

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ A STRUKTURY SLINUTÉHO KARBIDU
NA JEHO OBROBITELNOST LASEREM

EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION AND STRUCTURE OF
SINTERED CARBIDE ON ITS MACHINABILITY BY LASER

AUTOR: Jiří Stuchlík
STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní a materiálové inženýrství
VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Jiří Cejp CSc.

PRAHA 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štechlík** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **396219**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv chemického složení a struktury slitutého karbidu na jeho obrobitelnost laserem.

Název diplomové práce anglicky:

Effect of chemical composition and structure of sintered carbide on its machinability by laser.

Pokyny pro vypracování:

Určit vztah vlastností vybraných slitutých karbidů a jejich obrobitelnosti laserem z pohledu produktivity a jakosti obroběné plochy.
Studijní a referenční činnost zaměřená na slitutý karbid a jeho vlastnosti a na laserové technologie. Seřazení a provedení experimentálního programu, vyhodnocení naměřených hodnot, diskuse, závěry.

Seznam doporučené literatury:

SANJAY M.- VINOD, Y. : Laser beam micromachining. Optics and Lasers in Engineering, Volume 73, October 2015, Pages 89-122
CHENG, J. and all : Ultrafast laser materials micromachining. Optics and Laser Technology, Volume 46, March 2013, Pages 88-102
BUCHFINK, G. : The laser as a tool. Published by Vogel Buchverlag Würzburg, 2007

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Cejp, CSc., ústav materiálového inženýrství FS

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

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


Datum zadání diplomové práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____



doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce


prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) literatury


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis účastník

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


17.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod pro použití 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).

Dne.....

Podpis.....

Anotace

- Jméno autora: Jiří Stuchlík
- Název práce: Vliv chemického složení a struktury slinutého karbidu na jeho obrobitelnost laserem
- Rozsah práce: 71 stran
- Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.
- Konzultant: Ing. Pavel Zeman, Ph.D. - RCMT
- Klíčová slova: slinuté karbidy, materiálová analýza, mikroobrábění, gravírování, laser, břitové nástroje
- Anotace: Cíl diplomové práce je ve zjištění vztahu vlastností slinutého karbidu a jeho obrobitelnosti laserem z pohledu produktivity. Jako zkušební materiály byly použity vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů od výrobců Seco, Dormer Pramet a Tungaloy. Materiály byly podrobeny materiálovým zkouškám a pomocí elektronového mikroskopu bylo zjištěno orientační chemické složení vzorků. Jako experimentální zařízení byl použit pulzní laser s nanosekundovými pulzy v infračervené oblasti. Nalezení optimálních parametrů mikroobrábění bylo dosaženo postupnou optimalizací frekvence pulzů, rychlosti pohybu paprsku a ověření změny počtu skenovacích vrstev. Podle zjištěných optimálních parametrů byly stanoveny souvislosti s materiálovými vlastnostmi slinutých karbidů.

Annotation

Author's name:	Jiří Stuchlík
Subject:	Effect of chemical composition and structure of sintered carbide on its machinability by laser
Range of work:	71 pages
Head of work:	doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.
Consultant:	Ing. Pavel Zeman, Ph.D. - RCMT
Keywords:	sintered carbides, material analysis, micro-machining, engraving, laser, cutting tools
Annotation:	<p>The aim of the diploma thesis is to determine the dependency of efficient laser micro-machining from the productivity point of view on cemented carbide material properties. Investigated material were replaceable cemented carbide inserts from companies Seco, Dormer Pramet and Tungaloy. The materials were subjected to different investigations of material analysis. Indicative chemical composition of the samples was detected by the electron microscope. The experimental device used for experiment was an engraving laser with nanosecond pulses in the infrared wavelength region. Finding the optimal micro-machining parameters for each material was achieved by gradual optimization of pulse frequency, beam speed and verification of changes in the number of scanned layers. The optimal process parameters were determined based on measured results and different material properties of cemented carbides.</p>

Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat doc. Ing. Jiřímu Cejnovi, CSc. za vedení této diplomové práce, za jeho vstřícnost a připomínky při jejím psaní. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. z Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, za jeho rady při realizaci a vyhodnocování výsledů. Další poděkování směřuje kolegům, kteří mi dávali další inspirace k psaní této práce a Ing. Stanislavu Krumovi Ph.D. a Ing. Janu Krčilovi za pomoc při materiálové analýze. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům za jejich podporu během studia.

Obsah

1. Úvod	10
2. Karbidy	11
2.1. Skupiny slinutých karbidů	12
2.2. Výroba slinutých karbidů	15
2.2.1. Karbid wolframu	16
2.2.2. Karbid titanu	17
2.2.3. Karbid tantalu a niobu	17
2.2.4. Karbid chromu a vanadu	18
2.2.5. Kobalt	18
2.3. Struktury a vlastnosti	18
2.3.1. Struktura	19
2.4. Vlastnosti SK typu WC-Co	19
2.5. Fyzikální vlastnosti WC-Co	20
2.6. Mechanické vlastnosti	21
3. Laser a jeho možnosti	24
3.1. Lasery využívané ke gravírování	24
3.2. Rozdílné technologie ns a ps laserů	26
3.2.1. Q – spínání	26
3.2.2. Mode Locking	26
3.2.3. Blokování v aktivní režimu	27
3.2.4. Blokování pasivního režimu	27
3.3. Ablace	27
3.3.1. Laserová ablace nanosekundovým laserem	28
3.3.2. Laserová ablace pikosekundovým laserem	29

3.3.3. Hodnocení ablačního prahu.....	29
3.4. Mikroobrábění a gravírování laserem	30
3.5. Laserový systém pro mikroobrábění	30
3.6. Mikroobrábění ns - laserem.....	31
3.7. Mikroobrábění ps - laserem.....	32
4. Experimentální část	33
4.1. Experimentální zařízení.....	33
4.1.1. Laser	33
4.1.2. Měření odebraného materiálu.....	34
4.1.3. Měření tvrdosti	35
4.1.4. Metalografická studie	36
5. Experimentální materiály	37
5.1. SECO.....	37
5.1.1. SECO - povrch	38
5.1.2. SECO - jádro	39
5.1.3. SECO – EDX analýza	40
5.2. Dormer Pramet 415	40
5.2.1. Dormer Pramet 415 - povrch.....	41
5.2.2. Dormer Pramet 415 – jádro	42
5.2.3. Dormer Pramet 415 – EDX analýza.....	44
5.3. Tungaloy TH10	44
5.3.1. Tungaloy TH10 – povrch	45
5.3.2. Tungaloy TH10 – jádro	46
5.3.3. Tungaloy TH10 – EDX analýza.....	47
5.4. Výpočet lomové houževnatosti dle Palmquista	47
5.5. Materiálové shrnutí	48

6. Experiment – laserová část.....	49
6.1. Optimální frekvence	50
6.1.1. Frekvence – SECO HX	51
6.1.2. Frekvence – Dormer Pramet 415	52
6.1.3. Frekvence – Tungaloy TH10.....	53
6.1.4. Zhodnocení výsledků změny frekvence	54
6.2. Vyhodnocení ablačního prahu.....	55
6.3. Optimální rychlost.....	55
6.3.1. Rychlost – SECO HX.....	55
6.3.2. Rychlost – Dormer Pramet 415	57
6.3.4. Zhodnocení výsledků změny rychlosti.....	59
6.4. Zjištění závislosti změny počtu skenovacích vrstev	59
6.4.1. Změna počtu skenovacích vrstev – SECO HX	59
6.4.2. Změna počtu skenovacích vrstev – Dormer Pramet 415.....	60
6.4.3. Změna počtu skenovacích vrstev – Tungaloy TH10.....	61
6.4.4. Zhodnocení výsledků změny počtu skenovacích vrstev laseru.....	62
7. Závěr.....	65
7.1. Závěry.....	67
8. Citovaná literatura	69

1. Úvod

Technologie obrábění se zabývá širokým spektrem výroby součástí různými stroji. Proto musí mít každý stroj vhodné nástroje podle vzájemného pohybu nástroje s obrobkem. Na obrábění různých druhů materiálů je zapotřebí použít speciálních nástrojů s různými vlastnostmi a tvary. Základní řezné nástroje pro obrábění měkčích materiálů se vyrábí z řezných ocelí. Pro obrábění tvrdších materiálů se vyrábí břitové destičky ze slinutých karbidů, nebo z řezných keramik, kubických nitridů bóru až po technický diamant. Třískovým obráběním se mohou opracovávat plasty, různé druhy kompozitu, neželezné kovy, oceli, nebo další velmi tvrdé materiály jako jsou chromniklové a titanové slitiny.

U řezných nástrojů se nejčastěji používají slinuté karbidy, které jsou na trhu široce zastoupeny řadou výrobců světových značek ale i českým výrobcem Dormet – Pramet. Vysoká trvanlivost nástrojů je jedním z hlavních kritérií výrobců pro výrobu řezných nástrojů. Vyšší nároky spotřebitelů a stále se vyvíjející konkurence kladou na výrobce stále větší nároky na inovace a zlepšování jejich produktů. Pro zvyšování tvrdosti řezných nástrojů je tendence vytvářet jemnější struktury. Zjemňování struktury a vytváření vhodných tvarů břitu dosahuje limitu a proto se hledají nové způsoby, které by mohly nástroje ještě více vylepšit.

Jedním z nejmodernějších pohledů na danou problematiku je využití laserového paprsku, kterým lze vytvářet sofistikované struktury až mikrostruktury na povrchu nástroje. Právě v případě vytváření mikrostruktur se lze studiem přírodních struktur inspirovat na využití v technice. Napodobením struktury lotosového listu, kůže žraloka nebo povrchů pouštních brouků a dalších, lze dosáhnout požadovaných vlastností. Je možné docílit hydrofobních či hydrofilních vlastností, snížení třecích sil, velikosti opotřebení, samočisticích nebo antikoročních vlastností. Implementací těchto povrchových úprav na nástroje bychom dosáhli pokročilých nástrojů, které by se vyznačovaly svojí vysokou trvanlivostí, menšími řeznými silami a velmi dobrým chlazením.

Dnes se těmito funkčními strukturami zabývá stále více institucí a výzkumných center. Abychom mohli vytvářet tyto sofistikované struktury, musíme dobře znát geometrii vytvářených povrchů, ale i interakci laserového paprsku s materiálem. Aby byla práce kompletní, musí být u zkoumaných slinutých karbidů dobře známé jejich chemické složení, velikost zrna a povrchová tvrdost. Ukazatelé by měly spolu se zjištěnými optimálními laserovými parametry docílit efektivní mikroobrábění laserem.

2. Karbidy

V chemii je karbid definován jako sloučenina složená z uhlíku s méně elektronegativním prvkem. Karbidy se klasifikují jako elektropozitivní prvky iontové sloučeniny, ale i elektronegativní nekovy vytvářející intersticiální sloučeniny z kombinace molekulárních sloučenin a z řad přechodných kovů. Obecně se karbidy člení do čtyř skupin podle chemické vazby. Vazby podobné solím, iontové sloučeniny, intersticiální sloučeniny a meziprodukty karbidů přechodných kovů. Jednotlivé příklady zahrnují karbidy vápníku, křemíku, wolframu a cementitu. (1), (2)

Iontové karbidy

Solné karbidy se rozdělují podle složek atomů na methanidy, acetylidy a seskvikarbidy. Methanidy se vytváří hydrolyzou vody vyrábějící methan. Charakterizující karbid tohoto druhu je karbid hořčíku Mg_2C . Acetylidové karbidy se vytváří z alkalických kovů, zemin a lanthanoidních kovů. Tuto skupinu zastupují sloučeniny karbidu sodného Na_2C_2 , karbidu vápníku CaC_2 a jiné. Poslední skupinou popisující solné karbidy jsou seskvikarbidy, neboli allylenidy. Ty se nalézají ve sloučeninách Li_4C_3 a Mg_2C_3 . (1) (3) (2)

Kovalentní karbidy

Téměř všechny uhlíkové sloučeniny vykazují kovalentní charakter. Tuto skupinu karbidů popisují např. karbidy bóru a křemíku. Dalšími kovalentními karbidy jsou karbidy beryllia a hliníku. Karbidy křemíku jsou v krystalické formě podobné diamantové struktuře. I karbidy bóru jsou charakterizovány neobvyklou strukturou, a právě proto jsou tyto materiály velmi tvrdé a žáruvzdorné. (1) (3) (2)

Intersticiální karbidy

Jsou to karbidy, které mají kovové a žáruvzdorné vlastnosti. Jejich atomy uhlíku jsou umístěny v oktaedrických mezerách v těsně uzavřené kovové mřížce. Aby vznikla intersticiální struktura, musí být hodnota poměru poloměru r_c intersticiálního iontu uhlíku k poloměru iontu

doplňujícího se kovu r_m menší než 0,59. Tabulka 1. Do intersticiálních karbidů patří karbidy titanu a wolframu, které jsou velmi důležité v průmyslu. Používají se na pokovování řezných nástrojů a k výrobě vyměnitelných břitových destiček. Další karbidy patřící do této skupiny jsou karbidy tantalu, zirkonia, vanadu a niobu. Karbidy představující přechod mezi intersticiálními a iontovými karbidy jsou karbidy chromu, manganu, kobaltu, niobu a železa. Ty mají poloměr kovových atomů příliš malý pro vznik intersticiálních karbidů a struktura je proto silně deformována a prostoupena řetězci uhlíkových atomů. (1) (3) (2)

Tabulka 1: Poměr atomových poloměrů r_c/r_m (3)

Skupina IV		Skupina V		Skupina VI	
Hf – C	0,486	Nb – C	0,530	Cr – C	0,609 *
Ti – C	0,526	Ta – C	0,529	Mo – C	0,556
Zr – C	0,483	V – C	0,576	W – C	0,553
Pozn.: * Nevyhovuje podmínce intersticiální struktury					

2.1. Skupiny slinutých karbidů

Slinuté karbidy se rozdělují do karbidových skupin podle normy ISO na P, M, K, N, S, H. Každá z uvedených skupin je určena svým chemickým složením a strukturou pro obrábění jiného druhu materiálu. Skupiny jsou rozděleny od běžných konstrukčních ocelí, korozivzdorné oceli a litiny, až po nezelezné kovy, žáruvzdorné oceli, nebo tvrzené materiály. Jednotlivé skupiny karbidů se podle užití dělí na podskupiny 01-30, 40 a 50, které určují, při jakých řezných podmínkách mohou být tyto destičky využívány. Podskupiny od čísla 01 bývají označovány jako dokončovací, proto se využívají při vysokých řezných rychlostech a při malých posuvech. Nástroje označené střední číselnou řadou se využívají jak pro hrubování, tak i pro dokončování, ale s ne tak kvalitním obrobeným povrchem. Poslední podskupiny

označované nejvyššími čísly jsou využívány pouze pro hrubovací operace. Je to dáno poměrem, který říká, že s rostoucím číslem podskupiny se zvyšuje obsah pojiva. S vyšším obsahem pojiva roste houževnatost a pevnost v ohybu, klesá tvrdost a otěruvzdornost. (4) (5) (6)

Základní karbid, který se využívá pro výrobu slinutých karbidů je wolfram karbid (WC), jeho pojící složkou je kobalt (Co). Další složky karbidů využívané pro směsi jsou karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr₃C₂). Hlavním úkolem přídatných kovů nebo karbidů do práškové směsi je zpomalení růstu karbidového zrna (WC), který má pak jemnější zrno a vyšší tvrdost a pevnost na úkor horší houževnatosti. V uvedených skupinách jsou nepovlakované karbidy označovány jako jednkarbidové (K), dvojkarbidové (P) a vícekarbidové (M). (7)

- Skupina K:
WC (87 – 92) % + Co (4 - 12) % + (TaC.NbC)
- Skupina P:
WC (30 – 82) % + TiC (8 – 64) % + Co (5 – 17) % + (TaC.NbC)
- Skupina M:
WC (79 – 84) % + TiC (5 – 10) % + TaC.NbC (4-7) % + Co (6-15) % (7)

Skupina P

Je určena pro obrábění kovů od nelegovaných až po vysokolegované oceli, ocelolitiny a pro martenzitické a korozivzdorné oceli. Využívá se např. i pro obrábění temperovaných litin, které tvoří dlouhou třísku. Obrobitelnost těchto materiálů bývá touto skupinou obvykle dobrá, rozhodujícími faktory bývají tvrdosti materiálu a obsahy uhlíku. Podskupiny skupiny P jsou značeny od P01 do P50, které označují poměr tvrdé složky a pojivové složky slinutého karbidu.

Skupina M

Je určena univerzálnějšímu využití. Obrábí se touto skupinou materiály vytvářející dlouhé i krátké třísky. Jsou to korozivzdorné oceli obsahující minimálně 12 % chromu s dalšími přísadami. Zastupují je např. feritické, martenzitické, austenitické a austeniticko-feritické

duplexní oceli. Skupina M je označována žlutou barvou a její podskupiny jsou rozděleny od M01 do P40.

Skupina K

Touto skupinou nástrojů se obrábí materiály tvořící krátké třísky. Jsou využívány pro obrábění litin. Šedé litiny a temperované litiny bývají obráběny bez velkých problémů. Zatímco litiny nodulární, vermikulární a izotermicky kalené litiny se obrábí mnohem hůře. Všechny litiny obsahují ve svém složení karbid křemíku, který na břit působí velmi abrazivně. Skupina K je označena červenou barvou, kde jsou její podskupiny rozděleny od K01 do K40.

Skupina N

Je určena pro obrábění neželezných kovů, jako je hliník a jeho slitiny. Dále slitiny mědi nebo mosazi. Stejně tak jako předešlé skupiny je tato skupina rozdělena na podskupiny od N01 do N30 a je označována zelenou barvou.

Skupina S

Je určena pro obrábění žáruvzdorných slitin. Jsou to vysocelegované oceli a materiály na bázi niklu, kobaltu a titanu. Tato skupina je označovaná hnědou barvou a podskupiny jsou řazeny od S01 do S30.

Skupina H

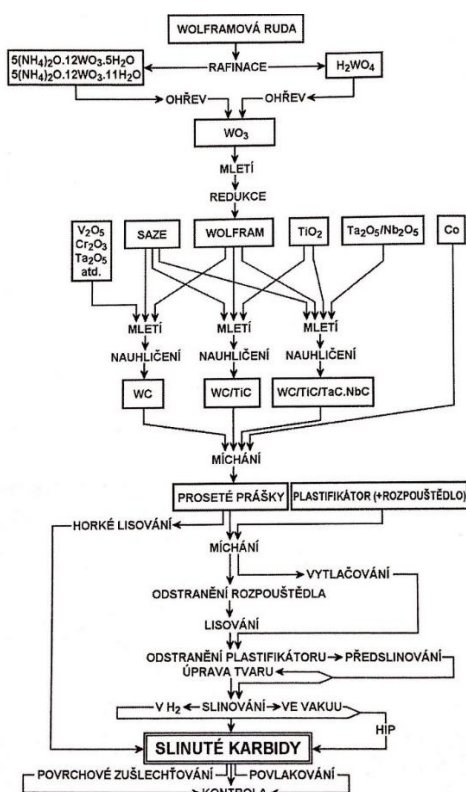
Je vhodná pro obrábění kalených materiálů. Tvrdosti ocelí se pohybují mezi 46 – 65 HRC. U tvrzených litin bývá tvrdost v rozmezí 400 – 600 HB. Tyto vysoké tvrdosti řadí tyto materiály mezi těžkoobrobitelné. Jsou označovány tmavě šedou barvou a její podskupiny jsou řazeny od H01 do H30. Rostoucí číslo podskupiny značí stejný poměr tvrdé a pojivové složky jako u skupin P, K, S. Čím je nižší číslo podskupiny, tím máme vyšší tvrdost a ořezavost slinutého karbidu. (5) (4)

2.2. Výroba slinutých karbidů

Sypké prášky tvrdých kovů a jejich pojiv, se po smíchání zhutní a následně tepelným zpracováním slinují. Kovové prášky se vyrábějí mnoha způsoby od mechanických způsobů, kde se čisté kovy melou v mlýnech, nebo se za působení vysokého tlaku plynu tříští na otěruvzdorných deskách. Rozprašováním tekutého kovu v plynech nebo ve vodě, tříštění kapek kovu o rotující lopatky, rozprašováním kovu účinkem odstředivé síly, až po chemické způsoby výroby prášků. (3) (8)

Po namíchání specifické směsi prášku se musí prášek zformovat do požadovaného tvaru. Pro lisování vyměnitelných břitových destiček se využívají formovací lis. Pro lisování objemnějších a složitějších tvarů se využívají hydrostatické nebo izostatické lisovací metody Cold Isostatic Pressing a Hot Isostatic Pressing. Další možností je protlačování prášku a vytváření dlouhých polotovarů o různých průřezech, dále válcování, nebo zhutnění vysokou energií vyvolané výbuchem. (3) (8)

Zhutněním tvrdého kovu s pojivovou složkou bývá nejčastěji kobalt, který se slinováním při teplotě blízké se k bodu tavení pojiva slije dohromady a vytvoří kompaktní materiál. Při slinování dochází k homogenizaci výlisku, jeho zhutnění, vyrovnání struktury a určení mechanických, fyzikálních a technologických vlastností. Slinování je difuzní proces, při kterém se částice pohybují v celém objemu. Je to dáno působením teploty a času. Aby se zabránilo nežádoucím reakcím, které se vytváří na povrchu výlisku. Slinuje se v ochranných atmosférách nebo ve vakuu. Po slinování bývají součástky podle potřeby dodatečně zpracovávány. Obrázek 1 graficky popisuje výrobu slinutého karbidu od zpracování vstupní suroviny až po konečný výrobek. (3) (8)



