

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 – Obrábění, aditivní
technologie a zabezpečování kvality

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrábění slinutého karbidu pomocí monolitní frézy

Autor: Bc. Lukáš FIALA

Vedoucí práce: Ing. Luboš KROFT, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš FIALA**
Osobní číslo: **S19N0100P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Studijní obor: **Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Obrábění slinutého karbidu pomocí monolitní frézy**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Analýza současného stavu řešené problematiky
3. Návrh, realizace a vyhodnocení experimentálního měření
4. Technické hodnocení navržených variant
5. Zhodnocení a závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Elektronické informační zdroje dostupné z www.knihovna.zcu.cz
- CIRP ANNALS – Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net/>)
- SANDVIK Coromant, Sandviken: Technická příručka obrábění, dostupné z:
<http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/>
- <http://www.isf.de/de/index.html>
- Elektronické informační zdroje
- Interní podklady ZČU-KTO

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Kroft, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Luboši Kroftovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této diplomové práce. Dále pak Ing. Jiřímu Hruškovi za odborné rady.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Fiala	Jméno Lukáš		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kroft, Ph.D.	Jméno Luboš		
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ		Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Obrábění slinutého karbidu pomocí monolitní frézy			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	84	TEXTOVÁ ČÁST	63	GRAFICKÁ ČÁST	10
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato diplomová práce se zabývá frézováním slinutého karbidu pomocí frézy ze slinutého karbidu deponované diamantovým povlakem a frézy s PCD destičkami. Na získané poznatky lze navázat další experimentální práci s cílem nalezení produktivního nástroje pro danou aplikaci.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Frézování, slinutý karbid, polykrystalický diamant (PCD), diamantový povlak, kulová fréza, obrábění velmi tvrdých materiálů</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Fiala	Name Lukáš		
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, additive technology and quality assurance			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kroft, Ph.D.	Name Luboš		
INSTITUTION	ZČU – FST – KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Machining of cemented carbide using solid end mill			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	84	TEXT PART	63	GRAPHICAL PART	10
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis deals with milling of cemented carbide using a diamond-coated ball end mill and a PCD end mill and presents the results which are necessary for the future work on finding the efficient tool for this kind of purpose.
KEY WORDS	Diamond-coated ball end mill, tungsten carbide, cemented carbide, polycrystalline diamond (PCD), direct milling, hard machining

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	3
Seznam obrázků	4
Seznam tabulek	7
1 Úvod.....	8
1.1 Podnět k diplomové práci.....	8
2 Rešerše v oblasti frézování slinutých karbidů.....	9
2.1 Mechanisms and characteristics of direct cutting of tungsten carbide using a diamond-coated carbide end mill	9
2.2 Applicability of diamond-coated tools for ball end milling of sintered tungsten carbide	10
2.3 Evaluation of finished surface of cemented carbide by direct cutting using diamond-coated carbide end mill	11
2.4 Sumidia binderless ball-nose endmills „NPDB“ for direct milling of cemented carbide	11
2.5 Experimental study on the meso-scale milling of tungsten carbide WC-17,5Co with PCD end mills	13
2.6 Shrnutí rešeršní práce	14
3 Problematika obrábění tvrdých materiálů	15
3.1 Obrobitelnost tvrdých materiálů.....	15
3.1.1 Opotřebení nástroje	15
3.1.2 Obráběné materiály	16
3.1.3 Tvrdost materiálu	17
3.2 Technologie obrábění tvrdých materiálů.....	19
3.2.1 Obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií břitu.....	20
3.2.2 Obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu.....	21
3.2.3 Progresivní obrábění tvrdých materiálů	24
4 Řezné materiály pro obrábění velmi tvrdých materiálů.....	28
4.1 Povlakování nástrojů	29
4.2 Diamant jako řezný materiál.....	29
4.2.1 Nástroje s diamantovými povlaky.....	30
4.2.2 PCD nástroje	30
4.2.3 Opotřebení nástrojů z PCD a CVD diamantu	30
5 Slinuté karbidy	31
5.1 Výroba slinutých karbidů	31
5.2 Rozdělení slinutých karbidů	32

5.3	Využití slinutých karbidů	32
6	Pre-experiment	33
6.1	Vstupní informace	33
6.1.1	Použitý materiál obrobku	33
6.1.2	Použitý stroj.....	34
6.1.3	Použitá měřicí zařízení	35
6.1.4	Použitý nástroj.....	35
6.2	Popis pre-experimentu	38
6.2.1	První část	39
6.2.2	Druhá část.....	40
6.2.3	Třetí část.....	41
6.3	Shrnutí pre-experimentu	42
7	Experiment	43
7.1	Experiment s variantou povlakovaného nástroje.....	43
7.1.1	Výsledky experimentu.....	45
7.1.2	Shrnutí experimentu s povlakovaným nástrojem	49
7.2	Experiment s variantou nástroje s PCD destičkami.....	51
7.2.1	Popis experimentu	52
7.2.2	Výsledky experimentu.....	52
7.2.3	Shrnutí experimentu s nástrojem s PCD destičkami	60
8	Technické zhodnocení variant řešení	61
8.1	Návrh dalšího postupu řešení	62
9	Závěr.....	63
	Seznam použité literatury a zdrojů.....	64
	Seznam příloh.....	68

Přehled použitých zkratk a symbolů

S-N-O – soustava stroj – nástroj – obrobek (možné doplnit o P – přípravek)

EDM – electric discharge machining – elektrojiskrové (elektroerozivní) obrábění

HSS – high speed steel – rychlořezná ocel

HRC – značení zkoušky tvrdosti podle Rockwella se zatížením 1500 N

HRA – značení zkoušky tvrdosti podle Rockwella se zatížením 500 N

HV30 – značení zkoušky tvrdosti podle Vickerse se zatížením 300 N

HV10 – značení zkoušky tvrdosti podle Vickerse se zatížením 100 N

PCD – polykrystalický diamant

CBN – kubický nitrid boru

EDS – energy dispersive spectroscopy – analýza chemického složení vzorku

CVD – chemical vapor deposition – chemická depozice z plynné fáze

PVD – physical vapour deposition – deponování odpařením z pevné fáze

VBD – vyměnitelná břitová destička

R_a – střední aritmetická hodnota drsnosti [μm]

v_f – rychlost posuvu [mm/min]

v_c – řezná rychlost [m/min]

f_z – posuv na zub [mm]

n – otáčky [ot/min]

a_e – šířka řezu [mm]

a_p – hloubka řezu [mm]

TiC – karbid titanu

TiN – nitrid titanu

TiCN – karbonitrid titanu

Al_2O_3 – oxid hlinitý

2D – dvourozměrný

3D – trojrozměrný

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Obrobek ze slinutého karbidu	8
Obrázek 2.1 Odloupení povlaku (oblast Flaking) [3].....	10
Obrázek 2.2 Detail oblasti D z obrázku 2.1[3].....	10
Obrázek 2.3 Srovnání tvrdostí velmi tvrdých materiálů [39].....	12
Obrázek 2.4 Autory vyvinutý nástroj z NPD materiálu [39]	12
Obrázek 2.5 Úrovně obrábění [44].....	13
Obrázek 2.6 Znázornění prezentované myšlenky hodnocení mikro-trhlin na PCD nástrojích [40]	13
Obrázek 3.1 Velikost měrného řezného odporu pro různé materiálové skupiny [43]	15
Obrázek 3.2 Ukázka křehkého porušení (vyštipování) břitu na VBD [46].....	16
Obrázek 3.3 Skupiny obráběných materiálů [11].....	17
Obrázek 3.4 Porovnání řezných materiálů v závislost tvrdosti (odolnosti proti opotřebení) na houževnatosti [33]	18
Obrázek 3.5 Zkouška tvrdosti - Rockwell (HRC)[47].....	18
Obrázek 3.6 Zkouška tvrdosti - Vickers (HV)[48].....	18
Obrázek 3.7 Tvrdé frézování formy s chlazením vzduchem [42].....	22
Obrázek 3.8 Při tvrdém obrábění dochází ke vzniku vysokých teplot v oblasti řezu [45].....	23
Obrázek 3.9 Tvrdé soustružení [15]	24
Obrázek 3.10 Schéma elektroerozivního obrábění [17].....	25
Obrázek 3.11 Schéma obrábění za pomoci laserového paprsku [22]	26
Obrázek 4.1 Výroba roubíků z CBN případně PCD pro VBD [32].....	28
Obrázek 4.2 Podoba VBD s roubíky z CBN a PCD [31].....	29
Obrázek 5.1 Závislost tvrdosti na obsahu Co a velikosti zrn WC[12][33].....	31
Obrázek 5.2 Závislost pevnosti v ohybu na obsahu Co a velikosti zrn WC [12][33].....	31
Obrázek 6.1 Analýza chemického složení pomocí EDS.....	34
Obrázek 6.2 Obráběcí centrum DMU 40 eVo linear [8].....	34
Obrázek 6.3 Digitální mikroskop VHX 6000 [9].....	35
Obrázek 6.4 Nákres nástroje s označením INSAP020-144562R001 [24]	36
Obrázek 6.5 Snímek špičky nástroje s označením INSAP020-144562R001.....	36
Obrázek 6.6 Snímek nástroje s označením INSAP020-144562R001	36
Obrázek 6.7 Nákres nástroje s označením INDIABN04.06Z02R020 [25].....	37
Obrázek 6.8 Snímek špičky nástroje s označením INDIABN04.06Z02R020	37
Obrázek 6.9 Snímek jedné břitové destičky nástroje s označením INDIABN04.06Z02R020	37
Obrázek 6.10 Snímek druhé břitové destičky nástroje s označením INDIABN04.06Z02R020	37

Obrázek 6.11 Snímek z mikroskopu řezu vybrané kapsy obrobené pomocí tříosého obrábění	39
Obrázek 6.12 Snímek z mikroskopu řezu vybrané kapsy obrobené pomocí pětiosého obrábění	40
Obrázek 6.13 Nástroj po první dráze.....	41
Obrázek 6.14 Detail zvýrazněné oblasti z obrázku 6.13	41
Obrázek 6.15 Nástroj po druhé dráze. Kružnice zobrazuje původní tvar frézy	42
Obrázek 7.1 Znázornění drah nástroje na obrobku.....	43
Obrázek 7.2 Znázornění drah nástroje v CAD/CAM.....	43
Obrázek 7.3 Obrobek upnutý ve stroji	44
Obrázek 7.4 Nástroj č. 3 po první řezné hladině.....	46
Obrázek 7.5 Nástroj č. 3 po druhé řezné hladině.....	46
Obrázek 7.6 Nástroj č. 3 po třetí řezné hladině.....	46
Obrázek 7.7 Nástroj č. 3 po čtvrté řezné hladině.....	46
Obrázek 7.8 Nástroj č. 1 po poslední řezné hladině.....	47
Obrázek 7.9 Nástroj č. 2 po poslední řezné hladině.....	47
Obrázek 7.10 Nástroj č. 2 po poslední řezné hladině.....	48
Obrázek 7.11 Nástroj č. 3 po poslední řezné hladině.....	48
Obrázek 7.12 Nástroj č. 4 po poslední řezné hladině.....	49
Obrázek 7.13 Nástroj č. 5 po poslední řezné hladině.....	49
Obrázek 7.14 Nástroj před testem.....	50
Obrázek 7.15 Nástroj č. 1.....	50
Obrázek 7.16 Nástroj č. 2.....	50
Obrázek 7.17 Nástroj č. 3.....	50
Obrázek 7.18 Nástroj č. 4.....	50
Obrázek 7.19 Nástroj č. 5.....	50
Obrázek 7.20 Znázornění dráhy nástroje v CAD/CAM.....	51
Obrázek 7.21 Upnutí obrobku ve stroji.....	51
Obrázek 7.22 Opotřebení nástroje po 10 drahách na jednom z břitů.....	53
Obrázek 7.23 Opotřebení nástroje po 10 drahách na druhém z břitů.....	53
Obrázek 7.24 Detail opotřebení z obrázku 7.22.....	53
Obrázek 7.25 Opotřebení nástroje po 20 drahách na jednom z břitů.....	54
Obrázek 7.26 Opotřebení nástroje po 20 drahách na druhém z břitů.....	54
Obrázek 7.27 Detail opotřebení z obrázku 7.25.....	54
Obrázek 7.28 Stav jednoho z břitů po 1. dráze.....	55
Obrázek 7.29 Stav druhého z břitů po 1. dráze.....	55
Obrázek 7.30 Stav jednoho z břitů po 9. dráze.....	55
Obrázek 7.31 Stav druhého z břitů po 9. dráze.....	55
Obrázek 7.32 Stav jednoho z břitů po 19. dráze.....	56
Obrázek 7.33 Stav druhého z břitů po 19. dráze.....	56

Obrázek 7.34 Pohled shora na jeden z břitů po 19. dráze.....	56
Obrázek 7.35 Pohled shora na druhý z břitů po 19. dráze.....	56
Obrázek 7.36 Stav jednoho z břitů po 3. dráze.....	57
Obrázek 7.37 Stav druhého z břitů po 3. dráze.....	57
Obrázek 7.38 Stav jednoho z břitů po 6. dráze.....	58
Obrázek 7.39 Stav druhého z břitů po 6. dráze.....	58
Obrázek 7.40 Stav jednoho z břitů po 14. dráze.....	58
Obrázek 7.41 Stav druhého z břitů po 14. dráze.....	58
Obrázek 7.42 Pohled shora na jeden z břitů po 14. dráze.....	59
Obrázek 7.43 Pohled shora na druhý z břitů po 14. dráze.....	59
Obrázek 7.44 Příčný řez drážkou u kolmého nástroje	60
Obrázek 7.45 Příčný řez drážkou u nástroje nakloněného o 40°	60
Obrázek 9.1 Torusová fréza od výrobce 6C Tools AG [37]	62
Obrázek 9.2 Kulová fréza od výrobce 6C Tools AG [36]	62

Seznam tabulek

Tabulka 3.1 Převod tvrdosti materiálů	19
Tabulka 7.1 Zvolené řezné podmínky u experimentu s povlakovaným nástrojem.....	44
Tabulka 7.2 Řezné podmínky nástroje č. 3	46
Tabulka 7.3 Řezné podmínky nástrojů č. 1 a 2	47
Tabulka 7.4 Řezné podmínky nástrojů č. 2 a 3	48
Tabulka 7.5 Řezné podmínky nástrojů č. 4 a 5	49
Tabulka 7.6 Řezné podmínky nástroje č. 1	52
Tabulka 7.7 Řezné podmínky nástroje č. 2	54
Tabulka 7.8 Řezné podmínky nástroje č. 3	57

1 Úvod

V posledních letech, na základě vydaných článků zhruba od roku 2015, se vývoj řezných nástrojů začíná zabírat myšlenkou obrábění materiálu, jako je slinutý karbid. Slinuté karbidy jsou materiály dosud využívané především k obrábění, a ne jako předmět obrábění. Poptávka producentů licích a vstřikovacích forem, lisovacích a střížných forem nebo zápustek vede výrobce nástrojů k hledání nových nástrojů či inovativních strategií a technologií vhodných k produktivnímu obrábění tak tvrdého materiálu, jakým je slinutý karbid.

Právě komplexní efektivnost možného řešení je jedním z hlavních důvodů, proč mnozí k třískovému obrábění tolik vzhlíží. Dosavadní metody obrábění takto tvrdých materiálů jsou pro malé úběry často časově velmi náročné, což se následně pojí i s horší rentabilitou výroby nehledě na kvalitu povrchu nebo omezenost, co do rozmanitosti tvaru obrobku.

Tato práce je pojata jako úvod do problematiky obrábění slinutého karbidu. Poskytuje poznatky nasbírané v této oblasti z dostupných studií a nabízí vstup do experimentálně hledaného řešení. Cílem této práce je porovnání teoretických očekávání nabytých z prostudovaných studií s praktickými testy provedenými dostupnými nástroji na dodaném vzorku slinutého karbidu.

1.1 Podnět k diplomové práci

Tato práce vznikla na základě zájmu výrobce nástrojů firmy ISCAR o otestování nástrojů z jejich portfolia na konkrétním obrobku ze slinutého karbidu. Tento požadavek přišel od jejich zákazníka, výrobce skleněných výrobků složitých tvarů, který k jejich výrobě využívá forem právě ze slinutého karbidu. Dosavadní výroba pomocí elektroerozivního obrábění (EDM) je pro ně energeticky a časově náročná a často se nedosahuje požadovaných kvalit obrobené plochy.

Testovaným předmětem obrábění v této práci se proto stala část formy na skleněné korálky vyrobená ze slinutého karbidu, viz obrázek 1.1, kde jsou v horní části na obvodu prstence viditelné kapsy, jejichž výroba třískovým obráběním by měla nahradit dosavadní technologii – EDM.



Obrázek 1.1 Obrobek ze slinutého karbidu

2 Rešerše v oblasti frézování slinutých karbidů

Rešeršní prací v problematice frézování slinutého karbidu, byly nalezeny studie zabývající se touto problematikou, jejichž výsledky byly brány v potaz v experimentální části této práce. Nalezené podklady ukazují, že mnohé výzkumné týmy hledají řešení v této oblasti, ale že stále nikdo nedošel k produktivnímu řešení, které by bylo využitelné pro výrobní praxi. Nalezení efektivních podmínek, za kterých by slinutý karbid mohl být frézován, je zcela jistě jedním z dalších milníků v technologii obrábění.

Na předních místech ve vývoji frézování slinutých karbidů stojí japonské univerzity, jejichž výzkumy poskytují nejvíce podkladů a nabízejí základní vhled do fyzikálních jevů při obrábění takto tvrdých materiálů. Výsledky dostupných studií seznamují s měřeními popisujícími zvolené experimentální podmínky a chování rezného prostředí, obrobku a nástroje, nenabízejí však jednoznačný návrh pro produktivní obrábění využitelné ve výrobním procesu.

Za studie poskytující nejrelevantnější informace považují články níže popsání, věnující se problematice frézování slinutých karbidů.

V následujících kapitolách rešeršní části diplomové práce jsou v kapitolách 2.1 – 2.3 popsány studie zabývající se frézováním slinutého karbidu pomocí karbidové frézy s diamantovým povlakem. Kapitoly 2.4 a 2.5 nabízí řešení frézování slinutého karbidu pomocí polykrystalického diamantu.

2.1 Mechanisms and characteristics of direct cutting of tungsten carbide using a diamond-coated carbide end mill

Autoři Okada et al. [3] vypracovali tuto práci na základě provedené rešerše se zaměřením na současné metody v obrábění slinutých karbidů. Výsledkem průzkumu bylo zjištění, že technologie využívané k obrábění slinutých karbidů jsou převážně založené na metodách využívajících principů elektrojiskrového obrábění, broušení nebo lapování. Všechny zmíněné postupy jsou ovšem neproduktivní, časově náročné a v případě EDM dochází k mikrotrhlinám na povrchu součásti. Tato práce vznikla s cílem experimentálně ověřit výrobní metodu, která by dosahovala vysokých hodnot úběru materiálu. S ohledem na ekonomičnost procesu byla pro tento experiment zvolena fréza ze slinutého karbidu povlakovaného CVD (chemical vapour deposition) diamantem. Materiály, jako kubický nitrid boru (CBN) a polykrystalický diamant (PCD), byly zavrženy právě pro jejich vysokou pořizovací cenu.

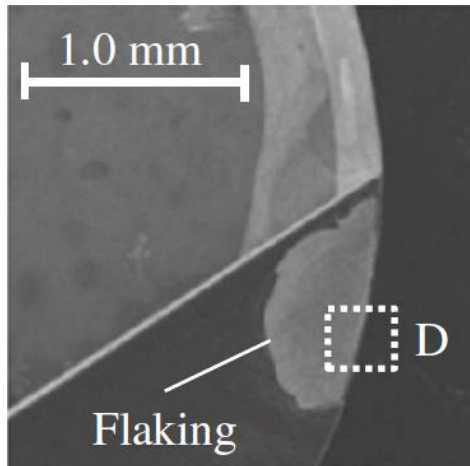
Pro experiment byla použita dvoubřitá kulová fréza o průměru 6 mm s diamantovým povlakem tloušťky 20 μm . Obráběn byl slinutý karbid o tvrdosti 90 HRA, s obsahem karbidu wolframu (WC) 80 – 90% a kobaltu (Co) 9 – 13%. Na vzorku se obráběly drážky pomocí 3 osého obrábění a oblast řezu byla chlazena pouze vzduchem.

Vhodnost nástroje byla posuzována na základě integrity obrobeného povrchu a opotřebení nástroje. Pro lepší interpretaci výsledků se v průběhu experimentu měřila i teplota řezání a rezné síly působící na obrobek. Z vyhodnocení teplot se došlo k závěru, že se zásadně neliší od teplot vyskytujících se v řezu při obrábění kalené oceli.

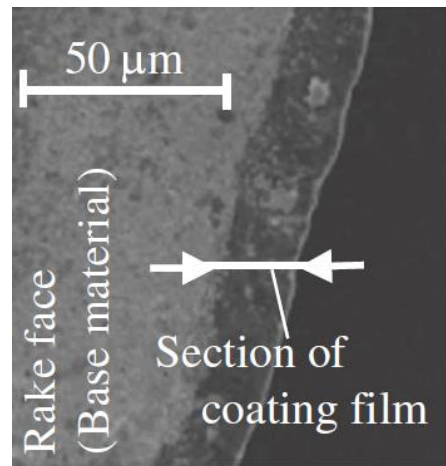
Experimentem bylo prokázáno, že ačkoliv se povlak na čele nástroje odštípne velmi záhy po začátku řezu, při velmi malých posuvech na zub stále dochází k úběru materiálu zbývajícím povlakem na hřbetu nástroje. Dokonce díky zostření geometrie frézy dojde ke snížení rezné síly a zvýšení objemu třísky. Z tohoto důvodu není vhodné, aby posuv na zub překročil hranici tloušťky povlaku. Odštípnutím povlaku z čela dochází ke změně hloubky řezu. Tento jev je možné, v případě nového nástroje a obrábění součásti na čisto, eliminovat cíleným opotřebením nástroje před samotným obráběním. V případě hrubování tento problém odpadá.

Při překročení posuvu na zub přes hranici tloušťky povlaku, dochází k lomu frézy po zhruba 100 mm v řezu.

Na obrázku 2.1 je viditelná oblast odloupení diamantového povlaku z čela nástroje. Na obrázku 2.2 je detail oblasti D z obrázku 2.1, kde je vyznačena tloušťka povlaku, která by pro stabilní obrábění měla být vždy vyšší než hodnota posuvu na zub.



Obrázek 2.1 Odloupení povlaku (oblast Flaking) [3]



Obrázek 2.2 Detail oblasti D z obrázku 2.1[3]

Bylo dosaženo maximální řezné dráhy 4680 mm. V této fázi již nebylo možné pokračovat ve stabilním řezu z důvodu absence povlaku na čele i hřbetu v oblasti špičky nástroje. Do dosažení maximální obrobenej dráhy nástroj vykazoval vysokou efektivitu úběru materiálu s odpovídající životností. Tohoto stabilního řezu bylo dosaženo za otáček vřetene $n = 20\,000$ ot/min, hloubky řezu $a_p = 0,2$ mm s posuvem na zub $f_z = 5$ μm/z.

2.2 Applicability of diamond-coated tools for ball end milling of sintered tungsten carbide

Studie autorů Suwa et al. [2] se zabývá výzkumem na poli frézování slinutého karbidu po zjištění, že aktuální vývoj v obrábění slinutých karbidů proběhl především v soustružení a elektrojiskrovém obrábění.

Předmětem obrábění se pro tuto práci staly vzorky ze slinutých karbidů různých zrnitostí karbidu wolframu a obsahů kobaltu. S tím souvisí odlišné tvrdosti vzorků od 86,2 HRA po 91,4 HRA, v závislosti na velikosti zrn WC a hmotnostních procent Co. Přičemž platí, že čím menší je velikost zrn WC a nižší obsah pojiva Co, tím vyšší je tvrdost materiálu.

K obrábění byla využita dvoubřitá kulová fréza o průměru 2 mm s diamantovým povlakem o tloušťce cca 10 μm s ostřím ve tvaru S při pohledu od špičky frézy. To dosahuje lepších výsledků než přímý tvar. Pro definování konce životnosti nástroje a ukončení testování dané frézy autoři stanovili jako rozhodující prvek viditelné odloupení diamantového povlaku z břitu frézy.

Pro potřeby této diplomové práce je ze studie vybrán popis výsledků dosažených u jednoho z autorů testovaných vzorků, který se vlastnostmi nejvíce blíží materiálu slinutého karbidu, který je předmětem obrábění v této práci.

Pro studii bylo využito 3 osého obrábění bez chlazení. Obráběnými vzorky byly kvádr a válec. Jedním z testovaných parametrů byla délka řezu. Předpoklad zde stanovený (a který by podle autorů měl být dále testován) je, že s rostoucí velikostí zrna WC a při vyšším z testovaných

posuvů na zub (ve studii použit $f_z = 0,05$ mm/z) se prodlužuje maximální řezná dráha. Z testovaných řezných podmínek pro vzorky z obsahem Co 10 % a 15 % se ukázaly jako vhodné otáčky $n = 20\,000$ ot/min, posuv na zub $f_z = 0,05$ mm/z při hloubce řezu $a_p = 0,086$ mm.

Dalším z testovaných parametrů byla drsnost povrchu, testovaná na vzorcích s hmotnostním obsahem kobaltu 15 % a 20 %. Nejlepších výsledků drsnosti v hodnotách R_a pohybujících se mezi 0,3 a 0,4 μm , dosáhly oba vzorky při řezných podmínkách $n = 20\,000$ ot/min, $f_z = 0,025$ mm/z při hloubce řezu $a_p = 0,086$ mm.

2.3 Evaluation of finished surface of cemented carbide by direct cutting using diamond-coated carbide end mill

Výzkum autorů Okada et al. [38] srovnává povrch slinutého karbidu dokončeného pomocí metody EDM, leštěním a frézováním karbidovou frézou s diamantovým povlakem.

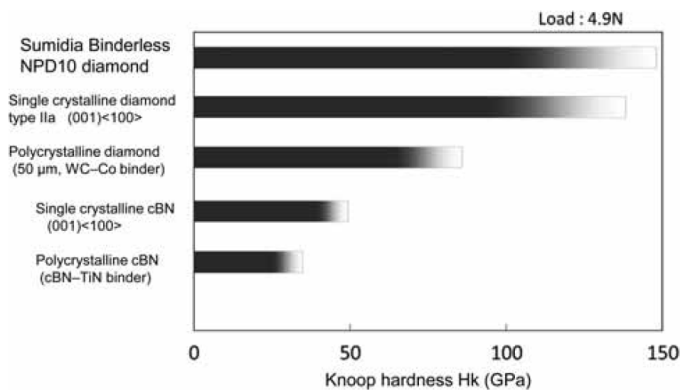
Obrobkem je slinutý karbid na bázi WC – Co s hmotnostním obsahem kobaltu 18 – 21 %, s tvrdostí 84 HRA. Využitá fréza je torusová dvoubřitá o průměru 2 mm, jejíž tělo tvoří slinutý karbid třídy K10 s řeznou částí deponovanou diamantovým povlakem o tloušťce 20 μm . Použité řezné podmínky jsou otáčky vřetene $n = 1000$ ot/min, $f_z = 5$ $\mu\text{m}/\text{z}$ při hloubce řezu $a_p = 0,02$ mm a šířce řezu $a_e = 0,12$ mm.

