

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Technologie obrábění (STOB)

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Možnosti obrábění materiálů skupiny ISO O

Autor: Milan Müller
Vedoucí práce: Ing. Luboš Kroft, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Milan MÜLLER**
Osobní číslo: **S19B0402P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **Možnosti obrábění materiálů skupiny ISO 0**
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 bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské 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 bakalářské práce: **Ing. Luboš Kroft, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jindřich Sýkora**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

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

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu panu Ing. Lubošovi Kroftovi, Ph.D. za odborné a profesionální vedení. Dále pak svému konzultantovi Ing. Jindřichovi Sýkorovi za cenné a odborné rady.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Müller	Jméno Milan	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kroft, Ph.D.	Jméno Luboš	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Možnosti obrábění materiálů skupiny ISO O		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	51	TEXTOVÁ ČÁST	34	GRAFICKÁ ČÁST	17
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce se zabývá problematikou obrábění materiálů skupiny ISO O, které se za normálních podmínek neobrábějí. Cílem je testování vhodnosti aplikace nástrojů od výrobců 6C tools a UnionTool. Součástí práce je také porovnání životnosti nástrojů a kvalita povrchu po obrobení.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	obráběcí nástroj, obrábění, ISO O, slinutý karbid, vysoká tvrdost, opotřebení nástroje

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Müller		Name Milan	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering			
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 options for ISO O group materials			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	51	TEXT PART	34	GRAPHICAL PART	17
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis deals with the issue of machining materials of the ISO O group, which are not machined under normal conditions. The aim is to test the suitability of the application of tools from the manufacturers 6C tools and UnionTool. Part of the work is also a comparison of tool life and surface quality after machining.
KEY WORDS	machining tool, machining, ISO O, tungsten carbide, high hardness, tool wear

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam tabulek	12
1 Úvod.....	13
2 Rozdělení materiálů pro obrábění dle DIN ISO 513.....	14
3 Charakteristika a vlastnosti základních materiálů ISO O.....	15
3.1 Keramické materiály.....	15
3.1.1 Korundová keramika.....	15
3.1.2 Zirkonová keramika	15
3.1.3 Cermety	16
3.1.4 Karbidy.....	16
3.1.5 Nitridy	16
3.1.6 Boridy.....	17
3.2 Kompozitní materiály	17
3.2.1 Vláknové kompozity	17
3.2.2 PMC – kompozity s polymerní matricí	18
3.2.3 MMC – kompozity s kovovou matricí	18
4 Tvrdost a problematika obrábění tvrdých materiálů	19
4.1 Tvrdost a zkoušky tvrdosti	19
4.1.1 Rockwellova zkouška.....	19
4.1.2 Vickersova zkouška.....	20
4.2 Obrobitelnost tvrdých materiálů a opotřebení nástroje	20
5 Konvenční metody technologie obrábění tvrdých materiálů	22
5.1 Obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu	22
5.1.1 Frézování tvrdých materiálů.....	24
5.1.2 Soustružení tvrdých materiálů.....	24
5.1.3 Vyvtávání a vystružování tvrdých materiálů	24
5.2 Obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií.....	25
5.2.1 Broušení	25
5.2.2 Lapování.....	25
5.2.3 Honování	26
6 Nekonvenční metody obrábění tvrdých materiálů	27
6.1 Elektroerozivní obrábění (EDM).....	27
6.2 Ultrazvukové obrábění (USM)	28
6.2.1 Ultrazvukové dělení materiálu	28

6.2.2	Ultrazvukové hloubení	29
6.3	Shrnutí konvenčních a nekonvenčních metod obrábění tvrdých materiálů.....	30
7	Návrh, realizace a vyhodnocení experimentální měření	31
7.1	Nástroje.....	31
7.1.1	TM-P-1115-200-010 (6C Tools AG)	31
7.1.2	UDCLRSF2020-010040 (Union Tool)	32
7.1.3	Experimentální nástroj PM-Tech	32
7.2	Obráběný polotovar	33
7.3	Použitý obráběcí stroj	33
7.4	Strategie obrábění	34
7.5	Měření drsnosti	35
7.6	Průběh a výsledky experimentu.....	35
7.6.1	Drážka 1	35
7.6.2	Drážka 2	37
7.6.3	Drážka 3	38
7.6.4	Drážka 4	39
7.6.5	Drážka 5	41
7.6.6	Opotřebení nástrojů	42
7.7	Technické hodnocení navržených variant	43
8	Závěr.....	44
	Seznam použitých zdrojů	45
	Seznam příloh.....	47

Přehled použitých zkratk a symbolů

DIN	Deutsches Institut für Normung
ISO	International Organization for Standardization
HRC	Hardness Rockwell C
SK	Slinutý karbid
KBN	Kubický nitrid boru
CVD	Chemical Vapor Deposition (Chemická depozice z plynné fáze)
GFRP	Glass fiber reinforced polymer
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer
PMC	Polymer matrix composites
S-N-O	Stroj – nástroj – obrobek
VBD	Vyměnitelná břitová destička
EDM	Electro Discharge Machining
PBM	Plasma Beam Machining
LMB	Laser Beam Machining
ECM	Electro Chemical Machining
CM	Chemical Machining
USM	Ultrasonic Machining
WJM	Water Jet Machining
AWJM	Abrasive Water Jet Machining
SPS	Slinování jiskrovým plazmatem
HIP	Izostatické lisování za tepla
HFIHS	Vysokofrekvenční indukční slinování
UPRC	Pulsní plazmové slinování
S-N-O	Stroj-Nástroj-Obrobek
PCD	Polykrystalický diamant

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Rozdělení materiálů DIN ISO 513 [4]	14
Obrázek 2 - Ložiskové válečky CeramTec vyrobené z nitridu křemíku.....	15
Obrázek 3 - Trubky, kroužky, trysky vyrobené z karbidu křemíku ROCAR® [6]	16
Obrázek 4 - Princip měření HRC tvrdosti [9]	19
Obrázek 5 - Princip měření HV tvrdosti [9].....	20
Obrázek 6 - Druhy opotřebení břitu nástroje [10].....	20
Obrázek 7 - Tvorba pilovité třísky [11]	22
Obrázek 8 - Kvalita povrchu v závislosti na opotřebení nástroje [12].....	23
Obrázek 9 - Nástroje řady CoroBore 825 pro jemné vyvrtávání tvrdokovů [14]	24
Obrázek 10 - Princip lapování [15]	25
Obrázek 11 - Schéma EDM [22].....	28
Obrázek 12 - Princip ultrazvukového obrábění [17].....	29
Obrázek 13 - Porovnání nákladů na frézování a EDM [26].....	30
Obrázek 14 – Soupis nákladů na konvenční obrábění [26].....	30
Obrázek 15 - Soupis nákladů na EDM obrábění [26]	30
Obrázek 16 - Ilustrační obrázek nástroje TM-P-1115-200-010 6C Tools AG	31
Obrázek 17 - Skica nástroje UDCLRSF2020-010040 [26]	32
Obrázek 18 - Snímek frézy PM-Tech pod mikroskopem	33
Obrázek 19 - Obrobek upnutý ve stroji.....	33
Obrázek 20 - Univerzální obráběcí centrum DMG MORI DMU 40 eVo linear [27].....	34
Obrázek 21 - Schéma trochoidního frézování [29]	34
Obrázek 22 – Schéma hladinového frézování [30]	34
Obrázek 23 - Číselné rozřazení drážek	35
Obrázek 24 - Sken povrchu dna drážky 1	36
Obrázek 25 - Schéma směrů měření drsnosti drážky 1	36
Obrázek 26 - Sken povrchu dna drážky 2	37
Obrázek 27 - Schéma směrů měření drsnosti drážky 2	38
Obrázek 28 - Sken povrchu dna drážky 3	39
Obrázek 29 – Schéma směrů měření drsnosti drážky 3	39
Obrázek 30 - Sken povrchu dna drážky 4	40
Obrázek 31 - Schéma směrů měření drsnosti drážky 4.....	41
Obrázek 32 - Sken povrchu dna drážky 5	42
Obrázek 33 - Schéma směrů měření drsnosti drážky 5.....	42
Obrázek 34 – Úhel stoupnání šroubovice 6C Tools.....	43

Obrázek 35 – Úhel stoupání šroubovice PM-Tech	43
Obrázek 36 - Nástroj 6C Tools před obráběním	ii
Obrázek 37 - Nástroj PM-Tech po obrábění	ii
Obrázek 38 – Nástroj PM-Tech před obráběním	ii
Obrázek 39 – Zub nástroje Union Tool po obrábění.....	ii
Obrázek 40 – Nástroj 6C Tools po obrábění.....	ii
Obrázek 41 – Zub nástroje Union Tool před obráběním	ii
Obrázek 42 - Technické specifikace DMG MORI DMU 40 eVo linear	iv

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Tvrdost slinutého WC-Co [31].....	19
Tabulka 2 - Základní rozměry nástroje TM-P-1115-200-010 [25]	31
Tabulka 3 - Základní rozměry nástroje UDCLRSF2020-010040 [26]	32
Tabulka 4 - Výsledky měření drsnosti drážky 1	36
Tabulka 5 - Výsledky měření drsnosti drážky 2	38
Tabulka 6 - Výsledky měření drsnosti drážky 3	39
Tabulka 7 - Výsledky měření drsnosti drážky 4	41
Tabulka 8 - Výsledky měření drsnosti drážky 5	42

1 Úvod

Kovoobráběcí průmysl vyrábí širokou škálu součástí, které jsou obráběny z různých druhů materiálů. Každý druh materiálu má své charakteristické vlastnosti, které jsou ovšem ovlivněny druhem tepelného zpracování, legujícími prvky, tvrdostí atd. Na základě těchto podnětů má každý nástroj jinou geometrii a řezné parametry. Pro větší přehlednost jsou materiály obrobků rozděleny do skupin dle normy ISO. Speciálním případem ISO normy jsou materiály označené jako O (Other), což znamená ostatní.