Obrázek 1: Postup výroby výchozích prášků a slinutých karbidů. (7)

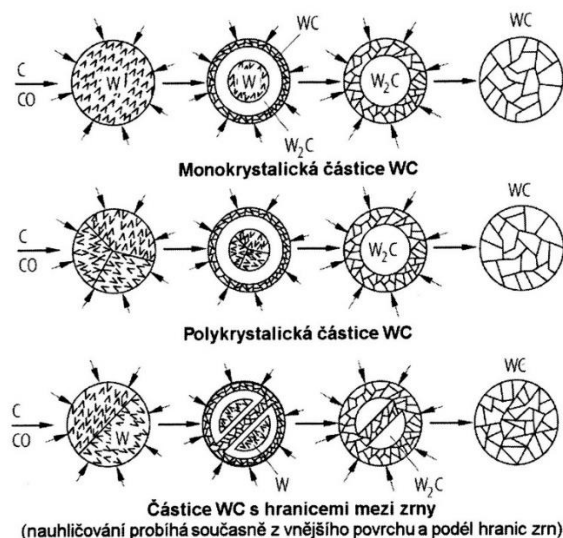
2.2.1. Karbid wolframu

Byl jako první karbid využíván pro slinování na tvrdou fázi. Má hexagonální krystalovou strukturu, která je charakteristická svými ostrými trojúhelníkovými nebo pravoúhlými tvary. Toto rozložení existuje pouze v úzké oblasti fázového diagramu C-W, kde je zcela stechiometrický, a tudíž si zachovává celkovou hmotnost obou složek. (3)

Při slinování WC dochází k rozpouštění a precipitaci. To vede ke zmenšování množství zrn a zvětšování jejich rozměrů. Jejich velikost lze ovlivnit přidáním kovů V, Cr nebo Ta, které omezují růst karbidických zrn. (3)

Karbid wolframu se vyrábí ze směsi prášku čistého wolframu a pevného uhlíku. Uhlík je zde zastoupen ve formě sazí nebo grafitu. Po rovnoměrném smíchání se směs zaformuje do patřičného tvaru a pokračuje do slinovací fáze. Ohříváním dochází ke zplyňování uhlíku a k plynnému nauhličení karbidu wolframu. Tento proces se provádí v atmosféře vodíku, argonu, nebo vakua, při teplotách mezi 1300 až 2400 °C. Teplota slinování vykazuje výsledné vlastnosti karbidu. Obecně při nižších teplotách získáme jemnější strukturu, která je náchylnější

na mřížkové poruchy, potlačují je přídavné kovy. Obrázek 2 zobrazuje možnosti formování uhlíku a wolframu v částicích WC. (3)



Obrázek 2: Tvorba WC. (7)

2.2.2. Karbid titanu

Je vyráběn redukcí a nauhličováním směsi z vysoce čistého TiO_2 a sazí nebo grafitového prášku v indukční peci, vakuu nebo ve vodíkové atmosféře za vysokých teplot kolem 2000 – 2200 °C. Výhoda vodíkové atmosféry je v jednodušší konstrukci pece, protože zde není třeba bránit komoru před přístupem vzduchu z okolí. V případě nauhličování ve vakuu je výsledný titan karbid kvalitnější, protože obsahuje vyšší množství obsahu vázaného uhlíku a neobsahuje žádný dusík. (7)

2.2.3. Karbid tantalu a niobu

Je vyráběn stejně jako ostatní karbidy. Jde o současnou redukcí a nauhličení oxidů kovů uhlíkem. Jelikož se v tantalové rudě vždy nachází niob, musí se počítat s oběma prvky. V důsledku fyzikálního spojení oxidu tantalečného a oxidu niobičného v rudě. Je odpovídající množství důkladně promícháno s čistými sazemi nebo grafitovým práškem a zahříváno ve vodíkové atmosféře nebo ve vakuu na teplotu 1400 – 1800 °C. Výsledný karbid bývá označován jako TaC.NbC. (7)

2.2.4. Karbid chromu a vanadu

Karbid vanadu je vyráběn stejně jako karbid tantalu. Jde o důkladné promíchání směsi s odpovídajícím množstvím oxidu vanadečného s čistými sazi nebo grafitickým práškem. Nauhličení probíhá ve vakuu při teplotách 1700 °C. Karbidy vanadu a chromu zabraňují růstu zrn mnohem více než karbidy tantalu a niobu. (7)

2.2.5. Kobalt

Ve slinutých karbidech plní kobalt funkci pojiva. Kobalt se těží společně s niklem, nebo se vyskytuje v mořské vodě, kde je obsažen kolem 0,27 μg na jeden litr. Je vyráběn nejčastěji hydrometalurgickými nebo pyrometalurgickými postupy. Např. oxidací a redukcí uhlíku ve vodíkové atmosféře při teplotách 350 – 500 °C nebo rozkladem CoC_2O_4 v redukční atmosféře při teplotách 500 – 600 °C. (7) (9)

2.3. Struktury a vlastnosti

Historický vývoj slinutých karbidů byl zaměřen na zvýšení odolnosti proti opotřebení, pevnosti a houževnatosti. Aby bylo dosaženo zlepšení těchto vlastností muselo se nejprve přesně definovat chemické složení, velikosti zrn a jejich rozložení. Dalším rozhodujícím faktorem je množství přidaných přísad, rovnoměrnost mikrostruktury, obsah nekovových prvků, uhlíku, dusíku a množství a druh nečistot. Velkou roli hraje i celková kvalita vstupních surovin, jejich předpříprava a finální slinování. Velikost zrn dnešních slinutých karbidů se pohybuje mezi 0,5 – 5 μm. (7) (10)

S nízkým obsahem kobaltu jsou slinuté karbidy tvrdší a mají vysokou pevnost v tlaku. S rostoucím obsahem kobaltu hodnoty tvrdosti a pevnosti monotónně klesají. Obecně pro slinuté karbidy v libovolném složení platí, že čím menší je velikost zrn tvrdých částic, tím je tvrdost větší. U pevnosti v ohybu platí, že čím více je ve struktuře obsažen kobalt s větší hrubostí struktury, tím bude dosažena větší pevnost v ohybu. (7) (10)

2.3.1. Struktura

Struktury slinutých karbidů wolframu a kobaltu se rozdělují podle následujících strukturních složek. Kde je zrno WC řazeno jako hlavní karbidická složka.

- Typ f_1 – drobná nepravidelná nerekrystalizovaná zrna.
- Typ f_2 – pravidelná krystalická zrna, vzniká při slinování rekrystalizací WC. Obvykle jsou zrna větších rozměrů než u typu f_1 .
- Typ f_3 – rekrystalizovaná zrna WC podlouhlého jehlicovitého tvaru o větších rozměrech. Vznikají při špatných podmínkách slinování.
- Typ $f_1 + f_3$ – smíšená zrna nestejných velikostí a tvarů. Patří k nejčastěji vyskytující se strukturní složce.
- Fáze gama – pojící kov kobaltu s malým množstvím rozpuštěného WC.
- Fáze eta – nežádoucí fáze vytvářející podvojný karbid $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ s nízkým obsahem uhlíku.
- Grafit – volný uhlík. (7) (10)

Nežádoucí karbidy jsou hrubá zrna typu f_2 , f_3 a fáze eta nebo grafit. Neměla by se vyskytovat nerovnoměrná struktura hrubých a jemných karbidů. Celková struktura slinutých karbidů ovlivňuje fyzikální i mechanické vlastnosti materiálu. (7)

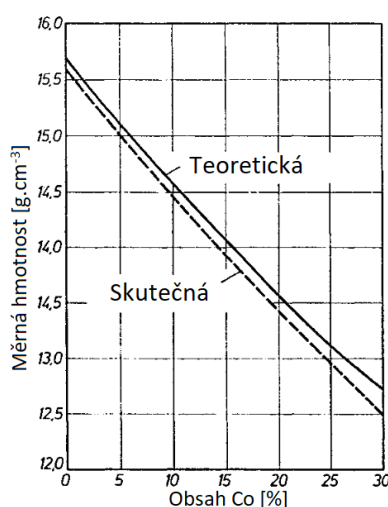
2.4. Vlastnosti SK typu WC-Co

Vlastnosti slinutých karbidů definuje chemické složení a výsledná struktura. Nedodržení ideálního obsahu uhlíku a jejich fází způsobí degradaci mechanických vlastností a řezného výkonu. Abychom docílili optimálních vlastností slinutého karbidu, musí být obsah uhlíku vždy stejný. V slinutých karbidech typu WC-Co se objevují dvě eta-fáze. První M_{12}C s konstantním složením $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ a druhá M_6C s proměnným složením od $\text{Co}_{3,2}\text{W}_{2,8}\text{C}$ do $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$. Proměnná fáze M_6C je v rovnováze s tekutou fází, ale v průběhu slinování může nukleovat a růst. Nahrazováním pojiva dochází ke zvýšení křehkosti a ke snížení efektivního příspěvku WC, který zpevňuje strukturu. Konstantní fáze M_{12}C se při ochlazování v tuhé fázi rozptýlí v matici ve formě malých zrn, která příliš nezkřehnou materiál. Vlastnosti slinutých karbidů mimo jiné závisí na velikosti zrna tvrdé fáze. Tvrdost lze ovlivnit velmi jemnou zrnitostí výchozího prášku. Nanostrukturní karbidy kombinují velkou tvrdost a vysokou houževnatost. (7) (2)

2.5. Fyzikální vlastnosti WC-Co

Měrná hmotnost

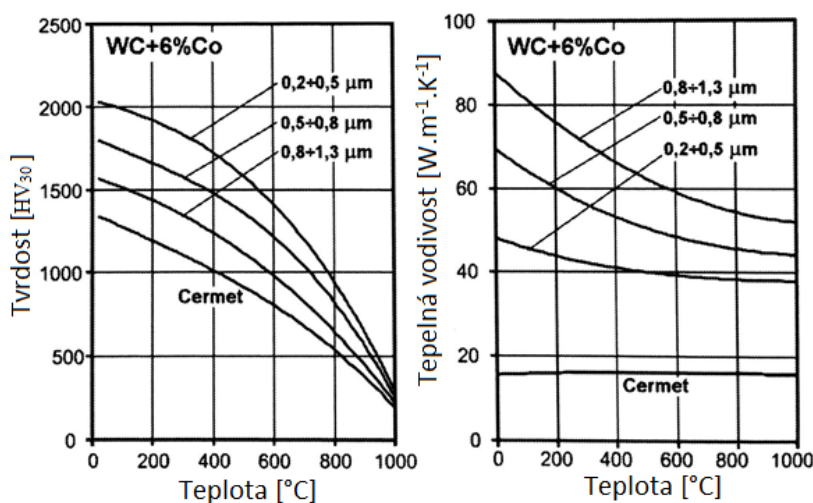
Měrná hmotnost slinutých karbidů WC-Co patří k vyšším. ($12,3 - 15,2 \text{ g.cm}^{-3}$) Je to z důvodu vysoké měrné hmotnosti karbidu wolframu, ale s vyšším obsahem kobaltu celková měrná hmotnost klesá. Obrázek 3 zobrazuje skutečnou a teoretickou měrnou hmotnost. Odchyly jsou způsobeny zbytkovou pórovitostí slinutých výrobků, které lze těžko zcela odstranit. Nežádoucí složky a přísady také snižují měrnou hmotnost. Např. přítomnost grafitu. (7)



Obrázek 3: Teoretická a skutečná měrná hmotnost (36)

Tepelná vodivost

Tepelná vodivost se u běžně využívaných karbidů pohybuje v rozmezí $50 - 105 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Obsah kobaltu má malý vliv na tepelnou vodivost. Jestliže je v pojivové fázi obsažen nikl, tak tepelná vodivost klesá. Tepelná vodivost klesá se vzrůstající teplotou. Materiály s větším zrnem vykazují vyšší hodnoty tepelné vodivosti než materiály s jemným zrnem. Výhoda materiálů s nízkou tepelnou vodivostí vnáší příznivý vliv na tepelné zatížení nástroje, a to kvůli lepšímu odvodu tepla obrobkem a ne nástrojem. Obrázek 4 graficky zobrazuje tepelnou vodivost při změně velikosti zrna. (7)



Obrázek 4: Závislosti tvrdosti a tepelné vodivosti na teplotě. (35)

Magnetické vlastnosti

Jsou určeny pojící feromagnetickou složkou kobaltu. Měřením magnetické složky ve slinutém karbidu lze měřit i přítomnost nežádoucí eta-fáze, do které přechází část pojící složky kobaltu a tím se stane nemagnetickou.

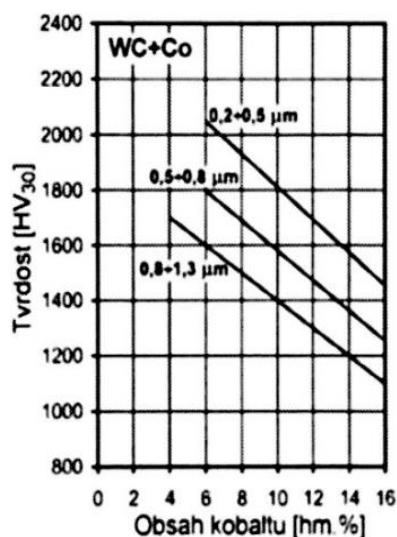
Další vlastnost, kterou lze zjistit magnetickou zkouškou, je koercitivní síla. Ta je dána stavem napjatosti kobaltové fáze, která je dána stupněm disperze. Ta je určena velikostí vrstev. Koercitivní síla roste s tenčí vrstvou. Měření velikosti této síly může být použito k zjištění velikosti karbidické fáze WC. Rozměry oblastí pojící fáze kobaltu závisí na velikosti zrn WC. S klesající zrnitostí vzrůstá koercitivní síla. Tento druh měření pro zjištění karbidické fáze je výhodné pro využití v praxi, kvůli rychlosti a neporušení slinutého karbidu. (7)

2.6. Mechanické vlastnosti

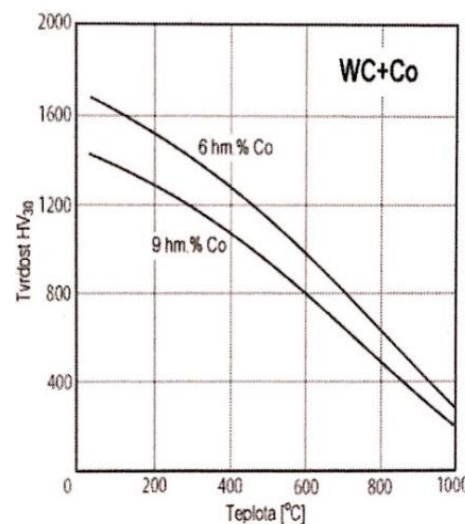
Tvrdość

Nejvyšší tvrdosti dosahují WC-Co karbidy s jemnozrnnou strukturou a s nízkým obsahem kobaltu. Obrázek 6. Tvrdość se pohybují od 1400 do 2000 HV. U karbidů, které se využívají na řezné nástroje, se sleduje tvrdost za vysokých teplot. Obrázek 5. S rostoucí teplotou tvrdost klesá, ale v porovnání slinutých karbidů s rychlořeznou ocelí jsou teploty pracovních podmínek

mnohonásobně vyšší. Karbidy mající submikrometrové a ultrajemné struktury dosahují při teplotách 700 – 800 °C velmi dobrých tvrdostí. (7) (3)



Obrázek 6: Závislost tvrdosti na velikosti zrna WC a obsahu Co. (7)



Obrázek 5: Závislost tvrdosti na teplotě. (7)

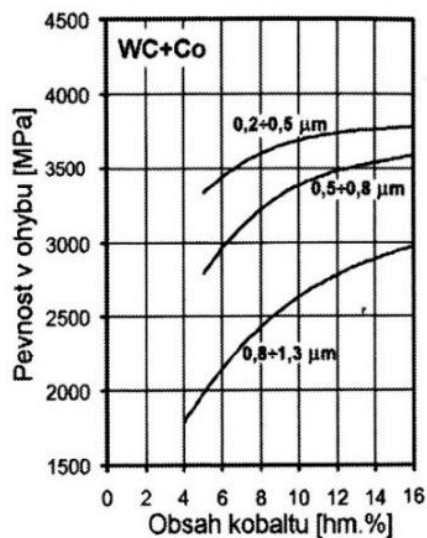
Mikrotvrdomost

Mikrotvrdoměr se využívá na malé předměty a pro velmi tenké materiály jako jsou např. fólie nebo strukturní složky materiálů. Nejčastěji se používá mikrotvrdoměr dle Vickerse, kde se využívá diamantový jehlan s velmi malým zatížením (0,005 – 1 N). Rozměry vtisku indentoru bývají menší než 100 nm, proto se pro odečítání úhlopříček využívá kvalitní optika. V porovnání makrotvrdomosti s mikrotvrdomostí jsou hodnoty mikrotvrdomosti vždy větší. Je to způsobeno elastickou deformací, která po odlehčení zmenší velikost vtisku. Tato deformace se zmenšováním velikosti vtisku zvětšuje. (11) (12)

Pevnost v ohybu

S rostoucím obsahem Co, roste pevnost v ohybu. To však platí do maximální hodnoty obsahu kobaltu, která je pro různé velikosti zrn WC odlišná. Dalším zvyšováním obsahu Co, pevnost v ohybu klesá. Podobně jako u tvrdosti se pevnost v ohybu snižuje zvyšováním teploty. Míra

snížení pevnosti v ohybu vzhledem k teplotě je závislá na velikosti zrn. Obrázek 7 zobrazuje vývoj pevnosti v ohybu při změně obsahu kobaltu. (7)



Obrázek 7: Pevnost v ohybu na obsahu Co. (7)

Lomová houževnatost K_{IC}

Je definována jako kritická hodnota součinitele intenzity napětí v okamžiku nestabilního šíření trhliny a je mírou odolnosti tělesa s definovanou trhlinou proti křehkému porušení. Hodnotu lomové houževnatosti je možné stanovit z naměřených hodnot při zkoušce tvrdosti dle Vickerse.

Lomová houževnatost roste s narůstajícím obsahem kobaltu a zvětšováním zrn WC. Po překročení teplot 500 – 700 °C začne z konstantní lomové houževnatost prudce narůstat. Únavové trhliny se hlavně šíří po hranicích zrn a ve fázovém rozhraní zrna a pojiva. U velkých jednotlivých zrn se mohou objevit i transkrystalické trhliny. Se vzrůstajícím obsahem kobaltu roste citlivost materiálu na tvoření trhlín, kvůli zvýšené hustoty rychlost šíření trhlín klesá. (7)

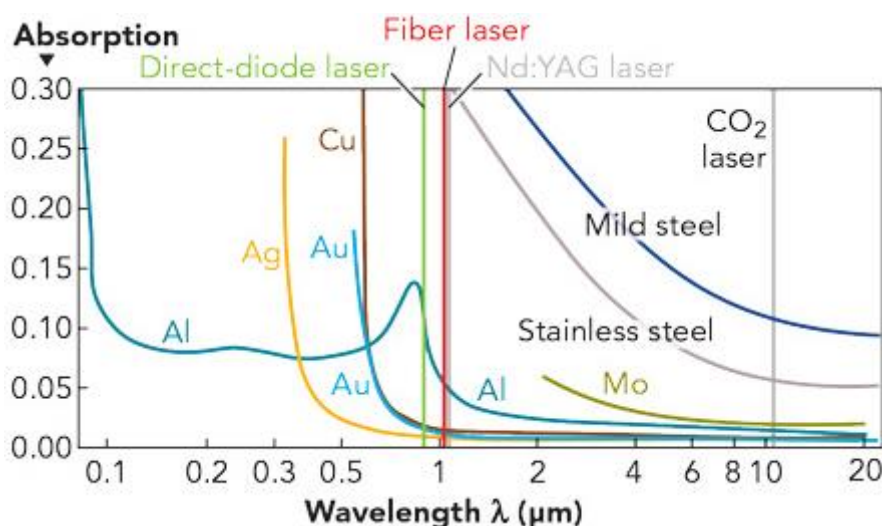
3. Laser a jeho možnosti

Široké spektrum druhů laserů a jejich modifikace způsobily, že lze laserové světlo použít v mnoha vědních oborech při různých aplikacích. Laser se stal v některých případech téměř nepostradatelným nástrojem, bez kterého by některé aplikace nebyly možné. V dnešní době je laser hojně využíván v elektrotechnice od domácího využití, až po vědecké účely. Využívá se v laserových tiskárnách, DVD přehrávačích, až po velmi přesné měřicí systémy nebo přenosy dat o vysoké rychlosti. Chemické složení prvků a látek lze laserovým svazkem detekovat pomocí změny vlnové délky. Je zjištěno, že každý prvek má svou autentickou vlnovou délku, při které se vyzáří. Podle intenzity vyzářené vlnové délky zjistíme prvek a jeho procentuální zastoupení. Dobré využití laseru je při restaurování soch, obrazů nebo nástěnných maleb. Laser dokáže odstranit z povrchu nežádoucí nečistoty v řádech jednotek mikronů a zachovat tak původní povrch bez drastického zásahu oproti klasickým metodám čištění. Díky vysoké přesnosti je laser čím dál častěji využíván v medicíně. Využívá se v dermatologii, při plastických operacích, kardiovaskulárních zákrocích a při operacích očí. Hlavní směry v průmyslové technice je v řezání přesných dílců nebo obtížně zpracovatelných materiálů jako jsou skla na mobilní displeje. Další využití je vrtání děr o malých rozměrech, kde je možné vytvořit otvory do velmi tvrdých materiálů o průměru desítek mikronů. Dvě příbuzné laserové aplikace je svařování a navařování laserem. Velkým trendem se v dnešní době stává 3D tisk, kde se drát, nebo práškový materiál pomocí laseru spéká do definovaného tvaru. Velmi širokou oblastí je povrchové zpracování laserem. Popisováním, gravírováním nebo laserovým kalením je možné dosáhnout změny povrchu mikrogeometrie a drsnosti, nebo změnit optické vlastnosti či zvýšit povrchovou tvrdost součástí. (13)