Výsledky studie shrnují, že zrcadlového povrchu bylo možné dosáhnout využitím frézování a leštění, ačkoliv zdaleka nejlepšího povrchu bylo dosaženo leštěním. Metoda EDM se ve srovnání s ostatními testovanými technologiemi neosvědčila pro dokončování. Experimentem byly získány hodnoty drsností R_a u EDM 2,04 μm , u frézování 0,05 μm a u leštění 0,01 μm .

2.4 Sumidia binderless ball-nose endmills „NPDB“ for direct milling of cemented carbide

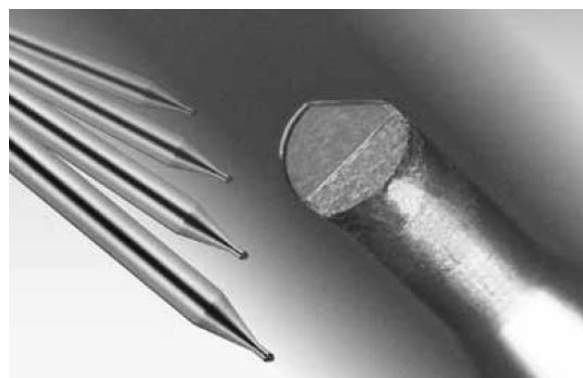
Autoři této studie, Shimada et al. [39], svoji práci založili na vývoji nové frézy, která by překonala nedostatky povlakovaných nástrojů vhodných pro aplikaci na slinuté karbidy, jako jsou především nedostatečná odolnost proti vylamování břitu, odolnost proti opotřebení a ostrost břitu. Stanoveným cílem bylo se s vyvinutým nástrojem přiblížit povrchu jako po leštění, ale s vyšší rozměrovou přesností.

Studie seznamuje s vyvinutým nástrojem označeným NPDB, který je tvořen PCD, nazývaném také nano-polykrystalický diamant (NPD), bez využití obvykle přítomného pojiva. Zatímco u běžného PCD je jako pojivo využíván kobalt ke spojení diamantových zrn velikosti 1 – 10 μm , u NPD jsou přímo bez pojiva spojena diamantová zrna o velikosti 30 – 50 nm. K tvorbě takového diamantu dochází za velmi vysokých tlaků (>15 GPa) a teplot (>2200 °C). NPD je tvrdší a není anizotropní jako monokrystalický diamant. Na obrázku 2.3 je znázorněno srovnání NPD s velmi tvrdými materiály využívanými pro obrábění nejtvrdějších materiálů.



Obrázek 2.3 Srovnání tvrdostí velmi tvrdých materiálů [39]

Ve studii je využit autory vyvinutý nástroj s NPD materiálem – kulová fréza o průměru 1 mm (obrázek 2.4). Autoři zmiňují vhodnost vyhrubování tvaru například diamantem povlakovaným brusným kotoučem a následného dokončení pomocí vyvinuté frézy. Fréza je otestována na třech typových součástech s půlkulovými kapsami. U jedné se zaměřením na vysokou kvalitu povrchu, u druhé na vysokou efektivitu obrábění a poslední při běžném využití. Ve všech případech bylo při obrábění využito olejové mlhy.



Obrázek 2.4 Autory vyvinutý nástroj z NPD materiálu [39]

Vysoké kvality povrchu bylo dosaženo obráběním SK s tvrdostí 92,5 HRA s obsahem Co 12 % při otáčkách vřetene $n = 40\,000$ ot/min, posuvové rychlosti $v_f = 120$ mm/min a hloubce a šířce řezu $a_p = a_e = 0,005$ mm. Po necelých 6 hodinách v řezu se dosáhlo drsnosti $R_a = 0,008$ μm.

Vysoké efektivnosti obrábění bylo dosaženo obráběním SK s tvrdostí 91,4 HRA s obsahem Co 13 % při otáčkách $n = 40\,000$ ot/min, posuvové rychlosti $v_f = 800$ mm/min a hloubce a šířce řezu $a_p = a_e = 0,005$ mm. Po 38 minutách v řezu se dosáhlo drsnosti $R_a = 0,015$ μm.

Běžných hodnot produktivity obrábění a drsnosti povrchu bylo dosaženo obráběním SK s tvrdostí 92,5 HRA s obsahem Co 12 % při otáčkách $n = 20\,000, 40\,000, 60\,000$ ot/min, posuvové rychlosti $v_f = 200, 400, 600$ mm/min a hloubce a šířce řezu $a_p = a_e = 0,005$ mm. Po 234 metrech v řezu se dosáhlo drsnosti $R_a = 0,050$ μm. Změna otáček se neukázala jako zásadní v hodnotách drsnosti povrchu R_a , ale při vyšších otáčkách bylo dosaženo většího lesku.

Obchodní název vyvinutého materiálu, Sumidia, je vlastněn firmou Sumitomo Electric, která nástroje z tohoto materiálu nabízí. V současné době se ovšem v dostupném katalogu vyskytují pouze VBD s roubíky s tímto materiálem. Kulové frézy zmiňované ve studii nelze dohledat.

2.5 Experimental study on the meso-scale milling of tungsten carbide WC-17,5Co with PCD end mills

Tato studie autorů Zhao et al. [40] se zakládá na poznacích o slinutých karbidech získaných z rešeršní práce se zaměřením na opotřebení nástroje a drsnost povrchu, která je obsahem studie a seznamuje s dostupnými výzkumy zabývajícími se vhodnými řeznými materiály, řeznými podmínkami, kombinacemi využívaných technologií nebo využívaných řezných kapalin. Získaná fakta lze shrnout tak, že se jedná o materiály extrémně odolné proti opotřebení, s vysokou tvrdostí, což je dělá velmi špatně obrobitelnými a dosažení produktivního obrábění je možné pouze při hloubkách řezu a posuvech na zub v mikro hodnotách. Tím se dosáhne tvárného řezu a eliminuje se riziko vzniku mikrotrhlin. Práce autorů se zaměřuje na obrábění na meso (střední) úrovni, viz obrázek 2.5.

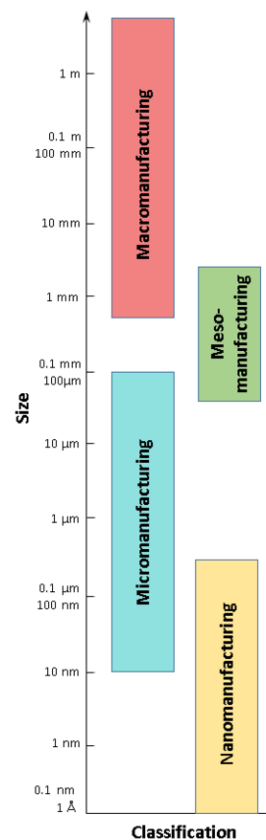
Pro experiment byla použita dvoubřitá fréza torusového tvaru o průměru 6 mm s napájenými PCD destičkami na těle ze slinutého karbidu. Obráběn byl vzorek na bázi WC a Co s obsahem kobaltu 17,5 % s tvrdostí 87,8 HRA. Obrábění proběhlo bez chlazení.

Nástroj byl testován za podmínek, kdy se měnil vždy jeden z parametrů pro vyhodnocení jeho vlivu na řezný proces. Řezné podmínky se tak pohybovaly u řezné rychlosti $v_c = 50 - 110$ m/min, posuvu na zub $f_z = 0,006 - 0,012$ mm/z a hloubky řezu $a_p = 0,008 - 0,014$ mm. Celkem bylo provedeno 10 testů.

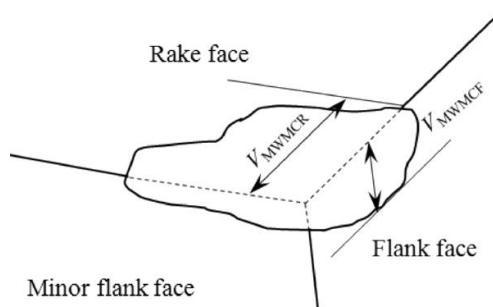
Výsledky studie se zaměřily na hodnocení drsnosti a míry opotřebení nástroje.

Bylo zjištěno, že se zvyšující se řeznou rychlostí nad 70 m/min dochází ke zlepšení kvality povrchu. Tento trend je možné sledovat i při snižování posuvu na zub a stejně tak u hloubky řezu.

Pro vyhodnocení opotřebení nástroje byla ve studii prezentována nová metoda pro charakterizování opotřebení PCD nástrojů, založená na měření maximální šířky mikrotrhlin břítu (maximum width of micro-chipping – MWMC), znázorněná na obrázku 2.6. Vznikající opotřebení nástroje lze klasifikovat jako nepravidelné mikro-vylamování břítu, které způsobuje změny v řezných silách a v proměnlivé drsnosti povrchu.



Obrázek 2.5 Úrovně obrábění [44]



Obrázek 2.6 Znárodnění prezentované myšlenky hodnocení mikro-trhlin na PCD nástrojích [40]

2.6 Shrnutí řešeršní práce

Z uvedených studií vyplývá, že nalezením cesty, jak frézovat slinuté karbidy, se zabývá řada vědeckých týmů, které prezentují více či méně úspěšné experimenty. Ve většině studií bylo využito nástrojů běžně dostupných na trhu a představené výsledky dokázaly možnost obrobení testovaných vzorků, ale nezabývaly se už následnou aplikací ve výrobní praxi. Výjimku tvoří studie [39], kde autoři vyvinuli nástroj nový s cílem komerčního využití.

Z výzkumů vyplývá, že s rostoucím obsahem kobaltového pojiva roste i obrobitelnost materiálu a stejně tak s rostoucí velikostí zrna WC.

Ve studiích zmíněné nástroje – nástroj s diamantovým povlakem a PCD nástroj, se ukázaly být vhodnou variantou pro svoji tvrdost a odolnost. Ekonomičtější varianta nástroje ze slinutého karbidu, kterému požadovanou tvrdost dodá diamantový povlak, byla stejně jako nástroje z PCD ve studiích otestována s relativním úspěchem. Až na výjimky byly využity kulové frézy.

Ze všech studií, lze vyvodit závěr, že základem úspěšného obrábění slinutých karbidů jsou velmi nízké posuvy na zub, pohybující se ideálně pod hodnotou tloušťky povlaku (v případě povlakovaného nástroje). To znamená určitě pod hodnotou 20 μm . Otáčky vřetene se ve většině případů pohybovaly ve vysokých hodnotách začínajících kolem $n = 20\,000$ ot/min.

Studie neprokázaly výrazný rozdíl mezi 3 a 5 osou technologií, a i při použití kulové frézy kolmo k obráběné ploše nástroj nevykazoval zásadních opotřebení díky malému úběru materiálu.

3 Problematika obrábění tvrdých materiálů

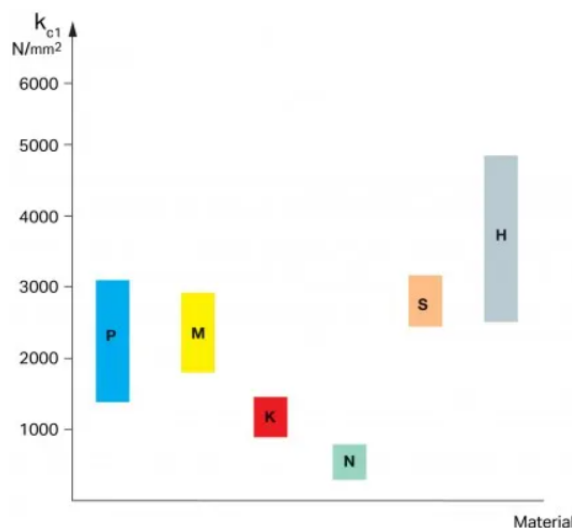
3.1 Obrobitelnost tvrdých materiálů

Obecný pojem obrobitelnosti, tedy vlastnosti materiálu být obroben, není definována jasně stanovenou veličinou, využitelnou napříč spektrem materiálů. Jedná se o komplexní vyhodnocení stavu, který závisí nejen na obráběném materiálu samotném, ale také na nástroji a řezném materiálu, stroji, tuhosti upnutí, řezných podmínkách a dalších faktorech ovlivňujících řezný proces. Mezi základní vlastnosti materiálu ovlivňující jeho obrobitelnost patří tvrdost a houževnatost, tvárnost, tepelná vodivost, zpevnění za studena, vměstky a legury ovlivňující obrobitelnost. [27]

Pro velmi tvrdé materiály obecně platí, že jsou špatně obrobitelné. Všeobecně platí, že klesající tvrdost bývá pro obrábění přínosem. Mezi základní vlastnosti tvrdých materiálů nepříznivě ovlivňující obrobitelnost a trvanlivost břitu nástroje patří vysoká rázová houževnatost (díky vysoké čistotě materiálu, která ovlivňuje tvorbu třísky), vysoká odolnost proti opotřebení (díky vyššímu výskytu tvrdých vměstků) a v neposlední řadě absence zpevnění materiálu po řezu. [27]

K základním faktorům ovlivňujícím obrábění tvrdých materiálů a ztěžujícím efektivní řez, lze zařadit vznik vysokých teplot v oblasti řezu, vysoké řezné síly, vysoký tlak na malý průřez třísky, rychlé opotřebení břitu a nedostatečnou stabilitu soustavy S-N-O (stroj – nástroj – obrobek). [27]

To, že obrábění tvrdých materiálů je specifické a ve srovnání s obráběním jiných materiálových skupin je výrazně náročnější na požadavky na nástroj, stroj a obsluhu, dokazuje obrázek 3.1. Na něm je vidět porovnání materiálových skupin k velikosti měrného řezného odporu. Měrný řezný odpor představuje sílu ve směru řezu, potřebnou k odstranění třísky o průřezu 1 mm^2 a délce 1 mm. S nejvyšším řezným odporem jednoznačně vyčnívá skupina H, do které tvrdé materiály spadají. [43]



Obrázek 3.1 Velikost měrného řezného odporu pro různé materiálové skupiny [43]

3.1.1 Opotřebení nástroje

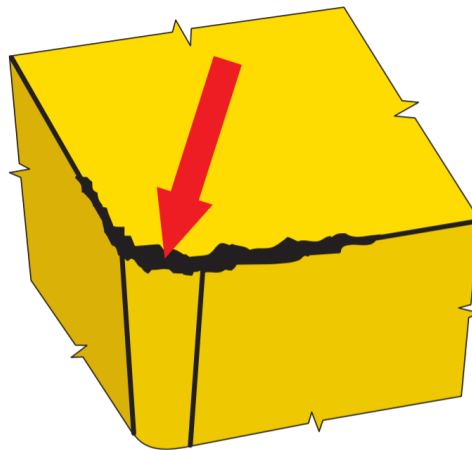
Vlivem relativního pohybu nástroje a obrobku dochází k fyzikálním a chemickým reakcím, které mají za následek opotřebení nástroje. To je důležitým faktorem pro životnost nástroje. Nalezení vhodných řezných podmínek, materiálů nebo ochranných povlaků je důležité

pro dobu, po kterou bude možné nástroj využít. Všechny zmíněné faktory ovlivňují opotřebení nástroje a tím jeho životnost.

Opotřebení vzniká vlivem následujících mechanismů. [27]

- Abraze – vzniká brusným efektem uvolňujících se tvrdých částic z obrobku i nástroje mezi břitem a obráběným materiálem.
- Adheze – působením tření mezi nerovnostmi na nástroji a obrobku dochází k mikrosvarům, které následně vytrhávají větší části materiálu. Může dojít až k tvorbě nárůstku, který mění ideální geometrii nástroje.
- Difuze – je založená na chemickém složení materiálů obrobku a nástroje. Ve stykové ploše dochází k výměně atomů se vzájemnou afinitou a tím k nežádoucímu narušení a degradaci povrchové vrstvy nástroje.
- Oxidace – při vysokých teplotách a přístupu kyslíku oxiduje povrch nástroje, čímž ztrácí své požadované vlastnosti.
- Plastická deformace – vlivem dlouhodobých vysokých teplot a tlaků je břit deformován. Eliminovat riziko vzniku plastické deformace lze dodržením doporučených řezných podmínek, ořezavzdorným povrchem nástroje a dostatečným chlazením.
- Křehký lom – nejčastěji při přerušovaném řezu a nehomogenitou nástrojového materiálu dochází ke křehkému lomu. Stejně tak pokud je obrobek příliš tvrdý a nástroj příliš křehký. Je vhodné se proto vyhnout vysokému mechanickému zatížení a krátkodobému přetížení břitu.

K nejčastěji vyskytujícímu se opotřebení při obrábění tvrdých materiálů patří, tvorba trhlin nebo mikrotrhlin na ostří (obrázek 3.2). To má za následek následné vyštipování až lom břitu. Proto nástroje pro tvrdé obrábění musí odolávat abrazivnímu opotřebení, mít dobrou chemickou stabilitu a tvrdost i za vysokých teplot a dostatečnou pevnost v tlaku i ohybu v kombinaci s úměrně houževnatým břitem v závislosti na stabilitě řezu.



Obrázek 3.2 Ukázka křehkého porušení (vyštipování) břitu na VBD [46]

3.1.2 Obráběné materiály

Obráběné materiály se podle ISO 513 dělí do základních šesti skupin. Každé skupině je přiděleno specifické písmeno a barevné označení. Toto zaběhlé označení je využíváno napříč odvětvími obrábění a na základě stejné formy značení se pak běžně dělí skupiny nástrojových materiálů nebo nástrojů či destiček jako takových – tedy na principu toho, jaký materiál (jaká skupina materiálů), se daným materiálem nebo nástrojem obrábí. V posledních letech se začíná vyskytovat nová skupina materiálů označovaná písmenem O (Others), do které spadají nově

vyvinuté kompozity, jako například plasty vyztužené skelnými nebo uhlíkovými vlákny, pryže nebo technický grafit. [45]

Rozčlenění do níže zobrazených skupin je nicméně velmi orientační a není možné z tohoto rozdělení určit jednoznačné chemické složení, tepelné zpracování nebo fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu a ani neodkazuje na vhodné geometrie nebo tvary obráběcího nástroje. Podrobnější rozdělení je pak odvislé od výrobce.

Následující obrázek 3.3 zobrazuje skupiny obráběných materiálů. Tato práce se v následujících kapitolách zabývá obráběním především poslední skupiny materiálů – skupinou H pro velmi tvrdé materiály.

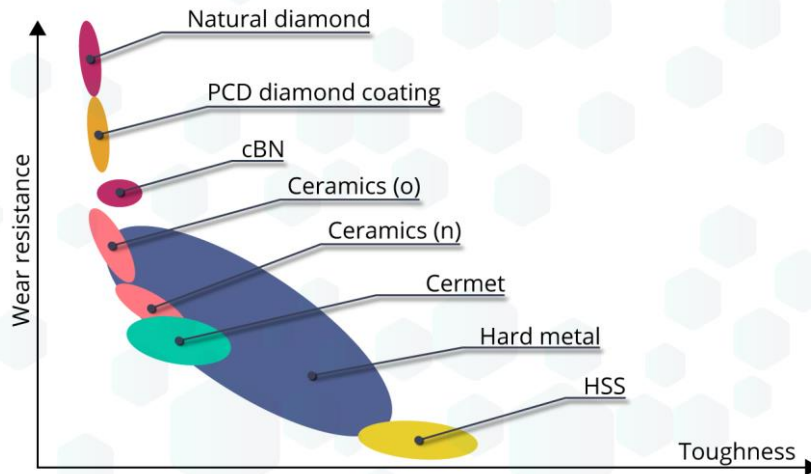
P	Uhlíkové, legované, feritické a nástrojové oceli, uhlíková ocelolitina skupiny 26, nízko a středně legované ocelolitininy skupiny 27, feritické a martenzitické korozivzdorné oceli
M	Nerezové oceli (austenitické a feriticko austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné)
K	Šedá litina nelegovaná i legovaná, tvárná litina, temperovaná litina
N	Neželezné kovy, nekovy (hliníkové slitiny, hořčíkové slitiny, slitiny mědi, bronz, mosaz, keramika a jiné vysoce abrazivní nekovy)
S	Super slitiny a titanové slitiny (žárupevné speciální slitiny na bázi niklu nebo kobaltu, titanové slitiny)
H	Tvrdé materiály (uhlíkové nebo kalené oceli o tvrdosti 48 – 65 HRC, zušlechtěné oceli s pevností nad 1500 MPa, nástrojové oceli, rychlořezné oceli, pružinové oceli, tepelně zpracované oceli, tvrzená litina, slitiny s tvrdou povrchovou vrstvou, slinuté karbidy, tvrdé niklové slitiny, atd.

Obrázek 3.3 Skupiny obráběných materiálů [11]

3.1.3 Tvrdost materiálu

Tvrdost, definovaná jako odpor materiálu proti vniknutí cizího tělesa, je mechanická vlastnost materiálu, od které se odvíjí řada dalších materiálových vlastností, které materiál (obrobek) charakterizují. Tvrdost úzce souvisí s pevností nebo odolností proti opotřebení. Získání povědomí o tvrdosti je proto jednou z klíčových informací, potřebných k stanovení obrobitelnosti materiálů a zvolení vhodných nástrojů a technologií. [27]

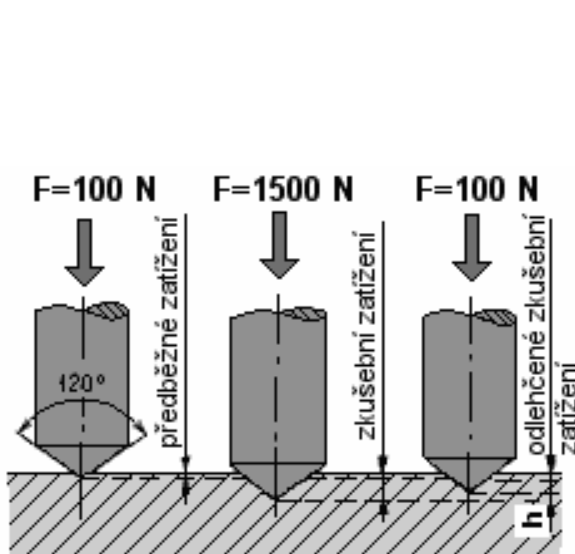
Základem úspěšného obrobení materiálu, je obrábění řezným materiálem o vyšší tvrdosti. Následující obrázek 3.4 zřetelně srovnává materiály v závislosti tvrdosti na houževnatosti. Z grafu vyplývá, že se stoupající tvrdostí klesá houževnatost materiálu. Nejtvrdějším materiálem vůbec je diamant v přírodní a v syntetické podobě, následovaný kubickým nitridem boru (CBN). Slinuté karbidy, které jsou stěžejním tématem této práce, jsou díky své rozmanitosti a mnoha druhům znázorněny rozsáhlou oblastí, označenou jako Hard metal.



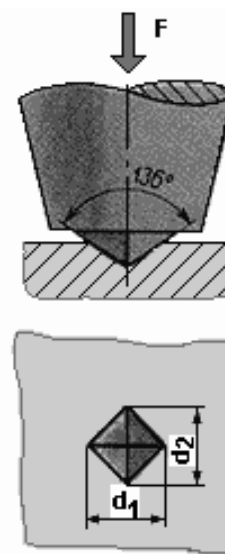
Obrázek 3.4 Porovnání řezných materiálů v závislosti tvrdosti (odolnosti proti opotřebení) na houževnatosti [33]

Měření tvrdosti je prováděno pomocí zkoušek tvrdosti, které jsou definovány normou. Nejrozšířenější zkoušky tvrdosti jsou založeny na principu vniknutí cizího tělesa (indentoru) do měřeného vzorku pod přesným tlakem a následném změření rozměrů vzniklého vtisku v závislosti na použité zkušební metodě. Změřené rozměry jsou pak tabulkově přiřazeny příslušné hodnotě tvrdosti na odpovídající stupnici dané zkušební metody. Mezi ty nejrozšířenější a pro tvrdé materiály nejpoužívanější, patří statické zkoušky rozlišující tvrdosti podle Rockwella a podle Vickerse.

Indentorem u zkoušky podle Rockwella je u tvrdších materiálů diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° (obrázek 3.5). Měření je rozdíl hloubky vtisku mezi předběžným zatížením a zkušební zatížením. Podle typu materiálu norma rozlišuje řadu metod zkoušky podle Rockwella, které se liší zatížením a indentorem a jsou rozlišovány posledním písmenem za označením HR (Hardness Rockwell). Rozšířenou stupnicí tvrdosti je HRC s celkovým zatížením 1500 N a pro tvrdé materiály stupnice HRA s celkovým zatížením 600 N. [47]



Obrázek 3.5 Zkouška tvrdosti - Rockwell (HRC)[47]



Obrázek 3.6 Zkouška tvrdosti - Vickers (HV)[48]

Indentorem u zkoušky podle Vickerse je diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° , který je zatížen danou silou po danou dobu. Měření jsou úhlopříčky indentorem

vytvořeného vtisku (obrázek 3.6). Nejběžnější využívanou metodou je zatížení 30 kg (odpovídající 294 N) s výdrží 10 – 15 s, označované jako HV30. Zatížení se objevuje za označením tvrdosti podle Vickerse – HV (Hardness Vickers). [48]

Speciální metodou je měření mikrotvrdosti tenkých vrstev obvykle měřenou metodou Vickers. Zatížení je ale velmi malé (např. 0,025 N), aby se zabránilo průchodu indentoru a ovlivnění měření podkladovým materiálem. [12]

Jednotlivé metody měření tvrdosti jsou ze své podstaty vhodné pouze pro určité materiály a převod mezi stupnicemi jednotlivých metod proto není možný bez zavedení případných nepřesností. Konverzní tabulky mezi různými stupnicemi lze využít jen v případě konkrétního materiálu, kdy tabulky vycházejí z paralelního měření různými zkouškami daného materiálového vzorku. V praxi ale k porovnávání tvrdostí napříč metodami dochází. Jedná se pak pouze o orientační porovnání, které nemá základ v žádné normě, ale pro získání praktického přehledu o vlastnostech materiálu jsou tyto převody velmi užitečné.

Horní hranice stupnice pro vyhodnocení tvrdosti HRA je podle normy hodnota 86,5, pro HRC 70, pro HV30 1076. Tato hranice je v tabulce 3.1 barevně vyznačena. Hodnoty nad těmito hodnotami jsou výsledkem aproximace a slouží pouze pro orientační zařazení tvrdostí materiálů uvedených v této práci.

Tabulka 3.1 Převod tvrdosti materiálů

Stupnice tvrdosti		
HRA	HRC	HV30
92,7	82	1589
92,2	81	1544
91,7	80	1499
91,2	79	1455
90,7	78	1410
90,2	77	1365
89,6	76	1321
89,1	75	1276
88,6	74	1212
88,1	73	1178
87,6	72	1144
87,1	71	1110
86,5	70	1076
86,0	69	1044
85,6	68	940
85,0	67	900
84,5	66	865
83,9	65	832

3.2 Technologie obrábění tvrdých materiálů

Termínem tvrdé materiály jsou označovány především materiály s tvrdostí pohybující se mezi 45 a 70 HRC. Mezi materiály spadající do této skupiny jsou například kalené oceli, rychlořezné

oceli (HSS), ložiskové oceli, kobaltové a jiné super–slitiny nebo slinované prášky. Tyto materiály spojuje jejich využití na mechanicky velmi namáhané výrobky napříč průmyslem [13].

Každý z materiálů má své specifické vlastnosti založené například na základě svého prvkového složení. Mezi obecné charakteristiky tvrdých materiálů lze ale zařadit následující vlastnosti.

