodnocen. V některých případech byly naměřeny až 68násobky referenční drsnosti. Z tohoto vzorku vyplývá, že 80% překryv v kombinaci s těmito výkony a počty přejezdů je pro úpravu povrchu řezných nástrojů nevhodný. Nejvyšší naměřená drsnost povrchu Ra 9,87 [μm] byla stejně jako v předchozím případě naměřena při výkonu 27,5 [W] a osmi přejezdech.



Graf 9 Grafické zpracování hodnot drsnosti povrchu při overlapu 80 [%] pro experiment II

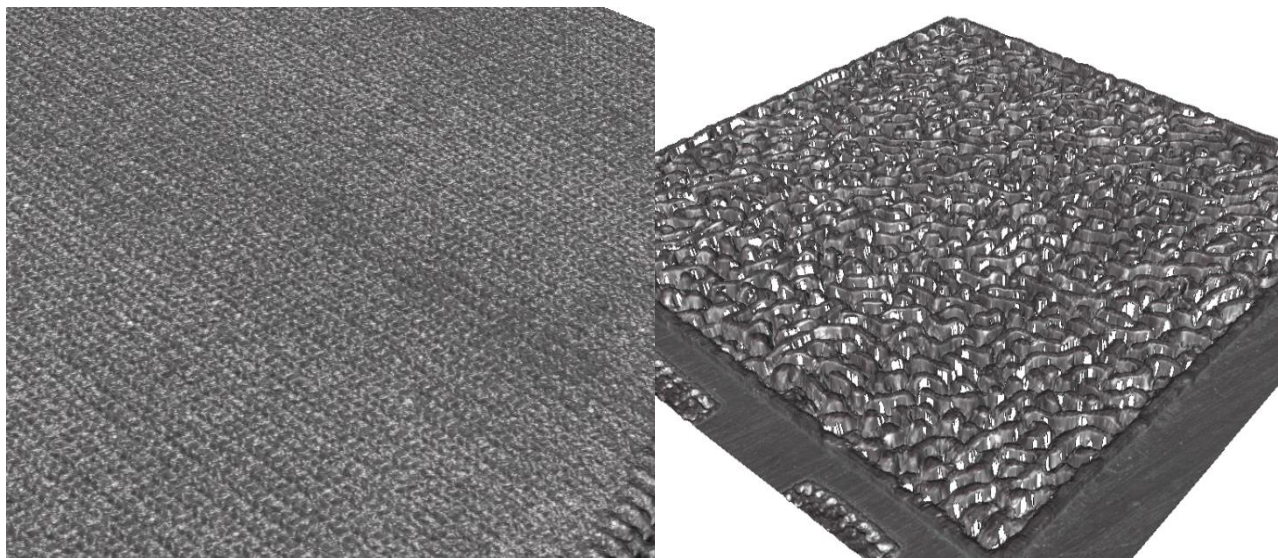
Nejnižší naměřená Ra 1 [μm] drsnost povrchu byla naměřena při stejných parametrech jako u minulého měření. I přes znehodnocení vzorku však nedochází ke skokovým nárůstům hodnoty tvrdosti. To může znamenat, že i přes příliš velké množství vnesené energie byla tato energie rovnoměrně rozprostřena po celém vzorku.

5.10.2. Snímky povrchu pro experiment II

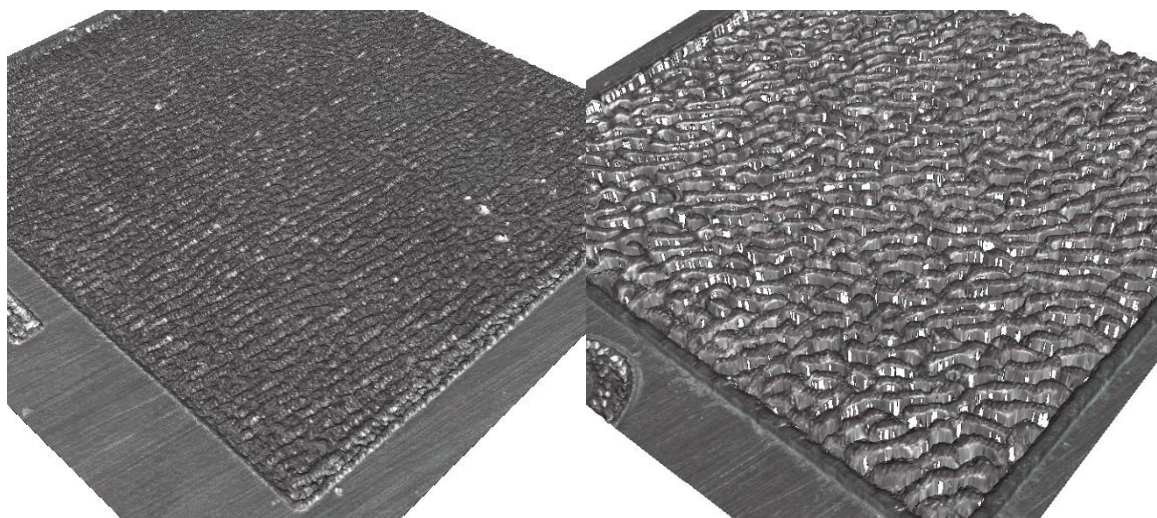
Povrchy všech vzorků byly naskenovány pro zjištění vzhledu povrchu. Tyto snímky včetně parametrů pro dané drsnosti povrchů je možné vidět v Tab. 17. Ta obsahuje nejslibnější vzorky jak z hlediska drsnosti, tak z hlediska optické kontroly, jedná se však pouze o vzorky s 50% overlapem, a to z důvodu příliš vysoké drsnosti při 80% overlapu. Na Obr. 33 je možné vidět nejlepší a nejhorší dosaženou drsnost povrchu pro 50% overlap.



Obr. 34 zachycuje vzorek s nejnižší a nejvyšší dosaženou drsností povrchu při 80[%] overlapu. Z obrázků 25 a 26 je možné vyvodit, že došlo k ovlivnění povrchu. Nicméně jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, drsnosti povrchu na matici s 80% overlapem jsou příliš vysoké. Tento vzorek byl tedy z pokračování experimentu vyloučen.