3.1. Lasery využívané ke gravírování

Gravírování pomocí laseru ovlivňuje mnoho aspektů, od druhu laserového zdroje a jeho vlnové délky až po samotné vlastnosti zpracovávaného materiálu. Podle druhu zpracovávaných materiálů se volí vhodné typy laserů, které nejlépe absorbují laserové záření. Graf 1 zobrazuje absorpci materiálů podle změny vlnové délky. CO₂ lasery emitují záření o vlnové délce 10,6 μm a jsou vhodné kvůli absorpci vlnové délky pro zpracování neželezných materiálů jako je dřevo, plast, kompozitní materiály, sklo, textil nebo papír. Zvýšením výkonu laserového CO₂ zdroje je možné zpracovávat i železné kovy. Tato kompenzace je způsobena vyrovnáním

hladiny absorpce zvýšením výkonu. Pevnolátkové lasery jsou určeny především pro zpracování kovů. Podle typu pevnolátkového laseru se jejich vlnové délky liší od 1064 – 1080 nm. Dalo by se říci, že se zmenšující se vlnovou délkou se zvyšuje absorpce u kovů. Proto je možné dobře a efektivně gravírovat materiály s II. harmonickou vlnovou délkou z 1064 nm na 532 nm. Diodové lasery, které mají vlnovou délku 880 až 1040 nm, nejsou pro gravírování vhodné a to především díky horší kvalitě svazku. Dají se nalézt aplikace gravírování diodovými lasery a to hlavně díky jejich výrazně nižší ceně. Diodové lasery jsou ve většině případů určeny spíše pro tepelné zpracování nebo svařování. (14) (13)



Graf 1: Závislost absorpce materiálů na vlnové délce záření. (15)

Velké rozdíly kvality obrobeneho materiálu jsou při použití různých délek pulzů, tím je gravírování rozděleno na odtavující nebo odpařovací. Gravírováním nanosekundovým laserem o délce pulzu (10^{-9} s) dochází k ablaci, částečnému natavení a odpaření materiálu. Způsobí tím na povrchu zvrásněný povrch plný kavit a různých vystříknutých kovových stop. U laserů s ultrakrátkými pulsy (10^{-12} – 10^{-15} s) nedochází k natavení materiálu, ale pouze k odpaření. V takovém případě lze hovořit o studené ablaci, která se vyznačuje vysokou čistotou a kvalitou obrobene plochy. (13)

3.2. Rozdílné technologie ns a ps laserů

Jak již bylo řečeno, tak existuje velký počet druhů laserů, které jsou svým způsobem unikátní jak různými vlnovými délkami, výkony, konstrukcí a délkami pulzů. Délky pulzů se v laserových technologiích dělí na dlouhé pulzy a ultrakrátké. Krátké pulzy laseru se řadí od ($10^3 - 10^9$ s) to jsou milisekundové až nanosekundové lasery. Ultrakrátké lasery jsou s délkami pulzů ($10^{-12} - 10^{-15}$ s), což představují pikosekundové a femtosekundové lasery. Obě tyto skupiny laserů mají v některých směrech rozdílnou konstrukci kvůli těmto délkám pulzu. Např. nanosekundový laser s dlouhými pulzy využívá pro dělení kadence pulzů Q-spínání a pikosekundový laser s krátkými pulzy využívá technologii mode locking.

3.2.1. Q – spínání

Q-spínání je technika pro získání krátkých laserových pulzů. Především se používá u pevnolátkových laserů pro generaci nanosekundových pulzů s vysokou energií a špičkovým výkonem. Prvek, který ovlivňuje optický rezonátor, je Q – faktor, ten zabraňuje brzkou oscilaci a řídí stimulovanou emisi. Při buzení aktivního prostředí v rezonátoru dochází při dosažení maximálních hodnot k inverzi populace. Inverze populace je velmi rychle vyčerpána, kde při určitém časovém úseku dochází k vysokému výstupnímu výkonu. Vlastnosti pulzu závisí na rychlosti závěrky, druhu aktivního prostředí a rychlosti buzení. Q – spínače se rozdělují na aktivní a pasivní. Podle principu činnosti aktivního spínače se rozdělují na opticko – mechanické spínače, kde se délka pulzu dělí rotujícím diskem v rezonátoru, nebo rotujícím hranolem. Další z principů aktivních Q – spínačů jsou na způsob elektrooptických a akustooptických vlastností. Pasivní snímače jsou tzv. saturované absorbéry, které jsou založeny na kumulaci a intenzitě dopadajícího záření a její absorpci. Nevýhoda jsou v neurčité době sepnutí spínače a absorpční ztráty. (16), (17), (18)

3.2.2. Mode Locking

Je skupina metod, která generuje impulzy s pikosekundovou nebo femtosekundovou dobou trvání. Laserový generátor obsahuje aktivní prvek, jako je optický modulátor, nebo nelineární pasivní prvek. Ten vzniká nasycením absorbéru a způsobuje vznik ultrarychlého pulzu, který cirkuluje v laserovém rezonátoru. V ustáleném stavu jsou parametry cirkulujících impulzů téměř v rovnováze. Vždy když pulz zasáhne výstupní zrcátko, tak se z laseru opustí použitelný

pulz. Za předpokladu jednoho oběhu pulzu se perioda rovná opakování pulzů s časovým zpožděním rezonátoru. Obvyklé zpoždění trvá několik nanosekund, ale délka pulzu je mnohem nižší. Typicky mezi 30 ps až 30 fs, v extrémních případech i méně. (19), (20)

3.2.3. Blokování v aktivní režimu

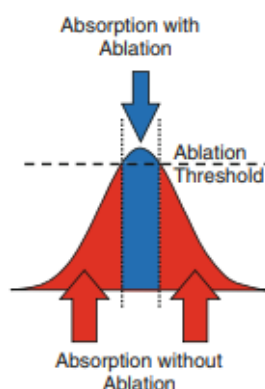
Zahrnuje pravidelnou modulaci ztrát rezonátoru nebo fázových přeměn, které vznikají několika způsoby. Pomocí akustického nebo elektrooptického modulátoru, integrovaného nebo polovodičovým modulátorem elektroabsorpce. Pokud je modulace synchronizovaná, může to vést ke generování ultrakrátkých pulzů, obvykle s trváním pikosekund. Ve většině případů se délka pulzu zkracuje přes modulátor. (19) (20)

3.2.4. Blokování pasivního režimu

Umožňuje generovat femtosekundové pulzy pomocí absorbéru, který je poháněný již krátkými pulzy a tím může modulovat ztráty rezonátoru mnohem rychleji než elektronický modulátor. Čím kratší je pulz, tím rychlejší je modulace za předpokladu, že absorbér má dostatečně krátkou dobu zotavení. Délka pulzu může být i mnohem menší, než je doba regenerace absorbéru. Ale v některých případech není dosaženo spolehlivého zamykání samočinného režimu. (19) (20)

3.3. Ablace

Je jednou z nejdůležitějších fyzikálních vlastností. Jedná se o odpařování pevné látky pomocí intenzivního ohřátí. Dochází k vylučování složek pevné látky a k tvorbě nanoklávů a nanostruktur. Ablace materiálu nedochází při jakémkoli působení energetického záření. Je zapotřebí dosáhnout určitého prahového energetického toku, který materiál odstraní. Velikost prahového energetického toku se mění absorpčním mechanismem, mikrostrukturou a vlastnostmi materiálu, povrchovou morfologií nebo přítomností vad. Laserovou ablaci ovlivňují mnohé laserové parametry, jako je vlnová délka, nebo délka pulzu. Typické hodnoty prahových energií v pulzu pro kovy jsou mezi 1 až 10 J/cm². Pro anorganické materiály 0,5 až 2 J/cm² a pro organické materiály v rozmezí 0,1 až 1 J/cm². Při použití více pulzů pro laserovou ablaci mohou ablační prahy poklesnout kvůli inkubačnímu účinku. (21) (22)



Obrázek 8: Rozdělení absorpce paprsku. (23)

Obrázek zobrazuje rozdělení energie pulzu laserového paprsku, při které dochází k ablaci materiálu. Při nízké energetické hodnotě energie pulzu dochází k ablaci v důsledku fototerapeutických mechanismů, při kterých dochází k odpaření a sublimaci materiálu. Při vysokých energiích v pulzu dochází k heterogenní nukleaci par a varu. Pokud je ohřev materiálu příliš rychlý, tak může dojít k explozivnímu varu kvůli rychlé homogenní nukleaci a expanzi par. Při vysokých intenzitách laseru může nastat díky elektrickému poli laserového impulsu k překročení prahové hodnoty hustoty energie, a tak se ablovaný materiál přemění na plazmu. (21)

3.3.1. Laserová ablace nanosekundovým laserem

Při nanosekundové laserové ablaci dochází k fotochemickému procesu, který způsobuje vylučování materiálu a tvorbu nanočástic. U nízké hustoty energie je hloubka, díky které bude energie účinně absorbována dána hloubkou tepelné penetrace. V tepelné penetraci převažuje v ablačním procesu tepelné odpařování než vypařování. Je to způsobeno prahovými hodnotami hustoty energie v pulzu. Když se povrchová hodnota rovná termodynamickému kritickému bodu, objevuje se fáze výbuchu, kde se látky mění z přehřáté kapaliny na směs par a kapiček kapaliny. Hustá plazma s vysokou teplotou a vysokým tlakem vzniká na konci laserového impulsu, díky kterému se roztavené kapičky chrlí z roztavené lázně nadzvukovou rychlostí. Vyloučená kapalina se opět zpevní v tenké vrstvě, čímž změní topografii na okraji a v okolních oblastech ablatovaného povrchu. (21)

3.3.2. Laserová ablace pikosekundovým laserem

Odstranění materiálu během velmi krátké laserové ablace probíhá především mechanismem CPSS (Critical Point Separation). Během tohoto procesu nedochází ke znatelné změně hustoty materiálu, dokud nedosáhne maximální teploty. Po dosažení maximální teploty začne hustota klesat a tím se u buněk odstartuje proces ablace materiálu. To je způsobeno expanzí buněk, které vstoupily do nestabilní zóny v blízkosti kritického bodu, zatímco se hmota pod ní zkondenzovala zpět na cíl. Během laserové ablace je energie laseru nejprve absorbována volnými elektrony v kovu a díky elektronové fotonové vazbě se tato energie přenesla na mřížku. Na povrchu dochází k přímému přechodu tuhých par nebo tuhých plazmatů a pod touto vrstvou se nachází kapalná fáze. (21), (24)

3.3.3. Hodnocení ablačního prahu

Aby byla dosažena trvalá změna v mikrostruktuře mikroobráběného materiálu, je zapotřebí dosáhnout prahové hustoty energie F_{th} , neboli prahové ablace. Pokud je při mikroobrábě použita velikost hustoty energie F , která je těsně nad prahovou hodnotou, dochází pouze k mírné ablaci. Zpravidla se mírnou ablací vytváří precizní a čistý materiálový úběr. Materiálový úběr se zvyšováním hustoty energie postupně zvětšuje až do určitého bodu zlomu, od kterého se zvyšováním hustoty energie ablace mnohonásobně zvětší. Následujícím vztahem je možné pomocí prahové hustoty energie zjistit průměr ablované stopy. (25)

$$D^2 = 2w_0^2 \cdot \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right)$$

Pro zjištění povrchových vlastností mikroobráběného materiálu je zapotřebí zjistit chování materiálu při různých energiích v pulzech E_p . Rozsahy energií v pulsu se volí podle materiálu a podle laserového zdroje. Zpravidla se využívá $1 \mu\text{J} < E_p < 10 \mu\text{J}$. Energie v pulzu je možné spočítat podílem výkonu laserového zdroje s opakovací frekvencí. (25)

$$E_p = \frac{P}{f}$$

Prahová energie v pulzu E_{th} se získá z vynesení grafu závislosti průměru ablační stopy na energii v pulzu. Kde prahový bod energie pulzu leží ve zlomu vynesené přímky, která značí zlom pomalého a rychlého ablačního režimu.

V poslední řadě je nutné získat rádius spotu w_0 při intenzitě $1/e^2$, kde k je směrnice přímky. (25)

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{2}}$$

Ablační práh F_{th} se určí ze vztahu. (25)

$$F_{th} = \frac{E_{th}}{\pi w_0^2}$$

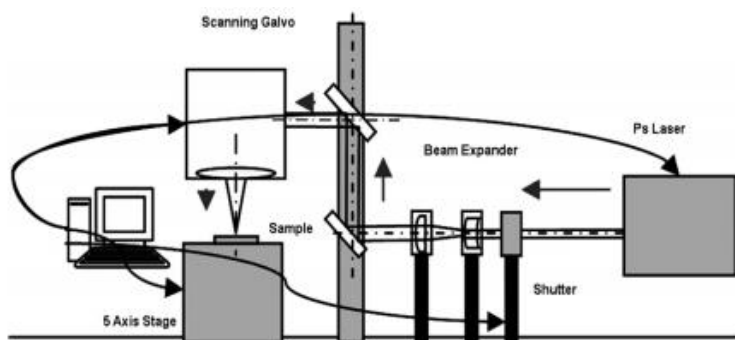
3.4. Mikroobrábění a gravírování laserem

Laserový paprsek je využíván jako univerzální a bezkontaktní nástroj pro odebrání materiálu. Pojmy mikroobrábění a gravírování jsou v podstatě totožné. Liší se pouze v použití laserového svazku v jednotlivých aplikacích pro dané materiály. Gravírování se nejčastěji využívá na výrobu nápisů, log, ornamentů nebo čárových kódů, kde je důležitý spíše vizuální faktor. Při mikroobrábění dochází k definovanému odstranění velmi malého objemu materiálu, který je ovlivněn parametry laseru. Výhoda použití strategie mikroobrábění je v přesném nastavení hloubky odebraného materiálu, přesnosti a drsnosti povrchu. Díky těmto výhodám se používá v oblastech, kde již klasické konvenční mikroobrábění nestačí k dokončení výrobku z důvodu tvarové složitosti nebo nemožnosti dokončení jiným způsobem. Využití nastává např. při úpravě velmi tvrdých materiálů, jako jsou slinuté karbidy, kubický nitrid bóru nebo diamant, na které se vytváří dokončovací struktury, nebo utvařeče třísek. (26)

3.5. Laserový systém pro mikroobrábění

Typický laserový systém je zobrazen na Obrázku 9. Skládá se z laserového pulzního zdroje a programovatelného galvo-skeneru pro přesné vedení paprsku vysokou rychlostí. Laserový paprsek je přepínán rychlou mechanicko-galvanickou uzávěrkou, která pozastaví průchod paprsku k materiálu. Světelný paprsek je veden přes čtvrtvlnovou destičku, ze které se získá kruhově polarizovaný laserový paprsek mířící na materiál tak, aby bylo možné získat stejné absorpční vlastnosti v celém průřezu svazku. Celková pulzní energie je oslabena rotující

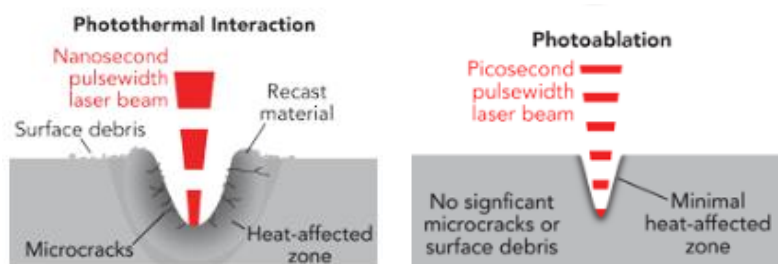
půlvlnovou destičkou, za kterou je lineární polarizátor. Laserový paprsek prochází kruhovým otvorem, který je umístěn před zaostřovacím objektivem. Tím se nízká intenzita emitované části laserového paprsku rovnoměrně rozloží do celého svazku, který jako zaostřený interaguje na povrchu materiálu. (21)



Obrázek 9: Schéma ps – laseru (21)

3.6. Mikroobrábění ns - laserem

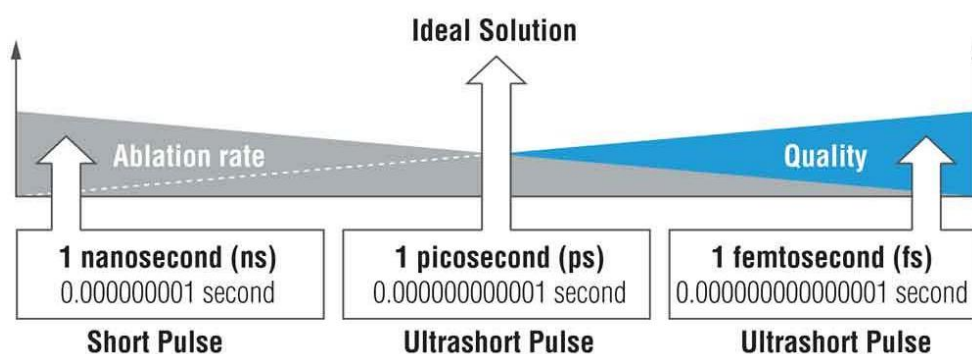
Nanosekundové mikroobrábění se široce používá v celé řadě průmyslových odvětví. Nevýhoda nanosekundových pulzů nastává při vyšších rychlostech odstraňování materiálu, kde dochází k tepelnému poškození povrchu. Mechanismus odstranění materiálu nastává absorpcí laserové energie, která vytvoří na povrchu taveninu. Nastává částečné odpaření materiálu a díky vysokému působení tlaku je část taveniny rozstříknuta na povrchu nebo zůstává uvnitř v obráběné části, kde vytvoří sraženiny a opět ztuhne. Výhoda nanosekundového mikroobrábění je v rychlosti odstraňování materiálu a v ceně laserového zdroje. Nevýhoda je v jakosti obrobené plochy, která je plná sraženin a rozstříku. Obrázek 10 zobrazuje, jak délky pulzů působí na obráběný materiál. (27)



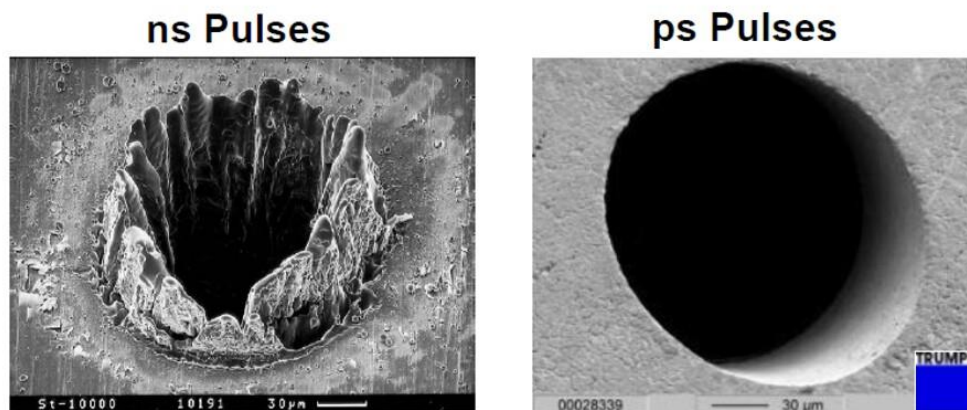
Obrázek 10: Srovnání fototermické interakce vs. fotoablace (27)

3.7. Mikroobrábění ps - laserem

Mikroobrábění pikosekundovým laserem spočívá v atomizaci základního materiálu. Díky působení ultrakrátkého pulzu se tento způsob obrábění považuje za studený, protože vzniká minimální tepelně ovlivněná oblast. Dosažením velmi vysokých výkonů (megawatty i více) a vysoké frekvenci dochází k vícečetné absorpci, která excituje elektrony v materiálu a přímo naruší atomové vazby. Šířka pulzu je kratší než rychlost tepelné difúze v obrobeném materiálu, proto je zbytkové teplo z velké části odstraněno atomizovaným materiálem dříve, než se vytvoří tepelně ovlivněná oblast. Díky tomu, že se nevytváří tepelně ovlivněná oblast, lze pikosekundový laser využít na široké spektrum materiálů, včetně transparentních materiálů, jako jsou skla nebo některé polymery. Obrázek 11 porovnává laserové délky pulzů z hlediska vysoké přesnosti a účinnosti, kde vychází, že jsou nejlepší pikosekundové lasery před nanosekundovými a femtosekundovými lasery. Obrázek 12 zobrazuje kvalitu děr vyrobených ns a ps laserem. (28)



Obrázek 11: Porovnání velikosti ablace a kvality s odlišnými délkami pulzů. (29)



Obrázek 12: Porovnání kvality ns a ps pulzů. (30)

4. Experimentální část

Experimentální práce byla zaměřena na laserové mikroobrábění vybraných slinutých karbidů. Z několika běžných nástrojových slinutých karbidů byly vybrány tři odlišné vzorky, které se lišily chemickým složením, velikostí zrn a tvrdostí. Experiment byl vytvořen na diodami buzeném pulzním pevnolátkovém laseru Nd:YAG o výstupním výkonu 50 W, vlnové délce 1064 nm s délkou pulzu 120 ns. Maximální možné nastavení frekvence a rychlosti je 50 kHz a $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Experimenty spočívaly v ověření vlivu nastavovaných parametrů laseru pro efektivní úběr materiálu v závislosti na chemickém složení a velikosti zrn.