- Vysoká tvrdost, respektive vysoká odolnost proti vniknutí cizího tělesa. Díky tomu je vyžadován nástroj o až 3x větší tvrdosti, než je tvrdost obráběného materiálu, což způsobuje vysoká napětí v místě prvotního kontaktu nástroje s obrobkem. [14]
- Náchylnost k abrazi těchto materiálů, vyžaduje řezný nástroj, který této vlastnosti dobře odolává pro předejití abrazivního opotřebení hřbetu nástroje. [14]
- Nízká tažnost materiálu je důvodem pro vznik specifické třísky, která je kombinací plynulé a stupňovité třísky. [14]
- Vysoká hodnota poměru tvrdosti a modulu pružnosti, projevující se významným elastickým zotavením. Na tuto vlastnost je potřeba brát ohled při následném dokončování. [14]

Obrábění tvrdých materiálů je možné rozdělit do 3 skupin na základě zvolené technologie obrábění.

- 1) Obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií břitu
- 2) Obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu
- 3) Progresivní obrábění

3.2.1 Obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií břitu

Obrábění tvrdých materiálů nástroji s nedefinovanou geometrií břitu bylo historicky jediným možným způsobem, jak u těchto materiálů dosáhnout požadovaného tvaru. S vývojem nových metod obrábění umožňujících efektivnější úběr i u tvrdých materiálů se technologie s nedefinovanou geometrií staly především dokončovacími technologiemi pro dosažení velmi kvalitních povrchů. Všechny tyto technologie využívají abrazivního opotřebení.

3.2.1.1 Broušení

Nejrozšířenější z těchto technologií je broušení. Hlavními důvody využívání této metody obrábění je schopnost obrobení i velmi tvrdých materiálů a dosažení velkých přesností obrobených rozměrů v jednotkách μm a s tím související příznivou drsností povrchu dosahující desetin μm (R_a). [49][50]

K obrobení povrchu dochází prostřednictvím brusiva – tvrdých a ostrých zrn spojených pojivem, díky kterému získá brusný nástroj svůj tvar. Při broušení dochází k postupnému úbytku nástroje z důvodu postupného vydrolování zrn z pojiva. Vydrolená zrna ale nahradí nová ostrá, tento mechanismus – samoostření, zajišťuje stále ostrý nástroj. V důsledku velkých třecích sil a velké řezné rychlosti dochází v místě řezu k vysokým teplotám, které je potřeba eliminovat stálým chlazením.

Jako přírodní tvrdý materiál běžně dostupných brusných nástrojů se využívají korund, smirek nebo křemen. Pro nejefektivnější broušení těch nejtvrdějších materiálů ale nejlépe slouží diamant. V závislosti na složitosti obrobku lze rozlišit řadu druhů brusných nástrojů využitelných pro danou aplikaci (rovinné broušení, broušení do kulata, tvarové broušení).

Využití broušení se ve výrobě nalézají všude tam, kde je kladen důraz na přesné rozměry součástí a pokud produktivnější obrobení selhává pro tvrdost obráběného materiálu. Jde o výrobu vodících a dosedacích ploch, ostření řezných nástrojů nebo vzhledové dokončování výrobků.

3.2.1.2 Honování

Honování je čistě dokončovací metoda a jedná se v podstatě o velmi jemné broušení honovacími kameny různých tvarů. Metoda je vhodná a využívána především pro výrobu otvorů, u kterých je kladen důraz na přesné rozměry spojené s geometrickými tolerancemi kruhovitosti nebo válcovitosti. K tomu dochází například u hydraulických a pneumatických válců, válců spalovacích motorů, ložisek vřeten nebo ozubených kol. [50]

3.2.1.3 Lapování

Další dokončovací metoda obrábění bez definované geometrie dosahuje nejvyšších rozměrových přesností a nejmenších drsností povrchu. Lapování je využíváno pouze tam, kde si okolnosti žádají ty nejvyšší přesnosti, protože tato metoda je velmi pracná, málo produktivní a nákladná. K úběru materiálu dochází díky volnému brusivu, které se nachází mezi vzájemně se pohybujícími se lapovacími nástroji a obrobkem. S lapováním se lze setkat u funkčních ploch měřidel v metrologii nebo u přesných ložisek. [50]

3.2.2 Obrábění nástroji s definovanou geometrií břitů

Za takzvané tvrdé obrábění (hard machining) je považováno obrábění obrobku z tvrdého materiálu pomocí nástrojů s definovanou geometrií břitů.

V osmdesátých letech začal vývoj třískového obrábění tvrdých materiálů, který odstartoval nejdříve na soustružení, a postupně se přesunul i na další typy obráběcích procesů, jako jsou frézování, vrtání, protahování nebo odvalování. Tím se začaly otevírat možnosti pro výrobu namáhaných součástí. Dosavadní možnosti obrábění tvrdých materiálů, závislé především na broušení, se tak velmi rozšířily. Postavily broušení do samostatné kategorie obrábění, nyní stojícího nezávisle vedle tvrdého obrábění jako takového. Broušení je díky tomu postaveno v procesu výroby na konci, především jako dokončovací metoda a celý proces výroby se celkově zefektivňuje. [13]

Využití tvrdého obrábění poskytuje výhody popsané v následujících bodech. [13]

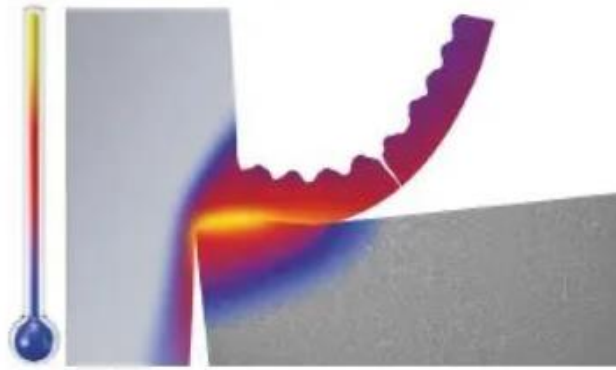
- Nejzásadnějším profitem je přizpůsobení se složitým součástem při dostupném vybavení (stroj, nástroj).
- Zároveň rychlá reakce na změnu výrobního procesu a možnost dosažení různých operací s minimálním zásahem do vzájemného nastavení soustavy S-N-O.
- Vysoký úběr materiálu.
- Využití standardních obráběcích strojů, bez nutnosti pořízení specializovaného stroje pouze pro dané využití, snižuje vstupní náklady při zařazování takové metody do výrobního procesu.
- Díky možnosti obrábění bez procesní kapaliny je taková výroba ekologičtější a umožňuje i následné jednodušší nakládání s třískami při manipulaci nebo likvidaci.



Obrázek 3.7 Tvrdé frézování formy s chlazením vzduchem [42]

Naopak vlastnosti, které limitují tvrdé obrábění, a které je třeba brát v potaz při aplikaci tohoto způsobu výroby, jsou zmíněny níže. [13]

- Pořizovací cena vhodného nástroje pro tvrdé obrábění je výrazně vyšší ve srovnání s broušením. Rozhodnutí o volbě této technologie, tak musí přijít po rozvaze, kdy se například náklady na nástroj rozloží do velkého množství kusů a produktivitou této výroby zároveň dojde k velké úspoře času. Té by se dosáhlo i při kusové výrobě, ale pořízení technologie pro tvrdé obrábění by se pak stalo nerentabilní.
- Významným omezením, především pak u tvrdého soustružení, je poměr délky k průměru součásti. Tento poměr (L:D) by neměl být větší než 4:1, jinak hrozí vznik nežádoucích vibrací.
- Pokud je u obvyklého obrábění snaha zajistit ideálně tuhou soustavu S-N-O, pak u tvrdého obrábění to platí obzvlášť. K zajištění vyšší tuhosti slouží vyztužení kompozity z polymerů a snaha o kompaktní konstrukci stroje bez zbytečných nástaveb a prodloužení. Nejvyšší přesnosti a snížení vibrací je dosaženo volbou hydraulických nebo tepelných držáků nástrojů. Ekonomičtější alternativu nabízí kleštinové upnutí.
- Další z omezení, které je třeba mít na paměti, je zvýšená teplota řezu a odcházející třísky. S tímto faktorem se pak váže otázka, zdali chladicí kapalinu používat nebo ne. Obecně lze stanovit, že při obrábění složitých součástí, kde dochází k častým přerušovaným řezům, je lepší volit variantu bez chlazení. Tím se předejde tepelným šokům, na které by nástroj musel být připravený a zároveň se jedná i o ekonomickou úsporu při absenci emulze. Na druhou stranu obrobek i nástroj vystavený soustavným vysokým teplotám může být komplikací při manipulaci a pro rozměrovou stálost výsledného povrchu po vychladnutí. Proto místo záplavového chlazení na bázi vody je doporučováno chlazení vzduchem nebo mlhou na bázi oleje. [41]



Obrázek 3.8 Při tvrdém obrábění dochází ke vzniku vysokých teplot v oblasti řezu [45]

Oproti obrábění konvenčních materiálů, jsou u tvrdých materiálů doporučovány následující obecné řezné podmínky.

- Dosažením malé tloušťky odebíraného materiálu se sníží opotřebení nástroje a nebezpečí vzniku významné změny jeho řezných rozměrů. Takovou třísku lze získat velmi malou hloubkou řezu a nízkou posuvovou rychlostí spolu s velkým rádiusem špičky nástroje. [14]
- Negativní úhel čela se zábrítem je další doporučenou vlastností, která zabrání především vylamování břitu. Právě zábrít, vzhledem k obrábění velmi malé tloušťky třísky, je tou částí břitu, která je v řezu, a vytváří tak ještě více negativní geometrii nástroje. [14]

3.2.2.1 Soustružení tvrdých materiálů

Tvrdé soustružení patří mezi průkopníky tvrdého obrábění jako takového. U této technologie se snadněji dosahuje tuhé soustavy a výsledný povrch až $R_a 0,4$ s tolerancí průměru dosahující až $3 \mu\text{m}$. Výhodou je využití strojního vybavení stejného pro klasické soustružení, rozdílem jsou pak rozdílné řezné podmínky, a především vhodné řezné nástroje. Obvykle dosahované maximální obráběné tvrdosti materiálů jsou kolem 60 HRC a nejběžnějšími zástupci těchto materiálů jsou nástrojové, ložiskové nebo kalené oceli, ale i méně obvyklé niklové slitiny jako Inconel nebo Hastelloy. Není výjimkou soustružení velmi tvrdých materiálů bez procesní kapaliny (obrázek 3.9). [14]

Zvláštní podskupinou tvrdého soustružení je vyvrtávání nebo vystružování, respektive soustružení vnitřních otvorů. Jde především o dokončovací metody, které svou přesností a vysokou produktivností jsou nesrovnatelné co do efektivity s broušením.



Obrázek 3.9 Tvrdé soustružení [15]

3.2.2.2 Frézování tvrdých materiálů

Vývoj tvrdého frézování vznikl především na základě poptávky z odvětví produkujícího různé typy forem. Vstřikovací, lisovací nebo stříhací formy jsou tvarově složité součásti, které vyžadují velkou přesnost, tvarovou stálost a odolnost proti opotřebení. Výroba takových forem je velmi nákladná a časově náročná, proto byla a stále je poptávka po nalezení technologie, která by celý proces zefektivnila.

Zásadní vlastností, která je vlastně jedním ze základních faktorů, na kterých stojí vývoj technologií pro tvrdé obrábění, je zajištění vhodných podmínek, a tedy zajištění co největší tuhosti soustavy. Nutná je eliminace vibrací základnou stroje a dostatečná tuhost nástroje, která se odvíjí především od vhodného držáku. Nejčastěji využívané nástroje jsou buďto monolitní frézy ze slinutého karbidu nebo frézy s karbidovými nebo keramickými vyměnitelnými břitovými destičkami. Držáky musejí odolat vysokým otáčkám, tendenci k vibracím nebo k vytahování nástroje. Nejlepších vlastností je dosaženo upnutím nástroje přes Morse kužel a využitím hydraulických sklíčidel nebo tepelným upnutím nástroje. [14]

3.2.2.3 Další využívané technologie

Jako zástupci technologií využívaných pro obrábění tvrdých materiálů v [14] jsou uvedeny protahování a výroba ozubených kol odvalováním.

U obou technologií se jedná o aplikace na součásti specifických tvarů, na které je kladen důraz na co nejvyšší životnost při vysokém namáhání, kterému jsou vystavovány. Pro efektivitu těchto technologií je potřeba především znát ekonomickou rozvahu výroby, protože je zde nutné investovat do vhodného strojního a nástrojového vybavení.

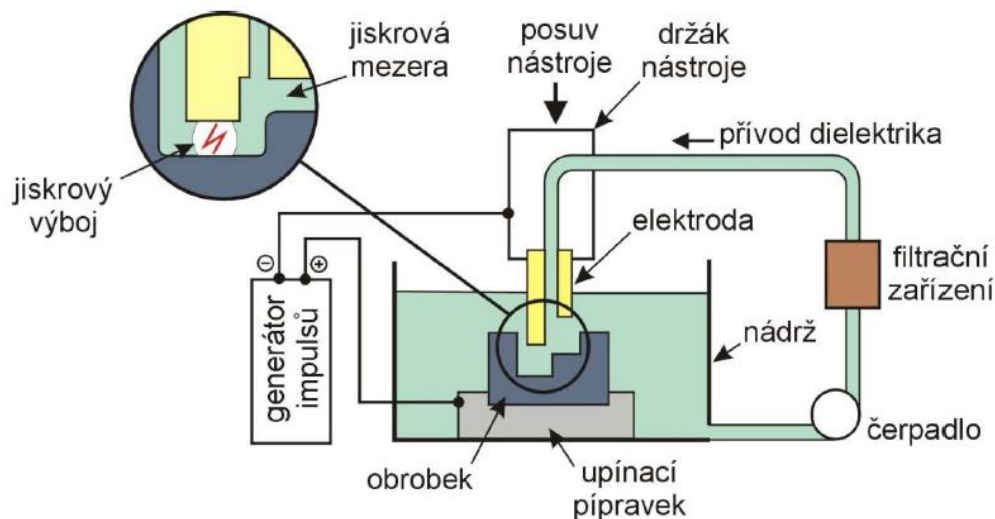
3.2.3 Progresivní obrábění tvrdých materiálů

Do inovativních technologií obrábění tvrdých materiálů zcela jistě spadají i výše uvedené upravené formy konvenčního obrábění. Díky snaze o efektivní obrábění i špatně obrobitelných materiálů a spolu s neustálým vývojem nových technologií se lze střetnout s využitím nekonvenčního způsobu obrábění, které už i historicky nachází své uplatnění pro své nesporné výhody. Žádná z metod obrábění tvrdých materiálů ale zatím stále není natolik efektivní a univerzální, aby světový technologický vývoj tíhnul k jednomu řešení.

3.2.3.1 Elektroerozivní obrábění

Jednou z nekonvenčních metod obrábění umožňující opracování tvrdých materiálů je známá pod zkratkou EDM a jedná se o takzvané elektroerozivní nebo také elektrojiskrové obrábění. Tento způsob obrábění je hojně využíván napříč průmyslem už od druhé poloviny minulého století především pro jeho přesnost a přizpůsobení se i složitým tvarům. Při rozhodování, jakým způsobem obrábět tvrdé materiály, tato metoda stojí na prvních příčkách co do četnosti a dostupnosti technického řešení na trhu.

Princip metody je tvořen rychle se opakujícími výboji – jiskrami, které se tvoří mezi dvěma elektrodami. Zápornou elektrodou je nástroj a kladnou je obrobek. Celý proces probíhá v prostředí poskytujícím elektrický odpor. Toto prostředí, dielektrikum, je nejčastěji založeno na vodě nebo oleji a jako pracovní médium obklopuje celý obrobek a zaplňuje tak i mezeru mezi nástrojem a obrobkem, kde v důsledku tvoří funkci i chladičí a vyplachující. Schéma metody je zobrazeno na obrázku 3.10. K úbytku materiálu pak dochází částečně odtavením nebo odpařením působením velmi vysokých teplot v místě výboje. Při vlastním obrábění nástroj s obrobkem nejsou v přímém mechanickém styku, což má za následek možnost využití i u velmi tvrdých materiálů a možnost obrobení náročných a přesných ploch díky softwarovému řízení drah. [18]



Obrázek 3.10 Schéma elektroerozivního obrábění [17]

Své uplatnění nachází metoda při výrobě tvarově složitých součástí, které jsou citlivé na přesnost svých rozměrů, kterou by po zakalení mohly ztratit. Tuto technologii je ale možné v procesu výroby umístit až za kalení, a proto mohou vznikat přesné, a přesto stále povrchově tvrdé, řezné nebo střížné nástroje a různé druhy lisovacích nebo odlévacích forem.

Princip elektroerozivního obrábění nabízí řadu uplatnění a s výhodou se využívá u řady technologií. K nejběžnějším využitím patří níže popsané.

U takzvaného *drátového řezání* se nástrojem stává vodivý drát malé tloušťky, mezi nímž a obrobkem dochází k výbojům. Nejčastěji měděný nebo mosazný drát se postupně odvíjí a jsou tak zachovány stále stejné řezné podmínky díky stále stejné kvalitě a průřezu drátu.

Využití lze najít i u *mikro elektroerozivního obrábění*. Tato metoda nabízí obrábění součástí, nejčastěji řezání nebo tvorbu děr, v mikroskopickém měřítku v rozměrech dosahujících od 50 do 100 μm . Uplatnění je u výroby například vstřikovacích trysek, mikro turbín, kompresorů nebo v optice. [16][19]

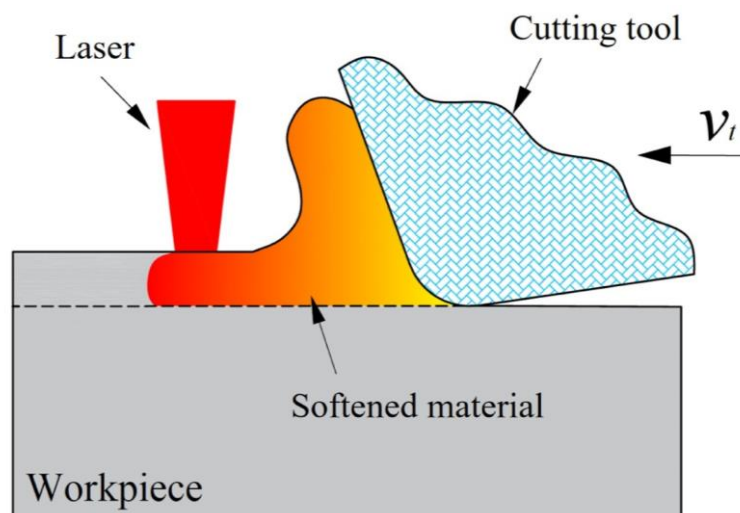
Další odvozenou technologií je *elektrojiskrové hloubení*, při kterém je jedna z elektrod vyrobena ve tvaru, který má být obroben. Tímto způsobem lze efektivně dosahovat obrobení složitých tvarů a velkých hloubek v poměru s obráběným průměrem.

Jedním z omezení EDM je nutnost elektrické vodivosti obráběného materiálu pro dosažení obrábění. Existují ale možnosti, jak metodu EDM využít i u nevodivých materiálů. Konkrétním příkladem jsou nejvyužívanější typy keramik. Získání vodivosti materiálu je možné vytvořením kompozitu s karbidem wolframu nebo nitridem titanu. Další cestou je povlakování vodivým materiálem, který iniciuje potřebný elektrický výboj na povrchu součásti. [19]

Elektroerozivní obrábění nabízí řadu výhod, mezi které patří přesnost obrábění, možnost obrábění tvarově komplexních součástí i s velmi vysokou tvrdostí. Samotný proces je automatizovaný a nevyžaduje neustálý dohled obsluhy. Vzhledem k absenci vysokých řezných sil, a tedy nutnosti pravidelné výměny nástroje, se jedná o ekologičtější metodu obrábění, než poskytují konvenční metody. A i potenciálně neekologické dielektrikum je možné díky současným technologiím nahradit plynným médiem. Podstatným nedostatkem EDM je především časová náročnost obrobení a vysoká spotřeba energie, což klade nároky na připojení na stabilní a levnou elektrickou energii. [20]

3.2.3.2 Laser assisted machining

Jednou z dalších nekonvenčních metod obrábění umožňující opracování i těžko obrobitelných a tvrdých materiálů je obrábění za využití laserových technologií. Laserový paprsek lze použít k přímému úběru nebo dělení materiálu. Při kombinaci s konvenčními metodami nabízí progresivní řešení obrábění jinak problematicky obrobitelných materiálů. Laser assisted machining, tedy obrábění za přítomnosti laseru, využívá spojení výhod výkonných laserů, efektivnosti a dostupnosti konvenčních metod obrábění jako je soustružení, frézování nebo vrtání. Zahřátím povrchu obrobku laserovým paprskem dochází ke snížení vnitřních sil materiálu a změně deformace z křehké na pružnou při vniknutí nástroje (obrázek 3.11). Zahřátý materiál obrobku dočasně změkne, ale nedochází ke změně materiálových vlastností součásti. Tím dochází ke snížení řezných sil, zvýšení produktivity úběru a zvýšení životnosti nástroje. Kromě již zmíněných výhod je oproti konvenčním metodám potřeba zmínit i lepší kvalitu povrchu, lépe kontrolované opotřebení nástroje, malou tepelně ovlivněnou oblast a ekologičnost procesu. [21][23]

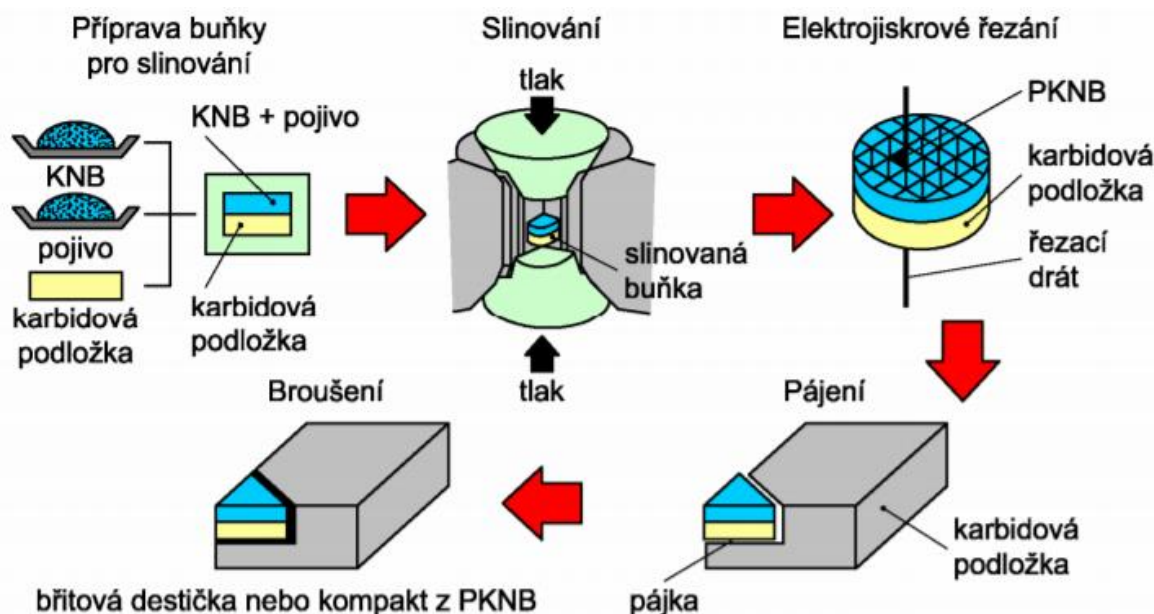


Obrázek 3.11 Schéma obrábění za pomoci laserového paprsku [22]

Dosavadní výzkumy této metody se zaměřují především na slitiny titanu, niklu a keramiku. Některé se pak zmiňují i o možnosti využití u kalené oceli nebo karbidu wolframu. Tato oblast se zdá být perspektivní v rozšíření palety produktivně obráběných materiálů, které jsou dnes vnímány jako těžko obrobitelné. Dostupné výzkumy zabývající se touto problematikou se začínají objevovat v posledních měsících a všechny se shodují na tom, že je potřeba dále pokračovat ve vývoji pro zodpovězení řady otázek osvětlujících především vhodné řezné podmínky u konkrétních materiálů. [21][22][23]

4 Řezné materiály pro obrábění velmi tvrdých materiálů

Nejtvrdší materiály využívané pro obrábění, takzvané supertvrdé řezné materiály, jsou synteticky vyrobené řezné materiály – kubický nitrid boru (CBN) a polykrystalický diamant (PCD). Oba materiály lze využít ve formě povlaků nebo řezných destiček (roubiků) napájených k podkladovému materiálu (slnutému karbidu). Schéma výroby roubiků je zobrazeno na obrázku 4.1.

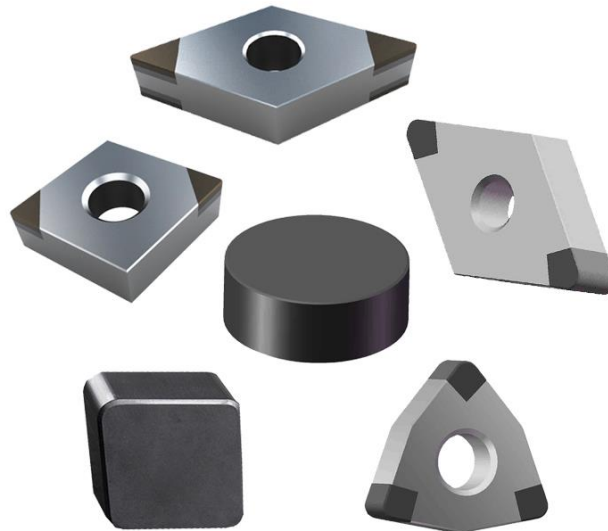


Obrázek 4.1 Výroba roubiků z CBN případně PCD pro VBD [32]

Kubický nitrid boru je velmi tvrdý materiál stabilní i za vysokých teplot (až do 2000 °C). Je odolný proti chemickým vlivům a abrazivnímu opotřebení. Obdobně jako keramické materiály má CBN keramickou vazbu atomů. Díky této vazbě je materiál velmi tvrdý a odolný proti opotřebení. Vysoká tvrdost je ovšem vykompenzována poměrně malou houževnatostí. Kombinace s houževnatým podkladovým materiálem, jako je slinutý karbid, je proto ideální kombinací, jak CBN v praxi použít.

CBN se využívá pro soustružení a frézování velmi tvrdých materiálů jako jsou kalené oceli a litiny, ocelové výkovky, povrchově kalené výrobky, slinované materiály na bázi kobaltu a železa a žáruvzdorné slitiny. Je možné dosáhnout obrobení materiálů o tvrdosti až 65 HRC. Při obrábění materiálů měkčích než 45 HRC je třeba zvážit ekonomičnost výroby a volbu tohoto drahého materiálu. [12]

Jednou z možností, jak aplikovat PCD i CBN jsou pájitelné destičky tvořené vrstvou tvrdého materiálu slinovaného s podložkou (obrázek 4.2). Takto vzniklý kompozit je možné pájet na vyměnitelné břitové destičky nebo na přizpůsobený nástroj. Z CBN lze vytvořit i monolitní vyměnitelné destičky.



Obrázek 4.2 Podoba VBD s roubitky z CBN a PCD [31]

4.1 Povlakování nástrojů

Pro významné navýšení životnosti a produktivity nástroje, respektive VBD, se využívá povlakování. Průkopníky mezi povlaky se staly povlaky TiC, TiN, TiCN a Al_2O_3 . Dnešní typy povlaků řazené ke čtvrté generaci povlaků jsou vícevrstvé, složené i z více než 10 vrstev. Povlakování je realizováno nejen u slinutých karbidů, ale lze jej využít například i u keramiky nebo oceli. Slinuté karbidy ale vynikají v míře využití. Mají výborné vlastnosti – ideální poměr tvrdosti a houževnatosti. Vývoj v jejich využití je nejdále a je možné u nich využít široké škály povlaků na bázi nitridů, karbidů, oxidů i boridů. [12][26]

Rozdíly mezi povlaky tvoří nejen chemické složení, ale i kombinace vrstev, tloušťka povlaku nebo použitá metoda povlakování. Mezi nejkvalitnější a nejtvrďší povlaky patří povlaky z polykrystalického diamantu (PCD) a kubického nitridu bóru (CBN).