Materiály v této skupině jsou hojně využívány ve strojírenství, ale nejsou primárně určeny k obrábění. Jedná se například o termoplasty, kompozitní materiály (GFRP, CFRP), slinutý karbid, plasty vyztužené aramidovými vlákny atd. V současné době se tyto materiály čím dál tím častěji objevují v různých průmyslových odvětvích, ovšem stále je jejich použití omezeno jejich zpracováním.

V současné době se na trhu objevili výrobci, kteří slibují efektivní frézování slinutého karbidu s překvapivě kvalitní jakostí obráběného povrchu. Prvním z nich je 6C tools AG, jenž sídlí ve Švýcarském Curychu. Výrobce se přímo specializuje na výrobu nástrojů pro obrábění velmi tvrdých materiálů jako například sklo, safír, keramika nebo slinutý karbid. Druhým výrobcem je Union Tool se sídlem v japonském Tokiu. Společnost Union Tool se zabývá nejen výrobou obráběcích nástrojů, ale také metrologickým příslušenstvím nebo technologiemi v odvětví lineárních posuvů. Pro účel této práce nabízí frézy ze série UNIMAX, které jsou určeny pro obrábění skla, slinutého karbidu a tvrdých a křehkých nekovových materiálů.

Cílem této práce je porovnání nástrojů 6C Tools a Union Tool v aplikaci frézování slinutého karbidu jak z hlediska životnosti, tak z hlediska jakosti obráběného povrchu. Zároveň je nyní vyvíjen nový nástroj na RTI ve spolupráci se společností PM-Tech, který je právě určen pro frézování slinutého karbidu. Vznikly první prototypy určené k testování. Výsledky vhodnosti volené konstrukce, volby materiálu a geometrie těchto prototypových nástrojů jsou součástí praktické části.

2 Rozdělení materiálů pro obrábění dle DIN ISO 513

Tato mezinárodní norma specifikuje použití tvrdých řezných materiálů včetně tvrdokovů, keramiky, diamantu a nitridu boru pro třískové obrábění a stanovuje jejich použití. Je důležité zmínit, že neplatí pro jiná použití jako např. nástroje na tváření kovů, doteky měřidel, průvlaky na tažení drátu atp. [5]

Obráběné materiály obsažené v této normě jsou rozděleny do šesti skupin. Každá skupina je identifikována velkým písmenem a identifikační barvou. [5]



Obrázek 1 - Rozdělení materiálů DIN ISO 513 [4]

ISO P – Ocel: Do této skupiny patří všechny druhy oceli a lité oceli, kromě korozivzdorné oceli s austenitickou strukturou. Jejich obrobitelnost bývá zpravidla dobrá, ale značně se liší v závislosti na tvrdosti materiálu a obsahu uhlíku. [4] [5]

ISO M – Korozivzdorná ocel: Zde řadíme korozivzdornou austeniticko/feritickou ocel a litou ocel. Hlavním legujícím prvkem je chrom (min. 12 %). Mezi další přísadové prvky patří nikl a molybden. [4] [5]

ISO K – Litina: Litinou konkrétně rozumíme šedou litinu, tvárnou litinu a temperovanou litinu. Litiny se vyznačují tím, že na rozdíl od ocelí vytváří krátké třísky. Obrábění šedé a temperované litiny je poměrně jednoduché na rozdíl od vermikulární a izotermicky kalené litiny. Všechny litiny obsahují karbid křemíku (SiC), který působí na břit velice abrazivně. [4] [5]

ISO N – Neželezné kovy: Jedná se o slitiny hliníku a slitiny mědi. Neželezné kovy se liší od běžných kovů tím, že jsou výrazně měkčí a v případě slitin mědi mají i dobré kluzné vlastnosti. Z hlediska obrábění obecně platí, že při použití břitových destiček s ostrými břity lze očekávat vysoké řezné rychlosti a dlouhou životnost nástroje. [4] [5]

ISO S – Superslitiny a titan: Sem spadají žáruvzdorné speciální slitiny na základě železa, niklu a kobaltu, titanu a titanových slitin. Pro tyto materiály je charakteristické snadné ulpívání na břitu a následné vytvoření nárůstku. Vlastnosti jsou podobné materiálům ISO M, ale jejich obrábění je mnohem obtížnější. [4] [5]

ISO H – Tvrdé materiály: Do této skupiny patří kalená ocel, kalené litinové materiály a tvrzená litina. Tyto oceli jsou většinou tepelně zpracované a dosahují tvrdosti 45-65 HRC. Kvůli své tvrdosti jsou všechny takové materiály těžkoobrobitelné. Při obrábění vzniká velké množství tepla a na břit působí tyto materiály velice abrazivně. [4] [5]

O – Neobsažené v ISO: Jedná se o ostatní materiály, které nejsou obsaženy v těchto šesti skupinách. Jedná se například o kompozitní materiály, termoplasty, termosety nebo materiály,

z kterých se práškovou metalurgií vytváří břitové destičky (SK, KBN, řezná keramika). Těmito materiály se tato práce zabývá. [4]

3 Charakteristika a vlastnosti základních materiálů ISO O

3.1 Keramické materiály

Keramika má charakteristické vlastnosti, jeví se převážně jako krystalický materiál se zrny malých rozměrů (často pod $1\mu\text{m}$), přičemž jeho hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Těmito materiály jsou např. ferity, ferroelektrika, nitridy (Si, B, Al), karbid křemíku, karbid boru, boridy na bázi titanu, oxidová keramika (Al_2O_3 , ZrO_2 , BeO).

Keramické materiály vynikají vysokou odolností vůči teplotě, mezi jejich další charakteristické vlastnosti patří vysoká tvrdost, tuhost, odolnost vůči opotřebení, avšak mezi negativní vlastnosti patří křehkost a malá pevnost v ohybu. Navzdory těmto negativům jsou především speciální keramické materiály (oxidy, nitridy, boridy, karbidy) stále vyhledávaným konstrukčním materiálem. [1] [2]



Obrázek 2 - Ložiskové válečky CeramTec vyrobené z nitridu křemíku

3.1.1 Korundová keramika

Al_2O_3 se v přírodě vyskytuje jako tvrdý nerost, korund. Podle způsobu zpracování a vypalovací teploty se vyskytuje ve čtyřech modifikacích (hydrargillit, bayerit, boehmit a diaspor). Slinutý korund je nejrozšířenějším zástupcem oxidové keramiky. Má zejména vynikající mechanické vlastnosti a lze z něj vyrábět i složité tvary. Má vysokou pevnost a tvrdost, žáruvzdornost, velkou tepelnou vodivost, vysokou odolnost vůči většině kyselinám a plynům. Jde o vynikající konstrukční materiál pro techniku vystavenou vysokým teplotám. Aplikuje se například na břitové destičky, dýzy, tavící kelímky nebo jako izolátor zapalovacích svíček. [2]

3.1.2 Zirkonová keramika

Zirkonová keramika patří mezi základní žáruvzdorné materiály. Výrobky z tohoto materiálu lze použít do teplot až $2400\text{ }^\circ\text{C}$ v oxidační nebo slabě redukční atmosféře. Hlavní negativní vlastnost zirkoničité keramiky je špatná odolnost vůči teplotním rázům způsobená

nízkou teplotní vodivostí. Prakticky lze jeho vlastností využít především jako pevný elektrolyt pro palivové články nebo k odčerpání kyslíku ze směsí plynů. Elektrické odporové články, které se používají do teplot od 1000 °C do 2000 °C, se zhotovují ze stabilizovaného ZrO_2 a Y_2O_3 . [2]

3.1.3 Cermety

Cermety vznikají složením prášků kovů a keramiky. Dělí se na cermety s kovovým a nekovovým jádrem. Nekovy u cermetů s kovovým základem jsou buď oxidy (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) nebo karbidy (W, Ti, Ta, Cr, Nb) pouze zpevňují kovovou hmotu a mají za funkci jí dodat speciální vlastnosti. Například grafit dodá dobré kluzné vlastnosti, Fe_2O_3 dodá dobré magnetické vlastnosti, aj. U cermetů s nekovovým jádrem je kovová složka pojivem keramické složky. Například kobalt v tvrdých nástrojových materiálech spojuje karbid wolframu. [2]

3.1.4 Karbidy

Monokarbidy (TiC, ZrC, WC, TaC) jsou karbidy, které tají při velmi vysokých teplotách a jsou extrémně tvrdé. Vytváří dále sloučeniny typu V_2C , Ta_2C a W_2C , které jsou také tvrdé. Prvky Cr, Mn, Fe, Co a Ni tvoří velmi mnoho karbidů s komplikovanou strukturou. Důležitý je zejména cementit Fe_3C , který je významnou složkou oceli. Výroba karbidů je drahá kvůli její vysoké energetické náročnosti. SiC vzniká karbotermickou redukcí velmi čistého a vysoce disperzního SiO_2 v rotační peci, která je vyložená grafitem, při teplotě 1700–1800 °C. Další možnost výroby, je přímou syntézou křemíku a uhlíku při teplotě 1800 °C z plynných složek metodou CVD. Výrobky ze SiC jsou odolné vůči oxidaci, jelikož povlaky nepropouští plyny. [2]