Před aplikací laserového paprsku byla provedena základní metalografická analýza všech sledovaných slinutých karbidů. Pro analýzu takto tvrdých materiálů se vytvářejí klasické metalografické výbrusy, které musí být po vyleštění naleptány tak, aby se odkryla struktura materiálu. K sledování struktury byly využity nejprve světelné a poté elektronové mikroskopy, které lépe zvýraznily okraje jednotlivých zrn. Výhoda použití elektronového mikroskopu je i v možnosti využití EDX analýzy, která zjistí zastoupené prvky v materiálu a jejich procentuální chemické složení. Nejčastější test je zjišťování tvrdosti materiálu. Pro takto tvrdé materiály byla použita metoda dle Vickerse se zatížením 300 N. Ze zjištěných hodnot tvrdostí byly změřeny délky trhlin od vtisku indentoru, z kterých se pomocí vztahu dle Palmquista vypočte lomová houževnatost.

4.1. Experimentální zařízení

4.1.1. Laser

Pro laserové mikroobrábění byl použit pevnolátkový laser LD50s od firmy MediCom. Obrázek 13. Jeho technické parametry jsou uvedeny v Tabulce 2. Z důvodu stáří laserového zařízení již není maximální uvedený výkon totožný s výchozími parametry. Je to způsobeno staršími diodami, které svým stářím ztrácejí výkon. Podle posledního měření v roce 2018 byl při nastavení maximálního výkonu 50 W a frekvenci 2000 Hz reálný výkon 7,7 W. Reálný výkon se s vyšší frekvencí stále zvyšuje až do svého maxima.



Obrázek 13: Laser LD50s

Tabulka 2: Parametry laseru LD50s

<i>Výkon</i>	50 W
<i>Vlnová délka</i>	1064 nm
<i>Délka pulzů</i>	100 ns
<i>Frekvence</i>	50 kHz
<i>Rychlost</i>	3000 mm/s
<i>Spot paprsku</i>	0,1 mm

4.1.2. Měření odebraného materiálu

Měření hloubky úběru bylo prováděno na světelném mikroskopu. Obrázek 14. Princip měření je v nasnímání několika rovin v ose z, které se následně v programu NIS element zpracují do jednoho obrázku. Pomocí funkce EDF Z – profil se snímek v libovolném místě proloží řezem, z kterého je možné změřit odebranou vrstvu a drsnost Rz. Vzorek je tímto způsobem třikrát proměřen a z naměřených hodnot se vypočte odebraná vrstva. Mikroskop je složen z čočky od společnosti Navitar a digitální kamery Jenoptic – ProgRes CT3. Parametry mikroskopu jsou uvedeny v Tabulce 3.

Tabulka 3: Parametry optického mikroskopu. (31)

<i>Dynamický rozsah zvětšení</i>	0,58x – 7,0x
<i>Zorné pole čočky</i>	0,006 – 85,71 mm
<i>Pracovní vzdálenost čočky</i>	32 – 341 mm
<i>Rozlišení kamery</i>	2 Mpix
<i>Velikost senzoru</i>	1/2“
<i>Velikost pixelu</i>	3,2 x 3,2 μm
<i>Snímací frekvence</i>	10 fps



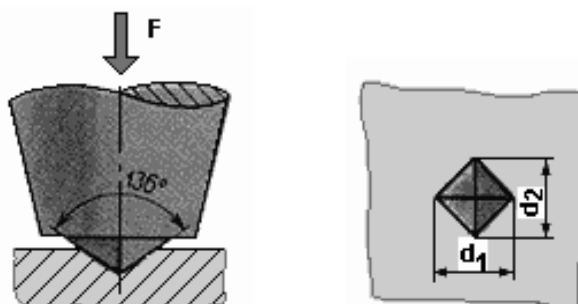
Obrázek 14: Optický mikroskop

4.1.3. Měření tvrdosti

Tvrdość byla vyhodnocována zkouškou dle Vickerse podle normy ČSN EN ISO 6507-1 (420374). Obrázek 15 zobrazuje použité zařízení pro měření tvrdosti. Jako zkušební indentor je v tomto případě čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Bylo provedeno standardní měření se zatížením 300 N a dobou výdrže vtisku 10 – 15 s. Obrázek 16 popisuje průběh měření a vyhodnocení vtisku indentoru.



Obrázek 15: Tvrdoměr



Obrázek 16: Schéma měření tvrdosti podle Vickerse (34)

4.1.4. Metalografická studie

Nejprve musely být vzorky nařezány pilou v požadovaných rovinách zkoumání. Obrázek 17. Řezání však muselo probíhat tak, aby nedošlo k velkému tepelnému ovlivnění vzorku.

Broušení a leštění vzorků bylo prováděno na metalografických bruskách Obrázek 18. Nejprve se vzorky ze slinutého karbidu zkoušeli brousit na klasických brusných papírech. To bylo kvůli vysoké tvrdosti vzorku neefektivní. Proto se přešlo na speciální brusný kotouč s diamantovými částicemi, který dokázal vzorky bez problému vybrousit. Leštění probíhalo na leštícím plátně v kombinaci s 3 µm silikou, která vzorek vyleštila do zrcadlového lesku.

Posledním krokem úpravy před samotným pozorováním velikosti hranic zrn je leptání. Podle literatury by se měly slinuté karbidy leptat lučavkou královskou $\text{HNO}_3+3 \text{HCl}$, nebo jinými silně žíravými kyselinami. Kvůli bezpečnosti se použilo standardní leptadlo 4 % roztoku kyseliny dusičné v etanolu. V našem případě byly vzorky leptány několik desítek minut, aby se odkryla struktura vzorků.

Po ne úplném naleptání vzorků se zvolila možnost pozorovat hranice zrn elektronovým mikroskopem Obrázek 19. Toto pozorování má výhodu mnoha zobrazovacích módů, které nejasné hranice dovedou zvýraznit. Výhoda elektronových mikroskopů je v možnosti maximálního přiblížení až 1 000 000x zatímco u optických mikroskopů je maximální zvětšení 2 000x. Další z výhod elektronových mikroskopů je možnost zjistit spektrální mapu prvků, která se nachází ve zkoumaném materiálu.



Obrázek 17: Metalografická pila. (33)



Obrázek 18: Metalografická bruska. (33)



Obrázek 19: Elektronový mikroskop

5. Experimentální materiály

K dispozici bylo šest odlišných druhů vyměnitelných řezných destiček ze slinutého karbidu od třech různých výrobců, na kterých byla provedena metalografická pozorování a zkoušky tvrdosti. Obrázek 20. Na základě zjištěných parametrů jednotlivých karbidů byly vybrány tři navzájem odlišné materiály. Na další experimentální testování byly vybrány vzorky od společností SECO, Dormer Pramet a Tungaloy.



Obrázek 20: Metalografické vzorky slinutých karbidů

5.1. SECO

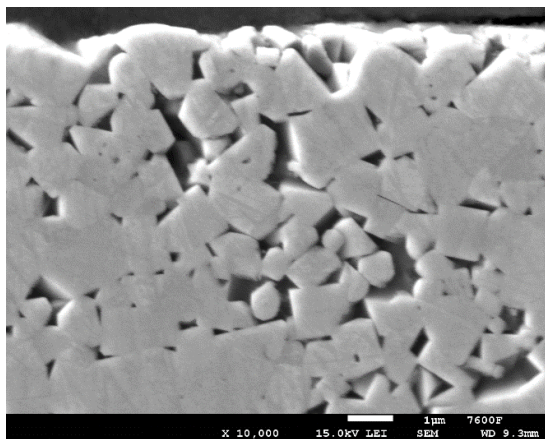
Použitý slinutý karbid od firmy SECO HX je nejdéle vyráběná vyměnitelná břitová destička z vybrané trojice. Z toho také vyplývají výsledky z metalografických zkoušek. V dnešní době je snaha o co nejmenší zrnitost karbidů kvůli vyšší tvrdosti a tím i odolnosti v řezném procesu. V tomto případě byla naměřena nejmenší tvrdost 1571 HV. Lze tedy předpokládat větší karbidická zrna než u dalších testovaných materiálů. Obrázek 21 zobrazuje vyleštěný slinutý karbid od firmy SECO.



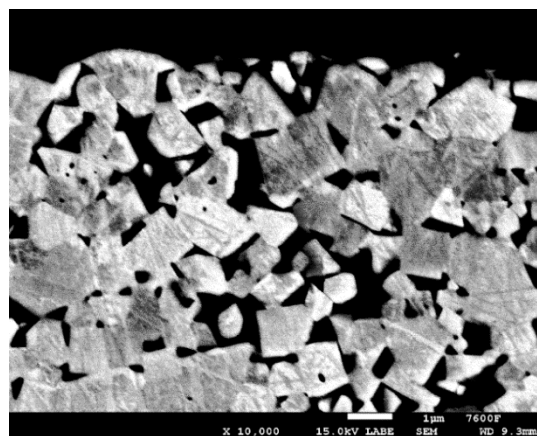
Obrázek 21: SECO - vyleštěný stav

5.1.1. SECO - povrch

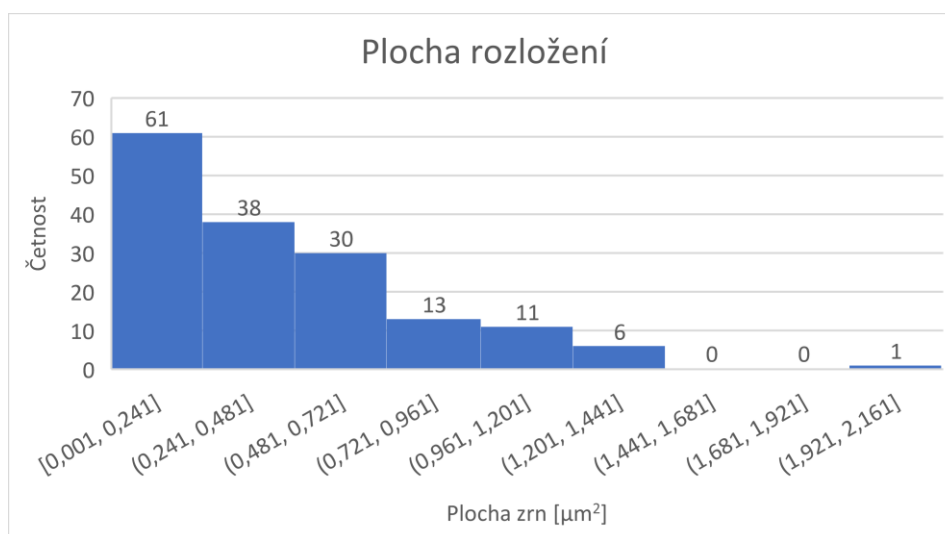
Z vytvořených fotografií na elektronovém mikroskopu Obrázek 23 následovalo prahování karbidických zrn jak povrchu, tak i jádra. Bylo zjištěno, že směrem z jádra k povrchu je velikost zrn gradientní. Na povrchu byla zjištěna průměrná plocha zrn $0,45 \mu\text{m}^2$ s průměrnou kruhovitostí 0,537, což představuje spíše eliptický tvar. Kruhovitost byla hodnoceno podle normy ČSN EN 10247, která řeší tvarový faktor. Zastoupená plocha karbidických zrn je z celkové plochy $115,95 \mu\text{m}^2$ zaplněna v ploše $71,148 \mu\text{m}^2$ tj. 61 % z celkové plochy. Zbýlých 39 % představují mezery mezi jednotlivými zrny, které jsou patrné na Obrázku 22.



Obrázek 22: SECO – Povrch leptaný stav.
Clona LEI



Obrázek 23: SECO - Povrch leptaný stav.
10 000x zvětšeno.

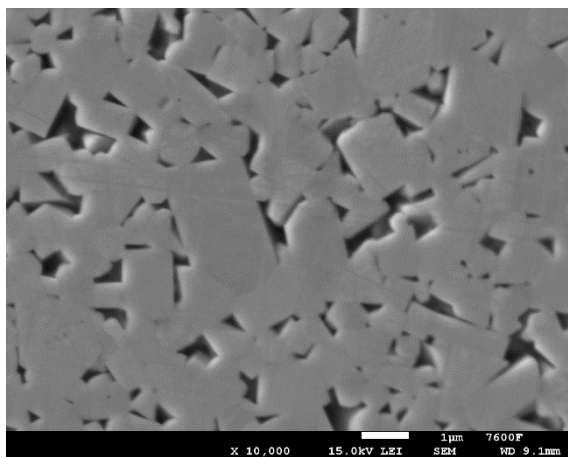


Graf 2: Plocha rozložení karbidických zrn – SECO

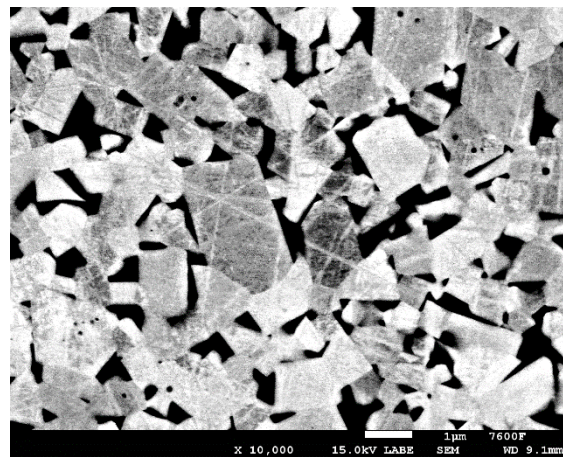
Graf 2 zobrazuje celkové rozložení karbidických zrn. Největší zastoupení malých karbidických zrn bylo v intervalu plochy 0,001 – 0,241 μm^2 v počtu šedesáti jedné. Četnost zrn se zvětšováním plochy zrn zmenšovala. Zastoupení větších zrn od plochy 0,961 – 2,161 μm^2 bylo v celkové ploše osmnáct.

5.1.2. SECO - jádro

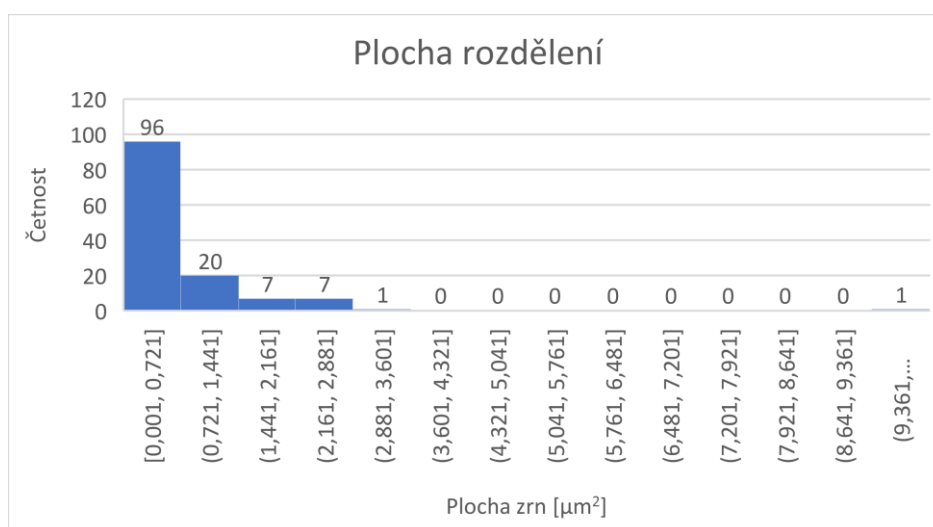
Stejně tak jako byl testován povrch vyměnitelné břitové destičky, tak bylo testováno i jádro. Bylo zjištěno, že velikost zrn se směrem od povrchu k jádru zvětšovalo. Z toho vyplývají i zjištěné hodnoty jako je celková plocha zrn. Vypočtená průměrná plocha zrn je 0,67 μm^2 a kruhovitost je 0,571. To představuje podobné tvary karbidických zrn, jako na povrchu. Na Obrázku 25 je vidět struktura jednotlivých zrn v jádře.



Obrázek 24: SECO - Jádro leptaný stav. Clona LEI



Obrázek 25: SECO - Jádro leptaný stav. 10 000x zvětšeno



Graf 3: SECO - Velikost karbidických zrn v jádře.

Z celkové zkoumané plochy o velikosti 117,99 μm^2 jsou zrna zastoupena na ploše 88,22 μm^2 tj. 75 %. Zbýlých 25 % je stejně jako v předešlém případě znázorněn výdutěmi z nedokonalého slinování, které jsou patrné na Obrázku 24.

Největší zastoupení karbidických zrn o počtu devadesáti šesti bylo v intervalu plochy 0,001 – 0,721 μm^2 . V následujícím intervalu plochy 0,721 – 1,441 μm^2 byl rapidní pokles četnosti, a to na pouhých dvacet zrn. Přibližně 9,5 μm^2 mělo plochu jedno velké zrno, které je patrné v Grafu 3. V porovnání jádra s povrchem, je velikost zrn na povrchu rozdělena do menších intervalů karbidických zrn než v jádře.

5.1.3. SECO – EDX analýza

Pomocí elektronového mikroskopu bylo dále zjišťováno procentuální zastoupení chemických prvků. Z důvodu několika faktorů, jako je např. zalití vzorků do uhlíkového substrátu, mohou procentuální zastoupení obsahovat chyby. Podle analýzy karbidu se jedná o jednodobý karbid skupiny K, kde jsou zastoupeny jen základní prvky, jako je wolfram, uhlík a jako pojivo kobalt. V Tabulce 4 je zobrazeno procentuální složení prvků v jádře a na povrchu.

Tabulka 4: SECO - Procentuální zastoupení prvků.

WC		W		C		Co	
Jádro	Povrch	Jádro	Povrch	Jádro	Povrch	Jádro	Povrch
91,37	92,02	74,59	72,8	16,78	19,23	8,63	7,98

5.2. Dormer Pramet 415

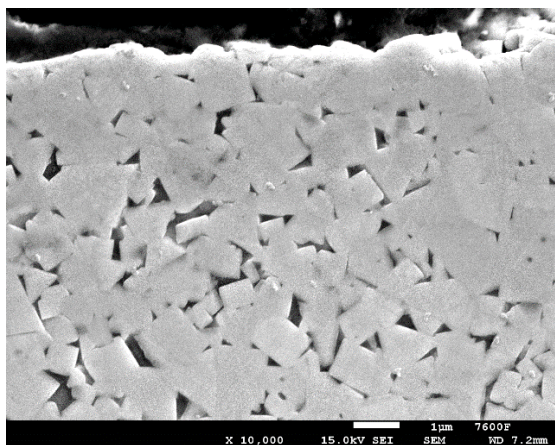
Druhý z testovaných slinutých karbidů byl od společnosti Dormer Pramet s označením 415. Ten byl podroben stejnými materiálovými zkouškami jako předešlý materiál. V první řadě byla měřena tvrdost vzorků, kde byla zjištěna tvrdost 1670 HV. Tedy téměř o 100 HV více než slinutý karbid od společnosti SECO. S vyšší tvrdostí by se dalo předpokládat, že bude mít tento slinutý karbid menší karbidická zrna a bude mít odlišné procentuální chemické složení. Obrázek 26 zobrazuje vyleštěný vzorek neleptaného stavu.



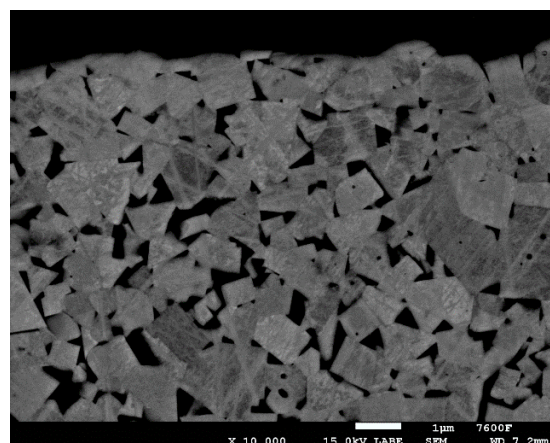
Obrázek 26: Dormer Pramet 415 - vyleštěný stav

5.2.1. Dormer Pramet 415 - povrch

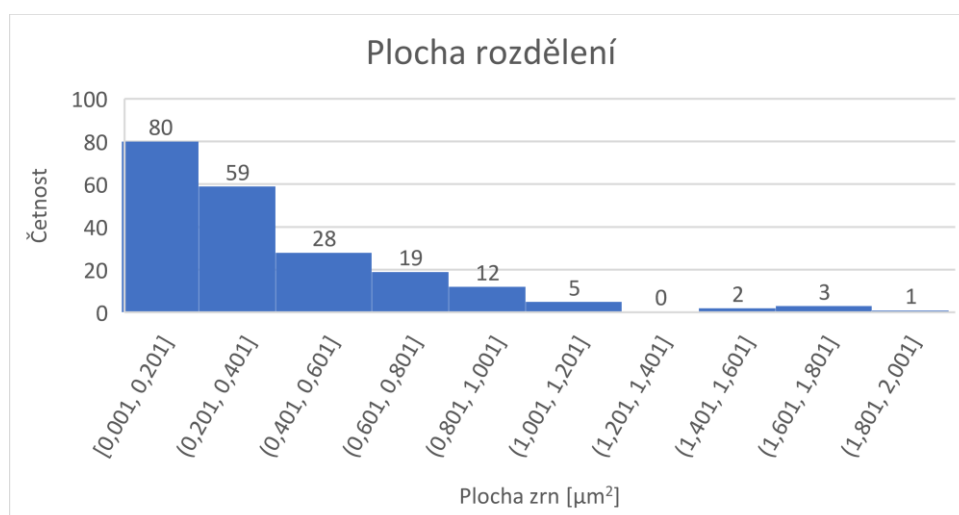
Z vytvořených elektronových fotek Obrázek 28, byly jednotlivá zrna naprahována tak, aby se zjistila průměrná plocha zrn a jejich tvar. Bylo zjištěno, že průměrná plocha zrn je $0,376 \mu\text{m}^2$ a průměrná kruhovitost je 0,551. Zrna zaujímají celkovou plochu $78,558 \mu\text{m}^2$. To z měřené plochy $111,719 \mu\text{m}^2$ činí zastoupení zrn ze 70 %. Zbýlých 30 % jsou dutiny mezi zrny, které nebyly dokonale slinovány. Dutiny po slinování jsou patrné na Obrázku 27.