Obr. 33 Vlevo povrch s drsností $R_a 0,291 \text{ } [\mu\text{m}]$ při výkonu 25 [W] a overlapu 50 [%] s jedním přejezdem
Vpravo povrch s drsností $R_a 1,161 \text{ } [\mu\text{m}]$ při výkonu 27,5 [W] a overlapu 50 [%] s osmi přejezdy

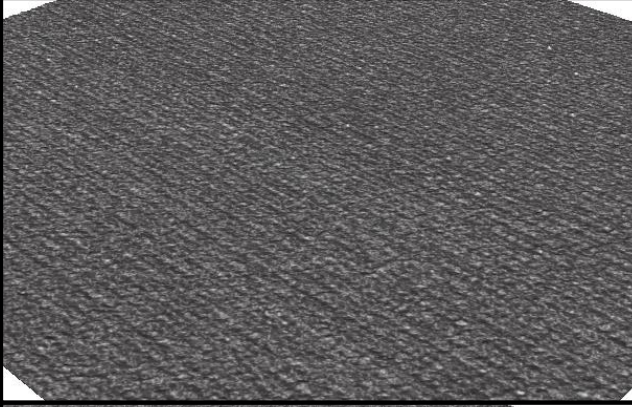
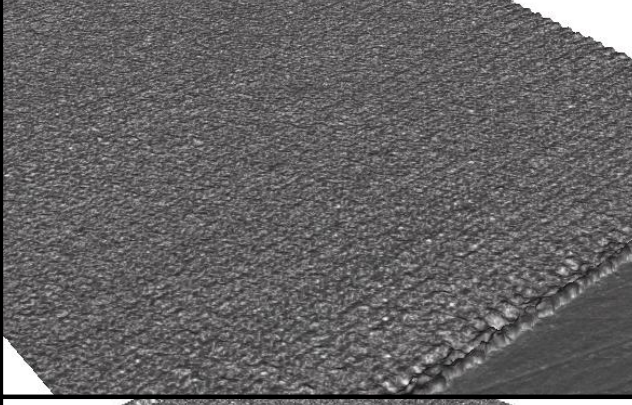
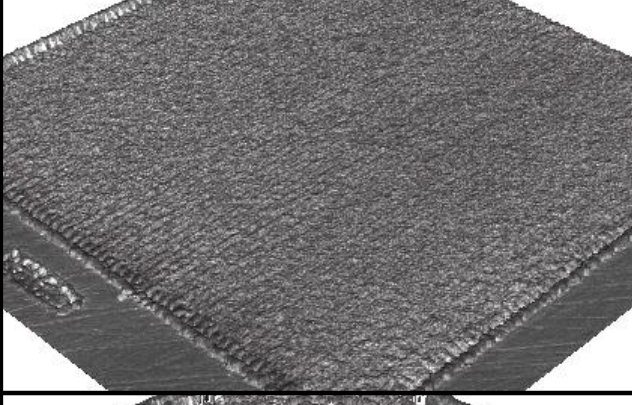
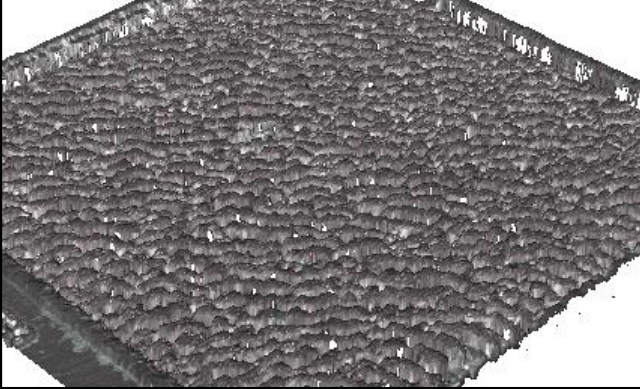


Obr. 34 Vlevo povrch s drsností $R_a 1 \text{ } [\mu\text{m}]$ při výkonu 25 [W] a overlapu 80 [%] s jedním přejezdem
Vpravo povrch s drsností $R_a 9,871 \text{ } [\mu\text{m}]$ při výkonu 30 [W] a overlapu 80 [%] s osmi přejezdy

Tab. 17 zmiňována na počátku kapitoly zobrazuje povrchy nejslibněji vypadajících vzorků. Tyto vzorky byly vybrány na základě vzhledu a drsnosti povrchu. Za snímků je patrné, že došlo k výraznému ovlivnění povrchu vzorků. Stejně jako v případě experimentu I je tato drsnost povrchu pro řezné nástroje ve většině případů nevhodná.



Tab. 17 Tabulka vybraných vzorků z matice s overlapem 50 %

Drsnost povrchu [μm]		Obráběcí parametry	Snímek povrchu
Rz	2,553	Overlap [%] - 50 Výkon [W] - 35 Frekvence [kHz] - 200 Přejezdy [-] - 1	
Ra	0,37		
Rz	3,065	Overlap [%] - 50 Výkon [W] - 32,5 Frekvence [kHz] - 200 Přejezdy [-] - 2	
Ra	0,44		
Rz	3,78	Overlap [%] - 50 Výkon [W] - 35 Frekvence [kHz] - 200 Přejezdy [-] - 4	
Ra	0,54		
Rz	6,395	Overlap [%] - 50 Výkon [W] - 35 Frekvence [kHz] - 200 Přejezdy [-] - 8	
Ra	0,92		



5.11. Metodika zjištění mechanických vlastností pro experiment II

Pro zjištění mechanických vlastností ovlivněného povrchu matice obráběné v experimentu II byla aplikována zkouška tvrdosti HV2.

Tvrdoost obecně je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. [36] V případě zkoušky HV2 je tímto tělesem indentor ve tvaru čtyrbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136°. Tento indentor je vlačován silou 19,6 N do zkoušeného povrchu po dobu 10 s. Po této době a následném odejmutí indentoru jsou za pomoci mikroskopu měřeny úhlopříčky vtisku. Délka úhlopříček je následně dosazena do Vzorec 3, který hodnotu tvrdosti uvede na stupnici tvrdosti dle Vickerse. Princip zkoušky je schematicky znázorněn na Obr. 35. [37]

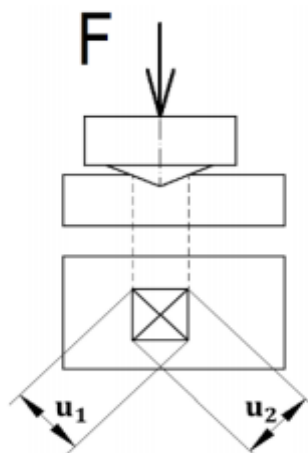
$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (3)$$