Obrázek 3 - Trubky, kroužky, trysky vyrobené z karbidu křemíku ROCAR® [6]

Součástí dalších technicky významných karbidů je karbid boru B_4C . Má podobné vlastnosti jako SiC, ale vyniká především díky své tvrdosti. Z tohoto důvodu se používá pro výrobu prvků odolných vůči abrazi. Spolu s uhlíkem má své využití v jaderném průmyslu, kde se používá pro kontrolní tyče a štíty v jaderných reaktorech. Karbid titanu (TiC) je významný především pro výrobu cermetů. Karbid wolframu je nedílnou součástí směsí pro řezné destičky. [2] [1]

3.1.5 Nitridy

Nitridy jsou tvořeny čtyřmi skupinami: kovalentní, iontové, diamantového typu a kovové. Nitridy vznikají buď přímou reakcí kovu s N_2 (popřípadě NH_3), nebo termickým rozkladem kovových amidů. Jejich fyzikální vlastnosti se úměrně zlepšují s rostoucím atomovým číslem prvků a postupnému přechodu vazby kovalentní, přes částečně iontovou až čistě kovové. Značný význam má Si_3N_4 jakožto keramický materiál s žádanými vlastnostmi. Vyznačuje se vysokou pevností a odolností vůči otěru, vysokou teplotou rozkladu a odolností vůči oxidaci, vynikající odolností vůči teplotním rázům a odolností proti koroznímu prostředí, nízkým součinitelem tření apod. Výroba vhodných tvarovaných součástí je však mimořádně náročná. Pro strojírenství je obzvláště významný nitrid boru (BN), který se vyskytuje ve třech modifikacích. Hexagonální podoba grafitu (bílý grafit) je velmi dobrý izolant. Druhá forma je

tzv. borezon s kubickou strukturou, velmi podobnou diamantu (má větší tvrdost než diamant). Poslední forma má romboedrickou krystalovou mřížku. [2]

3.1.6 Boridy

Boridy jsou skupinou čítající více než 200 podvojných sloučenin, které se vyznačují pozoruhodnou rozmanitostí stechiometrie a strukturních typů. [2]

Vlastnosti boridů bohatých na kov jsou tvrdost, chemická netečnost, netěkavost a žáruvzdornost. Jejich příprava spočívá v práškové formě a dále se zpracovávají práškovou metalurgií. Použití těchto materiálů lze uplatnit v energetickém průmyslu, pro výrobu lopatek turbín. Dále se hojně využívají k výrobě raketových trysek, rotorů čerpadel, vnitřních povrchů spalovacích komor. V jaderném průmyslu dále slouží pro výrobu kontrolních tyčí nebo reaktorových štítů. [2]

3.2 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály, jsou takové materiály, které se skládají ze dvou nebo více konstituentů z nichž alespoň jeden je tuhý. Složením dvou nebo více odlišných materiálových složek (fází) vzniká kompozitní materiál. Avšak pouze v případě, pokud mají tyto složky rozdílné fyzikální vlastnosti, tudíž i složený materiál musí mít zřetelně jiné vlastnosti, než jsou vlastnosti jeho složek. Takový materiál je označován jako kompozit. [1]

Konstituenty kompozitních materiálů rozdělujeme do dvou tříd, a to na dispergované konstituenty (nespojité konstituenty) a na matrice (spojité konstituenty). Diskontinuitní fáze bývá tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se vyztužení, zatímco spojitá fáze se nazývá matrice [1] [2]

3.2.1 Vláknové kompozity

Tento systém využívá spojení pevnosti vláken a tvrdosti pryskyřice. Vláknové kompozity se rozdělují podle délky vláken na materiály vyztužené krátkými vlákny a na materiály vyztužené dlouhými vlákny. Pro krátkovláknové materiály platí $\frac{\text{Délka vlákna}}{\text{Průměr vlákna}} < 100$ a pro dlouhovláknové platí $\frac{\text{Délka vlákna}}{\text{Průměr vlákna}} > 100$. Princip vlastního vláknového vyztužení je založen na skutečnosti, že vyztužující vlákna, které mají o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem se při vnějším namáhání deformují méně než polymer. Tím dochází ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/polymer. [3] [2]

3.2.1.1 Vlákná použitá ve vláknových kompozitech

- Skelná vlákna
- Uhlíková vlákna
- Aramidová vlákna

3.2.1.2 Matrice vláknových kompozitů (termoplasty/termosety)

Epoxidové pryskyřice

Methyl-methakryláty – Zástupci jsou PEEK (polyetherketon), PPS (polyfenylen sulfid) a PEI (polyetherimid). [3] [2]

3.2.2 PMC – kompozity s polymerní maticí

Jak už název napovídá, matrice je polymer. Ze tří čtvrtin jsou tvořeny termosety, dále mohou maticí tvořit termoplasty nebo pryž. Hlavní nevýhodou těchto kompozitů je nízká maximální pracovní teplota. Vysoké hodnoty tepelné roztažnosti vedou k rozměrové nestabilitě. Další negativní vliv na mechanické vlastnosti má absorpce vody z prostředí. Zástupci PMC kompozitů jsou GFRP (polymerní kompozity vyztužené sklenými vlákny), CFRP (polymerní kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny) a polymerní kompozity vyztužené aramidovými vlákny. [7] [2]

3.2.3 MMC – kompozity s kovovou maticí

Na rozdíl od PMC nejsou v současnosti tolik využívány. Je to dáno tím, že jsou stále ve vývoji. Nicméně již od 60. let 20. století se používají křemičitá vlákna ke zpevňování hliníkových slitin. Jejich přednosti jsou zejména vysoká elektrická a tepelná vodivost, vysoký koeficient tepelné roztažnosti. Za pokojové teploty stoupá pevnost úměrně s objemem zpevňovadel, naproti tomu tažnost a houževnatost klesají se stoupajícím podílem zpevňovadel. [2]

4 Tvrdost a problematika obrábění tvrdých materiálů

Metoda spékání	Velikost spékaného zrna [nm]	Tvrdost [HV]
Lisování za tepla	169	2084
SPS	780	1725
HIP	~400	1740
HFIHS	323	1886
UPRC	~97	1845

Tabulka 1 – Tvrdost slinutého WC-Co [31]

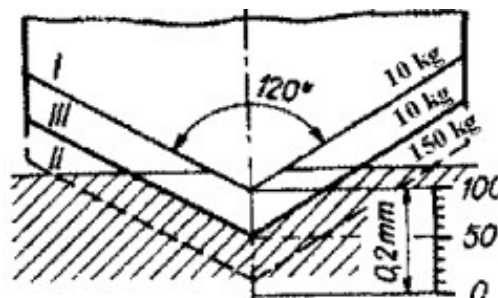
Za tvrdé materiály jsou již označovány kalené oceli s tvrdostí 45–65 HRC. V normě DIN ISO 513 jsou značeny písmenem H v šedém podbarvení. Karbid wolframu s kovovým Cobaltem (WC-Co) dosahuje ještě vyšší tvrdosti. Škála tvrdosti pro WC-Co je měřena v HV (Zkouška podle Vickerse), kde dosahuje hodnot 1845-2084 HV. Hodnoty tvrdosti se mění v závislosti na velikosti spékaných zrn a metody spékání a dalších parametrech (tabulka 1). [31]

4.1 Tvrdost a zkoušky tvrdosti

Tvrdost je mechanická vlastnost materiálu. Je definována jako odpor materiálu proti vniknutí cizího tělesa. Tvrdost materiálu je určena tzn. zkouškami tvrdosti. Postup provádění těchto zkoušek je normalizovaný. Podle způsobu porušení povrchu se zkoušky tvrdosti dělí na statické, dynamické (rázové) a vrypové.

4.1.1 Rockwellova zkouška

V technické praxi má velký význam pro tvrdé materiály Rockwellova zkouška tvrdosti. Zkouška se značí HRx (poslední písmeno se liší dle velikosti hlavní zatěžující síly). Princip této zkoušky spočívá ve vniknutí diamantového kužele s vrcholovým úhlem 120° a s poloměrem zaoblení 0,2 mm. Nejdříve se zkoušený materiál zatíží předběžnou silou o velikosti 98 N. Toto předzatížení má funkci vyrovnání povrchu, jelikož se tato zkouška používá pro kalené materiály a případné nerovnosti zakaleného povrchu by zkreslovali výsledek zkoušky. Následně je vzorek zatížen hlavní silou, která je pro nejtvrdší materiály 588 N (HRA) a pro měkčí materiály 1471 N (HRC). Nakonec se zatížení odlehčí zpět na 98 N. Výsledek zkoušky je rozdíl hloubky vtisku mezi předzatížením a hlavním zatížením. [9]



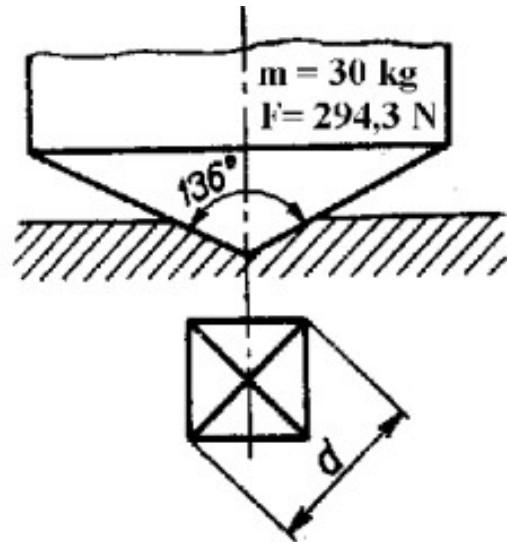
Obrázek 4 - Princip měření HRC tvrdosti [9]

4.1.2 Vickersova zkouška

Ve stejném časovém období, kdy vznikla Rockwellova zkouška, vznikla i Vickersova zkouška. Tvrdost se značí HV. Intendorem je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Výsledkem zkoušky je pak čtyřhranný vtisk. Délka úhlopříčky čtyřhranu je dále dosazena do vztahu:

$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

Kde „F“ je zatěžující síla [N] a „d“ je průměrná hodnota délky úhlopříčky [mm]. Velikost zatěžující síly je dána normou ČSN 42 0374. Hlavní výhodou použití této metody velmi přesné naměřené hodnoty tvrdosti. Ovšem nevýhodou je malá velikost vtisku, tudíž u hrubozrnných nebo nehomogenních kovů jako je například šedá litina, nelze obdržet jednoznačné výsledky.