Obrázek 27: Dormer Pramet – Povrch, leptaný stav. Clona LEI



Obrázek 28: Dormer Pramet – Povrch, leptaný stav.

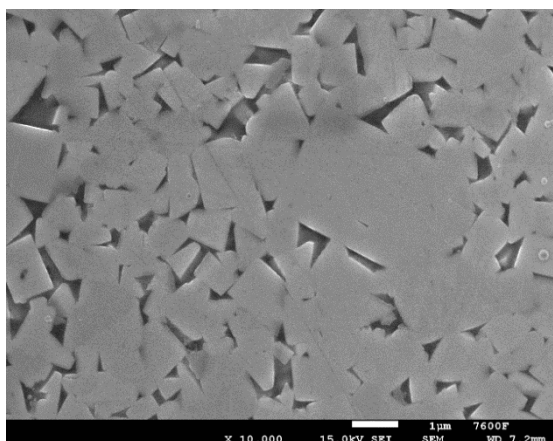


Graf 4: Dormer Pramet - Plošné rozdělení karbidických zrn.

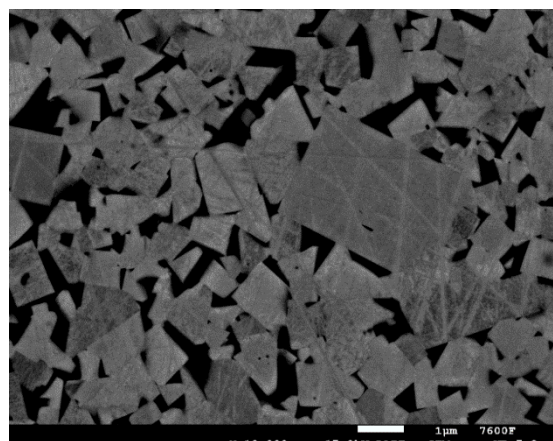
V Grafu 4 je vidět plošné rozdělení karbidických zrn, kde největší zastoupení je u nejmenších rozměrů. V intervalu plochy 0,001 – 0,201 μm^2 jich je přítomno na osmdesát zrn. V intervalu od 0,201 – 0,401 μm^2 jich je ještě padesát devět. Z toho vyplývá, že jde o jemnější strukturu než v předešlém případě u vzorku SECO. U vzorku SECO bylo ve stejném intervalu plochy do 0,4 μm^2 celkem zastoupeno devadesát devět zrn. Dormer Pramet 415 má celkový počet zrn o čtyřicet více, celkem sto třicet devět. Velká plošná zrna byla v intervalu 1,401 – 2,001 μm^2 pouze v pěti případech.

5.2.2. Dormer Pramet 415 – jádro

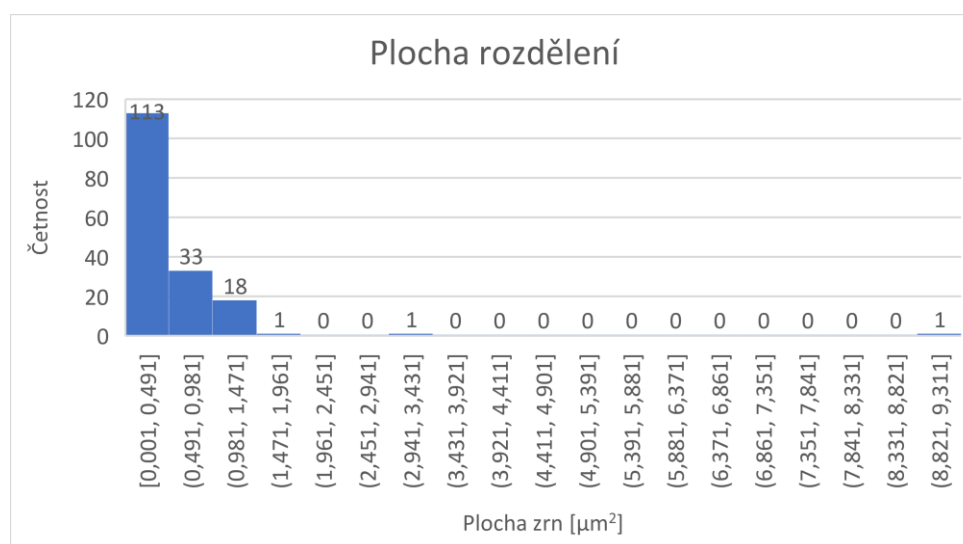
Jádro zkoumaného slinutého karbidu mělo větší zrna v porovnání s povrchem. Obrázek 30. Jako v předešlém případě je to způsobeno slinováním. V jádře působí na zrna menší napětí a tím zrna dostávají možnost více růst. Prahování vzorku jádra ukázalo, že průměrná plocha zrn je 0,5 μm^2 a kruhovitosť 0,591. To je v porovnání s povrchem plocha zrn o 33 % větší. Z celkové naprahované plochy 107,971 μm^2 jsou zrna obsažena pouze v 84,032 μm^2 . To znamená, že 78 % je jádro zastoupeno zrny a zbylých 22 % dutinami. Obrázek 29.



Obrázek 29: Dormer Pramet - Jádru. Clona LEI



Obrázek 30: Dormer Pramet - Jádru leptaného stavu.



Graf 5: Dormer Pramet – Jádru. Rozdělení četnosti podle velikosti karbidických zrn.

Plocha zrn se v porovnání s povrchem lišila pouze průměrnou hodnotou. Četnost karbidických zrn v intervalu 0,001 – 0,491 bylo sto třináct. Na rozdíl od povrchu bylo v jádře o deset karbidických zrn méně. Větší zrna se objevila jen ve dvou případech. První v intervalu 2,941 – 3,921 μm^2 a druhý v intervalu 8,821 – 9,311 μm^2 . Všechny hodnoty počtů zrn na zkoumané ploše jsou v Grafu 5.

5.2.3. Dormer Pramet 415 – EDX analýza

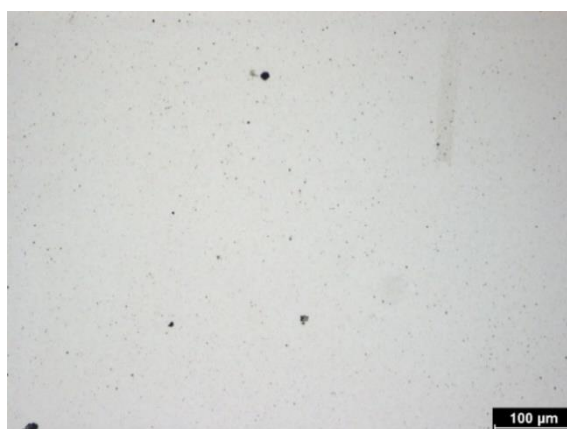
EDX analýza odhalila procentuální chemické složení jednotlivých prvků. Tabulka 5. Stejně jako u vzorku SECO se musí počítat s nepřesností. Ve vzorku byly zjištěny pouze základní karbidické prvky jako je wolfram, uhlík a pojivo kobaltu. V tomto chemickém zastoupení se jedná o jednodobový karbid s označením K. V tabulce je zobrazeno procentuální chemické složení tohoto vzorku.

Tabulka 5: Dormet Pramet 415 – Procentuální chemické složení slinutého karbidu.

WC		W		C		Co	
<i>Jádro</i>	<i>Povrch</i>	<i>Jádro</i>	<i>Povrch</i>	<i>Jádro</i>	<i>Povrch</i>	<i>Jádro</i>	<i>Povrch</i>
94,12	95,58	75,51	75,87	18,61	19,71	5,88	4,42

5.3. Tungaloy TH10

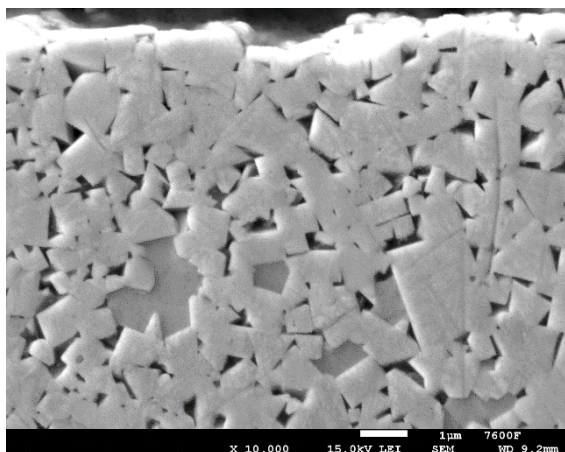
Poslední z testovaných materiálů byl slinutý karbid od společnosti Tungaloy typu TH10. Z testů tvrdosti vyplývá, že tento typ karbidu dosahuje tvrdosti 1734 HV. To je nejvíce ze všech testovaných materiálů. Předpokládá se, že se jedná o vzorek s nejjemnějšími karbidickými zrny. U takto vysoké tvrdosti lze předpokládat, že vzorek obsahuje i další prvky, které potlačují růst karbidických zrn. Obrázek 31 zobrazuje vyleštěný neleptaný stav na povrchu vzorku.



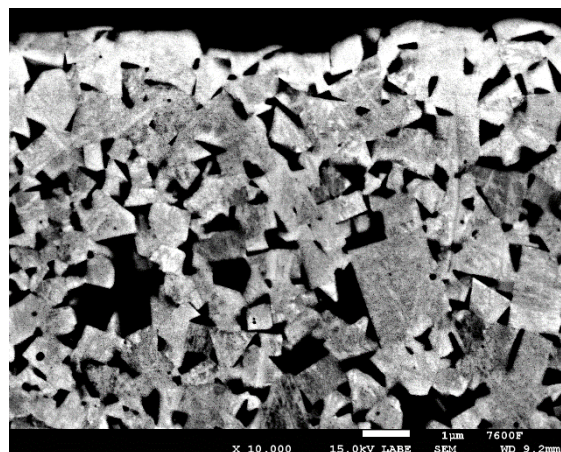
Obrázek 31: Tungaloy TH10 - leštěný stav

5.3.1. Tungaloy TH10 – povrch

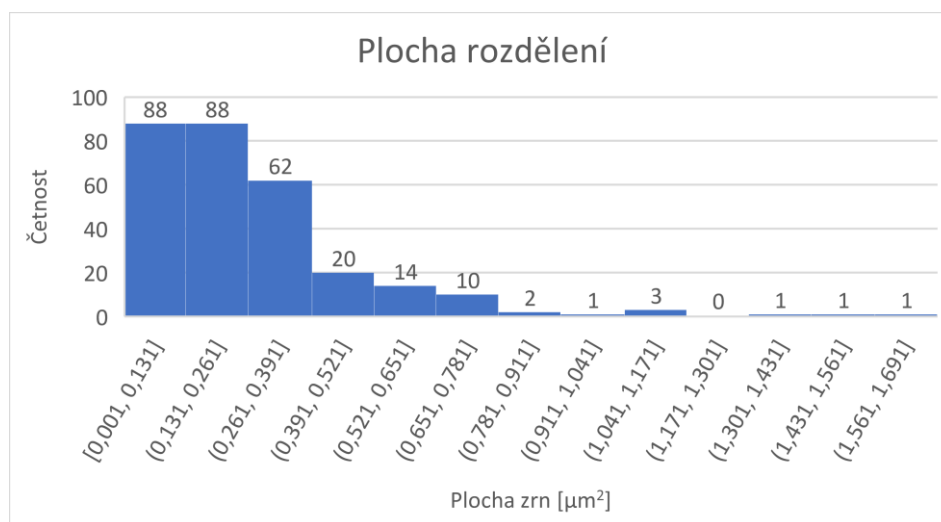
Po napraňování Obrázku 33 vzorku TH10 bylo zjištěno, že průměrná plocha zrn je $0,27 \mu\text{m}^2$ a jejich průměrná kruhovitost je 0,531. Z celkové prahované plochy $115,2 \mu\text{m}^2$ jsou zrna obsažena na ploše $78,913 \mu\text{m}^2$. To je celkem 69 % zrn a 31 % dutin. Obrázek 32 zobrazuje jednotlivé dutiny a zrna.



Obrázek 32: Tungaloy TH10 - Povrch. Clona LEI



Obrázek 33: Tungaloy TH10 – Povrch leptaný stav.

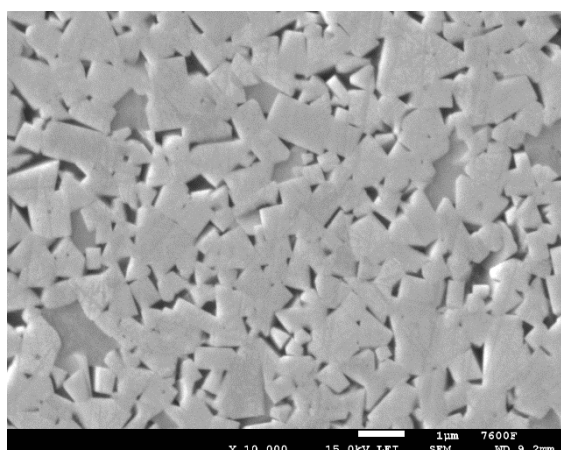


Graf 6: Tungaloy TH10 - Rozložení zrn na ploše.

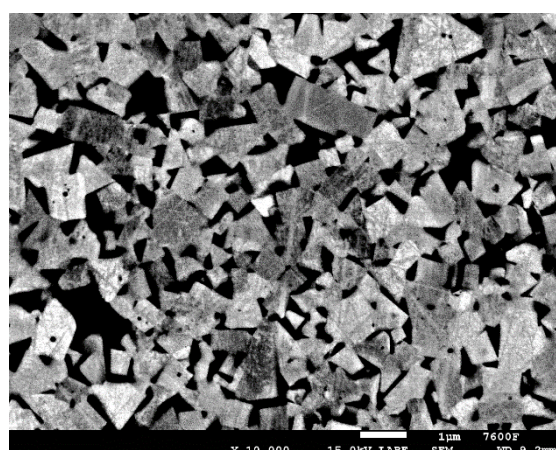
Z Grafu 6 je patrné, že vzorek TH10 má nejmenší karbidická zrna. V plošném intervalu od $0,001 - 0,261 \mu\text{m}^2$ je celkem 166 takto malých karbidů. Z toho již vyplývá i největší naměřená tvrdost.

5.3.2. Tungaloy TH10 – jádro

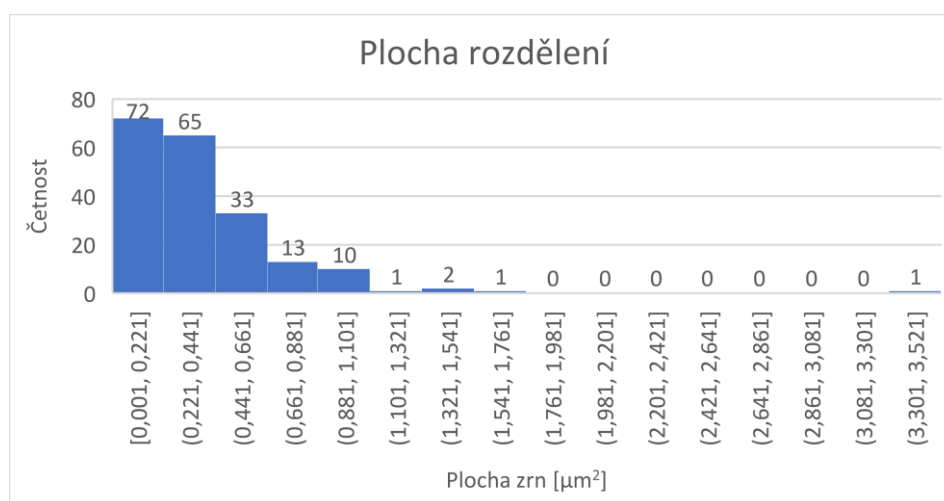
Jako v ostatních případech se předpokládá, že karbidická zrna v jádře budou většího tvaru z důvodu menších napětí při slinování. Po naprahování Obrázku 35 byla zjištěna průměrná plocha zrn v jádře $0,39 \mu\text{m}^2$ a průměrná kruhovitost $0,528$. Průměrná plocha zrn v jádře je větší o 44 %. Z celkové měřené plochy $113,73 \mu\text{m}^2$ je plocha všech karbidů $76,733 \mu\text{m}^2$. To činí z celkové plochy 67 % karbidických zrn a 33 % dutin. Obrázek 34.



Obrázek 34: Tungaloy TH10 - Jádro. Clona LEI.



Obrázek 35: Tungaloy TH10 - Jádro leptaný stav.



Graf 7: Tungaloy TH10 - Velikost zrn v plošném rozdělení.

V Grafu 7 je vidět zmenšení četnosti nejmenších zrn. Na povrchu bylo v plošném intervalu od $0,001 - 0,221 \mu\text{m}^2$ celkem 166 zrn. V jádře je zastoupení menší, a to v celkovém počtu 137 zrn. V porovnání s ostatními vzorky má Tungaloy TH10 nejmenší a tím i nejhustěji rozložená malá zrna.

5.3.3. Tungaloy TH10 – EDX analýza

Elektronovým mikroskopem bylo EDX analýzou zjištěno, že vzorek obsahuje více karbidických prvků než jen ty základní. Tabulka 6. S wolframem, uhlíkem a pojivovou složkou kobaltu byly objeveny i známky po titanu, tantalu a niobu, které slouží k potlačení růstu karbidických zrn WC. Tento slinutý karbid by se mohl považovat za dvojkarbidový, protože procentuální obsah tantalu a niobu nepřesahují hranici trojkarbidových karbidů 4 -7 %. Proto bych zařadil tento karbid do skupiny P.

Tabulka 6: Tungaloy TH10 - Procentuální chemické složení slinutého karbidu TH10

WC		W		C		Co		Ti		Ta		Nb	
Jádro	Povrch	Jádro	Povrch	Jádro	Povrch	Jádro	Povrch	Jádro	Povrch	Jádro	Povrch	Jádro	Povrch
93,75	96,19	77,23	79,24	16,52	16,95	3,25	2,36	0,54	0,4	2,17	0,79	0,29	0,26

5.4. Výpočet lomové houževnatosti dle Palmquista

Lomová houževnatost je odolnost materiálu proti šíření trhliny. Standardní zkouška lomové houževnatosti je pro takto malé vzorky složitě realizovatelná. Proto se využívá několik možných metod, kde se lomová houževnatost dopočítává např. z trhlín vedoucích z rohů po vtisku jehlanu po zkoušce dle Vickerse. Palmquistova metoda není naprosto přesná, velký vliv na výsledné hodnoty ovlivňuje upravený povrch, na kterém se provádí zkouška. Změřením všech trhlín a jejich sečtením se značí celková délka trhliny. Hodnota celkové délky trhliny a zjištěné tvrdosti se pomocí vzorce vypočte přibližná lomová houževnatost. Vypočtené hodnoty lomové houževnatosti jsou v Tabulce 7. (32)

$$W_k = 0,0028 \cdot \sqrt{HV} \cdot \sqrt{W_g} \qquad W_g = \sqrt{\frac{F}{\Sigma L}}$$

Kde:

W_k – Lomová houževnatost dle Palmquista
[MN/m^{3/2}]

W_g – Palmquistova houževnatost [N/mm]

P – Vtiskové zatížení [kg]

ΣL – Celková délka trhlín

5.5. Materiálové shrnutí

Materiálovou analýzou byly slinuté karbidy základně prozkoumány. Byly zjištěny tvrdosti, tvary a velikosti zrn na povrchu i v jádře a přibližně bylo nastíněno chemické složení v Tabulce 8. Podle předpokladu po zkoušce tvrdosti bylo potvrzeno, že s vyšší tvrdostí jsou karbidická zrna menší. S tím je spjatá i houževnatost. Ze zkoušky tvrdosti byly změřeny trhliny vedoucí z cípů vtisknutého indentoru a pomocí vzorce dle Palmquista byla změřena lomová houževnatost. Bylo potvrzeno, že s vyšší tvrdostí je lomová houževnatost menší a naopak. V Tabulce 7 jsou zobrazeny výsledky, které byly zjištěny z povrchové vrstvy všech vzorků.

Tabulka 7: Zjištěné hodnoty povrchové vrstvy z materiálových zkoušek.

	<i>Tvrdost</i> [HV]	K_{IC} [MN/m ^{3/2}]	<i>Plocha -</i> <i>Velikost zrna</i> [μm ² - μm]	WC [%]
<i>SECO</i>	1571	11,24	0,45 – 0,76	92,02
<i>Dormer Pramet 415</i>	1670	10,33	0,38 – 0,70	95,58
<i>Tungaloy TH10</i>	1734	10,05	0,27 – 0,59	96,19

Tabulka 8: Materiálové chemické složení v povrchové vrstvě slinutých karbidů.