Metody povlakování jsou dvě. Metoda PVD (physical vapour deposition – fyzikální napařování z pevné fáze) a CVD (chemical vapour deposition – chemické depozice z plynné fáze).

Metoda PVD probíhá za teplot kolem $500\text{ }^\circ\text{C}$ a využívá odpařování čistého kovu (titanu – Ti) pomocí např. elektrického oblouku za reakce reaktivního plynu (dusíku – N_2) nebo napařování využitím elektrického výboje v plynné atmosféře. Výhodou je povlakování i velmi ostrých hran, nevýhodou pak je nižší tloušťka vrstvy a možnost nerovnoměrné vrstvy povlaku. [12][26]

Metoda CVD využívá reakce plynných chemických sloučenin u povrchu základového materiálu za teplot kolem $1000\text{ }^\circ\text{C}$ při konstantních vysokých tlacích. Jedná se o využívanější metodu především pro její výhody ve vysoké hustotě povlaku, vynikající přilnavosti k podkladovému materiálu a rovnoměrné povlakování ze všech stran nezávisle na složitosti tvaru. [12][26]

4.2 Diamant jako řezný materiál

Přírodní varianta diamantu je nejtvrďším materiálem vůbec. Využití přírodní formy je možné, ale velmi nákladné a využitelné především ve formě diamantového prachu. Pro běžnou průmyslovou praxi byl ale v druhé polovině minulého století vyvinut syntetický diamant, který

se vlastnostmi vyrovnává přírodnímu diamantu, je ale množstevně a cenově výrazně dostupnější.

Mezi základní omezení ve využití diamantu patří maximální provozní teplota 600 °C (kdy už se mění na grafit) a díky afinitě s železem není vhodný k obrábění železných materiálů. Pro svou křehkost jsou doporučovány stabilní řezné podmínky bez přerušování řezu.

4.2.1 Nástroje s diamantovými povlaky

Nástroje deponované povlakem s tloušťkou do 50 μm, který obsahuje krystaly diamantu, mají výhodu pokrytí celé řezné části nástroje bez ohledu na složitost tvaru. Je využito chemické metody CVD, při které se vytvářejí krystalky diamantu o velikosti 1 – 10 μm přímo na povrchu nástroje. Kvalita získaných krystalů dosahuje kvalit přírodního diamantu. Tvrdost povlaku je 8400 – 12200 HV_{0,025}. Jinou metodou deponování je vytvoření takzvaného DLC (diamond like carbon – jako diamant) povlaku. Při této metodě vzniká amorfni uhlík spolu s malými krystaly diamantu. Fyzikální vlastnosti povlaku se blíží vlastnostem diamantu, ale má omezení v deponované tloušťce povlaku do 3 μm a tvrdosti povlaku 3000 – 6000 HV_{0,025}. [12]

4.2.2 PCD nástroje

Diamantový povlak není jedinou formou, jak vytvořit vysoce tvrdý řezný nástroj. Další cestou je vytvoření roubíku s diamantovou vrstvou, který lze připájet na vyměnitelnou břitovou destičku nebo přímo na vhodně upravený nástroj.

Diamant, získaný průmyslovou výrobou z uhlíku za vysokých teplot a tlaků, se slinuje s kovovým pojivem s podložkou ze slinutého karbidu a následně se slinovaná buňka elektrojiskrově rozřeže na požadované tvary roubíků. Požadovaných rozměrů je dosaženo broušením nebo honováním funkčních ploch břitů. [12]

Nástroje s roubíky jsou omezeny délkou ostří roubíku, a tedy relativně malou hloubkou řezu.

Nejvýznamnějšími zástupci materiálů, které se obrábí pomocí PCD jsou materiály velmi tvrdé nebo náchylné k tvorbě nárůstku a vyžadující ostrou geometrii a odolný povrch nástroje. Jde například o slitiny hliníku, křemíku, kompozity s kovovou maticí, plasty vyztužené uhlíkovými vlákny nebo v případě dokončovacích operací při obrábění titanu. [28]

4.2.3 Opotřebení nástrojů z PCD a CVD diamantu

Ačkoliv se u syntetického nebo povlakového diamantu jedná o nejtvrďší řezné materiály, které dosahují výborných ořezvzdorných vlastností a zajišťují tak nástrojům velkou odolnost proti opotřebení, i tyto nástroje jsou k opotřebení náchylné.

Prvním z omezení je už zmíněná afinita k železu, která znemožňuje využití diamantových nástrojů pro obrábění železných slitin pro silnou difuzní reakci mezi nástrojem a obrobkem. Dalším z omezení je především u PCD vydrolování diamantových zrn z kovové matrice. Diamant je sám o sobě křehkým materiálem a stejně tak je tomu i u CVD povlaků, které jsou náchylné k vyštípnutí. Pracovní teploty dosahující 600 °C jsou pak zase limitní z důvodu grafitizace diamantu. V případě CVD povlaků vzniká opotřebení díky nízké adhezi k podkladovému materiálu způsobené pnutím vzniklým rozdílnou tepelnou roztažností diamantu a karbidu wolframu. Pro zajištění požadované životnosti nástroje je u povlaku nutné brát v potaz velikost zrn slinutého karbidu jako podkladového materiálu a tloušťku povlaku.

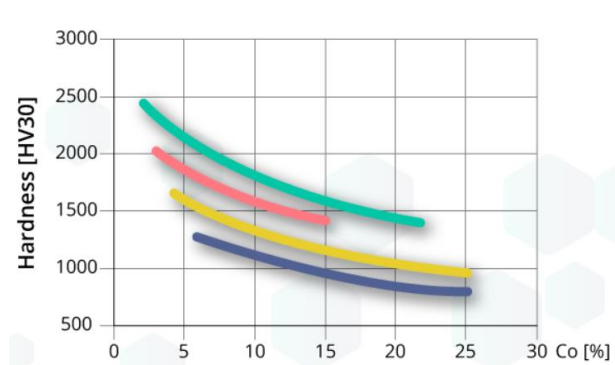
Diamantové nástroje patří mezi nástroje s vysokou ořezvzdorností a relativně vysokou chemickou stálostí. Pro svůj nízký koeficient tření jsou využívány u materiálů s náchylností na vznik nárůstku a zajišťují perfektní strukturu obrobeného povrchu.

5 Slinuté karbidy

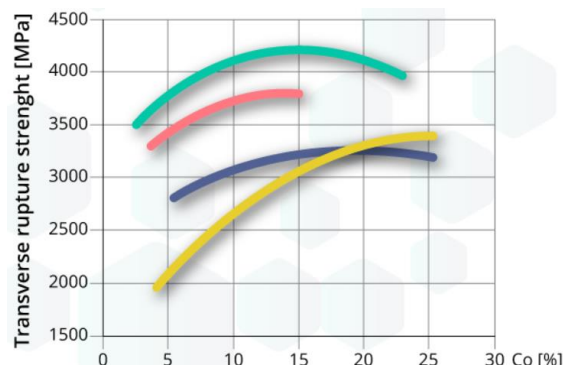
Téma slinutých karbidů se prolíná celou diplomovou prací. Setkáváme se s nimi u nástrojů i u obrobku. Proto jsou v následující kapitole tyto materiály blíže popsány.

Počátek vývoje slinutých karbidů sahá do začátku 20. století, kdy se začal hledat materiál s ideální kombinací tvrdosti a houževnatosti, který by umožnil vyšší efektivitu obrábění. Jde především o jeden z nejpoužívanějších řezných materiálů pro vhodný poměr ceny a efektivity nástroje, který nabízí široké spektrum vlastností. Jedná se o vícesložkový materiál, kde je požadovaných vlastností materiálu dosaženo spojením tvrdých částic – karbidů pomocí pojiva, které zajišťuje houževnatost výrobku. Nejčastěji zastoupeným karbidem je karbid wolframu (WC), dále jsou využívány karbidy titanu (TiC), karbidy tantalu (TaC) a karbidy niobu (NbC). Jako pojivo je majoritně využíván kobalt (Co). Na vlastnosti materiálu má vliv jak chemické složení, tedy zastoupení hlavních složek – karbidů, pojiva a přesné množství příměsí (například uhlík, dusík, kyslík), tak struktura materiálu s velikostí zrn směsi. [12]

Na obrázcích 5.1 a 5.2 je názorně zobrazeno ovlivnění vybraných mechanických vlastností slinutého karbidu v závislosti na obsahu kobaltu a velikosti zrn karbidu wolframu.



Obrázek 5.1 Závislost tvrdosti na obsahu Co a velikosti zrn WC [12][33]



Obrázek 5.2 Závislost pevnosti v ohybu na obsahu Co a velikosti zrn WC [12][33]

5.1 Výroba slinutých karbidů

Slinuté karbidy se vyrábějí práškovou metalurgií. Jde o lisování práškové směsi jednotlivých složek do požadovaného tvaru a následné slinování. Výroba jednotlivých částí směsi začíná získáním oxidů daných kovů (W, Co) z jejich rud. Následnou redukcí vodíkem se získává kovový prášek. Už v této fázi výroby je možné ovlivnit velikost zrna. Karbid wolframu je ze získaného prášku vyroben smícháním se sazemi a ohřevem na teplotu 1700 °C. Mletím směsi karbidů a pojiva je získána ideálně jemnozrnná a homogenní struktura. Slisovaný výrobek má vysokou pórovitost dosahující až 50 %. Po slinování – zahřátí na teplotu kolem 1500 °C, po daný čas ve slinovací komoře, dochází ke smrštění výrobku na konečný rozměr. Teplota, délka a průběh ohřevu a chladnutí výrazně ovlivňuje kvalitu výsledného výrobku. Fyzikální a mechanické vlastnosti, jako jsou například tvrdost, ohybová a tlaková pevnost nebo měrná hmotnost a vodivost, jsou ovlivněny strukturou slinutých karbidů. Důležité je zachování stejných velikostí zrn v jedné struktuře. Ke konečné úpravě výrobků na přesné tvary se využívá broušení. [12][26]

5.2 Rozdělení slinutých karbidů

Nejběžnější rozdělení slinutých karbidů, s kterým se lze v praxi setkat, je rozdělení podle použití daných karbidů podle ČSN ISO 513. Základní skupiny jsou označeny písmeny P, M, K, N, S, H s příslušným barevným označením shodným s tabulkou rozdělení obráběných materiálů na obrázku 3.3. Každá z těchto skupin se dělí na další podskupiny (například u třídy K – K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40). Čím je vyšší číslo podskupiny, tím se zvyšuje houževnatost materiálu díky rostoucímu podílu pojiva, ale zároveň klesá odolnost proti opotřebení pro klesající tvrdost a ořezavost. Na trhu je možné se setkat s různými označeními z důvodu průběžných aktualizací norem vzhledem k neustálému vývoji. Skupina N bývá zařazena pod skupinu K, S pod M a H pod P. [12][29]

Jednotlivé skupiny jednoznačně neurčují chemické složení daného materiálu, ale jsou orientovány především na účel použití – jaký materiál lze daným slinutým karbidem obrábět. Z toho vyplývá i základní rozdělení do tří skupin podle vznikající třísky při obrábění. Klasifikace do tří skupin podle druhů využití a množství jednotlivých složek je v následujícím přehledu.

Skupina P

WC (30 – 82) % + TiC (8 – 64) % + Co (5 - 17) % + (TaC, NbC)

Obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku, jako jsou oceli, ocelolitiny, korozivzdorné oceli, temperované litiny. [12][27]

Skupina M

WC (79 - 84) % + TiC (5 - 10) % + Co (6 - 15) % + TaC, NbC (4 – 7) %

Obrábění austenitických korozivzdorných ocelí, žáruvzdorných materiálů, manganových ocelí a legovaných druhů litin. [12][27]

Skupina K

WC (87 - 92) % + Co (4 - 12) % + (TaC, NbC)

Obrábění materiálů tvořících krátkou třísku, jako šedá litina, kalená ocel, nezelezné materiály (hliník, bronz, plasty). [12][27]

5.3 Využití slinutých karbidů

Hlavní využití slinutých karbidů je na řezné nástroje. Ze slinutého karbidu lze vyrábět celé monolitní nástroje, v případě fréz nebo vrtáků. Tyto nástroje pak mohou sloužit i jako základní materiál pod povlaky nebo jako tělo pro pájené destičky z tvrdších materiálů. Další výraznou skupinou jsou vyměnitelné břitové destičky (VBD) pro různé technologie obrábění, například soustružení, frézování nebo vrtání. VBD mohou sloužit opět jako samostatná destička, základní materiál pod povlak nebo jako nosič pájených tvrdších destiček.

Specifickým odvětvím využití slinutých karbidů jsou pak formy, razníky, matrice nebo zápustky v odvětvích, kde je kladen důraz na tvarovou stálost za vysokých teplot, tvrdost a odolnost proti otěru. Jde o lisovací nebo střížné nástroje nebo například formy na výrobu skleněných výrobků a vysoce namáhaných dílů.

6 Pre-experiment

V této kapitole je popsán experiment, který sloužil jako prvotní experimentální vstup do problematiky frézování slinutého karbidu v rámci této práce. Dále jsou zde specifikovány mimo jiné i jednotlivé členy použité soustavy S-N-O. Tyto charakteristiky se vztahují také k dalším experimentům.

6.1 Vstupní informace

Vstupní informace o obráběném materiálu, využitém stroji a nástroji, jsou nedílnou součástí popisu experimentu a definují možnosti a omezující faktory, s kterými se do experimentu vstupuje. Stejně tak definování měřicí techniky jasně určuje rozmezí nebo kvalitu interpretace výsledků.

6.1.1 Použitý materiál obrobku

Obráběný materiál je slinutý karbid. Na dodaném polotovaru bylo provedeno několik zkoušek za účelem určení jeho vlastností.

6.1.1.1 Tvrdost

Tvrdost byla stanovena metodou Vickers se zatížením 294 N s označením HV30. Tato metoda je vhodná pro takto tvrdé materiály, u kterých se už ostatní metody nacházejí mimo své rozlišovací možnosti. Bylo provedeno 9 náměrů na různých místech obrobku. Průměrná hodnota naměřené tvrdosti je 1161 HV30. Na základě tabulky 3.1 z kapitoly 3.1.3 lze orientačně srovnat tvrdost v hodnotách HRA a HRC.

6.1.1.2 Chemické složení

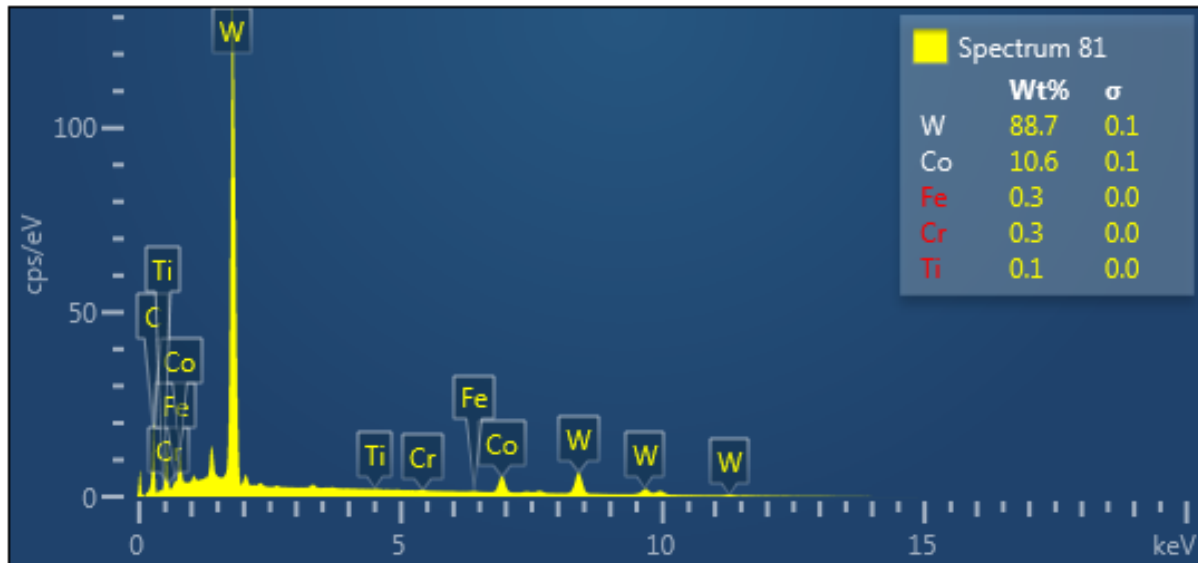
Pro chemickou analýzu složení obrobku byly využity 3 náměry pomocí analýzy chemického složení vzorku – analýza EDS. Výsledek analýzy je zobrazený na obrázku 6.1.

Analýza EDS – Energy dispersive spectroscopy spočívá v rozpoznání unikátního záření daného prvku vybuzeného elektronovým paprskem. K detekci této radiace se využívá elektronový mikroskop. Metoda je využívána především pro nedestruktivní zjištění prvkového složení materiálu a rychlost získaných výsledků.

Metoda má své limity v podobě omezené citlivosti na rozlišení prvku zastoupeného ve zkoumaném objemu vzorku pod 0,1 %. Metoda rozpoznává pouze atomy jednotlivých prvků, nikoliv molekuly. [4][5] Díky tomu, tato analýza není schopna rozlišit přítomnost uhlíku v obráběném materiálu, který je jako lehký prvek pod jejími zobrazovacími možnostmi.

Z výsledků měření je patrné, že hlavními složkami slinutého karbidu je wolfram (zastoupen 88 %) a kobalt (zastoupený 10 %). Zbytek tvoří stopové prvky zastoupené méně než 0,5 %. Zjištěna byla přítomnost železa, titanu a chromu.

Lze konstatovat, že se jedná o slinutý karbid typu WC-Co, kde hlavní tvrdou částicí je karbid wolframu a jako pojivo slouží kobalt. Na základě zjištěného chemického složení lze stanovit skupinu slinutých karbidů dle ISO, do které vzorek spadá. Vzhledem k rozpětí jednotlivých náměrů lze předpokládat, že se jedná o skupinu K30 nebo K40. [6][7]



Obrázek 6.1 Analýza chemického složení pomocí EDS.

6.1.2 Použitý stroj

Stroj, na kterém testování proběhlo je univerzální 5 osé obráběcí centrum DMU 40 eVo linear od firmy DMG MORI. Výrobce tento stroj doporučuje pro výrobu tvorově nejnáročnějších součástí od obrábění nástrojů, forem a komponent v automobilovém a leteckém průmyslu po využití ve zdravotnickém průmyslu při výrobě kloubních implantátů. Výhodou stroje je poháněná B a C osa, souběžné ovládání všech 5 os a dosažení otáček vřetene až 24 000 ot/min. [8] Z dostupných strojů byl tento vybrán právě pro možnost využití 5 osého obrábění a pro možnost dosažení uvedených maximálních otáček. Technické specifikace stroje je přiložena v příloze č. 4.



Obrázek 6.2 Obráběcí centrum DMU 40 eVo linear [8]

6.1.3 Použité měřicí zařízení

Pro skenování nástrojů byl využit digitální mikroskop VHX 6000 od firmy Keyence (obrázek 6.3). Tento mikroskop nabízí pozorování pod téměř libovolnými úhly díky otočnému stolku a naklání snímající kamery. Prostředí mikroskopu dovoluje zobrazení snímané oblasti v 2D i v 3D a podporuje analýzu snímku pomocí měřících funkcí, je tak možné rychle změřit hledané vzdálenosti, průměry, úhly. Mikroskop je osazen vysokorychlostní kamerou se snímkovou rychlostí 50 fps, čímž je dosaženo plynulého obrazu při manipulaci se vzorkem. Použitý objektiv poskytuje obraz zvětšený od 20x do 200x.



Obrázek 6.3 Digitální mikroskop VHX 6000 [9]

6.1.4 Použitý nástroj

Vzhledem k předpokladu obrábění neobvykle tvrdého materiálu, byl výběr vhodných variant nástrojů velmi omezen na materiály s nejvyšší tvrdostí, chemickou stálostí a odolností proti opotřebení. Obráběný tvar a jeho rozměry neumožňuje efektivní využití jiné než kulové frézy.

Pro dostupnost a pořizovací cenu byl jako první varianta vybrán nástroj ze slinutého karbidu. Pro zlepšení životnosti nástroje byl zvolen nástroj s CVD diamantovým povlakem. Ten slibuje výrazně vyšší odolnost nástroje proti opotřebení. Jeho výhodou je přizpůsobení se složité geometrii nástroje. Zároveň jádro ze slinutého karbidu zajišťuje houževnatost nástroje.

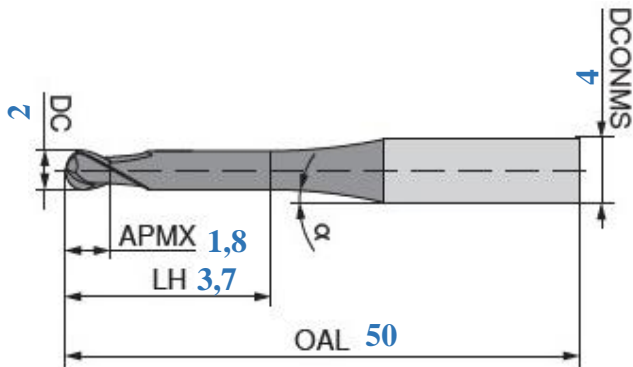
Druhým nástrojem je fréza s napájenými destičkami z PCD diamantu. Destičky nabízejí silnější vrstvu diamantu, a tedy možnou delší životnost nástroje.

Druhý nejtvrdší materiál, CBN, nebyl využit pro nedostatek nástrojů s vhodnou geometrií a rozměrem na trhu. V případě obrábění větších rozměrů by bylo vhodné také tento materiál podrobit experimentálním testům.

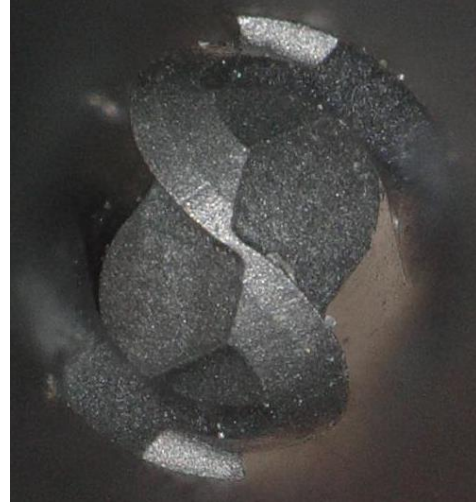
Obě zvolené varianty jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.

6.1.4.1 Nástroj s CVD diamantovým povlakem

Nástroj použitý pro experiment je nástroj od společnosti Ingersoll s označením INSAP020-144562R001. Jedná se o dvoubřitou kulovou monolitní frézu ze slinutého karbidu s označením IN05S s diamantovým povlakem s označením IN3005 o průměru 1 a 2 mm. Základní rozměry nástroje jsou v milimetrech okótovány na obrázku 6.4. Na obrázcích 6.5 a 6.6 jsou snímky nástroje z mikroskopu.



Obrázek 6.4 Náčrt nástroje s označením INSAP020-144562R001 [24]



Obrázek 6.5 Snímek špičky nástroje s označením INSAP020-144562R001

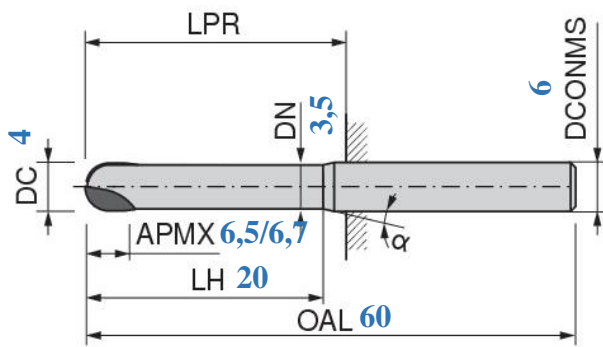


Obrázek 6.6 Snímek nástroje s označením INSAP020-144562R001

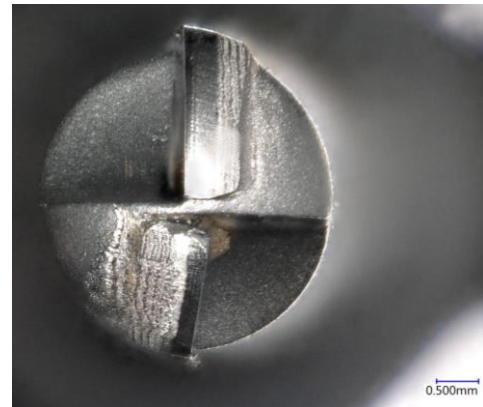
6.1.4.2 Nástroj s PCD diamantovými destičkami

Nástroj použitý pro experiment od společnosti Ingersoll s označením INDIABN04.06Z02R020 je dvoubřitá kulová fréza ze slinutého karbidu s napájenými diamantovými destičkami. Fréza je průměru 4 mm. Bližší údaje o materiálu destiček a základního materiálu frézy výrobce neposkytuje z důvodu ochrany duševního vlastnictví. Po naskenování nové frézy je ale možné stanovit některé její charakteristiky. Jednotlivé břity nejsou totožné, mají rozdílné rozměry a pouze jeden zasahuje do osy nástroje. Podle odlišné struktury destiček lze soudit, že jsou pravděpodobně složeny z podkladového materiálu a vrstvy PCD. Destička zasahující do osy nástroje je dlouhá 6,7 mm, široká 2 mm a vrstva PCD dosahuje tloušťky 0,4 mm. Druhá destička je dlouhá 6,5 mm, široká 1,6 mm a vrstva PCD je zhruba 0,2 mm. Na obrázku 6.7 jsou

v milimetrech znázorněny změřené rozměry nástroje. Obrázky 6.8 – 6.10 zobrazují samotný nástroj.



Obrázek 6.7 Nákres nástroje s označením
INDIABN04.06Z02R020 [25]



Obrázek 6.8 Snímek špičky nástroje s označením
INDIABN04.06Z02R020



Obrázek 6.9 Snímek jedné břitové destičky nástroje s označením
INDIABN04.06Z02R020



Obrázek 6.10 Snímek druhé břitové destičky nástroje s označením
INDIABN04.06Z02R020

6.2 Popis pre-experimentu

Pro realizaci pre-experimentu definujícího obrobitelnost daného vzorku slinutého karbidu, musel proběhnout počáteční test, který měl za cíl seznámení se s dodaným materiálem obrobku a nástrojem, nastavení podmínek, strategie a technologie obrábění.

Pre-experiment byl rozdělen do tří částí.