Vzorec 3 Vzorec pro výpočet hodnoty tvrdosti dle Vickerse, kde
F – zatěžující síla [N]; u – střední hodnota úhlopříček [mm] [37]

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (4)$$

Vzorec 4 Vzorec pro výpočet střední hodnoty uhlopříček, kde
u₁ – Uhlopříčka jedna viz Obr. 35
u₂ – Uhlopříčka dva viz Obr. 35 [37]

Zkouška tvrdosti byla využita pouze na vzorky obráběny s 50% overlapem. K tomu bylo nutno přistoupit z důvodu příliš vysoké drsnosti povrchu na vzorcích s 80% overlapem. Příliš vysoká drsnost druhé matice způsobila, že jednotlivé vtisky nebylo možné provést na dostatečně rovném povrchu. To mělo za následek nečitelnost délky měřených úhlopříček, a tudíž nemožnost vyhodnocení parametru tvrdosti. [37]



Obr. 35 Schéma principu zkoušky tvrdosti dle Vickerse [33]



Jako první krok měření byla provedena kalibrace tvrdoměru. Ta byla provedena za pomoci etalonu, naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 18. Samotné měření proběhlo provedením vždy tří vtisků v každé obrobené oblasti a následné statistické zpracování těchto hodnot.

Tab. 18 Naměřené hodnoty pro ověření kalibrace tvrdoměru

Tvrdość etalonu	Naměřená tvrdość	Odchylka [%]
754 HV1	780 HV1	3,45

Tab. 19 obsahuje naměřené hodnoty referenčního neovlivněného povrchu. Tato hodnota byla stanovena na základě tří vtisků. Pro ty byla následně stanovena střední hodnota a dle kalibrace dopočítána možná odchylka.

Tab. 19 Hodnota tvrdości HV2 neovlivněného povrchu

Střední hodnota HV2	Směrodatná odchylka HV2	Odchylka tvrdoměru HV2
1741	14,73	+60,1

5.11.1. Zjištění tvrdości pro experiment II

Veškeré naměřené hodnoty jsou zpracovány v Tab. 20, zde jsou uvedené zpracované hodnoty tvrdości HV2 včetně vypočtené směrodatné odchylky. Jak již bylo zmíněno dříve jedná se o hodnoty pro matici s 50% overlapem, na overlapu 80 % nebylo možné měření uskutečnit.

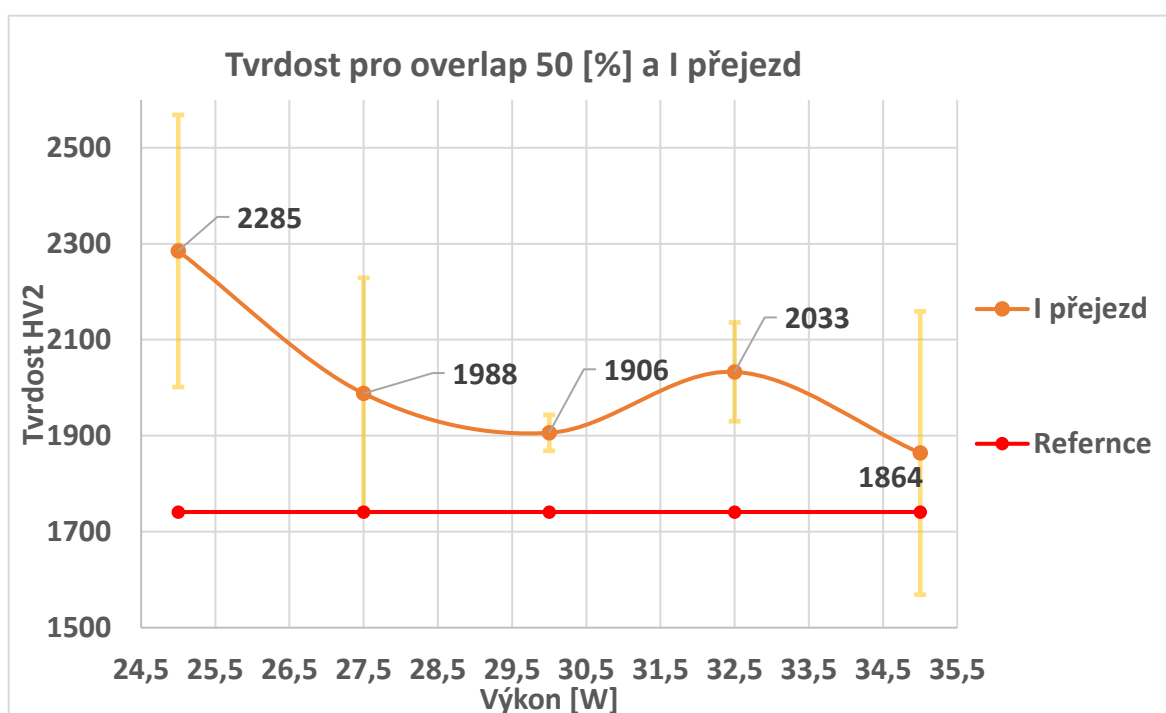
Tab. 20 Naměřené hodnoty tvrdości

Počet přejezdů	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
I	2285	283,60	1988	240,90	1906	37,37
II	2227	112,11	2578	127,09	2317	189,14
IV	2140	291,90	2191	208,30	2157	125,37
VIII	4332	1662,90	2582	188,64	2609	998,33
Výkon	25 W		27,5 W		30 W	
Počet přejezdů	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka		
I	2033	102,99	1864	295,27		
II	2089	118,18	2799	93,22		
IV	2357	168,65	2059	133,49		
VIII	1994	111,96	1692	53,54		
Výkon	32,5 W		35 W			



Na následujících grafech jsou zobrazeny hodnoty tvrdosti v poměru k tvrdosti neovlivněného materiálu. Z tohoto zobrazení je zřejmé, že došlo k nárůstu hodnoty tvrdosti. Je však potřeba vzít v potaz i vysokou hodnotu směrodatné odchylky, která se u většiny měření pohybuje nad hodnotou 100. I přes vysokou hodnotu odchylky je zřejmé, že došlo k nárůstu tvrdosti, která v některých případech značně převyšuje původní tvrdost neovlivněného povrchu.