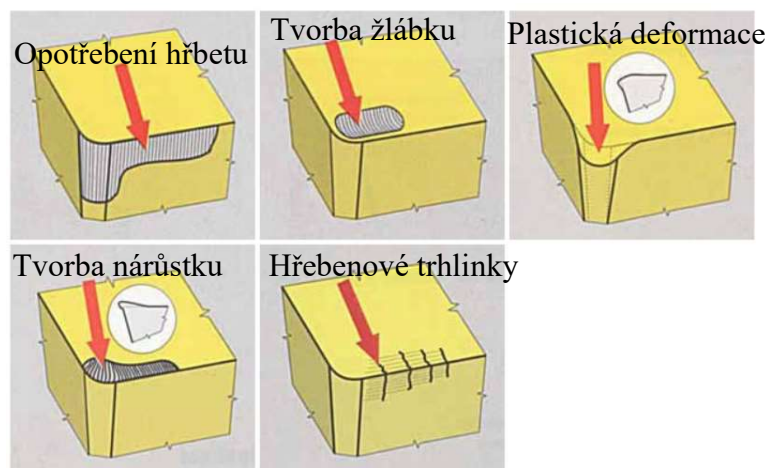
Obrázek 5 - Princip měření HV tvrdosti [9]

4.2 Obrobitelnost tvrdých materiálů a opotřebení nástroje

Každý materiál se při obrábění chová jinak. Proto byl zaveden obecný pojem obrobitelnost. Tento pojem není jasně definován žádným koeficientem nebo veličinou, jelikož do obrábění samotného vstupuje mnoho faktorů jako například rezné podmínky, upnutí obrobku, chlazení při obrábění, mechanické vlastnosti obrobku (tvrdost, pevnost, houževnatost), legující prvky obrobku, materiál rezného nástroje atd.

Obrobitelnost tvrdých materiálů bývá zpravidla špatná, kvůli vysoké rázové houževnatosti, vysoké odolnosti proti opotřebení a absenci zpevnění materiálu po řezu. Vysoká rázová houževnatost je důsledek vysoké čistoty materiálu a má za následek ovlivňování tvorby třísky. Vysoká odolnost proti opotřebení je zase důsledkem výskytu tvrdých vměstků. Tyto vlastnosti se projevují negativně na životnost obráběcího nástroje. [8]

Během obrábění vzniká velké množství tepla, které značně zatěžuje materiál bříty. Zároveň tyto vysoké teploty za přítomnosti vzduchu vytvářejí oxidační opotřebení. Dalšími mechanismy opotřebení nástroje jsou abraze, adheze, difuze, plastická deformace a křehký lom. Abraze je zapříčiněna uvolňujícími se částicemi materiálu jak obrobku, tak nástroje, tyto částice mají následně brusný účinek. Adheze vzniká kvůli tření nerovností na nástroji a obrobku, to má za následek mikrosvary, které vytrhávají větší části materiálu.



Obrázek 6 - Druhy opotřebení bříty nástroje [10]

Tím dochází k tvorbě nárůstku a změně geometrie břitu. Difuze je mechanismus, při kterém dochází k výměně atomů se vzájemnou afinitou a tím dochází k narušení a degradaci povrchové vrstvy nástroje. Plastická deformace je důsledkem působení dlouhodobých vysokých teplot a tlaků. Toto riziko, lze neutralizovat dodržením doporučených řezných podmínek či volbou vhodného chladiva. Ke křehkému lomu dochází nejčastěji při přerušovaném řezu nebo v případě, že obrobek je příliš tvrdý a nástroj příliš křehký. Křehkému lomu se lze vyhnout vysokému mechanickému zatížení a krátkodobému přetížení břitu. [8]

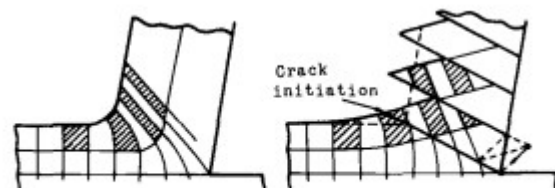
5 Konvenční metody technologie obrábění tvrdých materiálů

Jedná se o nejrozšířenější metody jako například frézování, soustružení nebo broušení. Při obrábění tvrdých materiálů těmito metodami je nutno brát v potaz následující aspekty:

- Nástroj pro obrábění musí mít o výrazně větší tvrdost než obráběný materiál (zhruba třikrát tvrdší). To má negativní dopad na malou oblast v místě kontaktu nástroje s obrobkem, kde vzniká vysoké napětí. [11]
- Vysoká abrazivita vyžaduje nástroj, který má vysokou odolnost vůči abrazivním částicím, které mohou poškodit hřbet nástroje. [11]
- Tvorba pilovitých ozubených třísek (obr. 6) z důvodu nízké tažnosti materiálu. V oblasti primární deformace dochází k prasklinám, které vytváří pilovité zuby. Tento specifický druh třísky je plynulá tříška s vruby, které připomínají zuby pilového nástroje. [11]
- Vysoká hodnota poměru tvrdosti vůči modulu pružnosti v tahu, tento poměr se projevuje velkým množstvím elastické regenerace po průchodu řezného nástroje. Tomuto jevu je potřeba věnovat pozornost při následné dokončovací metodě tvrdých materiálů. [11]

Konvenční metody obrábění tvrdých materiálů se dále rozdělují podle geometrie nástroje na:

1. Obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu
2. Obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií břitu



Tvorba plynulé třísky Tvorba pilové třísky

Obrázek 7 - Tvorba pilovité třísky [11]

5.1 Obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu

Obrábění tvrdého materiálu s definovanou geometrií břitu je označováno jako tvrdé obrábění (hard machining). V minulosti bylo jedinou možností tvrdého obrábění jen broušení nebo obrábění s extrémně nízkými řeznými rychlostmi.

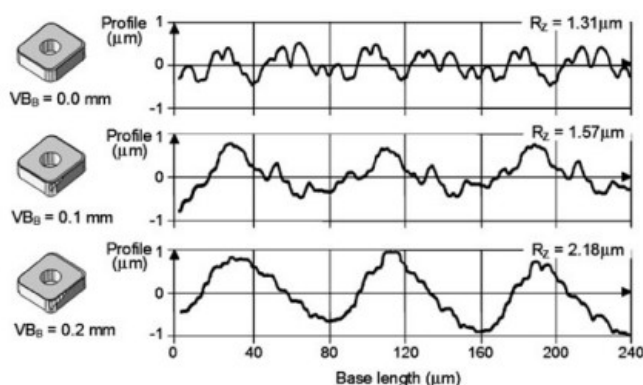
Jako první metoda tvrdého obrábění bylo vyvinuto soustružení. Dále se od jeho širšího zavedení zhruba v polovině roku 1980 začali vyvíjet i další metody jako je frézování, vrtání nebo protahování. Brzy se začali projevovat značné výhody oproti broušení, které bylo do té doby jedinou možností. Tímto vznikla pro broušení samostatná kategorie obrábění, a to v souvislosti s dokončovací metodou. Samozřejmě existují výhody i jisté limity tohoto obrábění. [12]

Následující výhody tvrdého obrábění vycházejí ze zkušeností popsaných v příslušných literaturách:

- Snadné přizpůsobení součástí se složitou konturou [12]
- Rychlá přestavba stroje při změně obráběného produktu [12]
- Provádění více operací na jedno upnutí [12]
- Větší množství odebíraného materiálu [12]
- Použití stejných CNC stojů, které se používají pro běžné obrábění měkkých a houževnatějších materiálů [12]
- Menší množství nástrojového portfolia [12]
- Vyšší ekologičnost díky chlazení vzduchem a eliminaci potřeby používání chladicí kapaliny a s tím související nižší náklady na oddělení třísek od chladicího média. [12]

Následující limity tvrdého obrábění jsou popsány z praktických zkušeností:

- Náklady na nástroje vhodné pro tvrdé obrábění jsou vyšší než pro nástroje používané při broušení. [12]
- Vibrace při tvrdém soustružení. Poměr délky ku průměru obrobku, který není podepřen nesmí být větší než 4:1. [12]
- U tvrdého obrábění je kladen největší důraz na tuhost soustavy S-N-O. Jelikož tuhost zde má přímý vliv na přesnost obrábění. K zajištění vyšší tuhosti je možné vyztužit základnu stroje polymerovou kompozitní výztuží. Maximalizace tuhosti systému znamená i minimalizaci všech vyložení nástroje. Hydraulické nebo tepelné držáky dokážou zajistit nejvyšší přesnost a nejnižší vibrace. [12]
- Ke zvážení je také otázka chlazení, protože například u dílů, jako jsou ozubená kola dochází k přerušovanému řezu je nejlepší obrábět bez chlazení. Důvodem je tepelný šok, který by břitová destička zažila při vstupu a výstupu z řezu. Následně by mohlo dojít ke zlomení nástroje. U kontinuálních řezů jsou vysoké teploty vyskytující se při soustružení za sucha žádoucí, jelikož dochází k žhání (změkčení) předřezané části. Díky tomu se sníží tvrdost a úběr materiálu je tak snazší. Řezání bez chladicí kapaliny je také zjevně ekonomičtější. Pokud je chladicí médium pro proces vyžadováno, je nutné, aby bylo na vodní bázi. [12]
- Kvalita obrobené plochy se zhoršuje společně s opotřebením nástroje i v mezích životnosti nástroje. Obrázek 8 ukazuje kvalitu povrchu Rz v závislosti na opotřebení hřbetu nástroje VB_B v milimetrech. [12]



Obrázek 8 - Kvalita povrchu v závislosti na opotřebení nástroje [12]

Řezné podmínky pro tvrdé obrábění se výrazně liší od běžného obrábění a jsou charakterizovány následujícími body:

- Aby se minimalizovalo opotřebení nástroje, odepírá se tříska pomocí malé hloubky řezu a rychlosti posuvu. Volí se také velký rádius špičky nástroje. Výsledkem je velmi tenký průřez třísky. [11]
- Pro prevenci a zabránění odštípnutí břitu je třeba volit záporný úhel čela se zábritem. Z důvodu velmi tenké třísky obrábí ve většině případů právě zábritem. Abrazivita materiálu otupuje řeznou hranu a dělá tak úhel čela více záporný. [11]

5.1.1 Frézování tvrdých materiálů

Frézováním tvrdých materiálů se jako první začali zabývat společnosti, které vyráběli formy pro lisování vyrobené z nástrojové nebo chrom-molybdenové oceli. Dutiny forem vyžadují velkou přesnost a dříve se vyráběli elektroerozivním obráběním, které se ovšem projevilo pro tuto konkrétní operaci obrábění jako energeticky velmi nákladné. [12]

Stroj pro tvrdé frézování musí mít stejné vlastnosti jako vysokorychlostní obráběcí centrum. Obzvláště velký důraz je kladen na tuhost základny. Polymerbetonové základny jsou nejvíce vhodné, jelikož mají velký tlumící efekt proti vibracím vyvolávaným při tvrdém obrábění. Jako nástroje pro obrábění se používají monolitní karbidové frézy, frézy s VBD ze slinutého karbidu povlakované/nepovlakované (povlak například z TiN) a frézy s VBD z řezné keramiky. Destičky z řezné keramiky dále bývají vyztuženy whiskery. Nástrojové držáky musí odolávat vysokým otáčkám, tudíž je nutné volit upnutí pomocí Morse kužele. Pro hrubovací operace se využívají kleštinová sklíčidla a hydraulické dilatační držáky, ale pro operace, které vyžadují vyšší přesnost jsou vhodnější tepelné upínače. [12]

5.1.2 Soustružení tvrdých materiálů

Motivací pro vývoj tvrdého soustružení byla možnost eliminace broušení, ačkoli je výhodnost procesu opakovaného soustružení materiálů tvrdších než 45 HRC z hlediska přesnosti oproti broušení více než sporná. Tvrdým soustružením je možné dosáhnout jakosti povrchu Ra 0,4-0,8 μm , ovality 2-5 μm a tolerance průměru $\pm 3-7 \mu\text{m}$. Hlavní výhodou je použití stroje pro soustružení běžných materiálů s menší tvrdostí a tím maximalizace využití zařízení. [12]

Stupeň přesnosti tvrdého soustružení, podobně jako u frézování, určuje stupeň tuhosti S-N-O. Tudíž u dílů s vyšším nárokem na přesnost je třeba počítat s použitím soustružnických center, která jsou přímo určena pro tvrdé obrábění. Jak bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, otázkou je použití řezné kapaliny. Běžně se soustruží bez chlazení, to má ovšem za následek, že se díl zahřívá, a to ztěžuje pooperační měření. Nejlepší volbou pro chlazení je vysokotlaký přívod kapaliny na vodní bázi. Pokud se vychlazené třísky drolí v ruce, tak to znamená, že v třisce vzniká správné množství teploty. Výběr vhodného materiálu řezného nástroje (KBN, cermet, řezná keramika) má vliv na přesnost obrábění a na kvalitu povrchu. [12]

5.1.3 Vyvrtávání a vystružování tvrdých materiálů

Vyvrtávání a vystružování má za úkol jednak přivést díru do správné diametrální přesnosti s úzkou tolerancí při dosažení požadované jakosti hotové díry, ale také vyrovnat původní vrtanou díru. Používá se především pokud deformace vzniklá předchozím tepelným zpracováním klade nepřiměřená omezení na měkké obrábění, a to má za důsledek zvyšující se náklady na nástroje. Tvrdé vyvrtávání tak poskytne nákladově levnější alternativu a zároveň sníží zmetkovitost.



Obrázek 9 - Nástroje řady CoroBore 825 pro jemné vyvrtávání tvrdokovů [14]

5.2 Obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií

Obráběním nástroji s nedefinovanou geometrií se myslí především dokončovací metody jako např. broušení, honování nebo lapování, jelikož brusné zrna, zde funguje jako břit a jeho geometrie je nepravidelná a silně negativní (až -50°). Rozložení zrn je nahodilé. Dříve to byl jediný způsob obrábění tvrdých materiálů. V průběhu let bylo nahrazeno právě obráběním nástroji s definovanou geometrií, protože umožňovalo efektivnější úběr materiálů.

5.2.1 Broušení

Broušení je rychlostní mikrořezání povrchových vrstev těles pomocí jemných zrn brusiva. Brusná zrna drží pohromadě za použití pojiva. Obvodová rychlost nástroje je nejčastěji do 50 m/s. Mezi hlavní výhody broušení je vysoká přesnost a kvalita povrchu. Brusný nástroj má nejčastěji tvar kotouče. Během broušení se vylamují brusná zrna a dochází tak k úbytku nástroje. Pokud dojde k zanesení třískami mezi mezerami zrn, stačí nástroj orovnat. Při broušení dochází ke generaci velkého množství tepla, které je nutné efektivně chladit.

Brusiva:

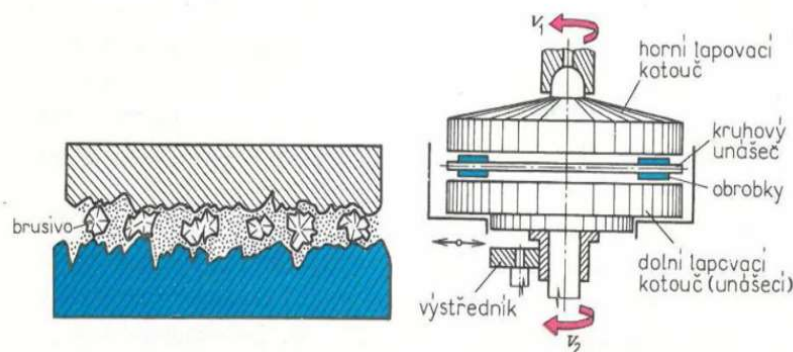
- Umělý korund (Al_2O_3) – obchodní název ELEKTRIT, používá se pro broušení kalených ocelí
- Karbid křemíku (SiC) – obchodní název KARBORUNDUM, používá se pro broušení slinutého karbidu
- Kubický nitrid boru (KNB) – používá se pro broušení kalených ocelí

Pojiva:

- Galvanické pojivo
- Pojivo ze syntetických pryskyřic
- Keramické pojivo

5.2.2 Lapování

Lapování je nejpresnější metodou obrábění. Hrubé lapování dosahuje přesnosti IT 5-6 a drsnosti povrchu $Ra\ 0,16-0,32\ \mu m$ a jemné lapování IT 1-3 a $Ra\ 0,01\ \mu m$. Je to v podstatě velmi jemné broušení volným brusivem. Brusivo je volně rozptýleno v kapalině nebo pastě mezi lapovacím nástrojem a obrobkem. Nejčastěji se používá pro rovinné plochy. Řezná rychlost je 5–120 m/min. Brusivo lapovacího prostředku je stejného materiálu jako u broušení. [15]



Obrázek 10 - Princip lapování [15]

5.2.3 Honování

Honování je metoda jemného broušení honovací hlavou nebo honovacími trny s jemnými kameny. Tato dokončovací metoda se využívá především pro výrobu otvorů, kde jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost (IT 3–4) a drsnost povrchu ($0,1 \mu\text{m}$). Materiál je odebírán abrazivním účinkem honovacích kamenů. Honovací nástroj zanechává typický křížový výbrus, který vzniká složeným šroubovitým pohybem nástroje. [16]