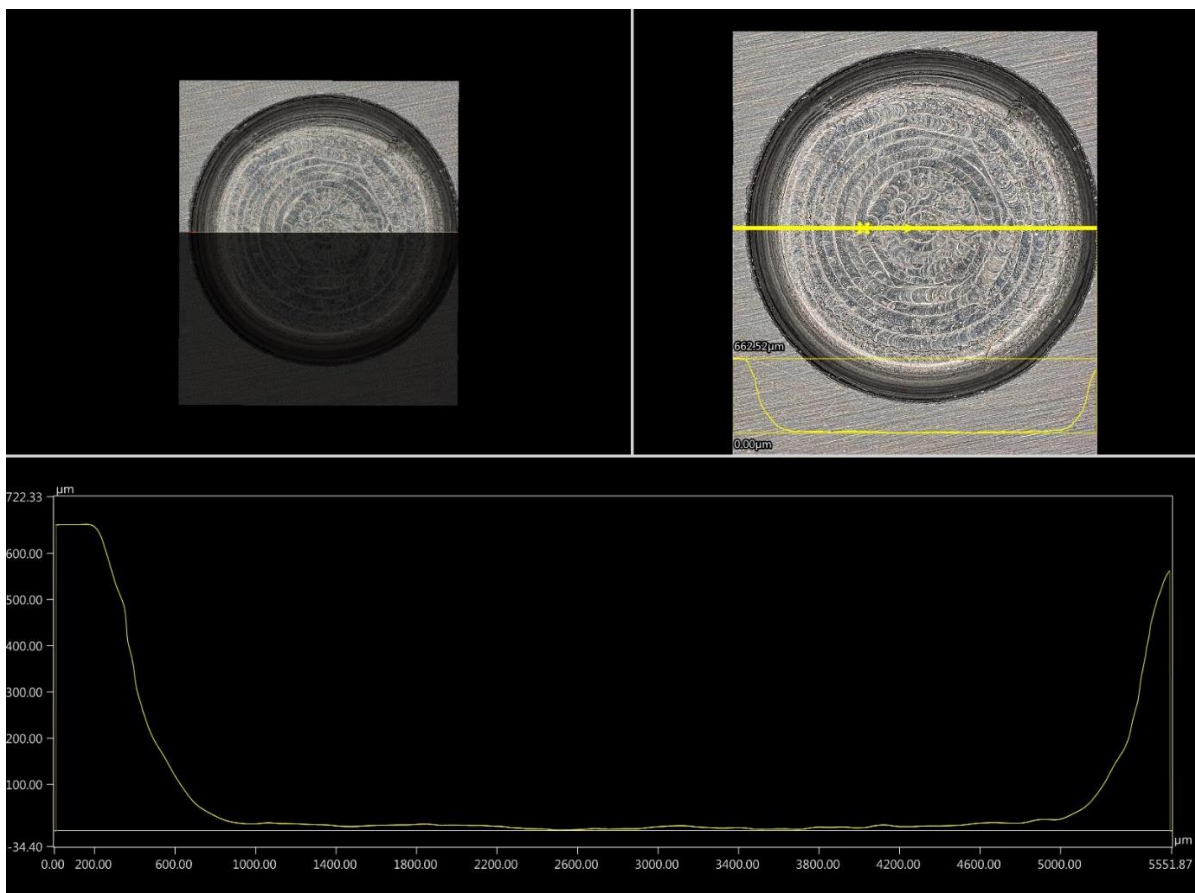
První dvě části mají společnou charakteristiku testů. Použit byl obrobek prstencového tvaru. S ohledem na požadavky zadávající společnosti a na nástroj, který byl k dispozici, bylo rozhodnuto o přímém frézování kulovou frézou bez rozdělení na hrubovací a dokončovací operaci jiným nástrojem. Cílem testu bylo vytvoření kulové kapsy o průměru 6 mm na rovné ploše testovacího vzorku, kterým byl dodaný prstavec ze slinutého karbidu. Jako obráběcí strategie bylo navrženo zanoření po šroubovici a rozšiřování kapsy od středu pomocí šroubovice.

Parametry shodnými pro první dvě části byly šířka řezu $a_e = 0,1$ mm, hloubka řezu $a_p = 0,03$ mm a posuv na zub $f_z = 0,005$ mm. Proměnnou se tedy staly otáčky vřetene, od kterých se odvodily řezná rychlost s rychlostí posuvu. Počáteční testovací hodnota otáček byla nastavena na maximální otáčky stroje $n = 24\ 000$ ot/min tak, aby se zajistila nejvyšší možná obvodová rychlost na řezném průměru nástroje. Při využití frézy s malým průměrem při malém úběru materiálu by nízké otáčky způsobily malou obvodovou rychlost v místě řezu a tím i malou efektivitu obrábění. Všechny testy proběhly s chlazením chladicí kapalinou od švýcarské společnosti Blaser Swisslube.

Poslední, třetí část, proběhla s jiným vzorkem, ale ze stejného materiálu, jako předchozí dvě části. Hlavním smyslem testu bylo otestovat nástroj při obrábění mimo osu nástroje, z boku obrobku. Využity byly frézy opotřebené na špičce, použité v jiném experimentu. Toto opotřebení nemělo vliv na testované vlastnosti nástroje.

6.2.1 První část

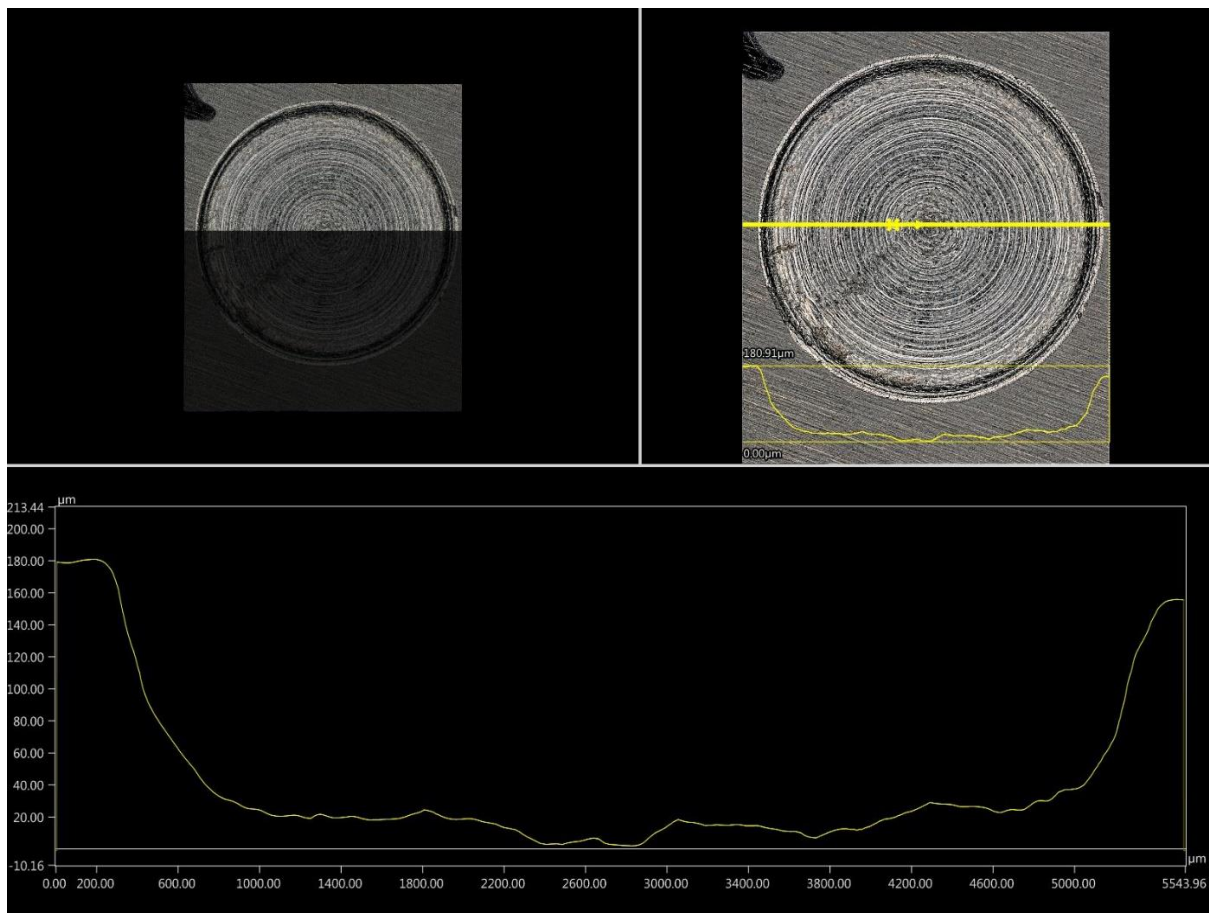
První část experimentu proběhla v režimu tříosého obrábění, celkem se takto provedly 3 testy. Každý test za jiných otáček ovlivňujících řeznou rychlost. Začalo se na již zmíněných maximálních otáčkách $n = 24\ 000$ ot/min, které se snižovaly na $n = 21\ 500$ ot/min a $n = 16\ 000$ ot/min. Kontrola nástroje se prováděla každých 5 minut. Po 10 až 20 minutách došlo k destrukci nástroje, přičemž nikdy nedošlo k dokončení požadovaného obráběného tvaru. Obrobená kapsa neodpovídala průměrem na povrchu vzorku ani hloubkou. U průměru se mělo dosáhnout 6 mm, naměřené hodnoty se pohybují kolem 5,4 mm. Vzhledem k tomu, že naprogramovaného rozměru se nedosáhlo už v první vrstvě řezu, kdy nástroj byl oproti dalším řezům méně opotřeben, lze uvažovat o řadě vlivů. Nástroj se mohl odtlačit od obráběného materiálu, nástroj mohl být už natolik opotřeben, že nedosáhl požadované hodnoty nebo reálná hodnota hloubky řezu neodpovídala té naprogramované. Další možností je ovlivnění zvolenou strategií CAM, která vzhledem ke kulové geometrii nástroje i obráběné kapsy počítá s obrobením vnějšího rozměru při obrábění dalších vrstev. Hloubka kapsy změřená pomocí mikroskopu se pohybovala od 0,3 do 0,65 mm. Využitím tříosého obrábění se oproti pětiosému obrábění dosáhlo výrazně lepší kvality obrobeného povrchu dna, viz grafické zobrazení níže. Další snímky obrobených kapes jsou k dispozici v příloze č. 1.



Obrázek 6.11 Snímek z mikroskopu řezu vybrané kapsy obrobené pomocí tříosého obrábění

6.2.2 Druhá část

Druhá část experimentu proběhla v režimu pětiosého obrábění s cílem vyhnout se bodu s nulovou řeznou rychlostí v ose nástroje. Ten byl proto řízen skrze bod a vykloněn u dvou testů o 10° a u dvou o 25° . Otáčky vřetene byly nastaveny u dvou testů na $n = 24\,000$ ot/min a u dvou na $n = 16\,000$ ot/min. Kontrola nástroje probíhala každých 5 minut a opět po 10 až 20 minutách došlo k ulomení frézy. Dosažené hodnoty obroběného povrchu nedosáhly požadovaných hodnot a hloubka kapsy se pohybovala od 0,1 do 0,35 mm a rozměr průměru na povrchu materiálu byl změřen v hodnotách od 5 do 5,5 mm. Další snímky obroběných kapes jsou k dispozici v příloze č. 1.



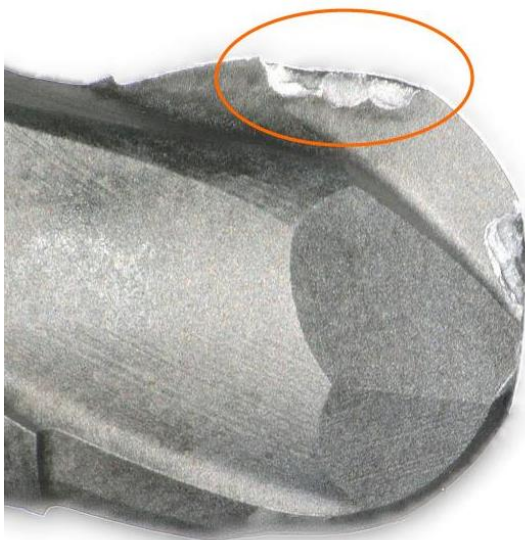
Obrázek 6.12 Snímek z mikroskopu řezu vybrané kapsy obroběné pomocí pětiosého obrábění

6.2.3 Třetí část

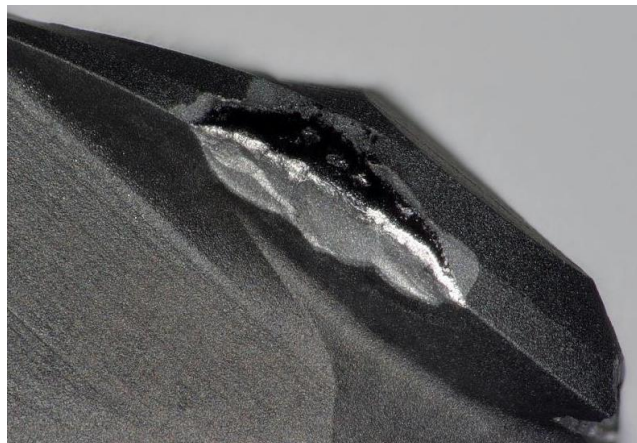
Další z testů prověřil chování nástroje při frézování z boku zkušební vzorku v podobě kvádrů o rozměrech 30 x 21 x 5 mm, který byl dále využit v experimentu popsáném v kapitole 7.2. Osa nástroje byla rovnoběžná s obráběnou stěnou obrobku. Nástroj byl zanořen do hloubky 0,8 mm pod hranu obrobku tak, aby nástroj obráběl povlakovanou část nástroje na největším průměru. Délka dráhy byla shodná s délkou delší hrany testovaného vzorku. Pro test bylo využito nástrojů použitých z jiného experimentu s opotřebením na špičce nástroje, která v tomto testu ale nebyla vystavena řezu. Hloubka řezu byla zvolena $a_p = 0,03$ mm, otáčky vřetene $n = 10\ 000$ ot/min a posuvová rychlost $v_f = 100$ mm/min s posuvem na zub $f_z = 0,005$ mm.

Po první projetí dráze bylo na nástroji viditelné značné opotřebením v podobě odštípnutého povlaku a podkladového materiálu. Dalšími drahami došlo k výraznému zhoršování stavu frézy a postupnému ničení nástroje obrobkem, kterému fréza přizpůsobovala svůj tvar. Výsledkem byla fréza s opotřebením neslučitelným s dalším použitím pod viditelnou hranicí zanoření nástroje. Na obrobku nedošlo k měřitelnému úběru.

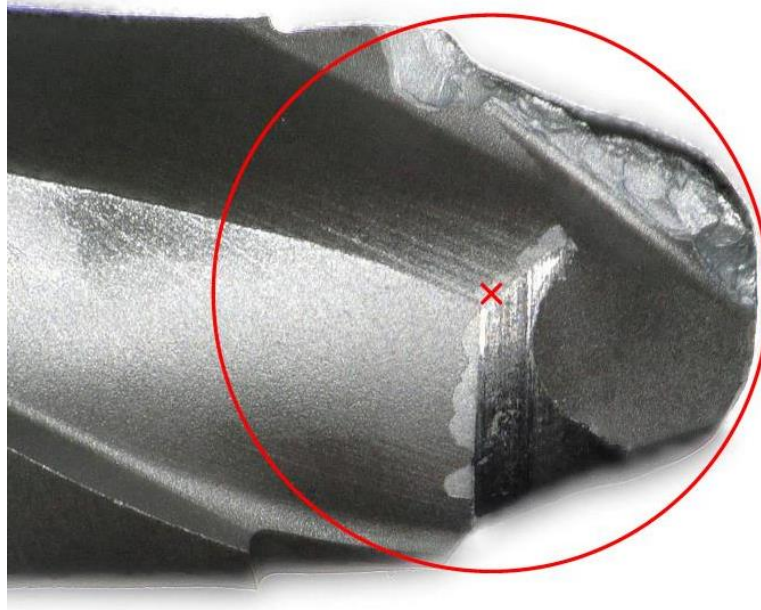
Na následujících obrázcích je zobrazena fréza po testu. Obrázek 6.13 ukazuje výrazné odštípnutí povlaku s následným vylamováním ostří podkladového materiálu po první kontrole nástroje. Zakroužkovaná oblast je zvětšena na detailu (obrázek 6.14) při pohledu zobrazující čelo i hřbet břitu. Na obrázku 6.15 je stav značně poškozeného nástroje po druhé kontrole s promítnutým průměrem nového nástroje.



Obrázek 6.13 Nástroj po první dráze



Obrázek 6.14 Detail zvýrazněné oblasti z obrázku 6.13



Obrázek 6.15 Nástroj po druhé dráze. Kružnice zobrazuje původní tvar frézy

6.3 Shrnutí pre-experimentu

V průběhu pre-experimentu byl testován nástroj ze slinutého karbidu povlakovaného diamantem s cílem zjistit chování nástroje při obrábění tvrdého materiálu, jakým je obrobek. Testy proběhly za různých otáček včetně, při nízkých posuvech na zub. Všechny části pre-experimentu skončily destrukcí nástroje. V prvních dvou částech ulomením frézy po obrobení nepatrné části požadovaného tvaru. U části poslední úbytkem frézy neslučujícím se s pokračováním v dalším obrábění, bez změřitelného odebrání materiálu obrobku.

Testování 3 a 5 osé technologie nepřineslo jednoznačný výsledek v preferované strategii. Změna z 3 na 5 osou technologii obrábění byla motivována vychýlením osy nástroje a tím zamezením kontaktu nástroje v místě s nulovou obvodovou rychlostí. Při 3 osém obrábění bylo na špičce nástroje viditelné znatelné opotřebení nástroje. Nakloněním nástroje se oblast opotřebení přesunula mimo špičku nástroje, ale nedošlo k očekávanému prodloužení životnosti nástroje.

Povlakovaný nástroj ze slinutého karbidu je předmětem dalšího testování, ale už tento prvotní experiment ukazuje, že pro efektivní obrábění použitého slinutého karbidu tento nástroj není vhodný. Pro nalezení řešení obrobení slinutého karbidu, bude potřeba jiného, odolnějšího nástroje.

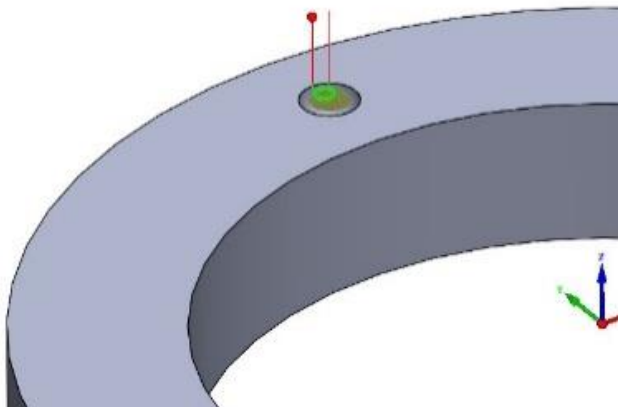
7 Experiment

Pre-experiment sloužil především jako seznámení se s obráběným materiálem, použitým nástrojem a podmínkami. Ze zaznamenaných snímků a míry opotřebení jednotlivých nástrojů nebylo možné vyhodnotit jednoznačné závěry směřující k vhodným podmínkám nebo stanovující definitivní nevhodnost nástroje či strategie.

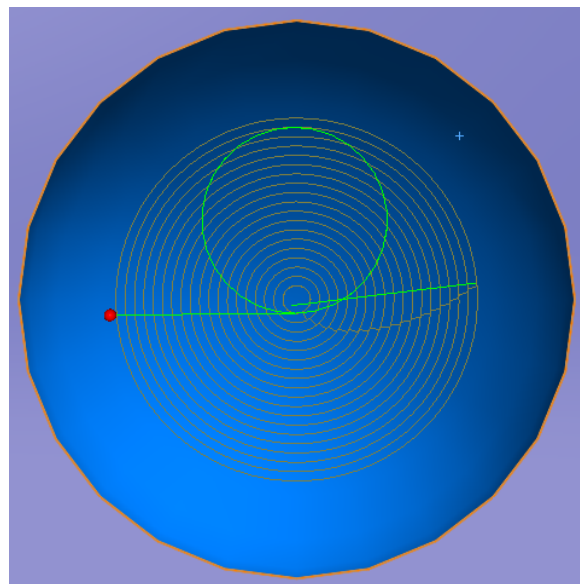
Následující experimenty seznamují s dalším testováním varianty nástroje z povlakovaného slinutého karbidu a s variantou nástroje s PCD destičkami.

7.1 Experiment s variantou povlakovaného nástroje

Tento experiment testoval nástroj za různých řezných podmínek. Došlo zde k zachování strategie obrábění a dráhy nástroje jsou zobrazeny na obrázcích 6.1 a 6.2. Využito bylo 3 osé technologie, která u pre-experimentu dosahovala lepších hodnot co do hloubky kapsy a kvality obrobeneho povrchu dna kapsy.



Obrázek 7.1 Znárodnění drah nástroje na obrobku



Obrázek 7.2 Znárodnění drah nástroje v CAD/CAM

Nástroj, kulová fréza s diamantovým povlakem, je použit ze stejné řady, od stejného výrobce jako v pre-experimentu, pouze jeho řezný průměr se zvýšil na 2 mm z předchozích 1,5 mm.

Pro lepší vyhodnocení experimentu a lepší analýzu naměřených dat bylo upuštěno od frézování kulové kapsy a měřeným objektem se stala válcová kapsa o průměru 6 mm. Rozměry válcové kapsy oproti kulové lze lépe porovnávat.

Experiment proběhl s pěti nástroji, stejný postup měření se proto za různých podmínek opakoval pětkrát. Cílem měření byla kontrola nástroje v průběhu frézování. Válcová kapsa byla frézována po jednotlivých konstantních řezných hladinách a po každé této hladině byl nástroj vyjmut ze stroje a naskenován na mikroskopu. Počet řezných hladin nebyl předem omezen a jejich množství bylo závislé od stavu frézy, respektive míře jejího opotřebení. Nástroj opotřebený natolik, že v řezu už nebyl diamantový povlak, ale pouze základní materiál nástroje, by znamenal, že s tímto nástrojem nelze dále efektivně obrábět. Jinými slovy úbytek původního rozměru nástroje by byl větší než hloubka řezu.

Pro každý nástroj byly zvoleny jiné podmínky. U prvních dvou nástrojů byly zvoleny na základě literatury, viz níže. Vzhledem k životnosti nástroje bylo nutné každé podmínky testovat na novém nástroji, protože nástroj byl po několika provedených drahách už příliš zničen. Po prvotním vyhodnocení snímků a pro nerozlišení vhodnějších řezných podmínek, byly podmínky následujících tří nástrojů zvoleny s variací řezných otáček a posuvů na zub tak, aby byla porovnatelná vhodnost vždy jedné z veličin – řezné rychlosti nebo posuvu na zub. Hodnoty zvolených řezných podmínek jsou uvedeny v tabulce 7.1.

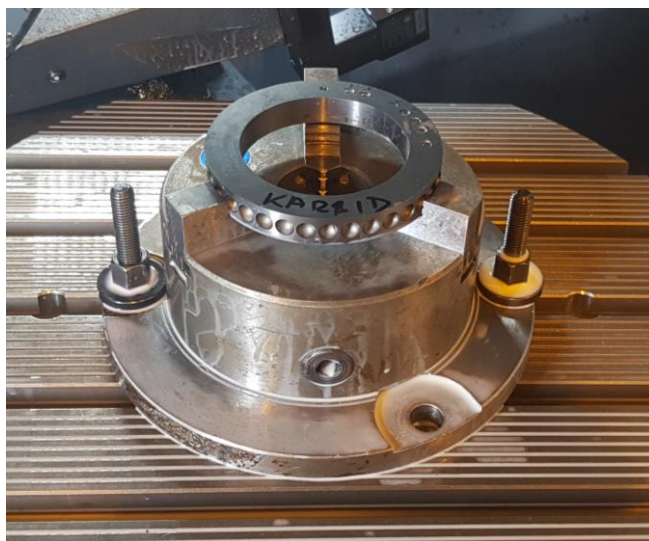
Tabulka 7.1 Zvolené řezné podmínky u experimentu s povlakovaným nástrojem

Nástroj č.	Otáčky vřetene n [ot/min]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na zub f_z [mm/z]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]
1	7 000	44	0,02	280
2	20 000	126	0,007	280
3	20 000	126	0,02	800
4	24 000	151	0,02	960
5	24 000	151	0,007	336

Podmínky pro nástroj č. 1 byly odvozeny z hodnot uvedených u typově podobného katalogového nástroje výrobce společnosti ISCAR, nástroje pro obrábění materiálu třídy H až do 65 HRC. Doporučená řezná rychlost u tohoto nástroje by se měla pohybovat mezi $v_c = 30 - 60$ m/min s posuvem na zub $f_z = 0,02 - 0,045$ mm. [1]

Podmínky pro nástroj č. 2 byly odvozeny na základě výsledků z experimentu popsáno v [2], kde se dané otáčky a posuv na zub projeví jako vhodné pro typ slinutého karbidu složením podobnému obráběnému materiálu.

Experiment provedený v [3] prokázal, že může dojít k odloupení části diamantového povlaku na čele nástroje. Tento stav ovšem neovlivňuje další obrábění, pokud posuv na zub nástroje nepřesáhne tloušťku diamantového povlaku. Proto při předpokládané tloušťce povlaku 10 – 20 μ m byly posuvy na zub zvoleny pod touto hodnotou.



Obrázek 7.3 Obrobek upnutý ve stroji

7.1.1 Výsledky experimentu

Obrábění u každého nástroje bylo ukončeno shodně po čtvrté hladině, pro lepší porovnání dat. Všechny nástroje byly po čtvrtém řezu už natolik opotřebené a základní materiál byl na ostří natolik odhalen, že ztratily předpoklad pro další efektivní obrábění.

Pro vyhodnocení pěti provedených pokusů byly zvoleny čtyři porovnání lišící se vstupními podmínkami.

- 1) Porovnání stavu vybraného nástroje po každé řezné hladině.
- 2) Porovnání stavu nástroje číslo 1 a 2 po poslední čtvrté řezné hladině.
- 3) Porovnání stavu nástroje číslo 2 a 3 po poslední čtvrté řezné hladině.
- 4) Porovnání stavu nástroje číslo 4 a 5 po poslední čtvrté řezné hladině.

Na snímcích stavu nástroje v následujících podkapitolách je znázorněn kružnicí původní průměr frézy a kóta úbytku frézy od původního vrcholu špičky nástroje. S každou hladinou je patrné větší opotřebení čela i hřbetu. Úbytek povlaku se základním materiálem dosahuje v extrémním případě od 0,05 do 0,1 mm. Nástroj tak už zcela jistě ztratil své původní vlastnosti zakládající se především na diamantovém povlaku.

Zvolený nástroj je za zvolených podmínek k obrábění testovaného slinutého karbidu nevhodný a vzhledem k variaci podmínek lze předpokládat, že ani změnou podmínek se nedocílí obrobení požadovaného tvaru.

Na základě výzkumu [3], při znalosti tloušťky povlaku, lze dosáhnout obrobení řezné dráhy až 4600 mm. A to za podmínek, kdy hloubka řezu nepřesáhne tloušťku povlaku a posuv na zub se zmenší pod $f_z = 0,005$ mm. Dodržením těchto podmínek při testování, při udržení maximálních otáček stroje a při frézování s posuvy na zub ne většími než zmíněná hranice, je předpoklad pro úspěšné obrobení žádoucí kapsy. Tyto podmínky znamenají poslední variantu pro testování kulové monolitní frézy s diamantovým povlakem. V případě neúspěchu s těmito podmínkami je nutné zvolit cestu frézování jiným typem frézy než kulové (neobvyklé frézy pro hrubování), například frézou toroidní, nebo frézou s plným diamantem nebo kubickým nitridem boru.