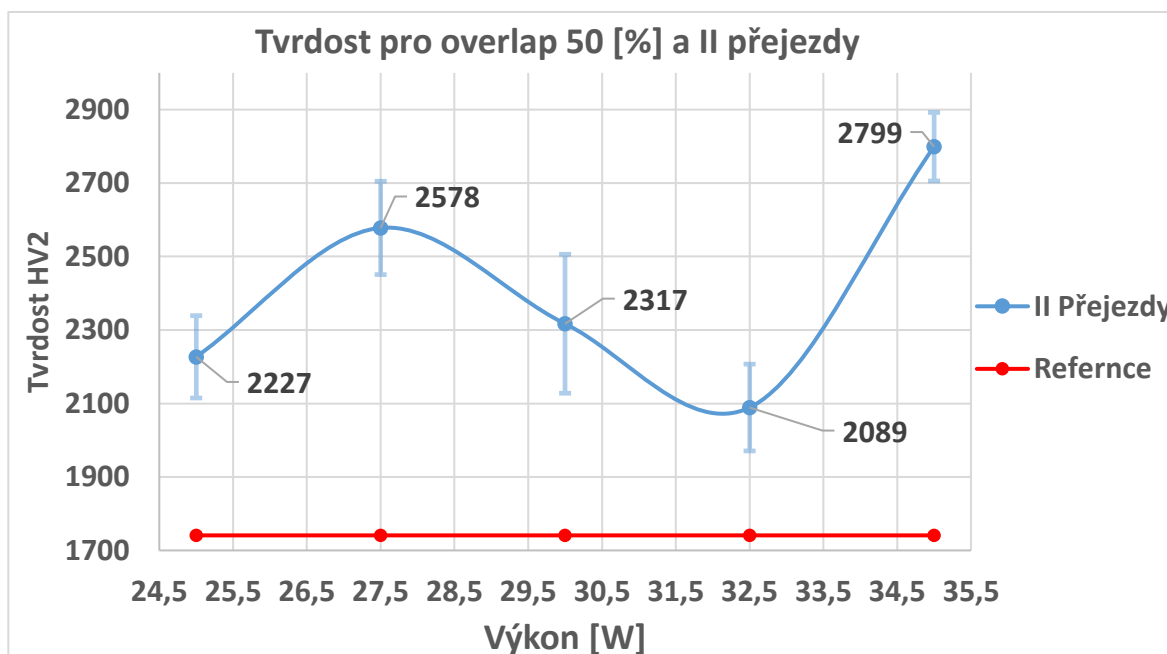
Graf 10 zobrazuje hodnoty tvrdosti pro jeden přejezd. Graf potvrzuje tvrzení v předchozím odstavci. Všechny hodnoty se svou střední naměřenou hodnotou pohybují značně nad referenční hodnotou tvrdosti. I kdyby byly ve skutečnosti na nižším okraji směrodatné odchylky, budou stále tři z pěti hodnot převyšovat referenční tvrdost. Z grafu je také možno odhadnout trend, kdy s rostoucím výkonem klesá hodnota tvrdosti.



Graf 10 Hodnoty tvrdosti při jednom přejezdu

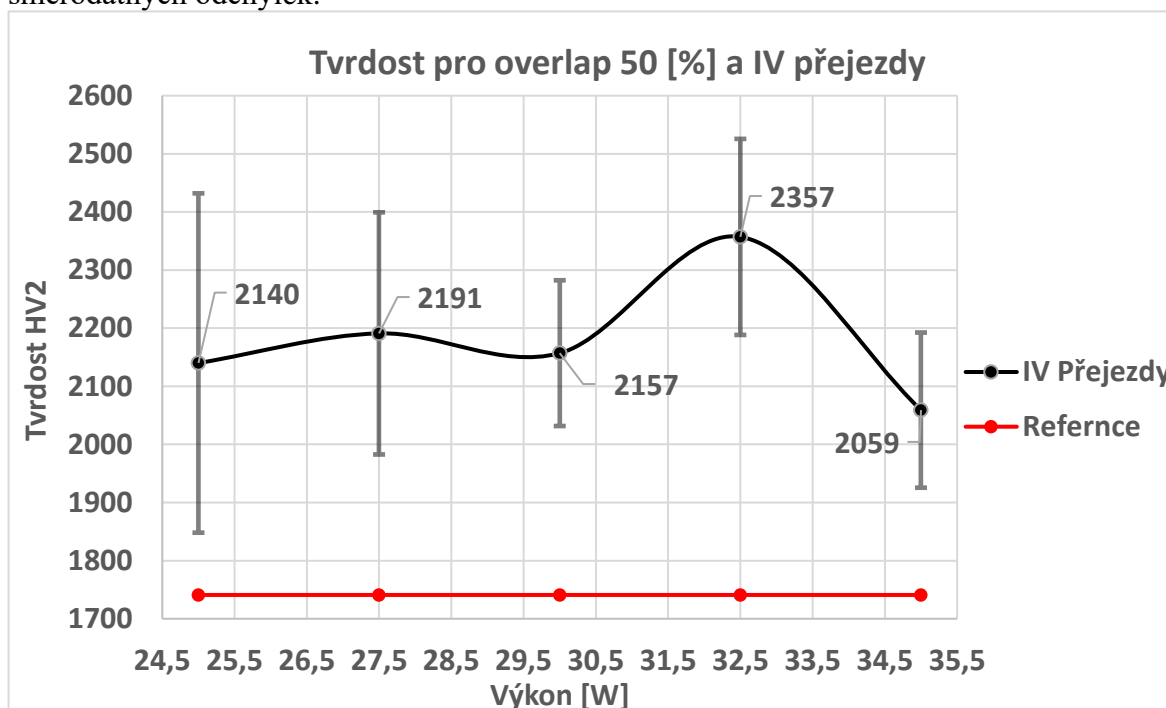


Graf 11 zobrazuje naměřené hodnoty tvrdosti při dvou přejezdech. Při tomto měření dosahovaly směrodatné odchylky jednoznačně nejmenších hodnot. Z grafu je patrné, že veškeré naměřené hodnoty přesahují hodnotu referenční tvrdosti, a to i v případech, kdy by se skutečné hodnoty pohybovaly na dolní hranici směrodatné odchylky.