	W [%]	C [%]	Co [%]	Ti [%]	Ta [%]	Nb [%]
<i>SECO</i>	72,8	19,23	7,98			
<i>Dormer Pramet 415</i>	75,87	19,71	4,42			
<i>Tungaloy TH10</i>	79,24	16,95	2,36	0,4	0,79	0,26

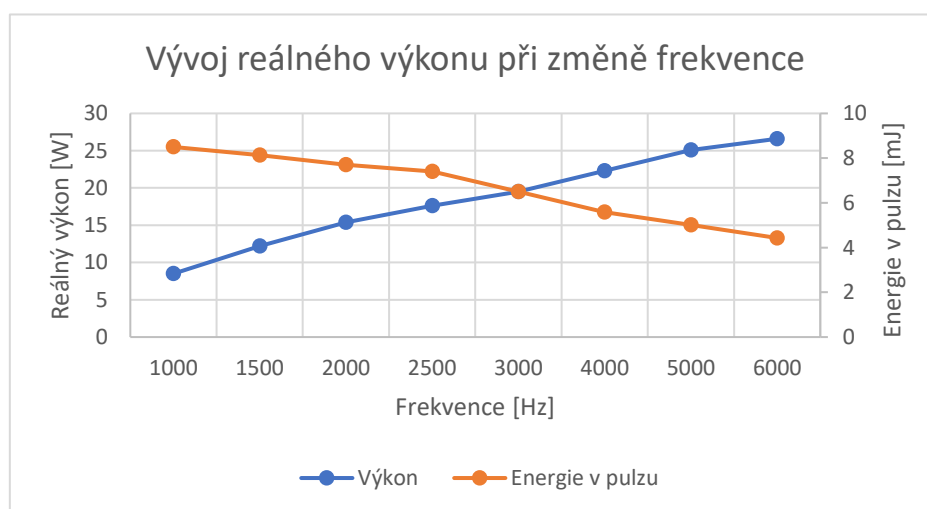
6. Experiment – laserová část

Experiment pro zjištění vlivu pracovních podmínek na úběr slinutého karbidu byl rozdělen do tří částí. První část experimentu spočívala v zjištění optimálně nastavené frekvence. Rozpětí frekvence bylo v experimentu nastaveno od 1000 do 6000 Hz podle předešlých zkušeností z BP. Výchozí parametry pro první fázi experimentu byl nastaven maximální výkon, rychlost 100 mm/s a 300 vrstev opakování. Druhá část spočívala v zjištění optimální pracovní rychlosti laseru. V tomto případě bylo rozpětí změny rychlosti nastaveno taktéž z předešlých zkušeností od 50 do 1000 mm/s. Poslední třetí fáze experimentu spočívala v doplnění informace o lineárnosti úběru materiálu na základě změny počtu odebraných vrstev. Počet vrstev byl měněn od 30 do výchozích 300 vrstev.

Laser, který byl pro tento experiment k dispozici, byl podroben měření reálného výkonu laserového svazku. Tím bylo zjištěno, že při nastavení maximálního výkonu 50 W je reálný výstupní výkon mnohem menší. Zvyšováním frekvence od 1000 do 6000 Hz výkon vzrůstá, ale energie v pulzu klesá. Výstupní hodnoty tohoto měření jsou v Tabulce 9 a v Grafu 8.

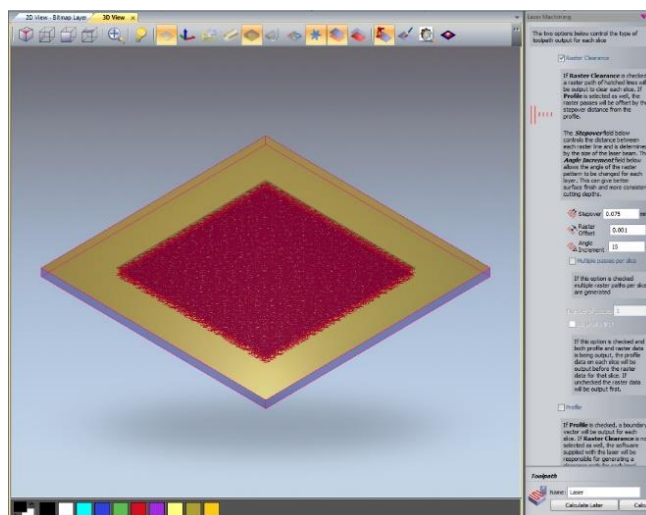
Tabulka 9: Tabulka skutečných výkonů a energií v pulzu.

Frekvence [Hz]	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000
Reálný výkon [W]	8,5	12,2	15,4	17,6	19,5	22,3	25,1	26,6
Energie v pulzu [mJ]	8,5	8,13	7,7	7,4	6,5	5,58	5,02	4,43



Graf 8: Zobrazení skutečného výkonu s energií v pulzu při změně frekvence

Programy pro celý experiment byly vytvořeny v grafickém programu ArtCam, kde byl nadefinován čtverec 2 x 2 mm. Šrafování čtverce bylo nastaveno jako optimální 0,075 mm, což představuje 25 % překryvu jednotlivých pulzů ve směru pohybu. Tento překryv byl zvolen podle bakalářské práce, kde bylo toto optimální nastavení zjištěno. Jednotlivé vrstvy šrafu byly kvůli rovnoměrnosti obrobené plochy pootáčený o 15°. Náhled do programu ArtCam je zobrazen na Obrázku 36.



Obrázek 36: ArtCam - vytvořený program s třiceti vrstvami.

6.1. Optimální frekvence

Po vytvoření programů se přistoupilo k zjištění optimální frekvence. Konstantní rychlost pro první část experimentu bylo 100 mm/s. Navržený interval frekvence byl v rozmezí 1000 – 6000 Hz a při nastavení neměnných výchozích parametrů byla zjišťována největší odebraná vrstva. Každý z testovaných materiálů má odlišné chemické složení. Proto se mohou nejlepší frekvence lišit podle typu materiálu, anebo bude docházet pouze k menším úběrům při stejných frekvencích. Obrázek 37 zobrazuje použité vzorky pro laserové mikroobrábění.



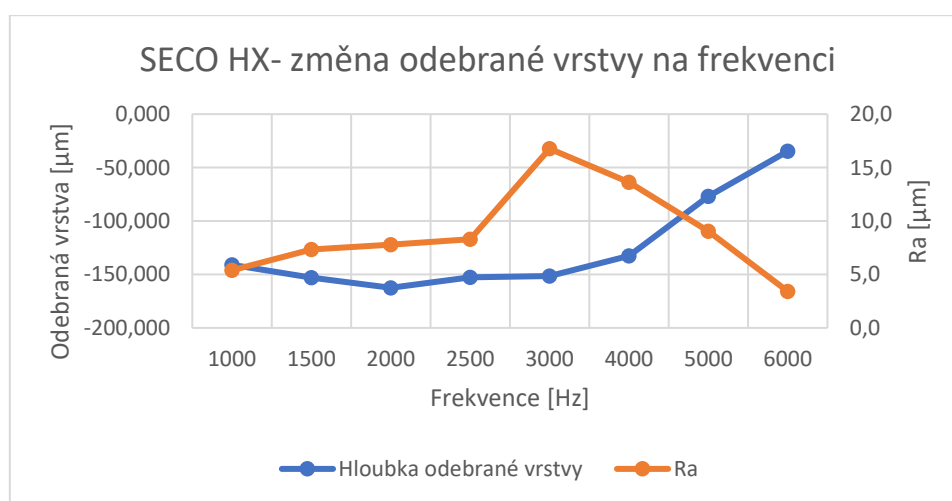
Obrázek 37: Testované vyměnitelné břitové destičky - SECO HX, Dormer Pramet 415, Tungaloy TH10

6.1.1. Frekvence – SECO HX

U experimentu byla optimální frekvence volena podle měření, kde byl změřen nejmenší úběr při zbylých konstantních parametrech. Graf 9 zobrazuje trend úběru materiálu, který má jednoznačnou minimální polohu. Vzorek SECO HX měl největší úběr materiálu -162,4 μm při frekvenci 2000 Hz, kde při nastavení maximálního výkonu byl reálný výkon 15,4 W. Celkový graf zobrazuje trend úběru materiálu v závislosti na změně frekvence, kde jde od výchozího bodu do minima, odkud opět roste. Drsnost Ra byla až do frekvence 2500 Hz téměř konstantní. Od 3000 Hz nastal velký skok drsnosti až na Ra 16,8 μm . Od této frekvence se zvyšováním frekvence drsnost opět snižovala. Tabulka 10 zobrazuje hodnoty celého experimentu při změně frekvence.

Tabulka 10: SECO HX - změna frekvence.

	Výkon	Frekvence	Rychlost	Překryv pulzů	Počet skenovacích vrstev	Hloubka odebrané vrstvy	Ra
	W	Hz	mm/s			μm	μm
1	50	1000	100	0%	300	-140,9	5,4
2	50	1500	100	33%	300	-153,0	7,3
3	50	2000	100	50%	300	-162,4	7,8
4	50	2500	100	60%	300	-152,6	8,3
5	50	3000	100	67%	300	-151,4	16,8
6	50	4000	100	75%	300	-132,5	13,6
7	50	5000	100	80%	300	-77,0	9,1
8	50	6000	100	83%	300	-34,7	3,4



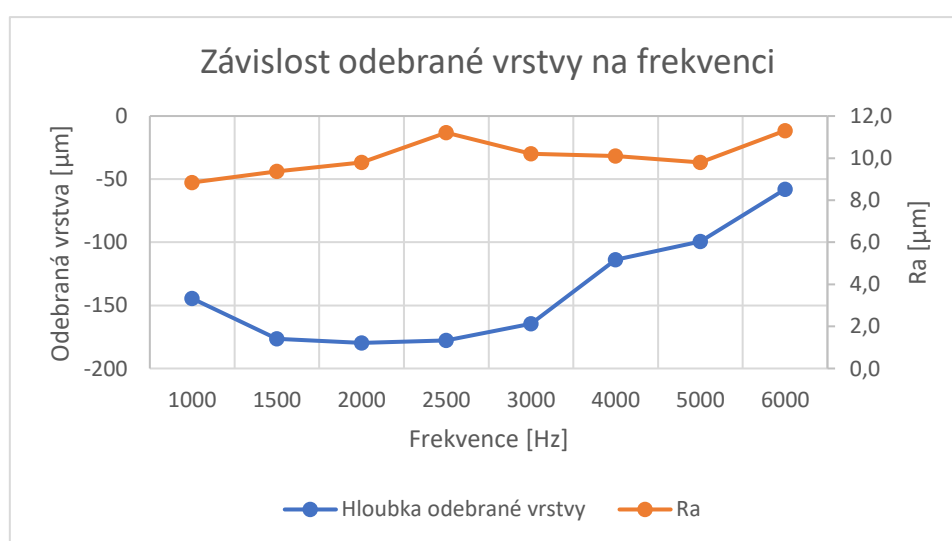
Graf 9: SECO HX - závislost velikosti odebrané vrstvy a drsnosti na frekvenci laseru.

6.1.2. Frekvence – Dormer Pramet 415

U vzorku Dormer Pramet 415 byla zjištěna optimální frekvence 2000 Hz, což představuje při této frekvenci a nastavení maximálního výkonu 50 W reálný výkon 15,4 W. Největší úběr materiálu při optimální frekvenci byl -179,7 μm . Tabulka 11 zobrazuje zbylé naměřené hodnoty experimentu. Graf 10 zobrazuje jaký je trend úběru materiálu a vývoj drsnosti Ra při změně frekvence. Drsnost se změnou frekvence v tomto případě příliš nemění. Nejvyšší drsnost je při frekvenci 2500 Hz, poté začne opět mírně klesat.

Tabulka 11: Dormer Pramet 415 - změna frekvence

	Výkon	Frekvence	Rychlost	Překryv pulzů	Počet skenovacích vrstev	Hloubka odebrané vrstvy	Ra
	W	Hz	mm/s			μm	μm
1	50	1000	100	0%	300	-144,437	8,8
2	50	1500	100	33%	300	-176,383	9,4
3	50	2000	100	50%	300	-179,72	9,8
4	50	2500	100	60%	300	-177,73	11,2
5	50	3000	100	67%	300	-164,593	10,2
6	50	4000	100	75%	300	-113,823	10,1
7	50	5000	100	80%	300	-99,3567	9,8
8	50	6000	100	83%	300	-58,0133	11,3



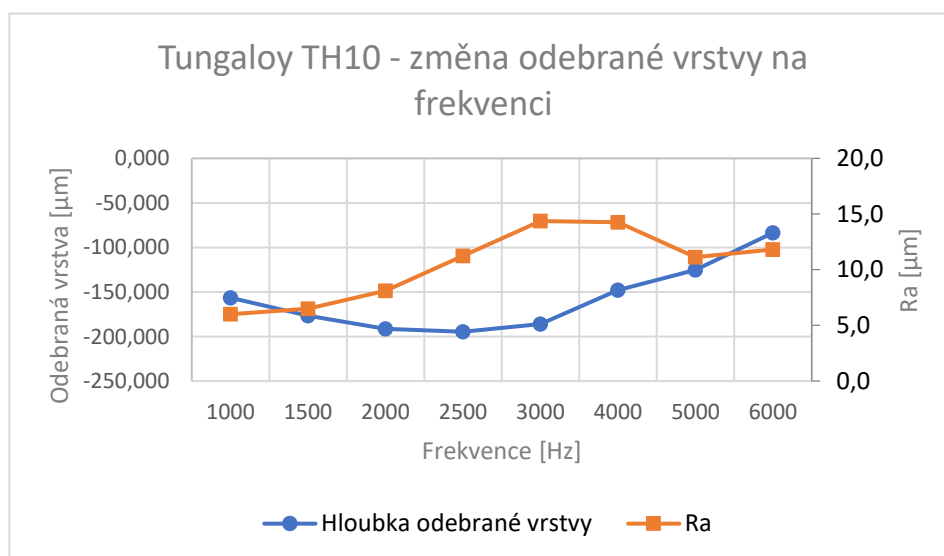
Graf 10: Dormer Pramet 415 - graf změny frekvence

6.1.3. Frekvence – Tungaloy TH10

Poslední vzorek od společnosti Tungaloy byl při provedení experimentu na zvolení optimální frekvence nejproduktivnější při 2500 Hz a reálném výkonu 17,6 W. Dosahovaná hloubka odebrané vrstvy byla -194,6 μm při 300 vrstev opakování. Drsnost byla i u tohoto vzorku maximální u frekvence 3000 Hz a to Ra 14,4 μm . Tabulka 12 zobrazuje zbylé hodnoty experimentu. Graf 11 graficky znázorňuje trend úběru materiálu a drsnosti Ra při změně frekvence.

Tabulka 12: Tungaloy TH10 - změna frekvence.

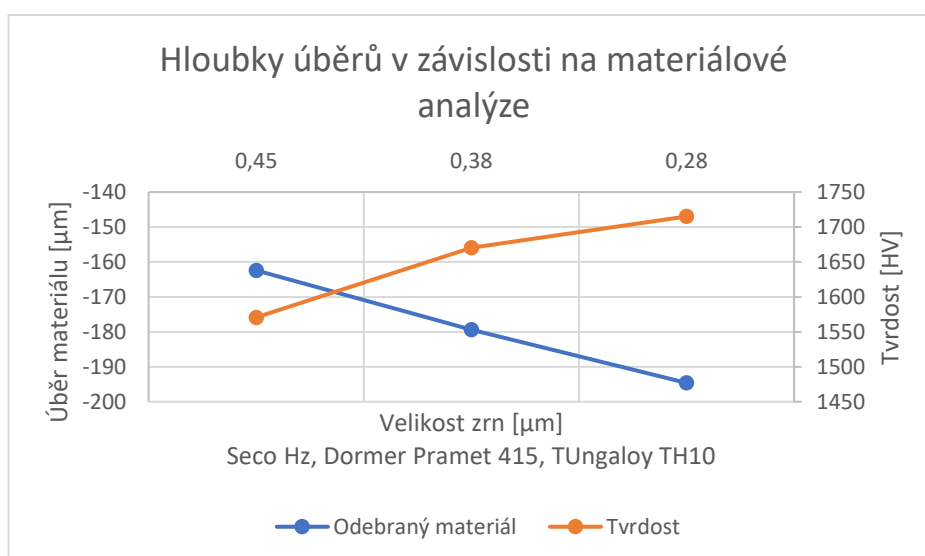
	Výkon	Frekvence	Rychlost	Překryv pulzů	Počet skenovacích vrstev	Hloubka odebrané vrstvy	Ra
	W	Hz	mm/s			μm	μm
1	50	1000	100	0%	300	-156,6	6,0
2	50	1500	100	33%	300	-176,5	6,5
3	50	2000	100	50%	300	-191,5	8,1
4	50	2500	100	60%	300	-194,6	11,2
5	50	3000	100	67%	300	-185,8	14,4
6	50	4000	100	75%	300	-147,7	14,3
7	50	5000	100	80%	300	-125,3	11,1
8	50	6000	100	83%	300	-83,6	11,8



Graf 11: Tungaloy TH10 - změna frekvence.

6.1.4. Zhodnocení výsledků změny frekvence

Jak již bylo nastíněno na začátku experimentu, tak největší úběry nastaly u frekvencí 2000 a 2500 Hz. Optimální frekvenci 2000 Hz měly vzorky SECO HX a Dormer Pramet 415. V tomto případě byl při nastavené rychlosti 100 mm/s překryv 50 %. Energií v pulzu 7,7 mJ bylo do vzorku dopraveno na 2000 pulzů za vteřinu o této energii. Intenzita záření byla při optimální frekvenci 1,634 GW/cm². Maximální úběr u vzorku SECO HX byl -162,4 μm a u vzorku Dormer Pramet 415 -179,7 μm. U vzorku Tungaloy TH10 nastal maximální úběr -194,6 μm při frekvenci 2500 Hz. Při této frekvenci je překryv pulzů ze 60 %. Liší se i energie v pulzu, která je 7,04 mJ a intenzita záření je 1,494 GW/cm². S přihlédnutím těchto parametrů k materiálové analýze je patrné, že je závislost úběru materiálu na velikosti zrn a tím i jeho tvrdosti a strukturních složek WC. U vzorku s většími zrny dochází k menším úběrům materiálu než u vzorků s menšími zrny Graf 12. To je zapříčiněno danou velikostí stopy laserového paprsku o průměru 0,1 mm. Tím jsou zrna energeticky ovlivněna tak, že více menších zrn přijme dostatek energie k tomu, aby došlo k porušení soudržnosti vazebních sil. Naopak větší zrna potřebují přijmout více energii, aby došlo k materiálové ablaci.



Graf 12: Hloubky úběru v závislosti na velikosti zrn a tvrdosti.

6.2. Vyhodnocení ablačního prahu

Podle kapitoly 3.3.3. byl po zjištění optimálních frekvencí realizován experiment, kde byla vyšetřena prahová hodnota energetického toku pro každý materiál. Pomocí testu, který byl aplikován na každý materiál zvlášť, byla zjištěna plocha svazku a minimální hustota energie, která způsobí ablaci materiálu. Test spočíval ve změření průměru stopy, která se měnila změnou energií v pulzu. Po změření průměrů stop paprsku byly hodnoty přepočítány pomocí vzorců, které nám prozradí prahovou hodnotu ablace, od které dochází k intenzivnímu úběru materiálu. V Tabulce 13 jsou uvedeny zjištěné prahové hodnoty hustoty energie a hustoty energie při optimálně zvolených frekvencích.

Tabulka 13: Porovnání prahových hodnot hustoty energie.

	SECO HX	Dormer Pramet 415	Tungaloy TH10
	<i>[J/cm²]</i>	<i>[J/cm²]</i>	<i>[J/cm²]</i>
Prahová hustota energie	15,949	15,105	16,462
Hustota energie při optimální frekvenci vzorku	196	196	179

6.3. Optimální rychlost

Další experimentální část je věnována optimální rychlosti. Experiment byl nastaven od rychlosti 50 mm/s až do 1000 mm/s. Hodnocení efektivity rychlosti byla zhodnocena podílem hloubky odebrané vrstvy s pracovním časem při dané rychlosti. Nejvyšší číslo podílu patří právě optimální rychlosti.

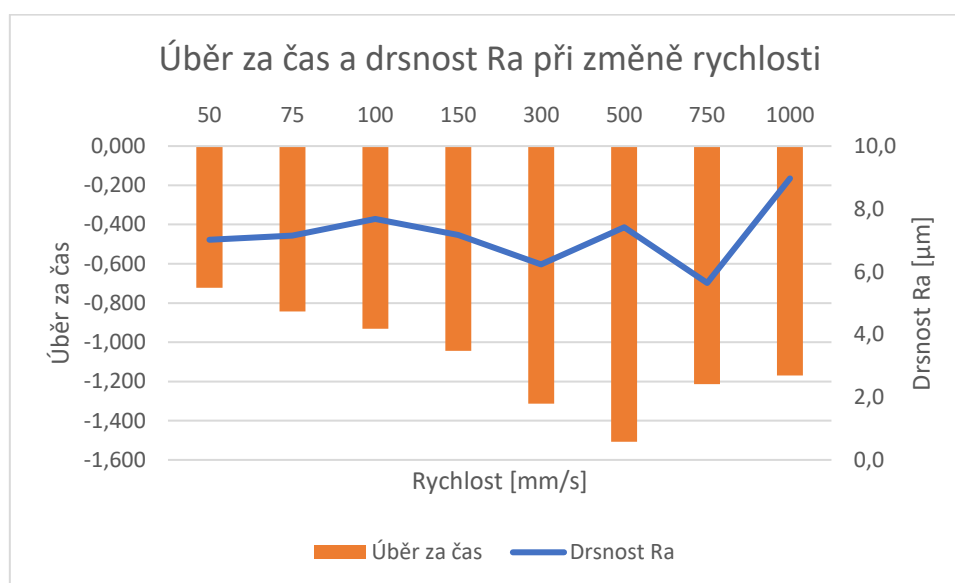
6.3.1. Rychlost – SECO HX

Experiment pro vzorek SECO HX měl nastaven výchozí parametry výkon 50 W, kde byl reálný výkon při nastavení frekvence 2000 Hz, 15,4 W. Změnou rychlosti se měnil překryv jednotlivých pulzů od pozitivních překryvů až po negativní, kde nebyl vůbec žádný překryv. Nicméně u těchto vyšších hodnot překryvů bylo dosaženo nejlepších produktivit. Tento výsledek je způsoben tepelným ovlivněním vzorku dlouhými pulzy nanosekundového laseru.