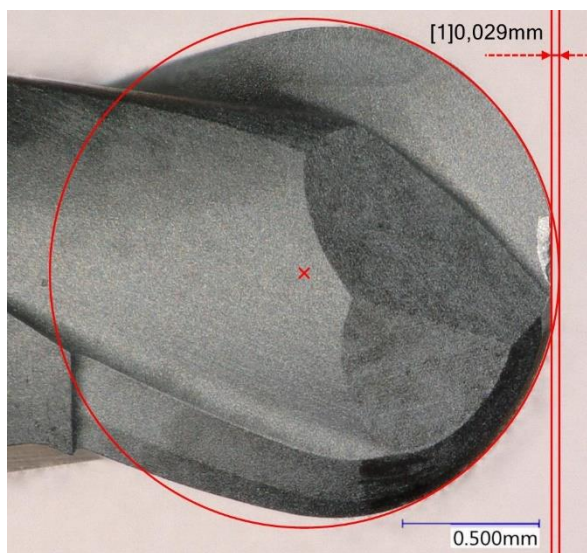
Na snímcích opotřebovaných nástrojů je vždy znázorněn úbytek špičky nástroje vzhledem k promítnutému původnímu rádiusu frézy.

7.1.1.1 Porovnání stavu nástroje č. 3 po každé řezné hladině

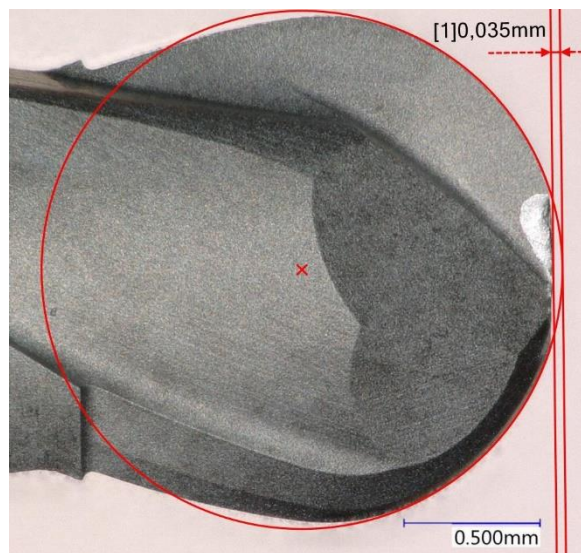
Z obrázků 7.4 – 7.7 je patrná postupná degradace nástroje. Diamantový povlak se odlupuje a základní materiál nástroje není dostatečně tvrdý na obrábění obrobku s podobnou tvrdostí. Díky výraznému úbytku materiálu nástroje došlo ke změně geometrie nástroje a fréza nebyla schopna obrábět s požadovanou přesností.

Tabulka 7.2 Řezné podmínky nástroje č. 3

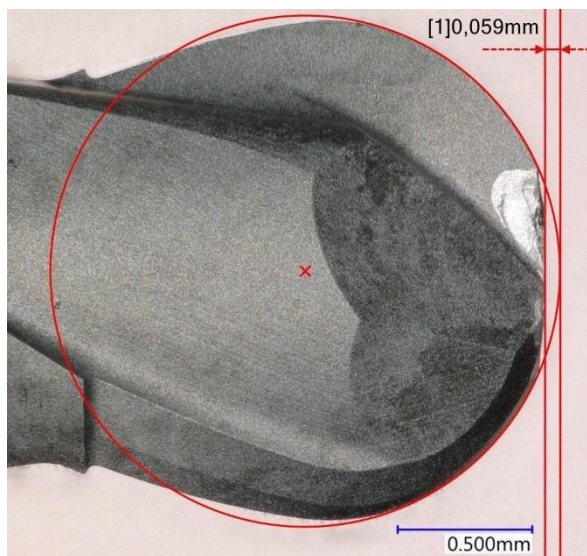
Nástroj č.	Otáčky vřetene [ot/min]	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm/z]	Rychlost posuvu [mm/min]
3	20 000	126	0,02	800



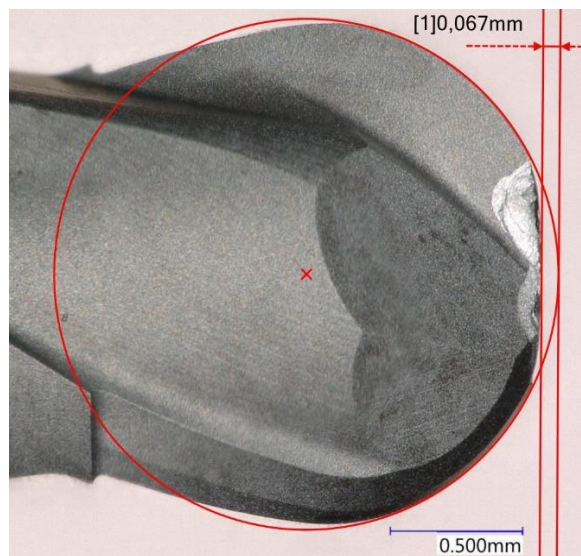
Obrázek 7.4 Nástroj č. 3 po první řezné hladině



Obrázek 7.5 Nástroj č. 3 po druhé řezné hladině



Obrázek 7.6 Nástroj č. 3 po třetí řezné hladině



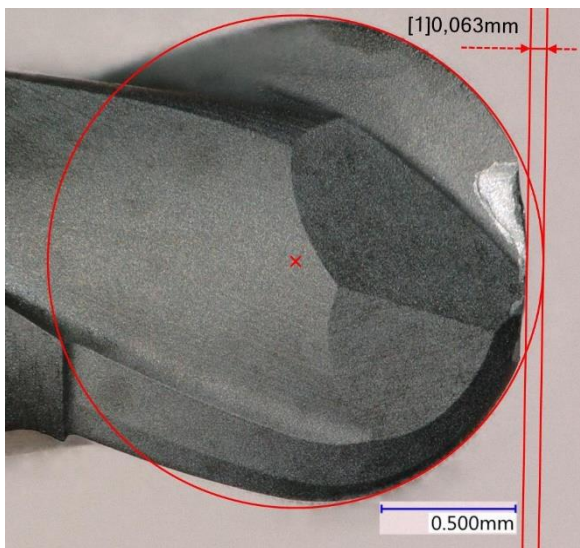
Obrázek 7.7 Nástroj č. 3 po čtvrté řezné hladině

7.1.1.2 Porovnání stavu nástroje číslo 1 a 2 po poslední čtvrté řezné hladině

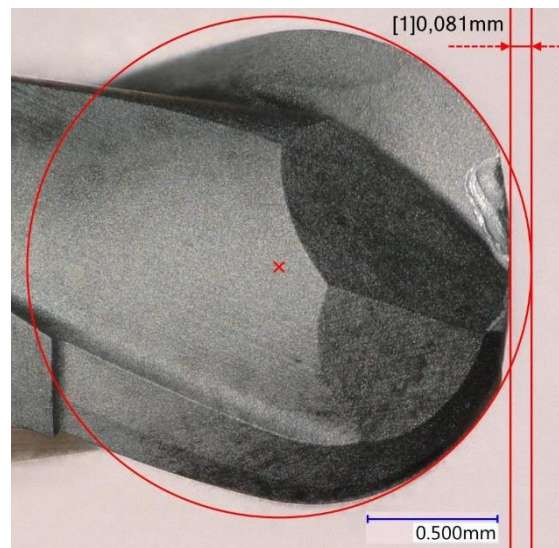
Obrázky 7.8 a 7.9 ukazují opotřebení nástroje použitím řezných podmínek podle doporučení výrobce (obrázek 7.8) a za podmínek doporučených v literatuře [2] (obrázek 7.9). V obou případech je opotřebení nástroje srovnatelné a nebyla prokázána zřejmá souvislost řezných podmínek s mírou opotřebení. U obou nástrojů došlo k úbytku frézy na špičce až o 0,1 mm. U tak výrazného opotřebení nelze předpokládat efektivní obrábění.

Tabulka 7.3 Řezné podmínky nástrojů č. 1 a 2

Nástroj č.	Otáčky vřetene [ot/min]	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm/z]	Rychlost posuvu [mm/min]
1	7 000	44	0,02	280
2	2 0000	126	0,007	280



Obrázek 7.8 Nástroj č. 1 po poslední řezné hladině



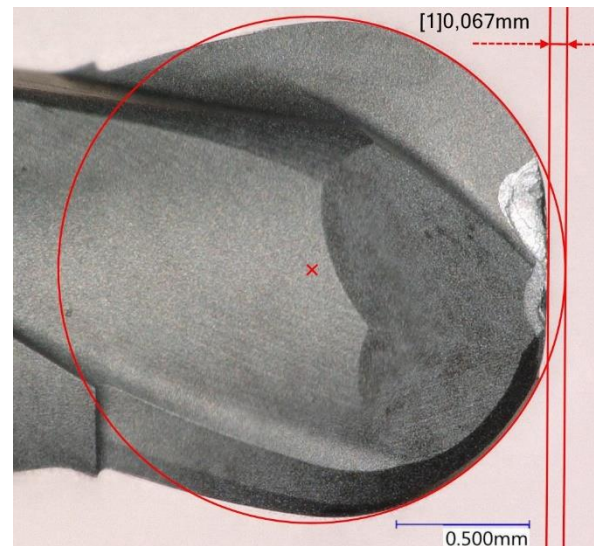
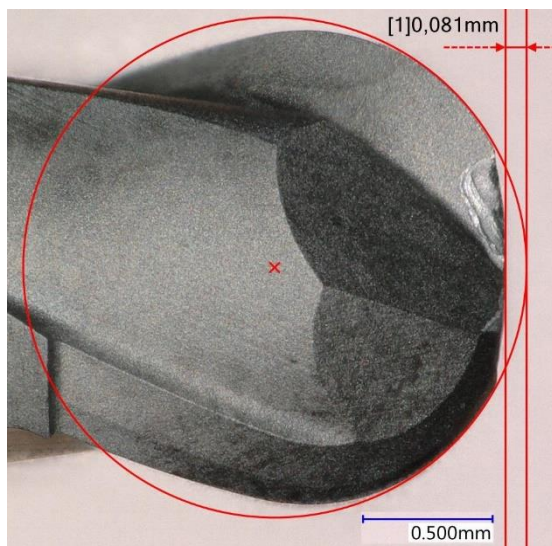
Obrázek 7.9 Nástroj č. 2 po poslední řezné hladině

7.1.1.3 Porovnání stavu nástroje číslo 2 a 3 po poslední čtvrté řezné hladině

U této dvojice nástrojů (zobrazených na obrázcích 7.10 a 7.11), byly zachovány shodné otáčky vřetene a hodnotícím faktorem byl posuv na zub. I přes výrazně menší posuv na zub se zdá být nástroj č. 2 opotřeben více než nástroj č. 3. K takovému závěru ale nelze dojít z jednoho zkušební vzorku a větší opotřebení může být způsobeno jakostí daných nástrojů.

Tabulka 7.4 Řezné podmínky nástrojů č. 2 a 3

Nástroj č.	Otáčky vřetene [ot/min]	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm/z]	Rychlost posuvu [mm/min]
2	20 000	126	0,007	280
3	20 000	126	0,02	800



Obrázek 7.10 Nástroj č. 2 po poslední řezné hladině

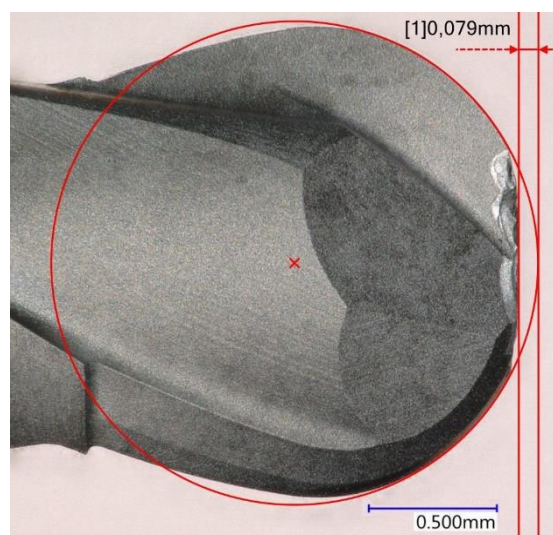
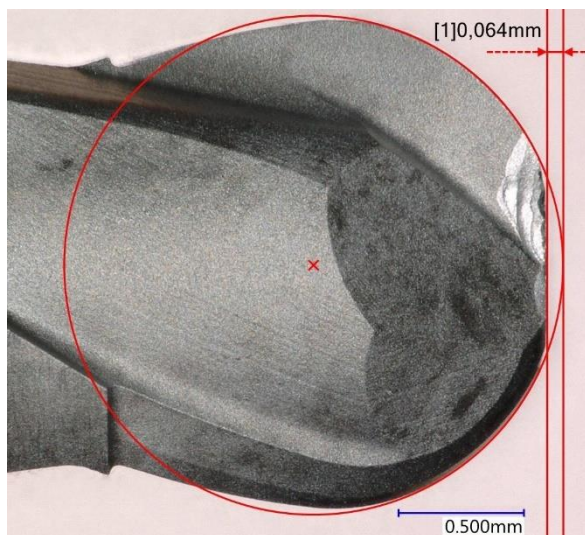
Obrázek 7.11 Nástroj č. 3 po poslední řezné hladině

7.1.1.4 Porovnání stavu nástroje číslo 4 a 5 po poslední čtvrté řezné hladině

Poslední srovnání proběhlo za využití maximálních otáček stroje a variace stejných hodnot posuvů na zub jako v předešlých případech. Ani tyto podmínky ale neprokázaly efektivní obrábění a obě frézy se srovnatelně poškodily (obrázky 7.12 a 7.13).

Tabulka 7.5 Řezné podmínky nástrojů č. 4 a 5

Nástroj č.	Otáčky vřetene [ot/min]	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm/z]	Rychlost posuvu [mm/min]
4	24 000	151	0,02	960
5	24 000	151	0,007	336



Obrázek 7.12 Nástroj č. 4 po poslední řezné hladině Obrázek 7.13 Nástroj č. 5 po poslední řezné hladině

7.1.2 Shrnutí experimentu s povlakovaným nástrojem

Provedený experiment měl za cíl vyzkoušení několika variant řezných podmínek. Při žádném z provedených testů se zvolené podmínky neprojeví jako vhodné k třískovému obrábění požadovaného materiálu. Všechny nástroje byly po dokončení čtvrté řezné hladiny natolik opotřebený, že ztratily vlastnosti své původní geometrie a nebyly schopny dále pokračovat v úběru materiálu.

Pro vyhodnocení experimentu byly využity 2D snímky nástroje, které umožnily porovnání změny geometrického tvaru nástroje vůči původnímu kulovému tvaru frézy. Izometrický pohled dává lepší představu na opotřebení špičky nástroje, avšak neposkytuje možnost srovnání porovnávaných snímků. Pro vyhodnocení byly použity snímky ze strany opticky většího poškození.

Do vyhodnocení snímků mohla být vnesena chyba subjektivního posouzení opotřebení nástrojů. Nepřesným nastavením úhlu natočení nástroje v mikroskopu mohlo dojít k odlišnému promítnutí jednotlivých nástrojů. Tyto faktory však neovlivňují skutečnost, že všechny

testované nástroje po čtyřech řezných hladinách už nebyly dále vhodné pro další obrábění za daných podmínek.

Pro ilustraci jsou na obrázcích 7.15 – 7.19 vyobrazeny špičky jednotlivých nástrojů z pohledu poskytujícího náhled na poškození fréz po ukončení testu daného nástroje. Obrázek 7.14 poskytuje náhled na původní nástroj. Snímky obrobených kapes jsou k dispozici v příloze č. 2.



Obrázek 7.14 Nástroj před testem



Obrázek 7.15 Nástroj č. 1



Obrázek 7.16 Nástroj č. 2



Obrázek 7.17 Nástroj č. 3



Obrázek 7.18 Nástroj č. 4

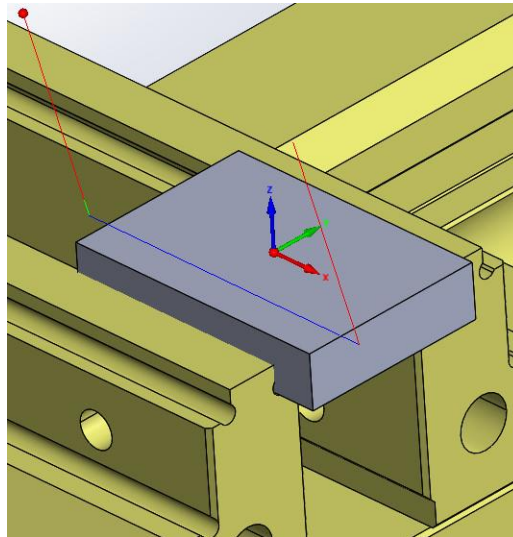


Obrázek 7.19 Nástroj č. 5

7.2 Experiment s variantou nástroje s PCD destičkami

Další testovanou variantou bylo využití nástroje s napájenými destičkami z polykrystalického diamantu. Větší vrstva tvrdého materiálu dává naději na vyšší životnost nástroje (ve srovnání s nástrojem použitým v předchozí variantě).

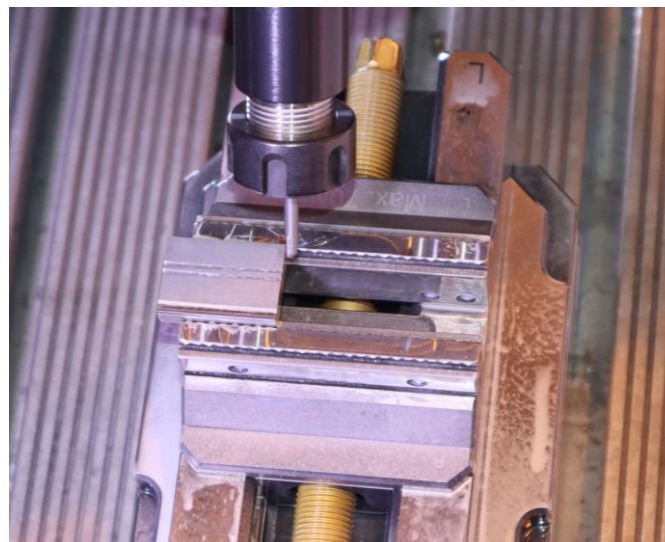
Dodavatelem obrobku byl pro tento experiment dodán nový zkušební vzorek ze stejného materiálu, jako je materiál použitý v předchozích experimentech. Vzorek je v podobě kvádrů o rozměrech 30 x 21 x 5 mm (obrázek 7.20 a 7.21).



Obrázek 7.20 Znárodnění dráhy nástroje v CAD/CAM

Zkušební dráhy nástroje využitě pro tuto variantu jsou přímé dráhy, které jsou vhodnější pro výsledné vyhodnocení. Délka dráhy nástroje a hloubka obrobene drážky je snáze měřitelná.

Vzhledem k omezenému počtu nástrojů nemohlo dojít k systematickému porovnávání vlivů změn jednotlivých rezných parametrů na opotřebenění nástroje nebo kvalitu obrobeneho povrchu. Provedené testy proto představují navržené metody obrábění a seznamují s jejich výsledky, na jejichž základě je možné postupovat v dalším testování těchto nástrojů při frézování daného slinutého karbidu.



Obrázek 7.21 Upnutí obrobku ve stroji

7.2.1 Popis experimentu

K dispozici pro zhotovení experimentu byly 3 frézy popsané v kapitole 6.1.4.2. Každý nástroj byl testován za jiných řezných podmínek a následně byl vyhodnocován stav nástroje v daných intervalech. Pro všechny tři frézy byla společným parametrem hloubka řezu $a_p = 0,03$ mm. Další parametry, otáčky vřetene a posuv na zub, byly jiné pro každý nástroj tak, aby byly otestovány různé řezné podmínky. Po výrazném viditelném opotřebení nástroje byl test pro danou frézu ukončen.

7.2.2 Výsledky experimentu

V následujících podkapitolách jsou představeny výsledky testů jednotlivých testovaných nástrojů.

7.2.2.1 Nástroj č. 1

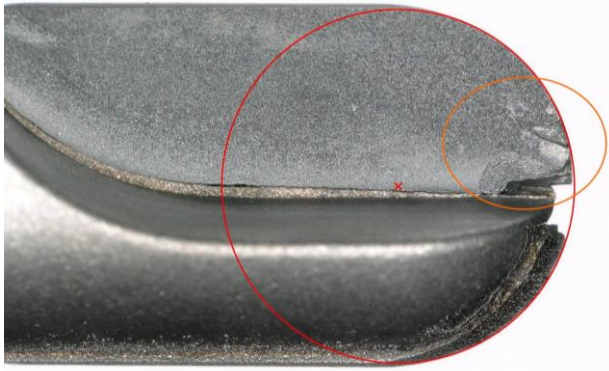
Pro první frézu byly zvoleny podmínky za nejvyšších možných otáček vřetene $n = 24\,000$ ot/min a rychlosti posuvu $v_f = 240$ mm/min, což odpovídá posuvu na zub $f_z = 0,005$ mm. Osa nástroje byla nastavena kolmo k povrchu obrobku. Z důvodu snahy o nasimulování vyfrézování kapsy v povrchu obrobku se fréza zanořovala do zkušebního vzorku po rampě do plného materiálu. Předmětem frézování pro tento test byla přímá drážka. Snímky opotřebení frézy byly provedeny po deseti přejetých drahách, poté byl nástroj testován po dalších deseti přejezdech v nové paralelní drážce. Následovalo skenování nástroje. Celý experiment s daným nástrojem byl ukončen po dvaceti drahách a byly vytvořeny dvě drážky.

Tabulka 7.6 Řezné podmínky nástroje č. 1

Nástroj č.	Otáčky vřetene [ot/min]	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm/z]	Rychlost posuvu [mm/min]
1	24 000	302	0,005	240

Opotřebení nástroje je patrné na obou břitech, ale výrazně většího opotřebení dosahuje na břitu sahajícím do osy frézy. Zde došlo k významnému odštípnutí špičky nástroje a následnému zploštění špičky, která po ukončení testu ztratila svůj původní tvar. Tento stav je pravděpodobně způsoben nenakloněním osy nástroje, a tedy nulovou řeznou rychlostí v ose nástroje. Na druhém břitu je patrné vydrolování ostří, které je jedním z obvyklých opotřebení.

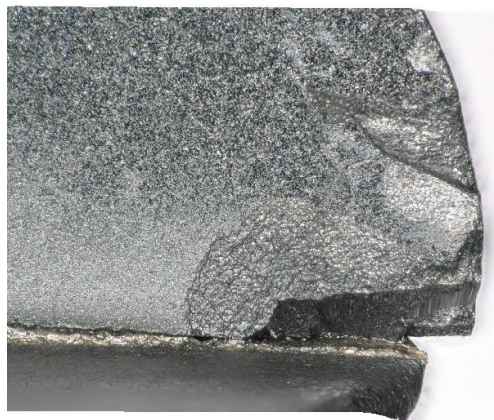
Obrázky 7.22 – 7.27 zobrazují postupné opotřebení po 10 a po 20 drahách na jednotlivých břitech. Oblasti oranžově zakroužkované na obrázcích 7.22 respektive 7.25 jsou přiblíženy na obrázcích 7.24 respektive 7.27. Na obrázku 7.26 je znázorněn úbytek špičky nástroje vůči původnímu tvaru frézy.



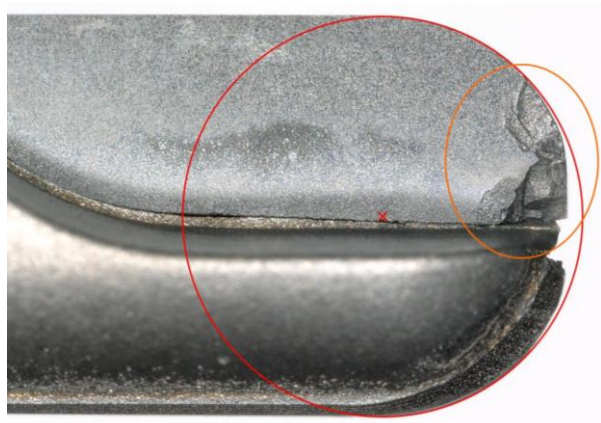
Obrázek 7.22 Opotřebení nástroje po 10 drahách na jednom z břitů



Obrázek 7.23 Opotřebení nástroje po 10 drahách na druhém z břitů



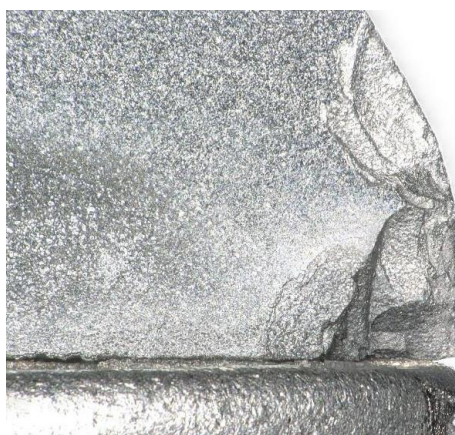
Obrázek 7.24 Detail opotřebení z obrázku 7.22



Obrázek 7.25 Opotřebení nástroje po 20 drahách na jednom z břitů



Obrázek 7.26 Opotřebení nástroje po 20 drahách na druhém z břitů



Obrázek 7.27 Detail opotřebení z obrázku 7.25

7.2.2.2 Nástroj č. 2

Pro druhou frézu byly zvoleny nižší otáčky vřetene oproti předchozímu testu $n = 12\ 000$ ot/min a rychlost posuvu $v_f = 70$ mm/min, což odpovídá posuvu na zub $f_z = 0,003$ mm. Osa nástroje byla tentokrát nastavena v úhlu 40° od svislé polohy nástroje. Nástroj se nejprve zanořil na hloubku řezu mimo obrobek a pokračoval ve vodorovné dráze přes celou délku obrobku.

Snímky nástroje při tomto experimentu byly pořizovány s větší četností a zároveň pro stálé zatížení stejné části nástroje bylo provedeno více paralelních drážek. První kontrola nástroje proběhla po první dráze, pak po dalších dvou drahách ve stále stejné drážce. Další dvě kontroly vždy po třech drahách, vždy v nových drážkách. Poté dvakrát po pěti drahách v samostatných drážkách. Celkově se do přerušení testu dosáhlo 19 drah při šesti kontrolách.

Tabulka 7.7 Řezné podmínky nástroje č. 2

Nástroj č.	Otáčky vřetene [ot/min]	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm/z]	Rychlost posuvu [mm/min]
2	12 000	151	0,003	70

Opotřebení nástroje je rozeznatelné už po první dráze, ale pouze v podobě lehkého vylamování ostří a nedochází k zásadnímu poškození frézy. Hlavní oblast poškození nástroje se s nakloněním frézy přesunula od osy nástroje, ale ani v nejnamáhavější oblasti nedochází k takovým destrukcím, jako když nástroj s obrobkem svíral 90° . Nakloněním osy frézy je možné pozorovat špičku nástroje v neměnné geometrii díky tomu, že špička je mimo řez. I po provedených devatenácti drahách, vylomení ostří nedosáhlo takových rozměrů, jako při předchozím testu. Naklonění nástroje lze tedy považovat za parametr vhodný k dalšímu testování.