Graf 11 Hodnoty tvrdosti při dvou přejezdech

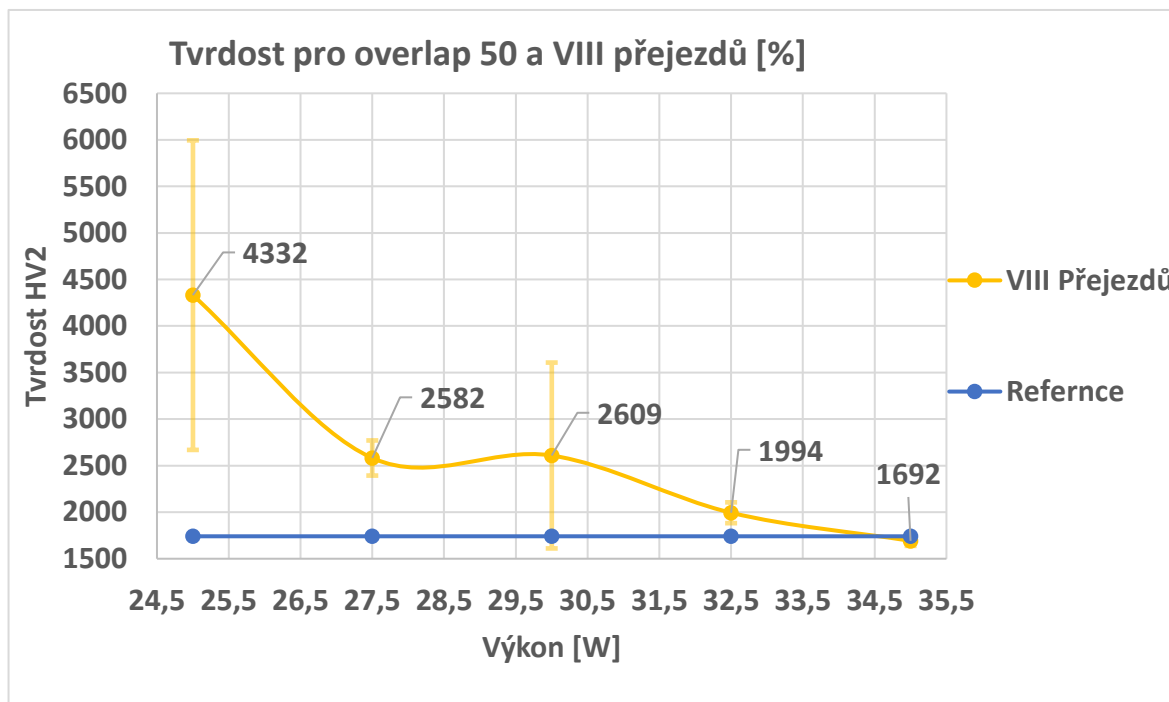
Graf 12 popisuje hodnoty tvrdosti pro čtyři přejezdy. Opakuje se zde podobný případ jako při dvou přejezdech, pouze s menším rozptylem středních hodnot, ale s větším rozptylem směrodatných odchylek.



Graf 12 Hodnoty tvrdosti při čtyřech přejezdech



Graf 13 znázorňuje tvrdost, která byla naměřena při osmi přejezdech. Vzhledem k jednoznačně nejvyšší drsnosti na tomto vzorku, jak dokazují snímky a měření drsnosti povrchu, bylo měření tvrdosti komplikované. Hlavním důvodem byla nerovnost na povrchu vzorku. Právě kvůli těmto nerovnostem má směrodatná odchylka pro první bod tak veliký rozptyl. I přes velmi proměnné hodnoty se zde opakuje trend ze vzorku obráběného jedním přejezdem, a to klesající hodnota tvrdosti s rostoucím výkonem.



Graf 13 Hodnoty tvrdosti při osmi přejezdech



5.11.2. Závěr experimentu II

V této části diplomové práce byly vytvořeny dvě nové matice vzorků na základě informací získaných při experimentu I. Byla zde popsána metodika provedení experimentu, následného získání hodnot a jejich grafické zpracování.

Tato část experimentu ukázala, že overlap 80 [%] je při nastavení výkonu v intervalu 25–35 [W] příliš vysoký v kombinaci s více přejezdy. Oproti tomu nastavení 50[%] overlapu se stejnými parametry výkonu a přejezdů přineslo podstatně lepší výsledky. Při vyšší hodnotě vnesené energie do materiálu nedošlo k dramatickému zvýšení drsnosti oproti experimentu I.

Poslední kapitolou experimentu II bylo vyhodnocení tvrdosti matice vzorků po natavení povrchové vrstvy. V této kapitole bylo zjištěno, že došlo ke značnému nárůstu tvrdosti. Teoretických důvodů k nárůstu může být několik. Může se například jednat o nárůst povrchového napětí vlivem tepelné deformace materiálu, což by mohlo mít za následek nárůst křehkosti nástroje. Také mohlo dojít k ovlivnění vnitřní struktury. Další výzkum by měl být směřován tímto směrem.



6. Závěr diplomové práce

V rámci diplomové práce byly dle zadání vypracovány tři rešerše. První z rešerší obsahuje souhrn různých materiálů, jejich charakteristik a využití při obrábění. Druhá rešerše popisuje rozdělení laserové techniky, principy, na kterých laserové zdroje fungují a jejich rozdělení. Poslední rešerše obsahuje informace o možnostech obrábění nástrojových materiálů laserem. Součástí této rešerše je jak popis úpravy povrchů nástrojových materiálů, tak vysvětlení možností úpravy metalografické a chemické struktury.

Praktická část diplomové práce popisuje návrh, metodiku, provedení a vypracování dílčích experimentů. Uvádí naměřené hodnoty a jejich grafické zpracování. Tato část je rozdělena do dvou hlavních experimentů, u nichž jsou uvedeny krátké závěry, jejichž cílem bylo shrnout okamžité poznatky z naměřených hodnot. V případě prvního experimentu měl tento závěr za cíl popsat, proč byl proveden druhý pokus a jakým směrem se vydává.

Cílem praktické části bylo stanovení hodnot, při kterých dojde k přetavení slinutého karbidu a odpaření jeho pojiva. Tento jev by měl vést k navýšení mechanických vlastností jako je pevnost a tvrdost. Dalším cílem bylo stanovit změnu chemického složení přetavené struktury v porovnání s neovlivněným materiálem vlivem tohoto obrábění. Dále byla pozorována změna vnitřní struktury materiálu a vliv laserového obrábění na drsnost a vzhled povrchu.