6 Nekonvenční metody obrábění tvrdých materiálů

Jako nekonvenční jsou označovány metody obrábění, kde se pro úběr materiálů nepoužívá standardní rezný nástroj. Používají se tepelné, chemické nebo jiné účinky. Používají se zejména tam, kde by běžný způsob obrábění nebyl možný. Současně je to nejrozšířenější způsob obrábění slinutého karbidu. [17]

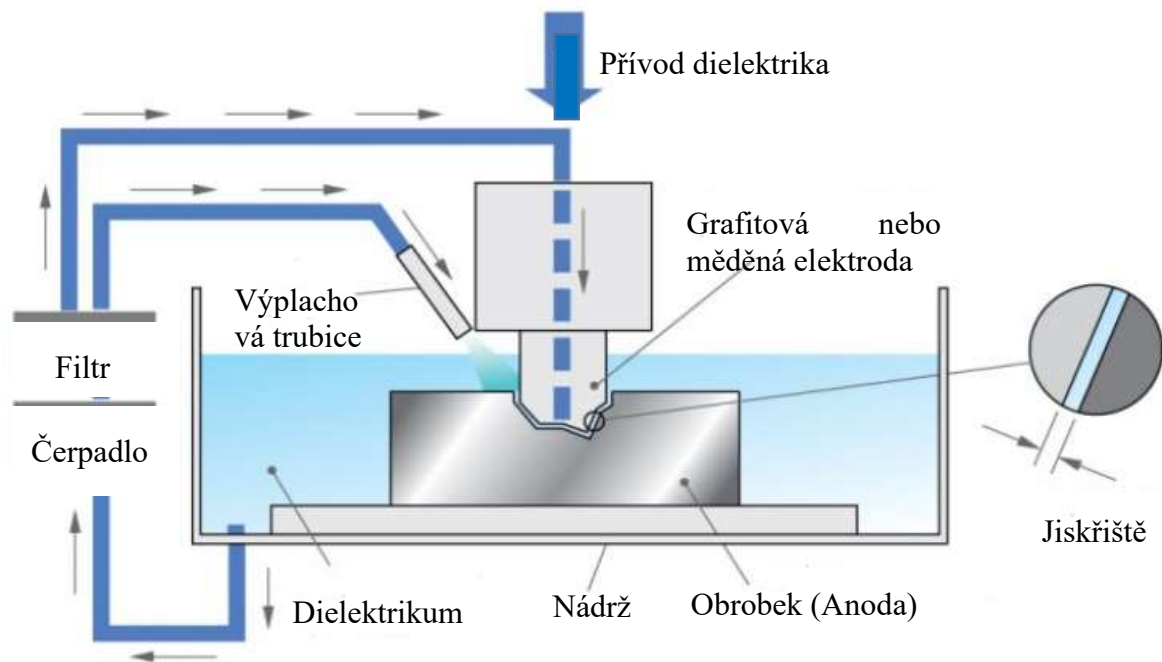
- Oddělování materiálu tepelným účinkem – elektroerozivní metody (EDM), obrábění paprskem plazmy (PBM), obrábění paprskem laseru (LBM) [17]
- Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem – elektrochemické obrábění (ECM), chemické obrábění (CM) [17]
- Mechanické oddělování materiálu – ultrazvukové obrábění (USM), obrábění paprskem vody (WJM/AWJM) [17]

6.1 Elektroerozivní obrábění (EDM)

Elektroerozivní obrábění je nekonvenční proces založený na elektrotepelné energii. Používá se především pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Jedná se také o oblíbenou metodou nekonvenčního obrábění slinutého karbidu. Díky své schopnosti obrábět komplexní tvary ve vysoké přesnosti. Používá se například pro obrábění lisovacích forem.

Princip je založen na termoelektrické energii. Pro konverzi elektrické energie na tepelnou je využívána série elektrických výbojů mezi elektrodou (katoda) a obrobkem (anoda). Při obrábění je obrobek zcela ponořen do dielektrické kapaliny. Dielektrické médium je nejčastěji demineralizovaná voda. Během obrábění je nutné udržovat mezeru mezi nástrojem a obrobkem (jiskřiště), která slouží pro chlazení a odvod třísek z místa obrábění. Materiál je odebírán v důsledku působení vysokých teplot odtavením nebo odpařením v místě výboje. Nástroj se nedotýká obrobku.

Mezi nejčastější technologické využití elektroerozivního obrábění patří: elektroerozivní hloubení, řezání drátem a mikroděrování. Řezání drátem (WEDM – Wire Electrical Discharge Machining) je modifikace elektroerozivního obrábění. Zavedení této metody mělo významný dopad na výrobu střížných a lisovacích nástrojů. Princip spočívá v průchodu tenkého vodivého drátu, který se odvíjí z cívky, kde mezi drátem a obrobkem dochází k elektrickým výbojům. Materiál drátu bývá zpravidla měď nebo mosaz. Díky pravidelnému odvíjení drátu jsou zachovány stále stejné rezné podmínky. Elektroerozivní hloubení (SEDM – Sinking Electrical Discharge Machining) se používá především pro tvorbu hlubokých kapes. Elektroda má tvar negativu dutiny. Pro zajištění proudění dielektrika a následného vyplachování nataveného materiálu se elektroda opakovaně přibližuje a oddaluje od obrobku. Pro zvýšení přesnosti a kvality obráběné plochy u hlubokých dutin se zavádí navíc translační pohyb, aby nedocházelo k dalším výbojům od odjiskřených částic, které jsou stále elektricky vodivé. Díky translačnímu pohybu dochází k výbojům střídavě na různých částech elektrody, tím vzniká dostatek prostoru k odvodu zbytkového materiálu. Jako dielektrikum se nejčastěji používají kapaliny na bázi petroleje nebo oleje. Další technologií je mikroděrování neboli elektroerozivní vrtání (EDD – Electrical Discharge Drilling). Používá se pro vrtání pouze malých průměrů. Obvykle od 0,5-1,5mm s vysokou přesností $\pm 0,05$ mm. Princip zůstává stejný jako u předchozích metod s tím rozdílem, že elektroda má tvar tyče, která je upnuta do stroje a zapojena na opačnou polaritu než obrobek. Dielektrikum je deionizovaná voda, která je přiváděna dutinou v nástroji. [18] [19] [20] [21]



Obrázek 11 - Schéma EDM [22]

6.2 Ultrazvukové obrábění (USM)

Ultrazvukové obrábění je založeno abrazivním účinku jemných částic tvrdých materiálů (diamant, kubický nitrid boru, ...) rozptýlených v kapalině, nejčastěji ve vodě, lihu nebo petroleji. Výhodou ultrazvukového obrábění oproti EDM je, že se dá použít i na elektricky nevodivé materiály. Mezi hlavní technologické výhody ultrazvukového obrábění patří rozměrová přesnost v řádu 0,02-0,05 mm a kvalita obrobeného povrchu, která dosahuje hodnot Ra 0,4-1,6 μm . Nutno podotknout, že kvalita výsledného povrchu je přímo závislá na velikosti a materiálu zrna.

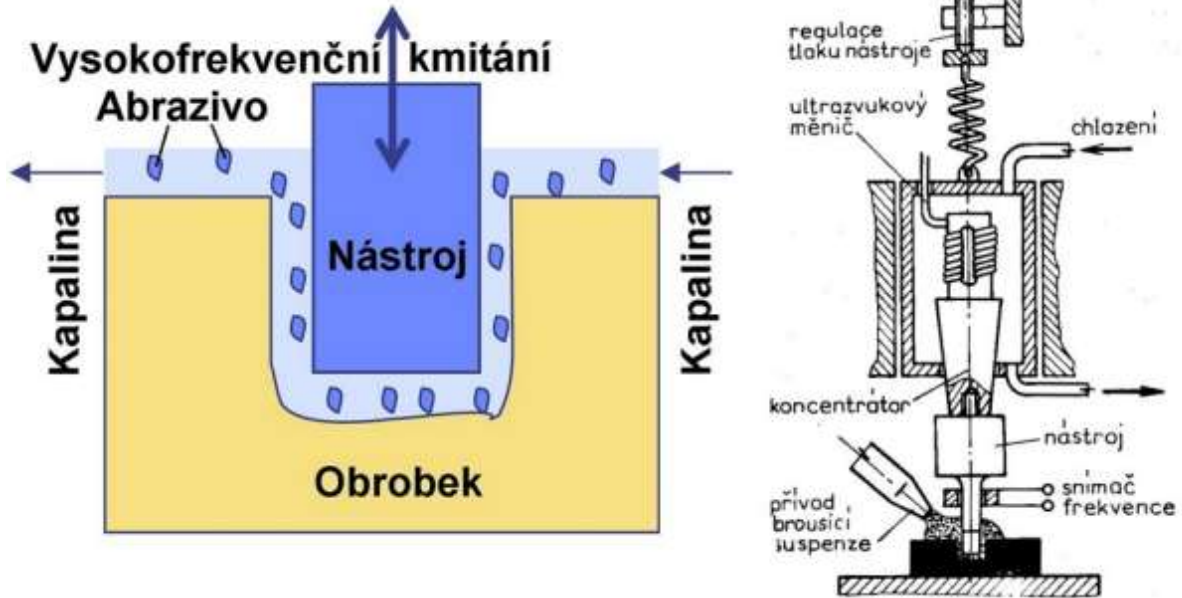
Princip spočívá ve vysokofrekvenčním kmitavém pohybu částic (18–25 kHz) tvrdých materiálů, které jsou rozptýleny v kapalině mezi nástrojem a obrobkem. Rozkmitaná zrna o velikosti 10–40 μm dále pronikají do obrobeného materiálu, který je následně jejich působením rozrušován. Nástroj kromě kmitavého pohybu může konat přímočarý pohyb. Největšího úběru materiálu je dosaženo v rovinách kolmých ke směru kmitání nástroje. Technologické aplikace jsou následující: [23]

6.2.1 Ultrazvukové dělení materiálu

Tato technologie se využívá pro řezání tyčí z tvrdých materiálů, které mají tloušťku do 5 mm. Oproti tomu, lze řezat i materiály které se při konvenčním řezání lepí, jako například nevulkanizovaná guma. Využití lze nalézt nejen ve strojírenském průmyslu, ale také v potravinářském průmyslu, například pro řezání sýrů.