Ty i při vyšších skenovacích rychlostech udržují vzorek na prahové hranici ablace materiálu. Optimální rychlost v závislosti na úběru materiálu za čas bylo u rychlosti 500 mm/s, kde je překryv pulzů -150 %. Drsnost byla při této rychlosti na průměrné hodnotě Ra 7,4 μm. Zbylé hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 14. Trend úběru materiálu za čas v závislosti na skenovací rychlosti je zobrazen v Grafu 13.

Tabulka 14: Rychlosti - SECO HX - výsledná tabulka hodnot.

	Výkon	Frekvence	Rychlost	Počet skenovacích vrstev	Překryv pulzů	Hloubka odebrané vrstvy	Ra	Čas	Úběr za čas
	W	Hz	mm/s			μm	μm	s	μm /s
9	50	2000	50	300	75%	-232,1	7,0	321	-0,723
10	50		75	300	63%	-168,1	7,2	199,5	-0,842
11	50		100	300	50%	-157,5	7,7	169	-0,932
12	50		150	300	25%	-123,7	7,2	118,5	-1,044
13	50		300	300	-50%	-89,0	6,2	67,76	-1,313
14	50		500	300	-150%	-73,2	7,4	48,57	-1,507
15	50		750	300	-275%	-46,1	5,6	38	-1,213
16	50		1000	300	-400%	-38,5	9,0	32,9	-1,169



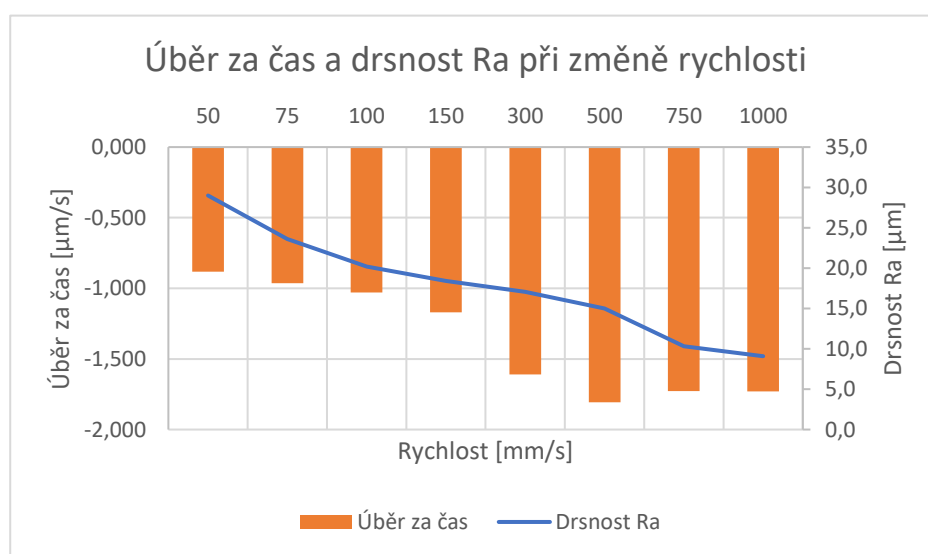
Graf 13: SECO HX - Porovnání úběru materiálu za čas s drsností při změně rychlosti.

6.3.2. Rychlost – Dormer Pramet 415

U vzorku Dormer Pramet 415 bylo zjištěno, že nejlepší úběr za čas vznikl také u rychlosti 500 mm/s, kde nedochází k překryvu jednotlivých pulzů, ale dochází k velkému tepelnému ovlivnění kolem jednotlivých pulzů. Tím se v malé ploše působení laserové energie vytvoří optimální prahová hodnota ablačního procesu o produktivním nastavení parametru rychlosti. Drsnost obrobené plochy se s vyššími rychlostmi snižovala. U optimální rychlosti 500 mm/s byla změřena drsnost Ra 6,4 μm. Výsledné hodnoty experimentu jsou zobrazeny v Tabulce 15 a v Grafu 14.

Tabulka 15: Dormer Pramet 415 - Výsledné hodnoty experimentu při změně rychlosti.

	Výkon	Frekvence	Rychlost	Počet skenovacích vrstev	Překryv pulzů	Hloubka odebrané vrstvy	Ra	Čas	Úběr za čas
	W	Hz	mm/s			μm	μm	s	μm /s
9	50	2000	50	300	75%	-283,1	42,2	321	-0,882
10	50		75	300	63%	-192,3	26,3	199,5	-0,964
11	50		100	300	50%	-174,0	22,2	169	-1,030
12	50		150	300	25%	-138,7	15,6	118,5	-1,171
13	50		300	300	-50%	-109,0	8,9	67,76	-1,609
14	50		500	300	-150%	-87,7	6,4	48,57	-1,806
15	50		750	300	-275%	-65,7	5,0	38	-1,729
16	50		1000	300	-400%	-56,9	4,3	32,9	-1,730



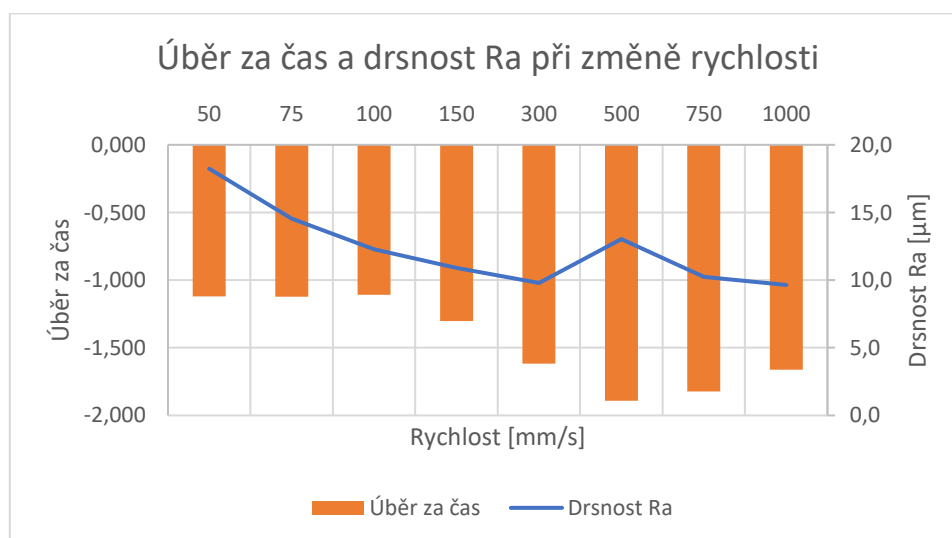
Graf 14: Dormer Pramet 415 - Porovnání hodnot úběru za čas a drsnosti Ra při změně rychlosti.

6.3.3. Rychlost – Tungaloy TH10

Vzorek Tungaloy TH10 měl jediný rozdílnou frekvenci než předešlé dva vzorky. Ale i při odlišné frekvenci 2500 Hz byla zjištěna optimální rychlost 500 mm/s, stejně jako v předešlých případech. Jen s tím rozdílem, že negativní překryv jednotlivých pulzů byl -100 %. I zde byla zjišťována optimální rychlost podílem odebrané vrstvy s pracovním časem. Při pozorování drsnosti bylo zjištěno, že od nejnižší rychlosti 50 mm/s se drsnost Ra snižovala až do rychlosti 300 mm/s. Při rychlosti 500 mm/s vzniklo nepatrné zvětšení drsnosti na Ra 13,0 μm, od které drsnost opět klesala. Výsledné hodnoty experimentu na vzorek Tungaloy TH 10 jsou zobrazeny v Grafu 15 a v Tabulce 16.

Tabulka 16: Tungaloy TH10 - Výsledné hodnoty experimentu při změně rychlosti.

	Výkon	Frekvence	Rychlost	Počet skenovacích vrstev	Překryv pulzů	Hloubka odebrané vrstvy	Ra	Čas	Úběr za čas
	W								
9	50	2500	50	300	80%	-359,6	18,2	321	-1,120
10	50		75	300	70%	-224,1	14,5	199,5	-1,123
11	50		100	300	60%	-187,4	12,3	169	-1,109
12	50		150	300	40%	-154,2	10,9	118,5	-1,301
13	50		300	300	-20%	-109,6	9,8	67,76	-1,617
14	50		500	300	-100%	-91,9	13,0	48,57	-1,891
15	50		750	300	-200%	-69,3	10,2	38	-1,824
16	50		1000	300	-300%	-54,7	9,6	32,9	-1,662



Graf 15: Tungaloy TH10 - Porovnání hodnot úběru za čas a drsnosti Ra při změně rychlosti.

6.3.4. Zhodnocení výsledků změny rychlosti

Celkové zhodnocení experimentů na zjištění optimální rychlosti dopadlo ve všech případech totožně. Optimální rychlost byla 500 mm/s. S tím, že u vzorků Seco HX a Dormer Pramet 415 byl s frekvencí 2000 Hz negativní překryv -150 %. U vzorku Tungaloy TH10 byl kvůli frekvenci 2500 Hz negativní překryv -100 %. K největším úběrům za čas docházelo kvůli několika aspektům. První z nich je délka pulzu 120 ns, při které je do jednoho pulzu vyvolaná tak velká hustota energie, že dochází k velkému ovlivnění kolem pulzu. Hustota energie se liší danou frekvencí a výkonem, kde při optimální frekvenci 2000 Hz je hustota energie 196 J/cm². S vyšší frekvencí hustota energie klesá na 179 J/cm² při frekvenci 2500 Hz. Ablační práh klesá s více pulzy, proto u nižších rychlostí docházelo k menším úběrům materiálu než u těch vyšších. Protože na menší plochu dopadlo díky malým rychlostem větší množství pulzů. Změna ablačního procesu nastala prahovou rychlostí 150 mm/s, při které se začal úběr materiálu za čas zvětšovat právě do rychlosti 500 mm/s.

6.4. Zjištění závislosti změny počtu skenovacích vrstev

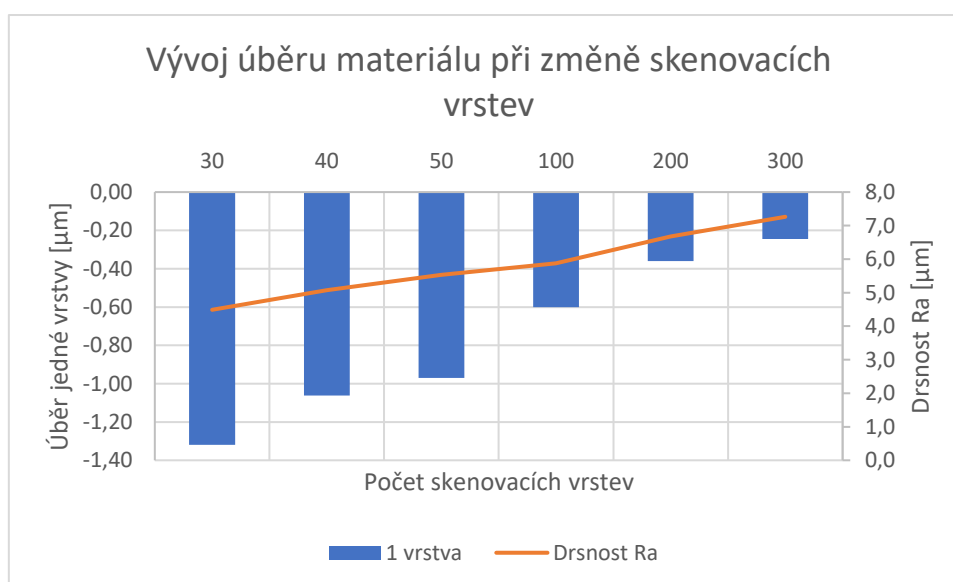
Poslední experiment byl na zjištění závislosti hloubky odebraného materiálu na počtu skenovacích vrstev. Tento experiment měl nastaven počty vrstev od 30 až do výchozích 300 vrstev, při kterých byly realizovány předešlé experimenty. Celý experiment měl pro každý materiál nastaveny zjištěné optimální parametry výkonu, frekvence a rychlosti. Pro zjištění závislosti hloubky odebraného materiálu na počtu skenovacích vrstev byly tyto hodnoty mezi sebou poděleny a tím byl zjištěn úběr materiálu na jednu vrstvu, která byla rozhodující.

6.4.1. Změna počtu skenovacích vrstev – SECO HX

Vzorek SECO HX měl nastaven výchozí parametry frekvenci 2000 Hz, rychlost 500 mm/s a maximální výkon 15,4 W při dané frekvenci. Bylo zjištěno, že s přibývajícím počtem vrstev se zvyšuje drsnost obrobené plochy. Podílem změřené hloubky odebraného materiálu s počtem skenovacích vrstev bylo zjištěno, jaký je úběr materiálu na jednu vrstvu. Úběr materiálu se s vyšším počtem skenovacích vrstev snižoval Graf 16. Tabulka 17 zobrazuje výsledky drsnosti a úběru materiálu jedné vrstvy při změně skenovacích vrstev.

Tabulka 17: SECO HX - tabulka výsledných hodnot při změně počtu skenovacích vrstev.

	Výkon	Frekvence	Rychlost	Počet skenovacích vrstev	Hloubka odebrané vrstvy	Ra	Čas	Úběr jedné vrstvy
	W	Hz	mm/s		μm	μm	s	μm
17	50	2000	500	30	-39,6	4,5	5,4	-1,32
18	50			40	-42,5	5,1	7,0	-1,06
19	50			50	-48,5	5,5	8,6	-0,97
20	50			100	-60,1	5,9	16,6	-0,60
21	50			200	-72,2	6,7	32,6	-0,36
22	50			300	-73,4	7,3	48,6	-0,24



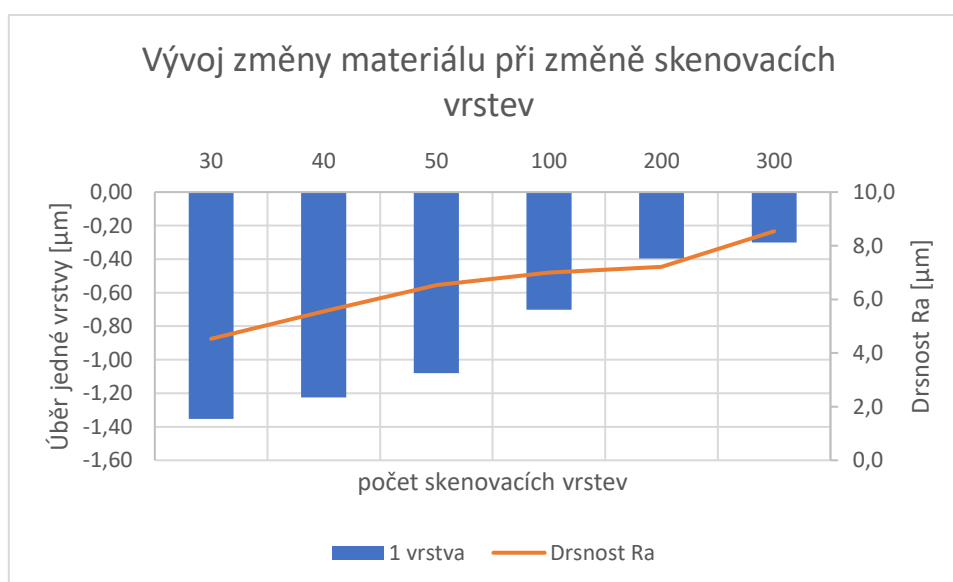
Graf 16: Porovnání úběru jedné vrstvy skenovací dráhy a drsnosti Ra se změnou počtu vrstev.

6.4.2. Změna počtu skenovacích vrstev – Dormer Pramet 415

Výchozí parametry laseru byly i v tomto experimentu nastaveny totožně, jako v předešlém testu Tabulka 18. A to frekvencí 2000 Hz, skenovací rychlostí 500 mm/s a maximálním nastaveným výkonu 50 W, který má při této frekvenci reálných 15,4 W. Stejně jako u vzorku SECO HX, tak i u vzorku Dormer Pramet 415 se drsnost obrobenej plochy a úběr materiálu na jednu vrstvu odvíjel od počtu skenovacích vrstev. Největší úběr materiálu na vrstvu a nejmenší drsnosti Ra 4,5 μm byla při 30 skenovacích vrstvách. Úběr materiálu na vrstvu se s více skenovacími vrstvami zmenšoval, ale drsnost se naopak zvětšovala Graf 17.

Tabulka 18: Dormer Pramet 415 - tabulka výsledných hodnot při změně počtu skenovacích vrstev.

	Výkon	Frekvence	Rychlost	Počet skenovacích vrstev	Hloubka odebrané vrstvy	Ra	Čas	Úběr jedné vrstvy
	W	Hz	mm/s		μm	μm	s	μm
17	50	2000	500	30	-40,6	4,5	5,4	-1,35
18	50			40	-49,0	5,6	7,0	-1,23
19	50			50	-54,0	6,5	8,6	-1,08
20	50			100	-70,2	7,0	16,6	-0,70
21	50			200	-79,4	7,2	32,6	-0,40
22	50			300	-90,0	8,5	48,6	-0,30



Graf 17: Dormer Pramet 415 - Porovnání úběru jedné vrstvy skenovací dráhy a drsnosti Ra se změnou počtů vrstev.

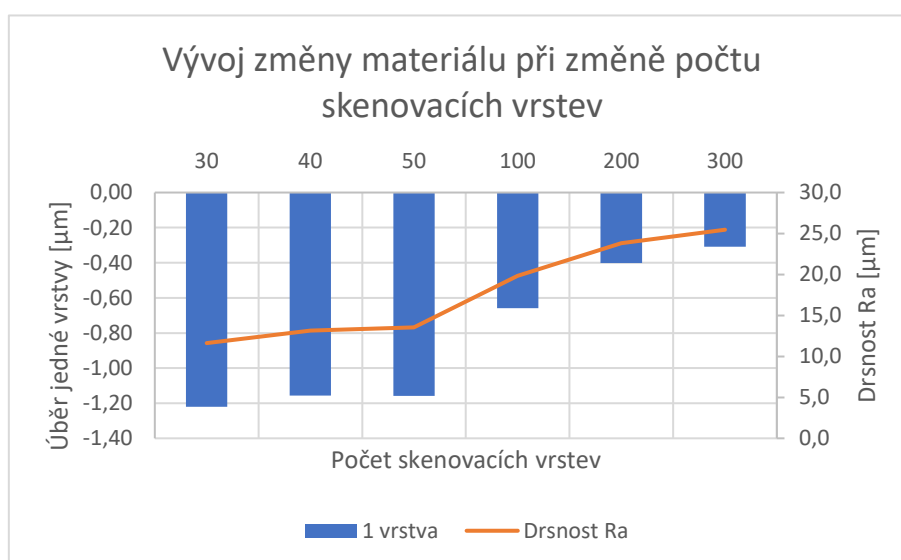
6.4.3. Změna počtu skenovacích vrstev – Tungaloy TH10

Optimální parametry pro tento experiment na vzorek Tungaloy TH10 byly zjištěny z předešlých experimentů. Proto byla nastavena optimální frekvence 2500 Hz, rychlost 500 mm/s a maximální výkon, který je při nastavené frekvenci 17,6 W. Při provedení experimentu bylo zjištěno, že vývoj drsnosti a odebraného materiálu na jednu skenovací vrstvu laserem má stejný trend jako u předešlých vzorků. Proto dochází k největšímu úběru materiálu na vrstvu při 30 skenovacích vrstvách. Opačný výsledek má naopak drsnost Ra 6,1 μm , která je s těmito

vrstvami nejmenší. Zvyšováním počtu skenovacích vrstev se drsnost zvětšuje. Efektivní úběry vrstev materiálu v porovnání s počtem skenovacích vrstev jsou považovány do 50. Zvyšováním počtů vrstev se odebraný materiál na vrstvu prudce zmenšuje. Výsledky experimentu jsou zobrazeny v Grafu 18 a v Tabulce 19.

Tabulka 19: Tungaloy TH10 - tabulka výsledných hodnot při změně počtu skenovacích vrstev.

	Výkon	Frekvence	Rychlost	Počet skenovacích vrstev	Hloubka odebrané vrstvy	Ra	Čas	Úběr jedné vrstvy
	W	Hz	mm/s		μm	μm	s	μm
17	50	2500	500	30	-36,6	6,1	5,4	-1,22
18	50			40	-46,3	6,9	7,0	-1,16
19	50			50	-57,9	7,1	8,6	-1,16
20	50			100	-65,8	10,4	16,6	-0,66
21	50			200	-80,1	12,5	32,6	-0,40
22	50			300	-92,4	13,4	48,6	-0,31

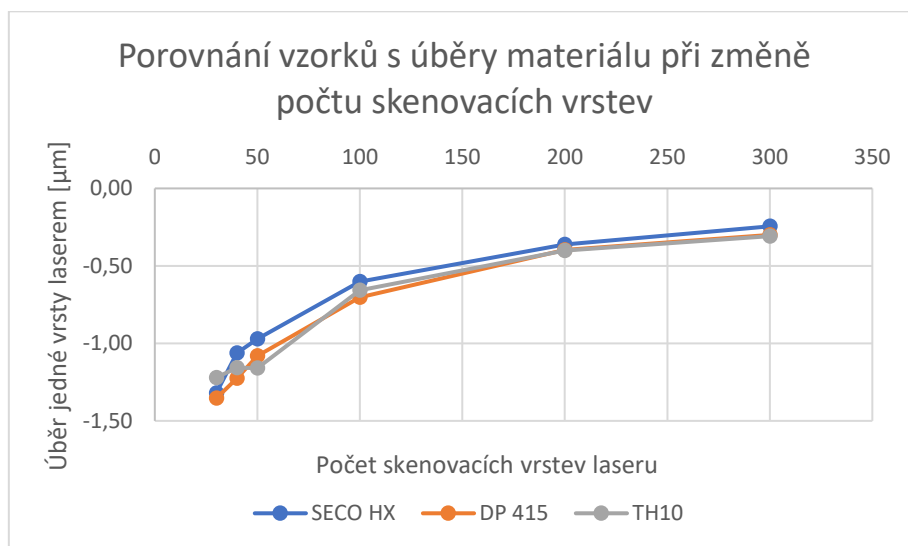


Graf 18: Tungaloy TH10 - - Porovnání úběru jedné vrstvy skenovací dráhy a drsnosti Ra se změnou počtů vrstev.