První částí experimentu I bylo měření drsnosti. To ukázalo, že ve všech případech došlo k ovlivnění povrchu, stejně tak došlo i ke zhoršení drsnosti povrchu. Snímky povrchu potvrdily ovlivnění, současně na jejich základě došlo k vyloučení několika vzorků u nichž byl povrch příliš znehodnocen. Byly vybrány vzorky, které nasvědčovaly tomu, že došlo k přetavení povrchu. Tyto vzorky byly pozorovány na SEM a byla na nich provedena EDX analýza. Ze snímku SEM bylo možné pozorovat, že přetavená struktura není rovnoměrná a tam, kde k přetavení došlo, se vyskytuje mnoho vad. Tyto vady jsou například póry či trhliny v přetavených shlucích materiálu. EDX analýza potvrdila teoretický předpoklad, že došlo k odpaření části pojivového materiálu ze struktury. S ohledem na tyto hodnoty bylo rozhodnuto, že pro další experiment je nutno lépe rozprostřít vnesenou energii do materiálu a současně její hodnotu navýšit.

Cílem druhého experimentu bylo vytvořit rovnoměrně přetavenou strukturu, na níž bude měřením tvrdosti zjištěna změna mechanických vlastností. Vypálení vzorků proběhlo na základě hodnot vyvozených z prvního experimentu. Byla změřena drsnost a byl



fotografován povrch vzorků. Z experimentu je patrné, že při 50[%] overlapu a výkonu v intervalu od 25 do 35 [W] došlo k vytvoření struktury s podobnou drsností jako při prvním experimentu, avšak s násobně větším množstvím energie vnesené do materiálu. Z měření tvrdosti na tomto vzorku vychází, že téměř ve všech případech kromě výkonu 35 [W] došlo k nárůstu tvrdosti.

Na základě těchto poznatků lze konstatovat, že vliv laseru při těchto parametrech má pozitivní efekt na hodnotu tvrdosti, která roste. Současně však roste i hodnota drsnosti povrchu, což může být nežádoucí. Byl potvrzen také fakt, že na tomto materiálu lze vytvořit přetavenou vrstvu, jež by při dalším zkoumání mohla přinést pozitivní výsledky z hlediska zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností. To by mohlo vést k prodloužení trvanlivosti a případnému navýšení řezných podmínek.

Další výzkum by měl směřovat k vytvoření jedolité přetavené vrstvy bez nežádoucích vad a s minimálním nárůstem drsnosti. V tuto chvíli je možné tvrdit, že došlo k nárůstu tvrdosti, ale není jasné, zda z důvodu změn ve struktuře materiálů, či změnách v chemickém složení povrchové vrstvy. Následující experimenty by měly být navrženy tak, aby bylo možné stanovit, z jakého důvodu dochází k nárůstu tvrdosti povrchu.



7. Použitá literatura

1. MCCARTHY, Willard, Joseph MCGEOUGH. Tool materials. *Www.britannica.com*. [Online] Encyclopædia Britannica, 2021. [Citace: 3. 2 2021.] <https://www.britannica.com/technology/machine-tool/Electrical-discharge-machining-EDM>.
2. Grzesik, Wit. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*. Londýn : Elsevier publications, 2008. ISBN 9780080557496.
3. Uhlíkové nástrojové oceli. *Www.tumlikovo.cz*. [Online] WordPress, 2010. [Citace: 03. 02 2021.] <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/nastrojovematerialy/uhlikove-nastrojove-oceli/>.
4. What is Stellite and what is it used for? *engineeringclicks.com*. [Online] engineeringclicks.com, 2016. [Citace: 03. 02 2021.] <https://www.engineeringclicks.com/stellite/>.
5. Technology and Markets Cutting Tools and Market Trends in the USA. *Www.kennametal.com*. [Online] Kennmetal Co, 2005. [Citace: 05. 02 2021.] <http://kennametal.com/kennametalwebsite/metalworking/html/techarticles.html>.
6. Nová generace povlakovaných cermetů. *www.mmspektrum.com*. [Online] mmspektrum s.r.o, 2016. [Citace: 06. 02 2021.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-povlakovanych-cermetu.html>.
7. Řezná keramika. <https://www.opi.zcu.cz/>. [Online] Odělení povrchových úprav Západočeská univerzita, 2015. [Citace: 06. 02 2021.] <https://www.opi.zcu.cz/keramika.pdf>.
8. Světelský, Jakub. Výroba a všeobecné použití slinutých karbidů. *Bakalářská práce*. Brno : VUT, 2016.
9. en.wikipedia.org. *Aluminium oxide*. [Online] Wikipedia, 2021. [Citace: 27. 06 2021.] https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxide.
10. Materials, AZO. *www.azom.com*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=52>. [Online] AZOM. [Citace: 27. 06 2021.] <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=52>.



11. —. Silicon Nitride (Si₃N₄) Properties and Applications. *azom.com*. [Online] AZOM. [Citace: 27. 06 2021.] <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=53>.
12. —. An Introduction to Cobalt. *www.azom.com*. [Online] AZOM. [Citace: 27. 06 2021.] <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=596>.
13. KOŘÁN, Pavel. ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. *www.lao.cz*. [Online] LAO - průmyslové systémy, s.r.o., 02. 09 2013. [Citace: 08. 02 2021.] <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>.
14. HASMI, M.S.J. *Comprehensive Materials Processing. 1.* [E-kniha] Amsterdam : Elsevier, 2014. ISBN 978-0-08-096532-1.
15. DAHOTRE, Narendra B. a Sandip P. HARIMKAR. *Laser fabrication and machining of materials*. New York : Springer, 2008. ISBN 978-0-387-72344-0.
16. KREJČÍ, Robert, HULICIUS Eduard. Polovodičové lasery a LED-ky. *Www.microdesignum.cz*. [Online] Microdesignum s.r.o., 23. 04 2007. [Citace: 14. 02 2021.] <https://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>.
17. Rozdělení laserů. *Www.lascam.cz*. [Online] LASCAM systems s.r.o., 2015. [Citace: 08. 02 2021.] <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>.
18. Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red. *Www.lt.cz*. [Online] Leonardo technology s.r.o., 2002. [Citace: 14. 02 2021.] <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>.
19. *Laserové diody – Část 2. Funkce a základní parametry*. Lukáš, Michal. místo neznámé : FCC Public, 2005, Světlo. ISSN 1212-0812.
20. Nosek, Tomáš. Polovodičový laser. [Online] Vyšší odborná škola a střední slaboproudé elektrotechniky, 2019. [Citace: 16. 02 2021.] http://stretech.fs.cvut.cz/2013/sbornik_2013/98.pdf#page=6&zoom=100,90,94.
21. Šorm, Martin a Kožmín, Pavel. Modifikace řezných nástrojů pomocí laseru. *www.mmspektrum.com*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 05. 05 2021. [Citace: 14. 07 2021.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/modifikace-reznych-nastroju-pomoci-laseru>.