6.2.2 Ultrazvukové hloubení

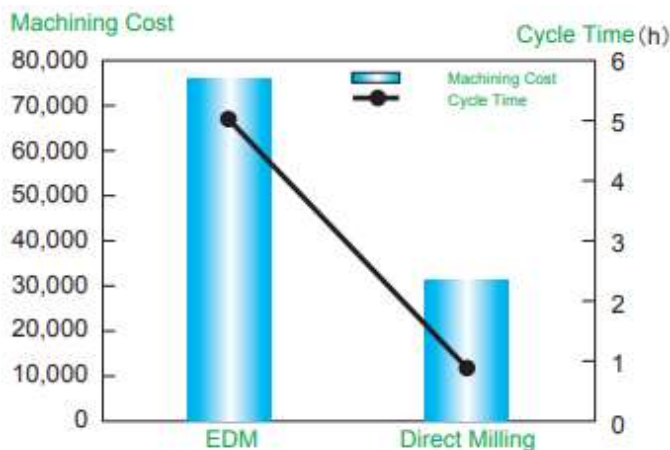
Ultrazvukové hloubení se provádí vertikálním přísuvem tvarových nástrojů, podobně jako u elektroerozivního hloubení. Pro hloubení průchozích otvorů se používá nástroj, který má tvar trubky. Pro zvýšení efektivity obrábění koná nástroj navíc rotační pohyb. [23]



Obrázek 12 - Princip ultrazvukového obrábění [17]

6.3 Shrnutí konvenčních a nekonvenčních metod obrábění tvrdých materiálů

Všechny výše uvedené metody obrábění tvrdých materiálů mají jednu či více společných vlastností. V případě nekonvenčních metod je třeba velmi drahých a energeticky náročných strojů vhodných pouze pro úzkou škálu operací. U dokončovací metod probíhá úběr materiálu v rámci μm , tím narůstají strojní časy v případě úběru většího objemu materiálu. Snaha obrábět tyto materiály na CNC obráběcích centrech a soustruzích skýtá mnoho výhod. Tou nejzásadnější výhodou je cenová dostupnost těchto strojů. Další zásadní výhoda, je variabilita použití, lze obrábět komplexní tvarové součásti za použití běžných nástrojů. S tím souvisí nízké náklady na nástroje, namísto použití specializovaných na zakázku vyrobených nástrojů. Úběr materiálu v řádu milimetrů zajistí kratší strojní časy. Srovnání nákladů pro obrábění slinutého karbidu a EDM obrábění (viz. Obrázek 14) udává výrobce Union Tool. Na obrázku lze vidět soupis jednotlivých nákladů v japonských jenech ($1\text{¥}=0,16\text{CZK}$) a jejich následné porovnání. Z grafu vyplývá, že konvenční obrábění je o $45\,500\text{¥}$ ($7\,372\text{CZK}$) levnější než EDM obrábění. [26]



Obrázek 13 - Porovnání nákladů na frézování a EDM [26]

		Qty/h	(¥) Unit Price	(¥) Total	(h) Cycle Time
Making Copper Electrode	Tool	3	3,000	9,000	2
	Material	1	2,000	2,000	
	Machine	2	5,000	10,000	
EDM	Operator	2	8,000	16,000	3
	Machine	3	5,000	15,000	
Total				76,000	5

Obrázek 15 - Soupis nákladů na EDM obrábění [26]

		Qty/h	(¥) Unit Price	(¥) Total	(h) Cycle Time
Milling Carbide	Tool (UDCB)	1	17,500	17,500	1
	Machine	1	5,000	5,000	
	Operator	1	8,000	8,000	
Total				30,500	1

Obrázek 14 – Soupis nákladů na konvenční obrábění [26]

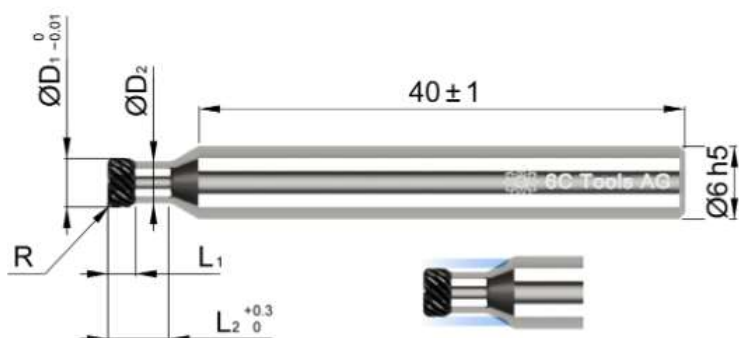
7 Návrh, realizace a vyhodnocení experimentální měření

V prostorách RTI na Západočeské univerzitě v Plzni se už delší dobu věnují frézování slinutého karbidu. Na trhu objevily nové nástroje, vhodné pro aplikaci frézování právě těchto supertvrdých materiálů. Následující kapitoly jsou věnovány právě použití těchto nástrojů od společností 6C Tools AG a Union Tool. Dále byl použit nově vyvíjený nástroj společnosti PM-Tech. Tento vyvíjený nástroj je inspirován konstrukcí nástroje 6C Tools, veškeré konstrukční rozdíly společně s výsledky testů jsou uvedeny níže.

7.1 Nástroje

První nástroj je od švýcarské společnosti 6C Tools AG, která se zabývá výrobou nástrojů z polykrystalického diamantu. Nástroje jsou optimalizovány pro obrábění nejen slinutého karbidu, ale také oxidu zirkoničitého (ZrO_2), oxidu hlinitého (Al_2O_3) a nitridu křemičitého (Si_3N_4). Pro experiment byla zvolena fréza, která má katalogové označení TM-P-1115-200-010. Druhý nástroj je od japonské společnosti Union Tool, která nabízí široké portfolio produktů, nejen v oblasti obráběcích nástrojů, ale mimo jiné také v oblasti metrologie a podélných posuvů. Použitý nástroj od této společnosti má označení UDCLRSF2020-010040. Je nutné podotknout, že ačkoli jsou nástroje od výrobců doporučovány pro obrábění slinutého karbidu, výrazně se liší v přístupu konstrukce a geometrie. To je důvod, proč je třeba věnovat pozornost jejich porovnání. [25]

7.1.1 TM-P-1115-200-010 (6C Tools AG)



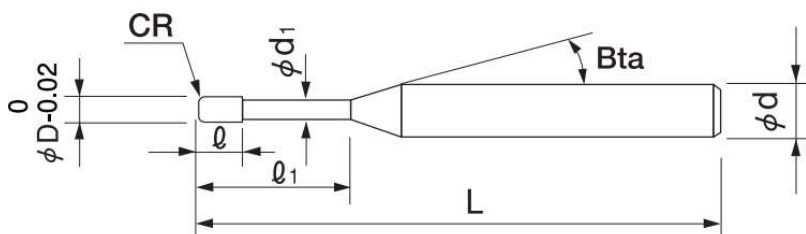
Obrázek 16 - Ilustrační obrázek nástroje TM-P-1115-200-010 6C Tools AG

Parametry nástroje	
D_1	2,0 [mm]
D_2	-
R	0,1 [mm]
L_1	1,5 [mm]
L_2	1,5 [mm]
Počet břitů	15

Tabulka 2 - Základní rozměry nástroje TM-P-1115-200-010 [25]

Pro experimentální obrábění byla vybrána monolitní PCD torusová fréza o průměru 2 mm s patnácti břity. Břity jsou ve tvaru pravořezné šroubovice. Celodiamantové nástroje s touto komplexní geometrií je možné vyrobit pouze díky ultrakrátkou pulzní laserovou ablací. Tato technologie ve srovnání s broušením nebo erozivním obráběním umožňuje obzvláště šetrný úběr materiálu. Zároveň zabraňuje mechanickému poškození, ke kterému dochází během broušení nebo vyjiskřování a tím zajišťuje vyšší životnost nástroje. [25]

7.1.2 UDCLRSF2020-010040 (Union Tool)



Obrázek 17 - Skica nástroje UDCLRSF2020-010040 [26]

Parametry nástroje	
D	2,0 [mm]
d ₁	1,9 [mm]
d	4 [mm]
CR	0,1 [mm]
l	1 [mm]
l ₁	4 [mm]
L	15 [mm]
Počet břitů	2
Bta	16°

Tabulka 3 - Základní rozměry nástroje UDCLRSF2020-010040 [26]

Druhým nástrojem je dvoubřitá stopková monolitní fréza o průměru 2 mm. Zbylé základní rozměry nástroje jsou uvedeny viz. tabulka 3. Materiálem nástroje je slinutý karbid. Řezná část je opatřena silným ochranným CVD diamantovým povlakem, který má dle výrobce razantně zvýšit tvrdost řezné části a trvanlivost nástroje. Výrobce dále kromě doporučení obrábění slinutého karbidu udává, že je nástroj vhodný pro tvrdé a křehké nemetalické materiály. [26]

7.1.3 Experimentální nástroj PM-Tech

V rámci vývoje vlastního nástroje pro obrábění slinutého karbidu si společnost PM-Tech připravila 2 prototypy nástroje. V obou případech se jedná o karbidovou stopku, s napájeným segmentem z PCD. Oblast napájení segmentu do dobře viditelná na obrázku 18. První fréza má průměr 3 mm a 20 zubů (dále označována jako PM-D3Z20), druhá má průměr 1,5 mm a 10 zubů (dále označována jako PM-D1,5Z10). Zuby jsou stočeny do šroubovice podobně jako v případě konstrukce frézy 6C Tools. Zásadní konstrukční rozdíly fréz jsou v úhlu stoupání šroubovice, kde PM-Tech má úhel stoupání šroubovice 74,3° a 6C Tools pouze 48,3°. Dalším výrazným rozdílem je směr stoupání šroubovice. Fréza 6C Tools má pravořeznou frézu s pravým stoupáním šroubovice, kdežto PM-Tech má pravořeznou frézu s levým stoupáním šroubovice.