6.4.4. Zhodnocení výsledků změny počtu skenovacích vrstev laseru

Porovnání výsledků ze všech testů na změnu skenovacích vrstev laserem bylo zjištěno, že na efektivní mikroobrábění slinutých karbidů má vliv i právě zmíněná změna vrstev. Graf 19 znázorňuje vývoj úběrů materiálu jedné vrstvy laserem při změně počtu skenovacích vrstev

laserem. Z grafu je patrné, že do 50 vrstev je úběr materiálu na vrstvu nejefektivnější. Odtud úběr jedné vrstvy exponenciálně klesá až do 300 vrstev. To je způsobeno natavením obráběného materiálu a tím se zvýšila odrazivost laserového paprsku.

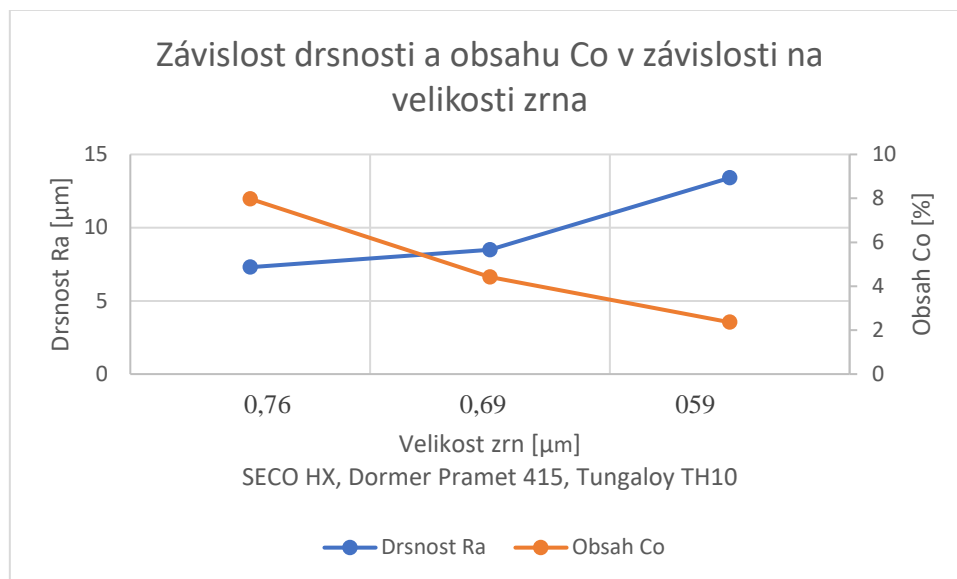


Graf 19: Porovnání úběrů jedné vrstvy při změně počtu skenovacích vrstev laseru

Drsnost se při tomto experimentu vyvíjela opačným způsobem. A to, že s více skenovacími přejezdy roste drsnost Ra. Při ohledu na plochy zrn v jednotlivých vzorcích a jejich procentuálním složení, bylo zjištěno, že na zvyšující drsnost obrobených ploch na změnu skenovacích vrstev má vliv pojivová složka kobaltu a složky wolfram karbidu. Malé procentuální složení kobaltu ve vzorku Tungaloy TH10 způsobuje, že se laserovou ablací v první řadě odstraní pojivová část a tím se zbylé tvrdé složky karbidu odhalí a na povrchu vytvoří vyšší drsnost. Graf 20. Naopak porovnání procentuální složky wolfram karbidu ukazuje, že s vyšším podílem této složky roste i drsnost. Tabulka 20 zobrazuje procentuální složení chemických prvků v jednotlivých vzorcích.

Tabulka 20: Hodnoty slinutých karbidů

	Velikost zrna	WC	Co	Ra
	[μm]	[%]	[%]	[μm]
SECO HX	0,76	92,02	7,98	7,3
DP 415	0,69	95,58	4,42	8,5
TH10	0,59	96,19	2,36	13,4



Graf 20: Porovnání drsnosti vzorků při změně obsahu kobaltu.

7. Závěr

Diplomová práce byla vypracována za účelem zjištění vztahu mezi parametry laseru a strukturou materiálů při mikroobrábění. Aby se docílilo propojení laserových parametrů s vlivem struktury, musely být jednotlivé materiály zanalyzovány. Zjišťovalo se chemické složení, velikost zrn, kruhovitost zrn a tvrdost. Testované materiály byly nepovlakované slinuté karbidy vyměnitelných břitových destiček od výrobců SECO, Dormer Pramet a Tungaloy. Po zjištění materiálových hodnot byl na vybrané materiály aplikován experiment na laserové mikroobrábění. Metodicky bylo nastaveno zjišťování jednotlivých veličin, které postupně rozklíčovaly to nejefektivnější obrábění.

Vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů jsou v dnešní době jedny z nejpoužívanějších nástrojů pro obrábění kovů. Dnešní trend je neustále zvyšovat rychlost obrábění, a to zejména zvyšováním řezných rychlostí do maxima. To způsobuje rychlé delimitace břitů. Proto se postupně přistupuje k tomu, že se vytvářejí na povrchu čela břitových destiček funkční struktury, které způsobí lepší odvod tepla a vyvolají menší třecí síly. Další z možností laserového mikroobrábění břitových destiček je ve výzkumu různých tvarů utvařečů. Jelikož je laser velmi přesný nástroj, může vytvářet opakovaně totožné tvary. Nevýhoda je pouze v účinnosti, proto by se z časového hlediska nevyplatilo vytvářet hluboké utvařeče sériově. Ale pro jemné struktury do hloubky desítek mikrometrů je toto použití výhodné.

Cíl práce byl splněn a tím se podařilo optimalizovat a zefektivnit proces mikroobrábění tvrdých materiálů ze slinutého karbidu. Jednotlivé zhodnocení úběru materiálu s výstupními hodnotami je zobrazeno pod názvem vzorku.

SECO HX

Tento vzorek vykazoval po materiálové analýze největší zrnitost struktury. Podle zhodnocení kapitoly 2.3.1 s Obrázkem 23 byla struktura zařazena do typu f2. Chemické složení zařazuje vzorek do jednodobých karbidů skupiny K. Jednotlivá zrna měla na povrchu průměrnou hodnotu plochy $0,45 \mu\text{m}^2$. To po přepočtu znázorňuje průměrnou hodnotu zrna $0,76 \mu\text{m}$. Velikost zrn a nejmenší procentuální složení WC představovalo nejmenší tvrdost vzorku a to 1571 HV. S velikostí karbidických zrn také souvisí úběr materiálu při optimálně nalezené frekvenci 2000 Hz. Ze všech tří vzorků měla při dané frekvenci nejmenší úběr materiálu -162,4

μm . Optimální rychlost byla při dané frekvenci 500 mm/s s negativním -150 % překryvem. Nejefektivnější úběr za čas byl způsoben velkou délkou laserového pulzu 120 ns. Docházelo zde k velkému tepelnému ovlivnění okolního materiálu a tím i naakumulování dostatečné energie k vytržení tvrdých částic karbidů. Po vyšetření ablačního prahu víme, že k ablaci tohoto vzorku dochází už při hustotě energie 15,949 J/cm². Při nastavení optimálních parametrů působí na materiál hustota energie 196 J/cm², která o 92 % převyšuje zjištěný ablační práh. Poslední z řad experimentů byl na zjištění závislosti opakovatelnosti skenovacích vrstev, který ukázal, že s vyšším počtem vrstev dochází k menším úběrům materiálu na vrstvu. Menší úběr materiálu je způsoben vyšší odrazivostí tekuté fáze při obrábění, která zmenší účinnost laserového paprsku. S více přejezdy dochází k vyšší drsnosti. To způsobuje efektivní obrábění pojivové složky kobaltu ve slinutém karbidu. Zbylé wolfram karbidy z povrchu vystupují a vytvářejí tak vyšší drsnost

Dormer Pramet 415

Podobné závěry mikroobrábění byly i u vzorku DP 415, u kterého byla zjištěna jemnější struktura nestejných velikostí a tvarů zrn typu f1 + f3. Chemické složení řadí vzorek do jednokarbidových karbidů skupiny K. Průměrná plocha zrna 0,38 μm^2 má po přepočtu průměrnou velikost zrna 0,69 μm . S jemnější strukturou vychází i vyšší tvrdost 1670 HV. Jak již bylo zmíněno v závěru u vzorku SECO, tak i zde platí pravidlo, že s menším zrnem dochází k většímu materiálovému úběru laserem. Dosahované hodnoty při optimální frekvenci 2000 Hz bylo -179,7 μm . Optimální rychlost byla i v tomto případě 500 mm/s. Po zjištění ablačního prahu 15,105 J/cm² je u tohoto typu materiálu vložena hustota energie při optimálních parametrech 196 J/cm². Poslední zjišťovaná závislost byla změna skenovacích vrstev, kde se vývoj úběru materiálu na jednu vrstvu choval stejně jako u vzorku SECO. Je to způsobeno zvýšenou odrazovou schopností tavné lázně při obrábění.

Tungaloy TH10

Poslední z testovaných vzorků měl nejjemnější strukturu, která vznikla přidáním legujících prvků Ti, Nb, Ta, které potlačují růst karbidických zrn. Zjištění přítomnosti dalších legujících prvků řadí vzorek TH10 do dvoukarbidových karbidů skupiny P. Drobná nepravidelná zrna představují typ struktury f1. Velikost karbidických zrn o průměrné ploše 0,27 μm^2 mají po přepočtu průměrná zrna 0,59 μm . Malá zrna společně s 96,19 % karbidickou složkou WC tvoří

nejtvrdší testovaný karbid o tvrdosti 1734 HV. Jako optimální nalezená frekvence byla 2500 Hz, při které docházelo k největšímu úběru $-194,6 \mu\text{m}$. Optimální rychlost pro tuto frekvenci byla i v tomto případě 500 mm/s. S tím, že při frekvenci 2500 Hz je -100 % negativní překryv jednotlivých pulzů. Optimální úběr za čas byl způsoben vyšší ovlivněnou materiálovou oblastí s velkou délkou pulzu 120 ns. U tohoto vzorku byla zjištěna minimální prahová hodnota $16,462 \text{ J/cm}^2$, od které dochází k ablaci materiálu. Při optimálně nastavených parametrech je hustota energie 179 J/cm^2 , která více jak desetinásobně převyšuje minimální ablační hodnotu. Poslední z testů byla opakovatelnost jednotlivých skenovacích vrstev, kde se zvyšováním vrstev snižoval úběr materiálu na vrstvu a zvyšovala se drsnost Ra. Efektivní obrábění se považuje do 50 skenovacích vrstev. Zvyšováním počtu skenovacích vrstev se tavnou lázní obráběného materiálu zvýší odrazivost a klesne obrobiteľnosť. Drsnost byla u tohoto vzorku ze všech nejvyšší. Je to pravděpodobně způsobeno nejnižším obsahem pojivové složky kobaltu. Kde v první řadě docházelo k odstranění měkké složky kobaltu, která odkryla tvrdé karbidy a tím se zvýšila drsnost obroběného materiálu.

7.1. Závěry

Vliv chemického složení slinutých karbidů je jednou z nejvíce ovlivňujících materiálových parametrů. S vyšším obsahem karbidové složky wolframu vznikají menší karbidická zrna. S tím je spjata tvrdost i lomová houževnatost. Nejmenší zjištěná karbidická zrna byla u vzorku TH10 o průměru $0,59 \mu\text{m}$, která pozitivně působila na tvrdost. Tvrdost byla u nejmenších zrn 1734 HV. Naopak s menším průměrem karbidických zrn a vyšším obsahem WC se zhoršuje lomová houževnatost. Ta byla u vzorku TH10 $10,05 \text{ MN/m}^{3/2}$. V porovnání se vzorkem SECO se snížením obsahu WC o 4 % zvětší karbidické zrno o 23 %. Se zvětšením zrna o 23 % souvisí i tvrdost, která je téměř o 10 % menší. Se snížením tvrdosti materiálu o 10 % se zvýší lomová houževnatost na $11,24 \text{ MN/m}^{3/2}$. Všechny tyto zmíněné závislosti mají exponenciální průběhy. Zbylé hodnoty vzorků jsou zobrazeny v Tabulce 21.

Tabulka 21: Materiálové vlastnosti vybraných vzorků

	WC [%]	Velikost zrna [μm]	Tvrdost [HV]	K_{IC} [$\text{MN/m}^{3/2}$]
SECO	92,02	0,76	1571	11,24
DP415	95,58	0,69	1670	10,33
TH10	96,19	0,59	1734	10,05

Vliv chemického složení nepůsobí jen na materiálové vlastnosti, ale také na kvalitu a obrobitelnost laserem. S vyšším obsahem wolframu a menším obsahem kobaltu se dosahuje větší obrobitelnosti. U vzorku TH10, kde bylo nejmenší zrno a největší tvrdost, bylo docíleno největšího úběru materiálu do hloubky 194,6 μm . Zmenšením tvrdosti o 100 HV se zmenší úběr materiálu o 8 %. Velikost zrna s malým obsahem kobaltu způsobuje větší drsnost na obrobené ploše než u zbylých materiálů. Zvětšováním karbidického zrna s větším obsahem podílu kobaltu se drsnost zmenšuje. Jednou z teorií je, že se zbylý natavený kobalt rozteče mezi vystupující zrna karbidů a tím se na povrchu zmenší drsnost. Ostatní materiálová porovnání jsou zobrazena v Tabulce 22.

Tabulka 22: Výsledky experimentů

	Velikost zrna [μm]	W [%]	Co [%]	Tvrdost [HV]	Úběr materiálu [μm]	Ra [μm]
SECO	0,76	72,8	7,98	1571	162,4	7,3
DP415	0,69	75,87	4,42	1670	179,7	8,5
TH10	0,59	79,24	2,36	1734	194,6	13,4

Výsledky kruhovitosti zrna procentuální množství dutin a zrn v řešené ploše nemají vliv na výslednou obrobitelnost materiálu laserem.

Další možnost pokračování v této práci by bylo ve vytvoření materiálové analýzy obrobených vzorků a zjištění změny strukturních složek. Vytvořením EDX analýzy, by se na povrchu zjistilo chemické složení zkoumaného materiálu. Po zjištění změn chemického složení by se dalo lépe porozumět závislostem mezi materiály slinutých karbidů a jejich obrobitelností laserem. Další možnost pokračování by bylo v porovnání obrobitelnosti vzorků slinutých karbidů podobného chemického složení s rozdílnými typy struktur. Poté by se daly lépe graficky zhodnotit závislosti úběru materiálu na změně chemického složení a typu struktury.

Poslední z možných návrhů na pokračování experimentu by bylo na zvýšení kvality obrobené plochy nanosekundovým laserem. Po vypracování této diplomové práce je nyní známo, že při přiblížení hustoty energie k minimální prahové hodnotě se zvyšuje kvalita obrobené plochy. Podle zjištěných hodnot ablačního prahu by bylo možné se pomocí změny parametrů přiblížit k prahové hodnotě tak, aby bylo splněno kritérium vyšší kvality obrobené plochy s optimálním úběrem.

8. Citovaná literatura

1. N.N.GREENWOOD a A, EARNSHAW. *Chemistry of the Elements*. Oxford : Pergamon Press plc, 1984. 80-85427-38-9.
2. BROOKES, K.J.A. *World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard Materials*. East Barnet Hertfordshire : -, 1997. 0950899542.
3. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : VUT, 2006.
4. *Uživatelská příručka - materiály*. - : Sandvik Coromant.
5. Soustružnické nástroje. *Sandvik Coromant*. Švédsko : AB Sandvik Coromant, 2017.
6. SVĚTELSKÝ, J. *Výroba a všeobecné použití slinutých karbidů*. Brno : VUT, 2016.
7. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha : MM publishing, s.r.o. 978-80-254-2250-2.
8. KOL., L. PTÁČEK A. *Nauka o materiálu II*. . Brno : Akademické nakladatelství CERN, s.r.o. , 2002. 80-7204-248-3.
9. Periodická tabulka. *www.prvky.com*. [Online] [Citace: 26. 3 2018.] <http://www.prvky.com/27.html>.
10. HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno : CCB, 1995. 80-85825-10-4.
11. DRIML, B. *Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení*. Olomouc : UPOL.
12. *Zkoušky tvrdosti*. [pdf.] Plzeň : ZCU.
13. STUHLÍK, Jiří. *Vliv materiálových charakteristik a pracovních parametrů na obrobitelnost laserem*. Praha : ČVUT, 2016.
14. RÜTERING, Marus. *Co rozhoduje při volbě typu laseru*. [web] - : MMspektrum, 2011.
15. Akela. *akelaser.com*. [Online] [Citace: 23. Duben 2018.] <http://www.akelalaser.com/markets/industrial/>.
16. Q Switching. *rp-photonics.com*. [Online] [Citace: 27. Duben 2018.] https://www.rp-photonics.com/q_switching.html.

17. Pevnolátkový Nd:YAG laser v režimu volné generace a v režimu Q-spínání., *people.fjfi.cvut.cz*. [Online] 2018. [Citace: 27. Duben 2018.] <http://people.fjfi.cvut.cz/blazejos/public/ul1.pdf>.
18. STANĚK, Tomáš. Metody Q spínání. *people.fjfi.cvut.cz*. [Online] 2013. [Citace: 27. Duben 2018.] http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/fla/2013/referaty/Stanek_MetodyQswitch.pdf.
19. PASCHOTTA, Rüdiger. Mode Locking. *rp-photonics.com*. [Online] RP Photonics. [Citace: 27. Duben 2018.] https://www.rp-photonics.com/mode_locking.html.
20. ULM, Thorsten, HARTH, Florian a LHUILLIER, Johannes. *High Power Femtosecond diode lasers*. Kaiserslautern : Springer, 2016.
21. SANJAY, M a VIDOD, Y. *Laser Beam MicroMachining (LBMM) - a review*. Indie : Optics and Lasers in Engineering, 2015.
22. BUCHFINK, G. *The laser as a tool*. Wurzburg : Vogel Buchverlag , 2007. ISBN-10 3-8343-3072-8.
23. HORN, Alexander, a další. Micromachining. *Ultrashort Pulse Laser Technology*. místo neznámé : Springer, 2016. 978-3-319-17659-8.
24. CHENG, J, a další. Ultrafast laser materials micromachining. *Optics and Laser Technology*. 2013, Sv. 46, 88-102.
25. ČERMÁK, Adam. Laser v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů. *Disertační práce*. Plzeň : ZCU, 2017.
26. LÁZNIČKA, Pavel. Laserové mikroobrábění. *Diplomová práce*. Brno : VUT, 2014.
27. MANUEL, Lopéz, JOSÉ, a další. Droplet assisted laser micromachining of hard ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 11, 2016, Sv. 36., 2689-2694.
28. BENGTTSSON, Magnus, Müller, Dirk a Klimt, Bernhart. Picosecond lasers come of age for micromachining. *industrial-lasers.com*. [Online] 5. Leden 2013. [Citace: 3. Květen 2018.] <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-3/features/picosecond-lasers-come-of-age-for-micromachining.html>.

29. ROBERTS, Sue. The Quickening Pulse of Laser Machining. *canadianmetalworking.com*. [Online] 12. Květen 2016. [Citace: 3. Květen 2018.] <https://www.canadianmetalworking.com/article/metalworking/the-quickening-pulse-of-laser-machining><https://www.canadianmetalworking.com/article/metalworking/the-quickening-pulse-of-laser-machining>.
30. GARROU, Phil. IFTLE 357 SEMICON Taiwan Part 2: Laser Processing. *http://electroiq.com*. [Online] Solid State Technology, 2017. [Citace: 3. Kveten 2018.] <http://electroiq.com/insights-from-leading-edge/2017/10/iftle-357-semicon-taiwan-part-2-laser-processing/>.
31. BRAJER, Jan, a další. Technologie výřezů v plošných dílcích laseru. *Výzkumná zpráva*. Praha : RCMT FS ČVUT, 2015.
32. JANOŮŠEK, Antonín. Vlastnosti slinutých karbidů a jejich aplikace na řezné nástroje. *Diplomová práce*. Plzeň : ZCU, 2014.
33. HANYKO Praha. [Online] [Citace: 6. Květen 2018.] <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/>.
34. KRYŠTŮFEK, Pavel. Zkouška tvrdosti dle Vickerse. *conVERTER*. [Online] [Citace: 6. Květen 2018.] <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>.
35. GILLE, G., a další. *Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts*. místo neznámé : International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2001.
36. WEILAND, F. *Cerametal S.à.r.l., eine Spitzenadresse nicht nur in Europa Hartmetall und Hartmetallwerkzeuge auf und mit Welt-Niveau*. - : Revue Technique Luxembourgeoise, 1996.