22. Vznik třísky a její druhy. *eluc.kr-olomoucky.cz*. [Online] ELUC, 2016. [Citace: 14. 07 2021.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1190>.
23. Mikroobrábění. *www.trumpf.com*. [Online] TRUMPF, 2021. [Citace: 14. 07 2021.] https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/mikroobrabeni/.
24. Stanislav NĚMEČEK, Michal MÍŠEK. LASEROVÉ KALENÍ FOREM A NÁSTROJŮ LASER HARDENING OF MOULDS AND TOOLS. *docplayer.cz*. [Online] METAL s.r.o, 20. 05 2011. [Citace: 14. 07 2021.] <https://docplayer.cz/16941967-Laserove-kaleni-forem-a-nastroju-laser-hardening-of-moulds-and-tools.html>.
25. Alisson R. Machado, Leonardo R.R. da Silva, , Felipe C.R. de Souza, Rahul Davis, Leandro C. Pereira, Wisley F. Sales, Wagner de Rossi, Emmanuel O. Ezugwu. State of the art of tool texturing in machining. *Journal of Material Processing Technology*. 1, 2021, Sv. 293, 10.1016.
26. A. Tyurin, S. Nagavkin, A. Malikov & A. Orishich. Microstructure of WC–Co hard alloy surface after laser treatment. *Surface Engineering*. issue 1, 2014-09-29, Sv. I, vol. 31.
27. Jiří, Chábera. POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ OCELÍ S355J2 A S355NL PO SVAŘOVÁNÍ. *Bakalářská práce*. Praha : ČVUT, 2019. Sv. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE.
28. FLASAR, Petr. *SURFACE HARDENING OF CEMENTED CARBIDE BODY. WO 2017/167906 A1* Česká republika, 5. 10 2017.
29. L. Giorleo, E. Ceretti, L. Montesano, and G. M. La Vecchia. Nd:YOV4 laser polishing on WC-Co HVOF coating. *Surface Engineering*. vol.31, 29. 09 2014, Sv. I, I.
30. C. Karatas, B.S. Yilbas, A. Aleem, M. Ahsan,. Laser treatment of cemented carbide cutting tool. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 183, 2007, Sv. Issues 2-3, 183.
31. Čermák, Adam. Konstrukční řešení nových geometrií břitů a koncepcí rezných nástrojů s ohledem na obráběné materiály. . Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
32. Fousek, Jakub. *Leštění povrchu pomocí ultra-krátkopulsních laserů*. Praha : ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, 2020.



33. Tungaloy Czech s.r.o. [Online] Tungaloy Czech s.r.o., 2021. [Citace: 4. 5 2021.] <https://subs.tungaloy.com/cz/about-us/>.
34. Tungaloy. www.imc-companies.com/. [Online] Tungaloy inc, 2021. [Citace: 4. 5 2021.] <http://www.imc-companies.com/Tungaloy/tungaloycatalog/Grade.aspx?grade=TH10&item=6806561&num=1067&mapp=IS>.
35. NEZDAŘILÍKOVÁ, MARTINA. *METROLOGICKÁ KONFIRMACE MĚŘIDLA*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010.
36. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse. *ČSN EN ISO 6507-1 (420374)*. Praha : normy.biz, 2018. Sv. 1, 1. 8596135056255.
37. Čechlovský, Jan. Zjištění změny tvrdosti (mikrotvrdosti). *Bakalářská práce*. [Online] 2017. [Citace: 24. 06 2021.] https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/150888/Jan_Cechlovsky_bakalarska_prace_2017.pdf?sequence=1.
38. www.briol.cz. *Www.briol.cz*. [Online] BRIOL s.r.o, 2013. [Citace: 05. 02 2021.] https://www.briol.cz/freza-tvrdokov-ctyrbrita-pro-materialy-do-55-hrc?gclid=CjwKCAiA9vOABhBfEiwATCi7GBSgyWMkq-ycIJtjt7AqKG61PASsgibAdBz92hv8ROf-pXLXu8LXJBoCgo8QAvD_BwE.
39. Sandvik Coromant. *Modern metal cutting: A practical handbook*. místo neznámé : Sandviken, 1994. ISBN 91-972299-0-3.
40. Christian Nüsser, Isabel Wehrmann, Edgar Willenborg,. Influence of Intensity Distribution and Pulse Duration on Laser Micro Polishing. *Physics Procedia*. Volume 12, 2011, Sv. A, 23.
41. GmbH, Alicona Imaging. Bruker alicona. www.alicon.com. [Online] Alicona Imaging GmbH, 2021. [Citace: 13. 06 2021.] <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocus/>.
42. www.ophiropt.com. *Photonics blog*. [Online] Ophir photonic blog, 02. 05 2018. [Citace: 11. 07 2021.] <https://www.ophiropt.com/blog/laser-measurement/peak-power-vs-average-power-master-it-calculate-it/>.