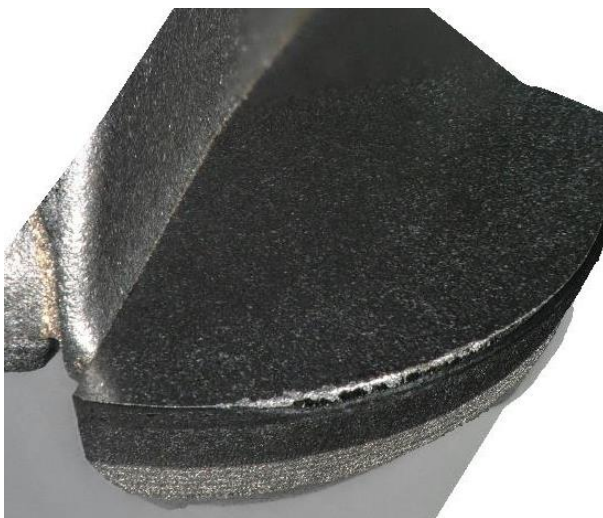
Obrázky 7.28 – 7.33 zobrazují stav obou břitů na přiblížených 3D snímcích. Pro názornost průběhu opotřebení jsou k dispozici snímky průběžných kontrol testu po projetí celkově 1., 9. a 19. dráhy. Na obrázcích 7.34 a 7.35 jsou pak pohledy shora na konečný stav obou břitů nástroje po poslední kontrole.



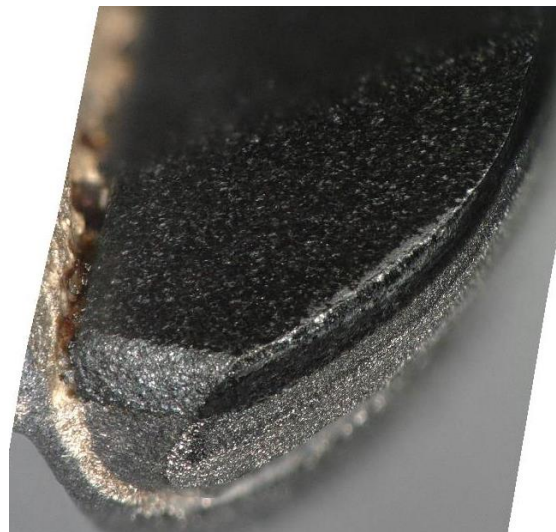
Obrázek 7.28 Stav jednoho z břitů po 1. dráze



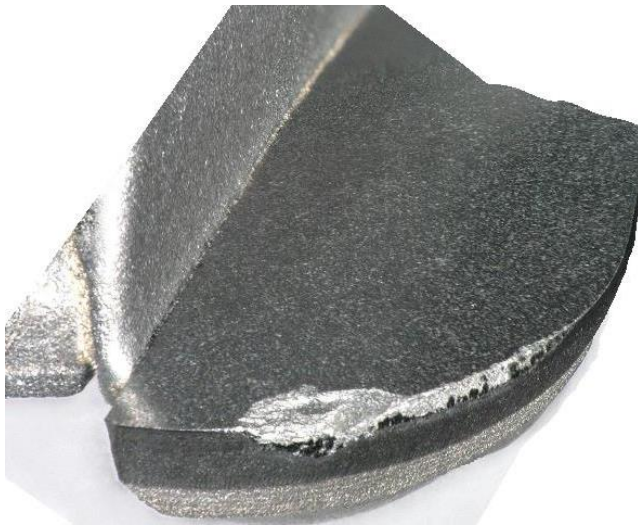
Obrázek 7.29 Stav druhého z břitů po 1. dráze



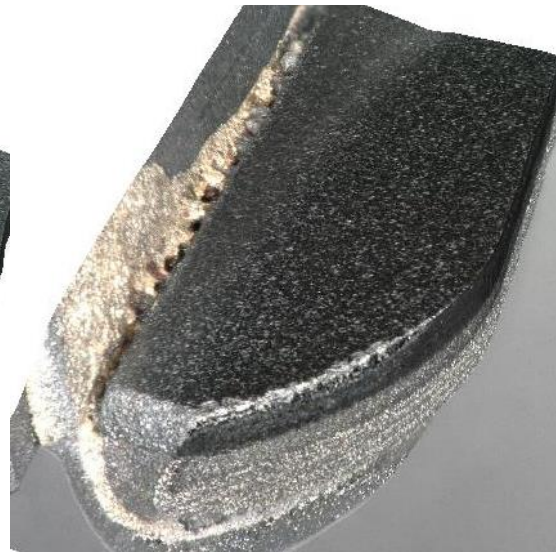
Obrázek 7.30 Stav jednoho z břitů po 9. dráze



Obrázek 7.31 Stav druhého z břitů po 9. dráze



Obrázek 7.32 Stav jednoho z břitů po 19. dráze



Obrázek 7.33 Stav druhého z břitů po 19. dráze



Obrázek 7.34 Pohled shora na jeden z břitů po 19. dráze



Obrázek 7.35 Pohled shora na druhý z břitů po 19. dráze

7.2.2.3 Nástroj č. 3

Pro třetí frézu byly zvoleny lehce vyšší otáčky vřetene oproti předchozímu testu $n = 15\,000$ ot/min a rychlost posuvu $v_f = 120$ mm/min, což odpovídá posuvu na zub $f_z = 0,004$ mm. Osa nástroje zůstala nastavena v úhlu 40° od svislé polohy nástroje. Nástroj se nejprve zanořil na hloubku řezu mimo obrobek a pokračoval ve vodorovné dráze přes celý rozměr obrobku.

Snímky nástroje při tomto experimentu byly pořízeny celkem čtyřikrát po třech projetych drahách. Pro stálé zatížení stejné části nástroje bylo provedeno více paralelních drážek. První tři drážky byly projety třemi drahami, poslední pěti drahami. Po každé drážce došlo k nasnímání nástroje. Celkově se do přerušení testu dosáhlo čtrnácti drah ve čtyřech drážkách.

Tabulka 7.8 Řezné podmínky nástroje č. 3

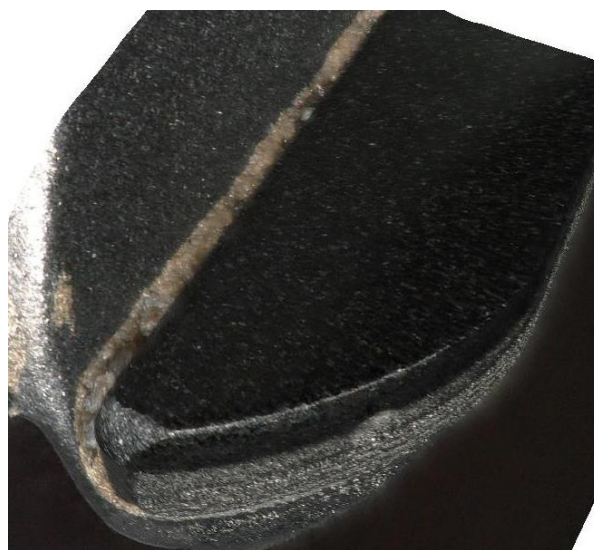
Nástroj č.	Otáčky vřetene [ot/min]	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm/z]	Rychlost posuvu [mm/min]
3	15 000	189	0,004	120

Opotřebení nástroje lze sledovat od první kontroly, ale oproti předchozímu testu nástroje č. 2 nedošlo k zásadnímu rozdílu. Stav nástroje po ukončení testu po 14 dráhách také nevykázal výrazných změn při porovnání s nástrojem č. 2. Změna řezných podmínek tedy neměla za následek znatelné změny v opotřebení nástroje a faktor naklonění se potvrdil jako důležitý pro snížení míry opotřebení.

Obrázky 7.36 – 7.41 zobrazují stav obou břitů na přiblížených 3D snímcích. Pro názornost průběhu opotřebení jsou k dispozici snímky průběžných kontrol testu po projetí celkově 3., 6. a 14. dráhy. Na obrázcích 7.42 a 7.43 jsou pak pohledy shora na konečný stav obou břitů nástroje po poslední kontrole. Průběh opotřebení na břitech z bočního pohledu na destičky je zobrazen v příloze č. 3.



Obrázek 7.36 Stav jednoho z břitů po 3. dráze



Obrázek 7.37 Stav druhého z břitů po 3. dráze



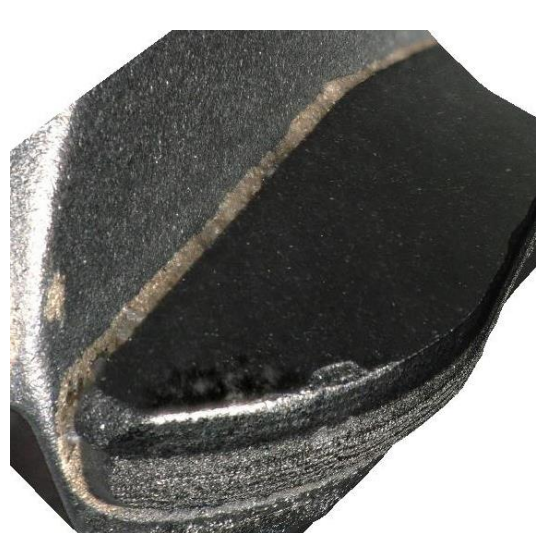
Obrázek 7.38 Stav jednoho z břitů po 6. dráze



Obrázek 7.39 Stav druhého z břitů po 6. dráze



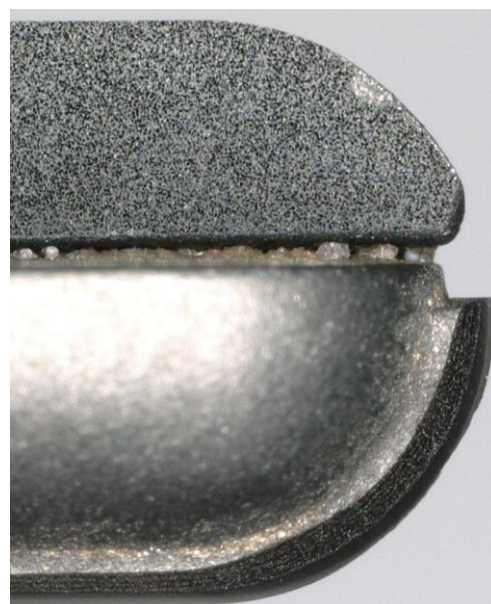
Obrázek 7.40 Stav jednoho z břitů po 14. dráze



Obrázek 7.41 Stav druhého z břitů po 14. dráze



Obrázek 7.42 Pohled shora na jeden z břitů po 14. dráze



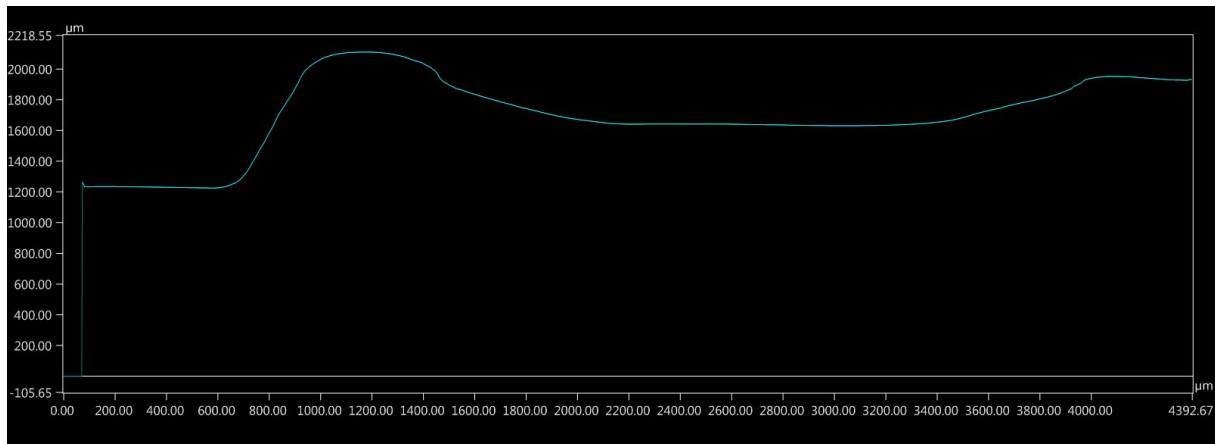
Obrázek 7.43 Pohled shora na druhý z břitů z břitů po 14. dráze

7.2.3 Shrnutí experimentu s nástrojem s PCD destičkami

V druhém experimentu byla testována dvoubřitá fréza s napájenými destičkami z polykrystalického diamantu. Nástroj byl testován na lineárních drahách a skenován v průběhu testu po odjetí určitého počtu drah. K dispozici pro tento test byly tři nástroje shodné geometrie a každý z těchto nástrojů byl prověřen za rozdílných podmínek. Zatímco variace rezných podmínek nepřinesla jednoznačné výsledky a závěry, které by stanovily vhodnější variantu, změnu polohy nástroje vůči obrobku lze považovat za prospěšnou pro životnost nástroje.

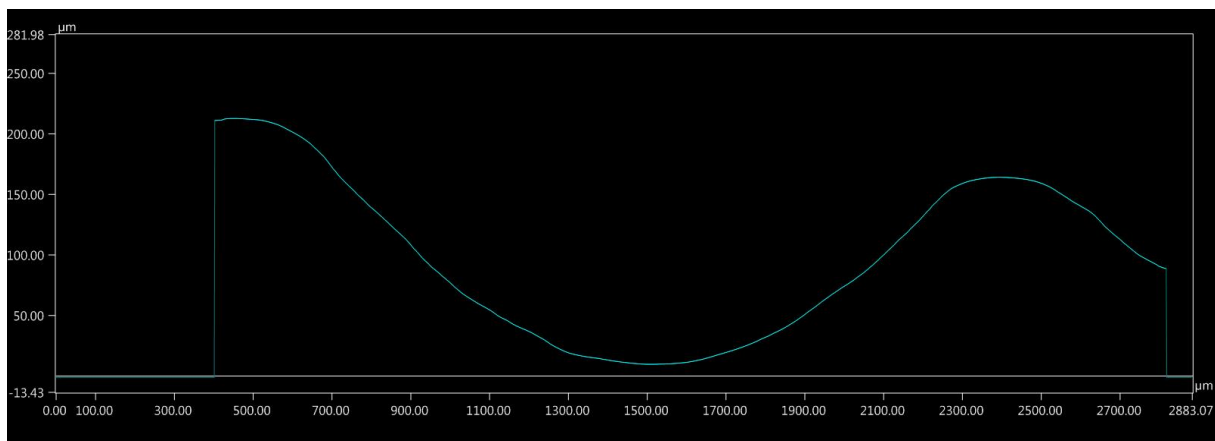
Na následujících obrázcích jsou snímky příčných řezů drážek vytvořených nástrojem kolmo k obrobku (obrázek 7.41) a nástrojem vykloněným o 40° od svislé polohy (obrázek 7.42).

První snímek zobrazuje drážku u nástroje kolmo k obrobku. Je zřetelné zploštění profilu pravděpodobně způsobeného odlomením špičky nástroje.



Obrázek 7.44 Příčný řez drážkou u kolmého nástroje

Na druhém snímku zobrazujícím drážku vytvořenou nakloněným nástrojem lze pozorovat výrazně více zaoblený tvar drážky, oproti předchozímu případu. To více odpovídá tvaru frézy a také potvrzuje větší stálost geometrie frézy.



Obrázek 7.45 Příčný řez drážkou u nástroje nakloněného o 40°

8 Technické zhodnocení variant řešení

Volba kulových fréz se odvíjela od záměru obrobení kulové kapsy relativně malého průměru, pro kterou by výroba frézou s rovinným zakončením byla problematická. Limitující faktor průměru frézy není daný pouze průměrem obráběného tvaru, ale také jeho hloubkou, která omezuje velikost naklonění nástroje.

Pro experiment bylo dostupné omezené množství i druhů nástrojů. Tento fakt ovlivnil charakter testování, které nemohlo proběhnout formou systematického zkoušení podmínek různých nástrojů postupnou změnou jednotlivých parametrů řezného procesu. Řezné podmínky proto byly zvoleny na základě doporučení výrobce nebo na základě rešerše provedených testů v této problematice.

Jeden z typů nástrojů zastupoval povlakované nástroje, druhý pak nástroje s destičkami z polykrystalického diamantu. V případě frézy s PCD destičkami šlo o nejmenší dostupný rozměr.

Jako první byl testován nástroj s diamantovým povlakem. Možné využití těchto nástrojů, popsané ve studiích zmíněných v kapitole 2, nebylo s dostupnými nástroji za použitých podmínek potvrzeno. Jako jeden z faktorů ovlivňující životnost nástroje měl být posuv na zub pod hodnotou tloušťky povlaku. I přes variaci posuvů na zub vždy došlo k odloupení povlaku v takové míře, že byl nástroj pro další obrábění znehodnocen. U každého z nástrojů došlo k natolik velkému opotřebení, že byl test přerušen ještě před obrobením naprogramovaného tvaru. Nástroj byl testován v poloze kolmé k obráběné ploše pro maximální zachycení axiální síly působící na nástroj s takto malým průměrem. V místě střetu špičky nástroje s obráběným materiálem je kritický bod s nulovou obvodovou rychlostí, kde nedochází k obrábění, ale k tváření. Z tohoto místa se dále šířilo opotřebení břitů.

Ze zdrojů uvedených v práci plyne, že rychlé střídání teplot na břitu nástroje způsobené přerušovaným řezem, má za následek teplotní šok. Při tvrdém frézování vznikají vyšší teploty než při konvenčním a při využití chlazení vodou dochází k umocnění teplotních rozdílů, které mohou v důsledku způsobit vznik mikrotrhlin a trhlin na břitu nástroje. Vyzkoušení chlazení vzduchem nebo olejovým aerosolem by mělo být předmětem dalšího testování.

Druhý z nástrojů měl napájené destičky z PCD. Proběhlý experiment byl realizován s nástrojem kolmo k povrchu obrobku i s nakloněním nástroje. U kolmého postavení docházelo opět k velkému opotřebení špičky nástroje. Přesun hlavní oblasti řezu dál od osy nástroje se kladně projevil na celkovém opotřebení nástroje.

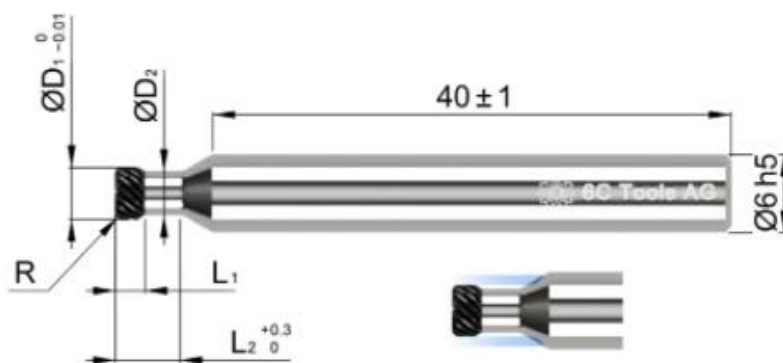
Pro ilustrativní číselné vyhodnocení efektivnosti povlakovaného nástroje lze využít porovnání skutečně obrobeného objemu vůči plánovanému. Pro tento výpočet je použit test nástroje z pre-experimentu, kde nástroj obráběl až do zničení při vytváření půlkulové kapsy. Výpočty je porovnán objem vytvořeného zahloubení s plánovanou půlkulovou kapsou. Výsledkem bylo obrobení pouze 2,8 % plánovaného objemu jedné kapsy. Tento výsledek je zcela neuspokojivý pro udržitelnou výrobu.

Z dodaných nástrojů se žádný za testovaných podmínek neukázal jako vhodný kandidát pro obrábění použitého vzorku slinutého karbidu. Původně plánovaného obrobení kulové plochy nebylo možné dosáhnout a charakter testů byl pro lepší porovnatelnost změněn na lineární drážky. Pro definitivní otestování a stanovení vhodnosti nástroje s PCD destičkami by bylo potřeba disponovat větším množstvím nástrojů.

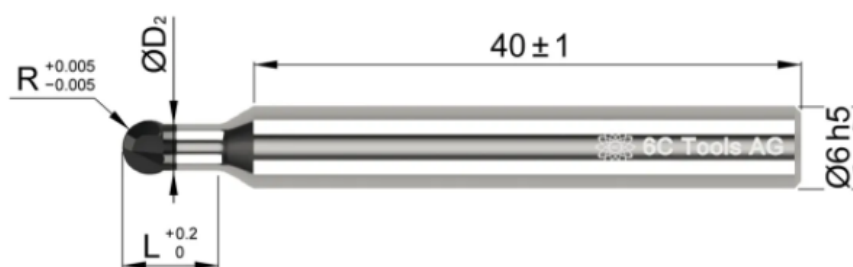
8.1 Návrh dalšího postupu řešení

Již po proběhlém testování dvou variant nástrojů se na trhu objevil výrobce fréz, který nabízí vhodné nástroje k hledané aplikaci. Dané frézy lze doporučit k budoucímu testování. Jedná se o nástroje švýcarského výrobce nástrojů 6C Tools AG z Zürichu. Tato firma má ve svém portfoliu monolitní PCD vícebřitvé torusové i dvoubřitvé kulové frézy. Ve svých podkladech u daných nástrojů dokonce uvádí vhodnost pro obrábění keramiky, slinutého karbidu, safíru a skla. To jsou velmi tvrdé materiály, využití těchto nástrojů proto slibuje dobré výsledky. Na dostupných videích zveřejněných výrobcem je vidět obrábění slinutých karbidů těmito frézami se značnou efektivitou. Konkrétně jde o obrábění slinutého karbidu třídy K40 bez bližší specifikace nebo slinutého karbidu s označením Ceratizit CF H40S+ s uváděnou tvrdostí 90,1 HRA, respektive HV10 1400. U posledního zmíněného výrobce používá vysokorychlostního obrábění (HSC) s frézami o průměru od 1 do 4 mm a dosahuje údajné drsnosti obrobeneho povrchu $R_a 0,025 \mu\text{m}$. [34][35]

Firma nabízí jak monolitní kulové frézy z PCD do průměru 1 mm, tak i monolitní PCD torusové frézy do průměru 3,3 mm. Pro využití v případě žádané kulové kapsy by se kapsa mohla nejdříve vyhrubovat nabízenou torusovou frézou a dokončit frézou kulovou. Tyto nástroje mají celou reznou část tvořenou z PCD. Vhodnost aplikace těchto nástrojů na obrobení konkrétního, v této práci testovaného, slinutého karbidu nelze s jistotou stanovit a nástroje je potřeba otestovat na daném vzorku. Při potvrzení popisovaných vlastností nástrojů by se ale mohlo jednat o potenciální řešení zkoumané problematiky.



Obrázek 8.1 Torusová fréza od výrobce 6C Tools AG [37]



Obrázek 8.2 Kulová fréza od výrobce 6C Tools AG [36]

9 Závěr

Tato práce řeší problematiku frézování slinutého karbidu. Úvod práce seznamuje se současným stavem prostřednictvím vědeckých publikací. Dále jsou uvedeny faktické informace potřebné k pochopení problematiky. Druhá část práce je věnována experimentálnímu ověření získaných poznatků a otestování dvou variant nástrojů zvolených pro frézování slinutého karbidu.

Obrobek a obráběný tvar použitý v této práci byl dodán firmou se zájmem na jeho využití v oblasti výroby lisovacích forem. Použité nástroje byly výrobcem vybrané vzorky dvou zvolených variant nástrojů pro aplikaci na velmi tvrdé materiály. Za těchto stanovených podmínek bylo úkolem diplomové práce ověření obrobitelnosti daného vzorku ze slinutého karbidu danými nástroji.

V práci prezentované studie se věnují problematice frézování slinutého karbidu za odlišných podmínek s odlišnými nástroji. Ačkoliv všechny uvádějí závěry o úspěšném provedení obrábění, srovnání s experimentální částí této práce je velmi problematické. Nelze zcela přesně porovnat použité nástroje, ale ani dostupné informace o materiálu obrobku neposkytují data jednoznačně definující jeho vlastnosti. Vlastnosti nástroje bývají často obchodním tajemstvím výrobce. Vlastnosti obrobku jsou ve většině případů charakterizované obsahem WC a Co a tvrdostí měřenou na stupnici HRA, mimo rozsah uvedený normou. Proto je porovnání podmínek, za kterých experimenty probíhaly velmi komplikované. Výsledky autorů uvedených studií proto nelze s jistotou úspěchu aplikovat na experimenty prezentované v této diplomové práci.

Ke zpřesnění výsledků práce by bylo vhodné provedené testy provádět s větším množstvím nástrojů pro prostupné otestování vlivů jednotlivých rezných parametrů a nalezení optimálních podmínek. Lze uvažovat nad změnou otáček vřetene, posuvu na zub, naklonění nástroje nebo druhu chlazení. Na základě výsledků práce ale nelze s jistotou předpokládat, že by došlo k nalezení podmínek takových, které by měly vliv na výrazné prodloužení životnosti nástroje.

Další vývoj experimentu by proto měl směřovat směrem k volbě vhodnějšího nástroje schopného obrobení testovaného materiálu. Ačkoliv výrobci nástrojů nabízejí frézy pro obrábění velmi tvrdých materiálů, tak podle informací z katalogu nelze dopředu stanovit vhodnost daného nástroje pro konkrétní obráběný materiál. Vybraný nástroj je potřeba experimentálně otestovat.

Výsledek této diplomové práce nepotvrdil vhodnost použitých nástrojů pro obrábění daného materiálu. S ohledem na předpokládaný další vývoj v oblasti obrábění slinutých karbidů je vhodné uvést pořizovací cenu využitých nástrojů, ke které je, v případě zavedení nové technologie do výroby, potřeba přihlédnout. Nástroj ze slinutého karbidu povlakovaný CVD diamantem (INSAP020-144562R001) byl pořízen za 1800,- Kč/ks. Nástroj s napájenými PCD destičkami (INDIABN040.06Z02R020) byl pořízen za 7200,- Kč/ks.

S použitými nástroji bylo problematické dosáhnout původního záměru vytvoření půlkulových kapes na obvodu testovaného vzorku SK. V případě dalšího hledání alternativního řešení obrobení SK frézováním, je také potřeba srovnat dobu obrábění. Ta nemohla být v této práci stanovena pro neobrobení požadovaného tvaru. Výroba 36 kapes o průměru 6 mm pomocí EDM trvá 10 – 12 hodin.

Na základě výsledků experimentů lze pro obrábění doporučit nástroje z PCD před nástroji z povlakovaných slinutých karbidů. Návrh možné varianty nástroje využitelného pro další vývoj stanovení obrobitelnosti daného slinutého karbidu je popsán v následující kapitole.

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] EB-A2-H (rib processing). Iscar [online]. [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=3840&mapp=ML&app=71&GFSTYP=M#>
- [2] SUWA, Haruhiko, Soushi SAKAMOTO, Masafumi NAGATA, Kazuhiro TEZUKA a Tetsuo SAMUKAWA. Applicability of Diamond-Coated Tools for Ball End Milling of Sintered Tungsten Carbide. International Journal of Automation Technology. 2020. 14(1), 18-25. ISSN 18817629. Dostupné z: <https://doi.org/10.20965/ijat.2020.p0018>
- [3] OKADA, Masato, Akihiro YOSHIDA, Tatsuaki FURUMOTO, Hidehito WATANABE, Naoki ASAKAWA a Masaaki OTSU. Mechanisms and characteristics of direct cutting of tungsten carbide using a diamond-coated carbide end mill. International Journal of Automation Technology. 2020. 86, 5-8. ISSN 1827-1839 Dostupné z: <https://doi.10.1007/s00170-015-8324-3>
- [4] NGO, Phuc D. Energy Dispersive Spectroscopy. The Springer International Series in Engineering and Computer Science [online]. 1999 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4919-2_12
- [5] Energy Dispersive Spectroscopy. Thermo Fisher Scientific [online]. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/cz/en/home/materials-science/eds-technology.html>
- [6] ISO GRADE CLASSIFICATIONS - TUNGSTEN CARBIDE. Ultra-met carbide technologies [online]. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://carbide.ultra-met.com/viewitems/iso-grades/iso-grade-classifications-tungsten-carbide>
- [7] Základní rozdělení slinutých karbidů dle ISO. Tumlikovo - Metal Cutting Technologies [online]. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-slinutych-karbidu-dle-iso/>
- [8] DMU 40 eVo linear. DMG MORI [online]. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/dmu-evo/dmu-40-evo-linear>
- [9] Multi-lighting in digital microscope for detailed analysis. ETMM [online]. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://www.etmm-online.com/multi-lighting-in-digital-microscope-for-detailed-analysis-a-743514/>
- [10] ISCAR CZ [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/>
- [11] BUKÁČEK, Zdeněk. Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [12] HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [13] DAVIM, J. Paulo, editor. Machining of hard materials. London: Springer, 2011. ISBN 978-1-84996-449-4.
- [14] NAKAYAMA, Kazuo, Minoru ARAI a Torahiko KANDA. Machining Characteristics of Hard Materials. CIRP Annals. 1988, 37(1), 89-92. ISSN 0007-8506. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61592-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61592-3)

- [15] Hard Turning. Hwacheon Machinery Europe [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: https://www.hwacheon-europe.com/sites/default/files/styles/very_very_large_1080_/public/212/images/img_2126.jpg?itok=XnUqzGiY
- [16] Electrical Discharge Machining. Micro EDM [online]. [cit. 2021-2-26]. Dostupné z: <https://www.electricaldischargemachining.com/micro-edm/>
- [17] KALENDA, Jan. ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ PŘI VÝROBĚ TVAROVÝCH DUTIN. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [18] CHANDRA PANDA, Ramesh a Anuranjan SHARADA. A review on electrical discharge machining and its characterization. Materials Today: Proceedings. 2021. ISSN ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.546>
- [19] Elektroerozivní obrábění. Nástrojárna CB [online]. [cit. 2021-2-26]. Dostupné z: <https://www.nastrojarnacb.cz/vyroba/elektroeroze/>
- [20] Elektrojiskrové obrábění. One industry [online]. [cit. 2021-2-26]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.one/lexikon/elektrojiskrove-obrabeni/>
- [21] BHARAT, Nikhil. An overview on machinability of hard to cut materials using laser assisted machining. Materials Today: Proceedings. 2021, 43(1), 665-672. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.587>
- [22] YOU, Kaiyuan a Guangpeng YAN. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials. Journal of Manufacturing Processes. 2020, 58, 677-692. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.034>
- [23] NAGIMOVA, Aigul a Asma PERVEEN. A review on Laser Machining of hard to cut materials. Materials Today: Proceedings. 2019, 18(7), 2440-2447. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.092>
- [24] Rádusová fréza. Ceratizit group [online]. [cit. 2021-2-2]. Dostupné z: https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/products/50906_MEDIUM.html
- [25] PCD rádusová fréza. Ceratizit group [online]. [cit. 2021-2-2]. Dostupné z: <https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/products/50014.html>
- [26] HUMÁR, Anton. Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění. Brno: CCB, 1995. ISBN 80-85825-10-4.
- [27] Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-97-2299-4-6.
- [28] Nástrojové materiály. Sandvik Coromant [online]. [cit. 2021-2-4]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [29] DIVIŠ, Jakub. Obrábění titanu a těžkoobrobitelných slitin soustružením. Zlín, 2012. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně.
- [30] Cemented carbides [online]. [cit. 2021-4-4]. Dostupné z: <http://carbide.mmc.co.jp/permanent/courses/91/cemented-carbides.html>
- [31] Solid CBN inserts. ZT super hard [online]. [cit. 2021-4-4]. Dostupné z: <https://www.isoinserts.com/Product/2.html>
- [32] ČMIEL, Milan. VÝVOJ NÁSTROJŮ S PKD, CVD VRSTVOU A CVD POVLAKEM PRO DOKONČOVÁNÍ DĚR. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT v Brně.

- [33] Cemented tungsten carbide: material properties. Matmatch [online]. [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: <https://matmatch.com/suppliers/cera-ceratizit/examples/cemented-tungsten-carbide-properties>
- [34] Highly efficient machining of a solid carbide punch. YouTube [online]. [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=ifpeBPbE1Zc&ab_channel=roedersTEC
- [35] Tungsten Carbide. 6C Tools AG [online]. [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <https://6c-tools.ch/en/applications/application-tungsten-carbide/>
- [36] PCD Ball Mill [online]. [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <https://6c-tools.ch/en/produkte/kugelfraser/>
- [37] 6C Tools AG [online]. [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <https://6c-tools.ch/en/produkte/fraeser/fraeser-r0-1/>
- [38] OKADA, Masato, Reiji SUZUKI, Atsuyuki KONDO, Hidehito WATANABE, Takuya MIURA a Masaaki OTSU. Evaluation of finished surface of cemented carbide by direct cutting using diamond-coated carbide end mill. Procedia CIRP. 2018, 77, 114-117. Dostupné z : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.234>
- [39] SHIMADA, Hiroyuki, Kazuya YANO a Yasuyuki KANADA. Sumidia Binderless Ball-Nose Endmills “NPDB” for Direct Milling of Cemented Carbide. SEI TECHNICAL REVIEW. 2014, (79), 86-90
- [40] ZHAO, Wei, Asif IQBAL, Ding FANG, Ning HE a Qi YANG. Experimental study on the meso-scale milling of tungsten carbide WC-17.5Co with PCD end mills. Advances in Manufacturing. 2020, (8), 230-241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00298-y>
- [41] Preparing for hard metal milling. Canadian Metalworking [online]. 2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/cuttingtools/preparing-for-hard-metal-milling>
- [42] High-Speed Hard Milling Tips for Successful Mold Production. Cutting Edge Conversation [online]. [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <http://cuttingedgeconversation.blogspot.com/2015/12/high-speed-hard-milling-tips-for.html>
- [43] Specific cutting force. Sandvik Coromant [online]. [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/specific-cutting-force.aspx>
- [44] Mesoscale manufacturing. Wikipedia The Free Encyclopedia [online]. [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Mesoscale_manufacturing
- [45] Workpiece materials. Sandvik Coromant [online]. [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [46] Katalog Dormer Pramet 2019 [online]. 2019 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/downloads/2019%20general%20catalogue%20pramet%20set4%20cz-ru-pl-sk.pdf>
- [47] Zkouška tvrdosti dle Rockwella [online]. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdest-rockwell.htm>
- [48] Zkouška tvrdosti dle Vickerse [online]. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdest-vickers.htm>

[49] BESEDA, Vojtěch. TECHNOLOGIE BROUŠENÍ. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT v Brně.

[50] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část [online]. 2005 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Snímky obrobených kapes při první a druhé části pre-experimentu

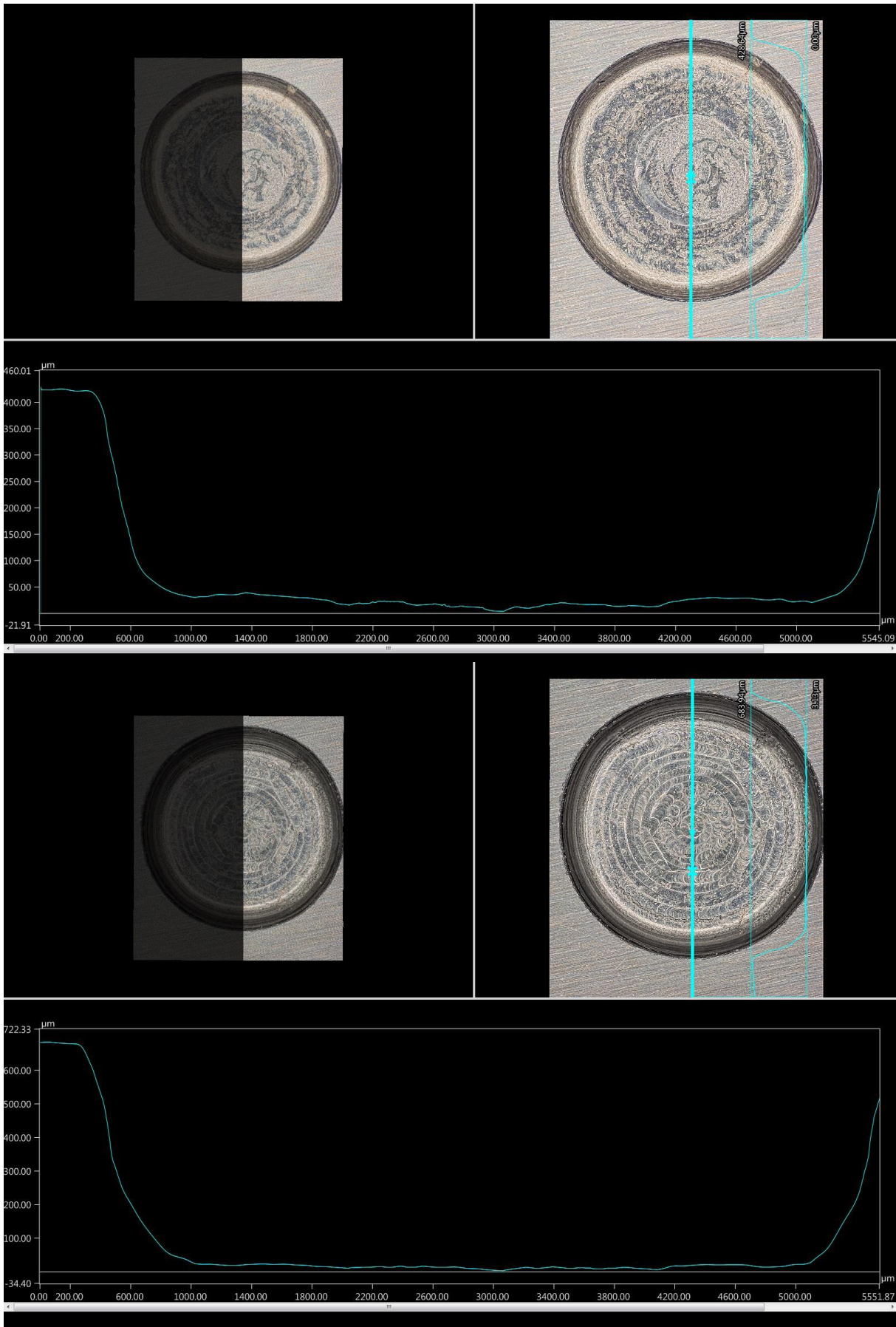
Příloha č. 2 – Snímky obrobených kapes při experimentu s povlakovaným nástrojem

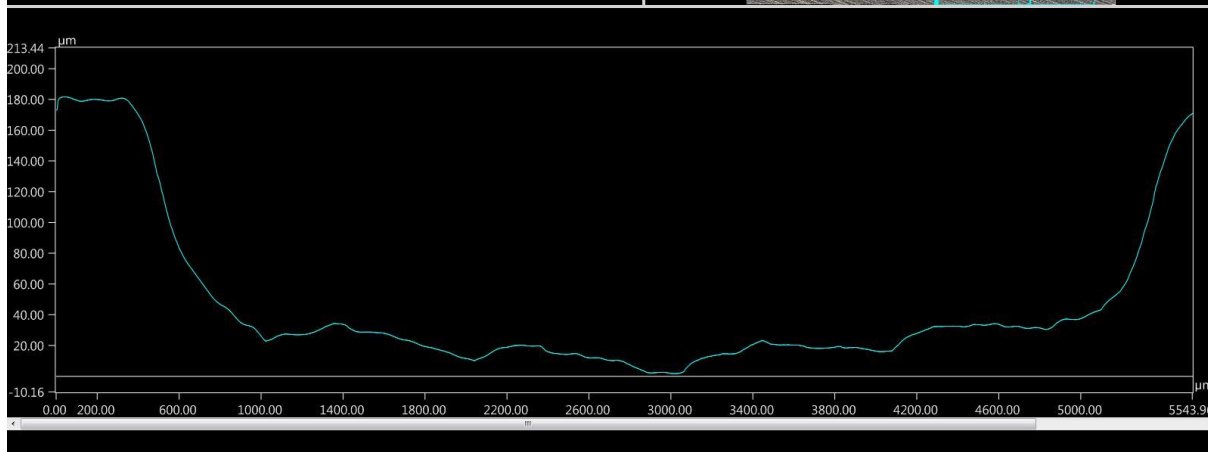
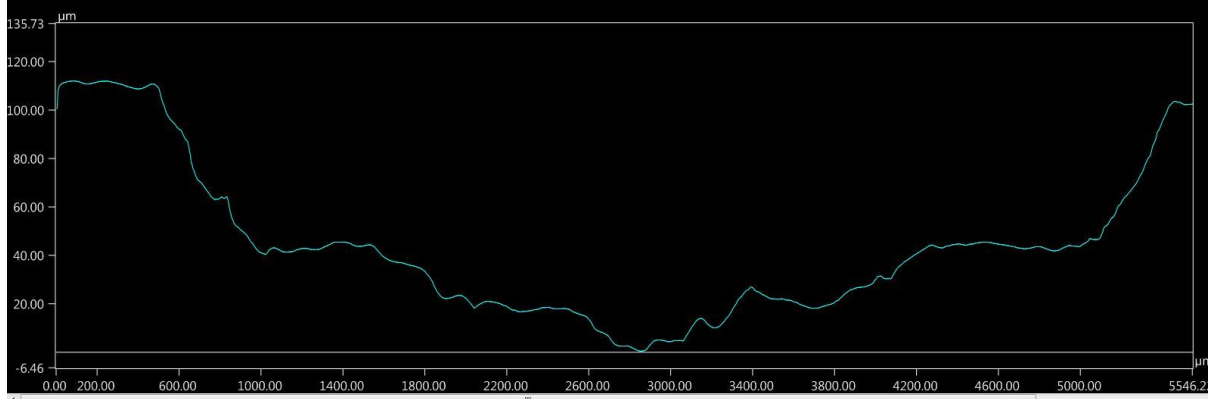
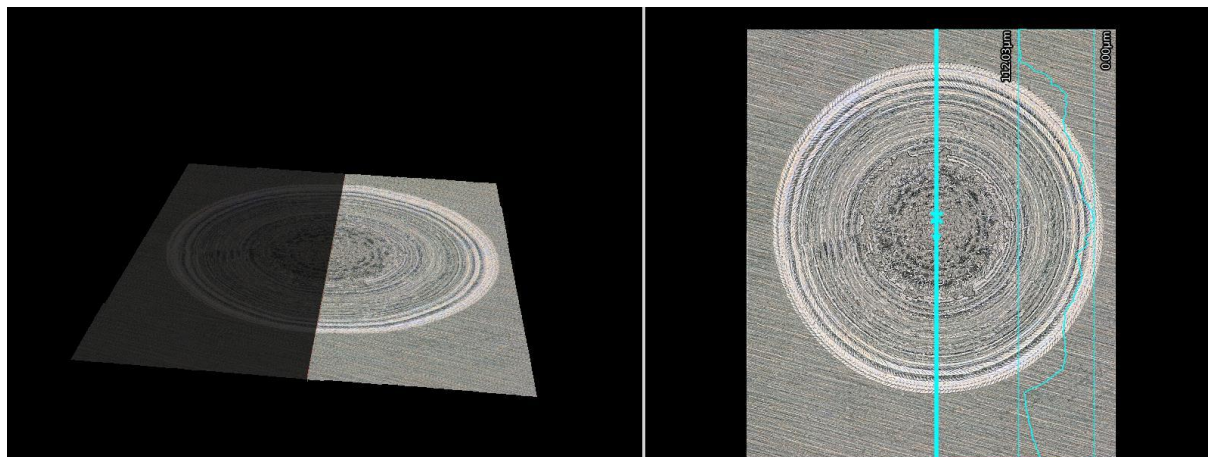
Příloha č. 3 – Vývoj opotřebení nástroje č.3 z PCD, od nového nástroje k ukončení experimentu

Příloha č. 4 – Technické specifikace stroje DMU 40 eVo (DMG MORI)

Příloha č. 1

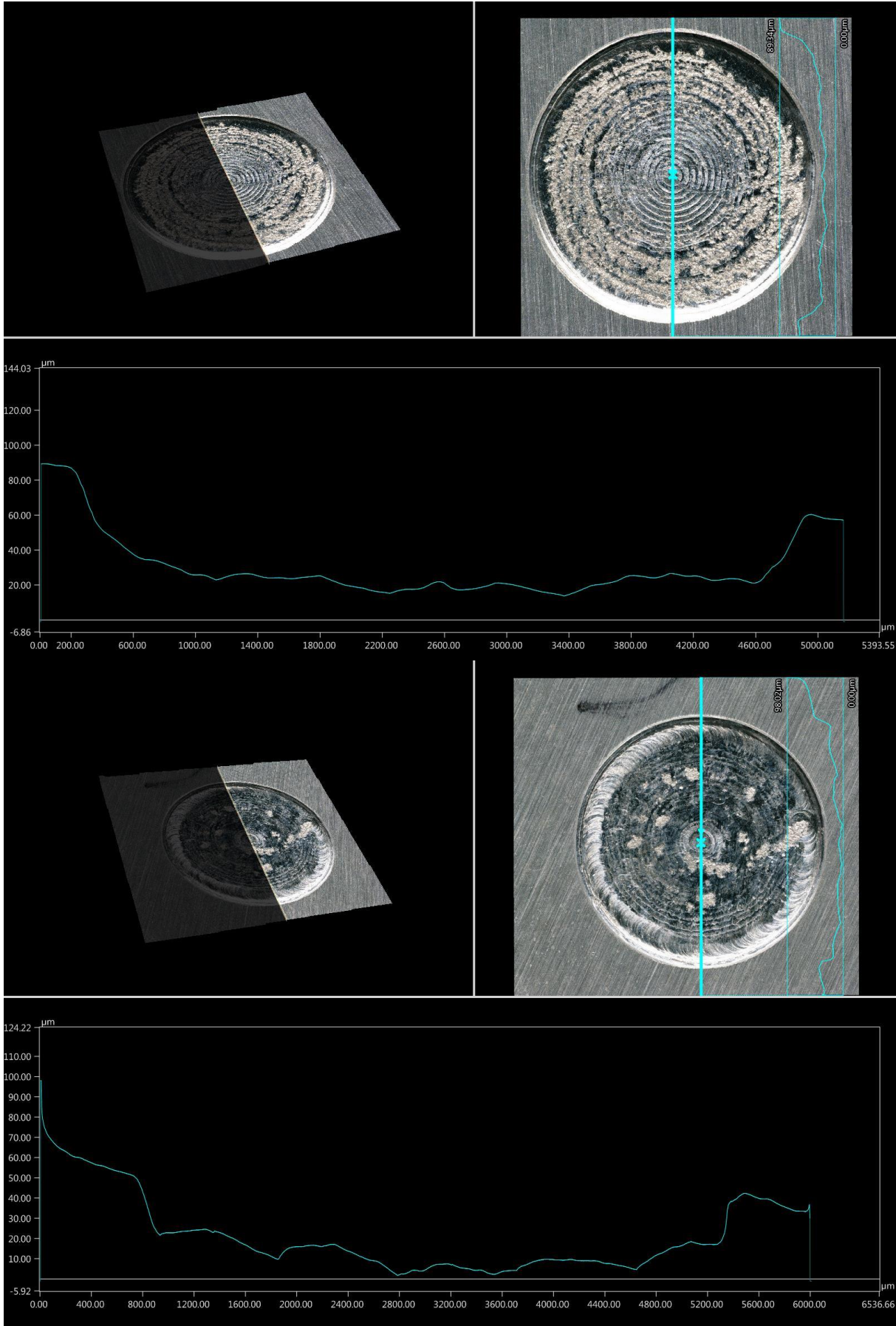
Snímky obrobených kapes při první a druhé části pre- experimentu





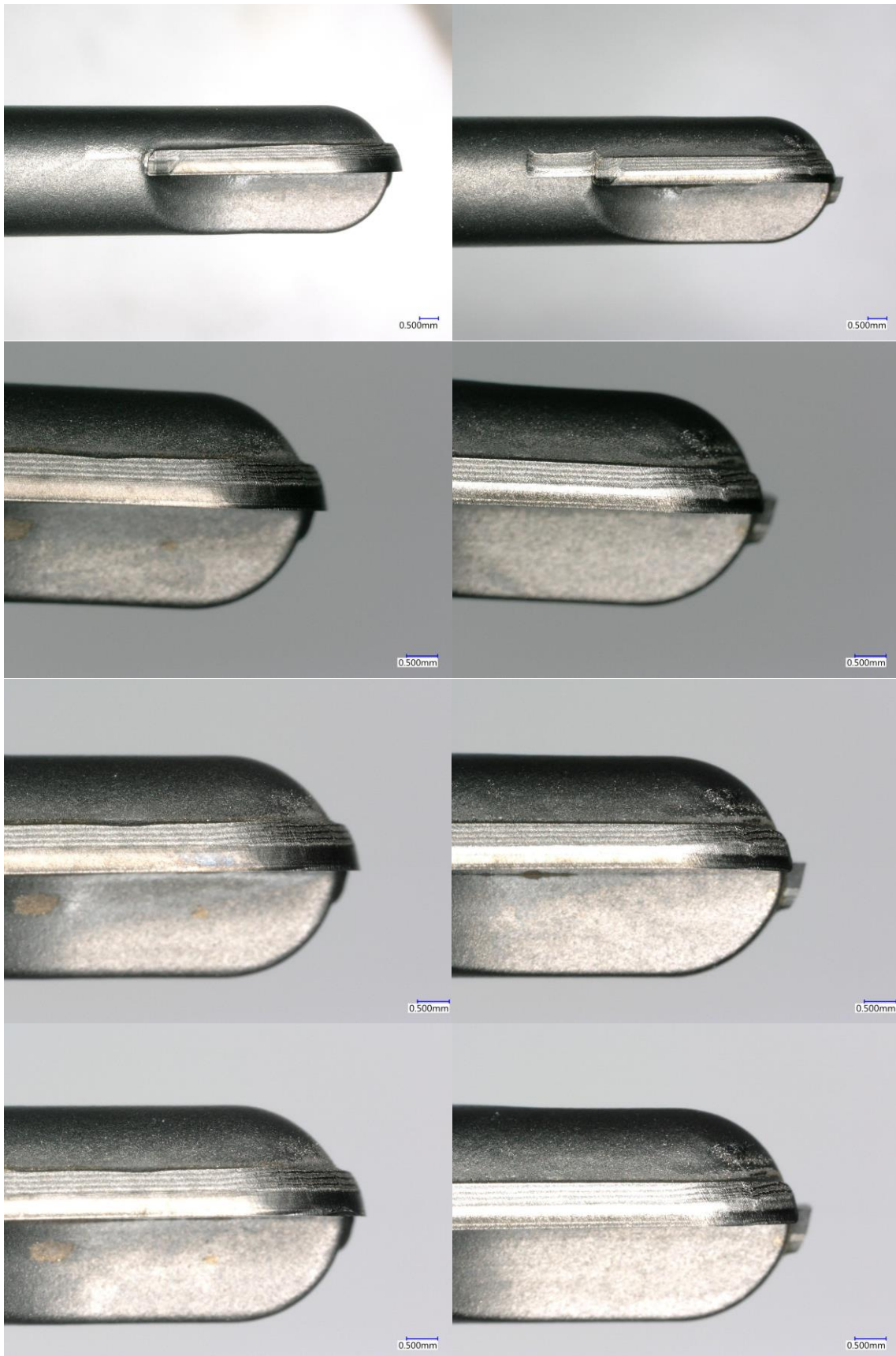
Příloha č. 2

Snímky obrobených kapes při experimentu s povlakovaným nástrojem



Příloha č. 3

Vývoj opotřebení nástroje č. 3 z PCD, od nového nástroje k ukončení experimentu



Příloha č. 4

Technické specifikace stroje DMU 40 eVo (DMG MORI)

DMU eVo series

Technical data

		DMU 40eVo	DMU 60eVo	DMU 80eVo
Working area				
Travel X/Y/Z	mm	400/400/375	600/500/500	800/650/550
Distance between spindle nose and table	mm	125 – 500	125 – 625	150 – 700
Main drive (standard)				
Speed range	rpm	20,000	20,000	20,000
Drive power (40/100% ED)	kW	35/25	35/25	35/25
Torque (40/100% ED)	Nm	130/87	130/87	130/87
Tool holder DIN 69871/DIN 69893		SK 40/HSK-A63*	SK 40/HSK-A63*	SK 40/HSK-A63*
Main drive (Option)				
Speed range	rpm	24,000	24,000	24,000
Drive power (40/100% ED)	kW	24/16	24/16	24/16
Torque (40/100% ED)	Nm	100/67	100/67	100/67
Tool holder DIN 69871/DIN 69893		HSK-A63	HSK-A63	HSK-A63
Main drive (Option)				
Speed range	rpm	15,000	15,000	15,000
Drive power (40/100% ED)	kW	46/30	46/30	46/30
Torque (40/100% ED)	Nm	200/130	200/130	200/130
Tool holder DIN 69871/DIN 69893		SK 40/HSK-A63*	SK 40/HSK-A63*	SK 40/HSK-A63*
Main drive (Option)				
Speed range	rpm	28,000	28,000	28,000
Drive power (40/100% ED)	kW	30/20	30/20	30/20
Torque (40/100% ED)	Nm	40/27	40/27	40/27
Tool holder DIN 69871/DIN 69893		HSK-A63	HSK-A63	HSK-A63
Main drive (Option)				
Speed range	rpm	40,000	40,000	40,000
Drive power (40/100% ED)	kW	19/15	19/15	19/15
Torque (40/100% ED)	Nm	16/12	16/12	16/12
Tool holder DIN 69871/DIN 69893		HSK-E50	HSK-E50	HSK-E50
Feed				
Standard design X/Y/Z	m/min	50	50	50
Dynamic version X/Y/Z	m/min	80	80	80

*Optional

		DMU 40 eVo	DMU 60 eVo	DMU 80 eVo
NC swivelling rotary table				
Clamping area	mm	450 × 400	600 × 500	800 × 700
Table load	kg	250	400	600
Swivel range B-axis	Degree	-5/+110	-5/+110	-5/+110
Rotation range C-axis	Degree	360	360	360
Speed B-/C-axis	rpm	60/60	60/60	50/50
Speed B-/C-axis torque table	rpm	80/150	80/150	80/150
Speed mill-turn table	rpm	1,200	1,200	900
Tool magazine				
Number of tools		30 (60,120,210)*	30 (60,120,210)*	30 (60,120,210)*
Dimensions				
Footprint (without chip conveyor)	mm	2,050 × 2,815	2,230 × 2,960	2,440 × 3,350
Height	mm	2,530	2,865	3,050
Controls				
ERGOline Control with 21,5" Multi-Touch screen, CELOS and SIEMENS 840D solutionline		•	•	•
ERGOline Control with 21,5" Multi-Touch screen, CELOS and HEIDENHAIN TNC 640		•	•	•
ERGOline Control with 19" Multi-Touch screen and HEIDENHAIN TNC 640		•	•	•
Options				
Internal coolant supply 40 bar		•	•	•
Internal coolant supply, can be switched between 40 bar/80 bar		•	•	•
Oil mist emulsion separator		•	•	•
Preparation for automation		•	•	•
B-/C-torque table		•	•	•
Mill-turn table (star-shaped notch and 18,000 rpm spindle)		•	•	•
Infrared reporting device		•	•	•
Laser tool measurement		•	•	•
Minimum quantity lubrication		•	•	•
Air blast through the spindle centre		•	•	•
Hydraulic workpiece clamping		•	•	•

*Optional