8. Seznam obrázků

Obr. 1 Stopková fréza z rychlořezné oceli [28].....	6
Obr. 2 Dvoufázová (vlevo) a třífázová struktura (vpravo) karbidů. [2].....	9
Obr. 3 Princip vzniku laserového paprsku [18].....	13
Obr. 4 Princip vzniku laserového záření [15].....	14
Obr. 5 Znázornění principu Q-switch [15].....	16
Obr. 6 Varianty pohybu CO ₂ molekul a) rovnoměrné natahování , b) ohýbání , c) nesouměrné natahování [15].....	17
Obr. 7 Schéma PIN diody emitující laserový paprsek [16].....	19
Obr. 8 Struktura na povrchu VBD omezující tvorbu nárůstku. Směr šipky znázorňuje směr odchodu třísek. [21].....	20
Obr. 9 Zleva žlábkový utvařeč, uprostřed stupínkový utvařeč [21], vpravo VBD z řezné keramiky s utvařečem [23].....	21
Obr. 10 Znázornění postupné tvorby utvařeče třísek s vlastní mikrostrukturou [21].....	22
Obr. 11 Vlevo příklady střížných nástrojů, vpravo forma na lisování plechů [24].....	23
Obr. 12 Snímek vlevo zachycuje jehlicovité útvary zrn karbidu wolframu, zatímco snímek vpravo zobrazuje řez VBD, kde je možné vidět „obalovou“ část VBD označenou číslem 1 a část „těla“ označenou číslem dva. [18].....	25
Obr. 13 Díry v povrchu nástroje z SK vzniklé vlivem unikajících par [30].....	26
Obr. 14 Popraskaný povrch nástroje ze slinutého karbidu [30].....	26
Obr. 15 Schéma principu laserového leštění v řezu [41].....	27
Obr. 16 Grafické znázornění špičkového výkonu (Peak Power) a průměrného výkonu (Average Power). [37].....	27
Obr. 17 Znázornění principu parametru Překrytí [32].....	28
Obr. 18 VBD SNGN120408 TH10 - 6806561 [33].....	30
Obr. 19 Obrázek 14 Fotografie neovlivněného povrchu z SEM.....	30
Obr. 20 Grafické znázornění výsledků EDX analýzy a chemického složení.....	31
Obr. 21 Skenovací mikroskop InfiniteFocus5G od firmy Alicona [35].....	34
Obr. 22 Skica uspořádání vypálené matice.....	35
Obr. 23 Snímek povrchu při výkonu 20 [W], overlapu 40[%], frekvenci 133 [kHz], jeden přejezd; Rz 1,46 [μm].....	40
Obr. 24 Snímek povrchu při výkonu 30 [W], overlapu 60 [%], frekvenci 200 [kHz], dva přejezdy; Rz 9,15 [μm].....	40



Obr. 25 Místa měření chemického složení SEM.....	42
Obr. 26 Grafické znázornění poměrů prvků dle SEM.....	44
Obr. 27 Snímek SEM části ovlivněné struktury při jednom přejezdu, výkonu 20 [W], frekvenci 200 [kHz]; overlapu 60 [%].....	44
Obr. 28 Přetavená struktura při jednom přejezdu, výkonu 20 [W], frekvenci 200 [kHz]; overlapu 60 [%]	45
Obr. 29 Přetavená struktura při jednom přejezdu, výkonu 40 [W], frekvenci 200 [kHz]; overlapu 60 [%]	45
Obr. 30 Částečně přetavená struktura při jednom přejezdu výkonu 20 [W]; overlapu 60 [%]; frekvenci 200 [kHz].....	46
Obr. 31 Body EDS analýzy	46
Obr. 32 Schéma matice pro experiment II.....	48
Obr. 33 Vlevo povrch s drsností Ra 0,291 [μm] při výkonu 25 [W] a overlapu 50 [%] s jedním přejezdem Vpravo povrch s drsností Ra 1,16 1 [μm] při výkonu 27,5 [W] a overlapu 50 [%] s osmi přejezdy	52
Obr. 34 Vlevo povrch s drsností Ra 1 [μm] při výkonu 25 [W] a overlapu 80 [%] s jedním přejezdem Vpravo povrch s drsností Ra 9,87 1 [μm] při výkonu 30 [W] a overlapu 80 [%] s osmi přejezdy	52
Obr. 35 Schéma principu zkoušky tvrdosti dle Vickerse [33].....	54



9. Seznam tabulek

Tab. 1 Vlastnosti nástrojových materiálů a jejich popis [2]	4
Tab. 2 Charakteristika a příklady vysokorychlostních ocelí [2].....	7
Tab. 3 Označování nástrojů ze slinutých karbidů [2].....	8
Tab. 4 Přehled vlastností vybraných materiálů [8] [2] [9] [10] [11] [12]	12
Tab. 5 Dělení aktivních prostředí laserů [15]	15
Tab. 6 Výsledky EDX analýzy poskytující chemické složení	31
Tab. 7 Hlavní technické parametry laserového zdroje	32
Tab. 8 Konstantní parametry experimentu	33
Tab. 9 Vypočtené hodnoty pro frekvenci 200 [kHz].....	33
Tab. 10 Vypočtené hodnoty pro frekvenci 133 [kHz].....	34
Tab. 11 Vybrané vzorky pro SEM	41
Tab. 12 Výsledky chemické analýzy dle SEM.....	43
Tab. 13 Výsledky SEM chemické analýzy přetavené vrstvy	47
Tab. 14 Přepočtené teoretické parametry pro experiment II	49
Tab. 15 Naměřené hodnoty drsnosti pro experiment II s overlapem 50%	49
Tab. 16 Naměřené hodnoty drsnosti pro experiment II s overlapem 80%	50
Tab. 17 Tabulka vybraných vzorků z matice s overlapem 50 %.....	53
Tab. 18 Naměřené hodnoty pro ověření kalibrace tvrdoměru.....	55
Tab. 19 Hodnota tvrdosti HV2 neovlivněného povrchu.....	55
Tab. 20 Naměřené hodnoty tvrdosti	55



10. Seznam grafů

Graf 1 Zobrazení vlivu velikosti zrna slinutého karbidu na mechanické vlastnosti [2].....	8
Graf 2 Znázornění jednotlivých energetických stavů a jejich interakcí v CO ₂ laserech [15]	18
Graf 3 Grafické zpracování naměřených hodnot při výkonu 20 [W].....	36
Graf 4 Grafické zpracování naměřených hodnot při výkonu 30 [W].....	37
Graf 5 Grafické zpracování naměřených hodnot při výkonu 40 [W].....	37
Graf 6 Grafické zpracování naměřených hodnot při výkonu 50 [W].....	38
Graf 7 Grafické zpracování naměřených hodnot při výkonu 60 [W].....	39
Graf 8 Grafické zpracování hodnot drsnosti povrchu při overlapu 50 [%] pro experiment II	50
Graf 9 Grafické zpracování hodnot drsnosti povrchu při overlapu 80 [%] pro experiment II	51
Graf 10 Hodnoty tvrdosti při jednom přejezdu	56
Graf 11 Hodnoty tvrdosti při dvou přejezdech	57
Graf 12 Hodnoty tvrdosti při čtyřech přejezdech	57
Graf 13 Hodnoty tvrdosti při osmi přejezdech	58



11. Seznam příloh

Příloha I

SEM protokol

Příloha II

Parametry experimentu I

Příloha III

Měření drsnosti experimentu I