Obrázek 18 - Snímek frézy PM-Tech pod mikroskopem

7.2 Obráběný polotovar

Pro experimentální obrábění byl zvolen druh slinutého karbidu G1.1 s označením podskupiny K30 s tvrdostí HV30 – 1161. Povrch obrobku je broušený.



Obrázek 19 - Obrobek upnutý ve stroji

7.3 Použitý obráběcí stroj

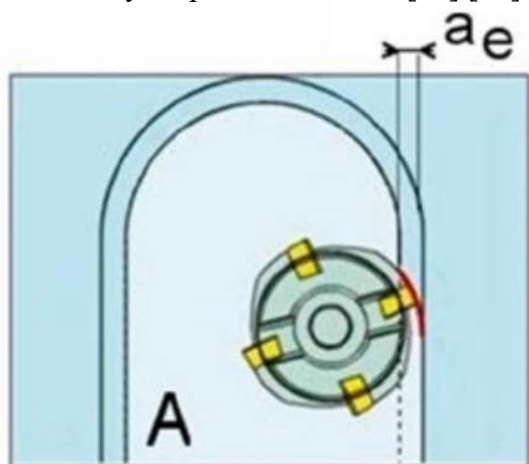
Pro experiment bylo vybráno pětiosé obráběcí centrum DMG MORI DMU 40 eVo linear s řídicím systémem HEINDENHAIN. Výhodou pětiosého obráběcího centra je obrábění tvarově náročných součástí v energetickém či slévárenském průmyslu, na výrobu forem, které mohou být právě vyrobeny ze slinutého karbidu. Ačkoli pro tento konkrétní experiment není potřeba všech pěti os, úloha se snaží simulovat situaci, kdy výrobce forem má k dispozici právě tento stroj a snaží se ušetřit obráběním náklady, které by jinak vynaložil na jinou technologii např. EDM. Technické specifikace jsou součástí přílohy č. 2 [27]



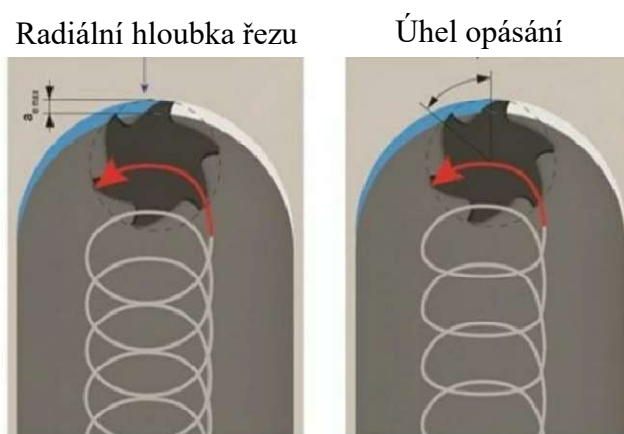
Obrázek 20 - Univerzální obráběcí centrum DMG MORI DMU 40 eVo linear [27]

7.4 Strategie obrábění

Strategie obrábění bylo volena vzhledem k aplikaci frézování rovinných drážek pomocí monolitních fréz. Bylo zvoleno trochoidní a hladinové obrábění. Trochoidní obrábění v porovnání s tradičními metodami obrábění jako je hladinové obrábění dovoluje dosažení vyšší životnosti nástroje. Klíčový je pak zejména nízký řezný odpor, jelikož při velkých hodnotách axiální hloubky řezu a nízkých hodnotách radiální hloubky řezu (a_e) je v záběru jen jeden nebo dva břity. Díky nízkým hodnotám radiální hloubky třísky nedochází k problému s odvodem třísky a je dosahováno lepší kvality opracovaných ploch a je sníženo riziko vzniku vibrací. Trochoida je křivka, která vzniká pohybem bodu po kružnici, který se odvaluje po pevné přímce, tudíž pro naprogramování drah nástroje byl použit iMachining, který je součástí doplňkového modulu SolidCAM. Hladinové obrábění pak odebírá materiál ve hladinách, dráha nástroje je přímka. Po celou dráhu má fréza stejný úhel záběru. Touto strategií je zatížení frézy mechanicky i tepelně neměnné. [28] [30]



Obrázek 22 – Schéma hladinového frézování [30]



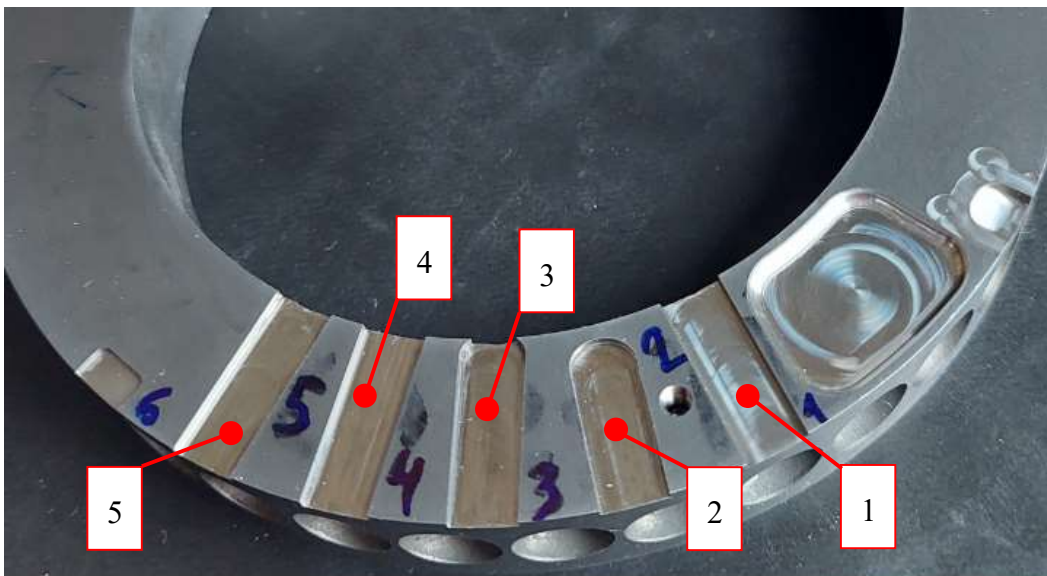
Obrázek 21 - Schéma trochoidního frézování [29]

7.5 Měření drsnosti

Drsnost povrchu byla měřena pomocí metrologického nástroje Alicona G4 InfiniteFocus. Jedná se o optický mikroskop, který dovoluje skenovat povrch, na kterém následně vyhodnotí drsnost. Toto zařízení bylo vybráno díky své vysoké rozlišovací schopnosti na lesklých površích. Princip měření spočíval vždy v naskenování části povrchu dna drážky a jeho následné převedení na 3D texturu. Všechna měření drsnosti byla provedena v souladu s ČSN EN ISO 4287. Měření bylo prováděno profilovou metodou ve dvou navzájem kolmých směrech, které jsou vždy naznačeny na schématech (viz. obrázky 25, 27, 29, 31 a 33)

7.6 Průběh a výsledky experimentu

Na polotovaru bylo v průběhu testování vyfrézováno několik drážek a kapes. Pouze očíslované drážky byly součástí experimentu. Jedná se o rovné drážky pokaždé stejných rozměrů s hloubkou 1 mm. Drážky 1 a 4 byly vyrobeny pomocí výše uvedených nástrojů společnosti 6C Tools a Union Tool. Zbylé drážky byly předmětem testování vyvíjeného nástroje společnosti PM-Tech.



Obrázek 23 - Číselné rozřazení drážek

7.6.1 Drážka 1

Drážka s číslem 1 byla obráběna pomocí nástroje 6C Tools. Strategii obrábění bylo trochoidní frézování. Během obrábění se měnila radiální hloubka řezu (a_e), tak aby střední tloušťka třísky byla konstantní. V průběhu obrábění nedošlo ke komplikacím ani viditelnému poškození nástroje (vylovení břitu, zalomení nástroje, atd.). Celková doba obrábění stanovená CAM softwarem byla 6 minut. Volené řezné podmínky byly následující:

- Řezná rychlost V_c : 100 [m/min.]
- Maximální posuv na zub $F_{z_{max}}$: 0,0015 [mm/zub]
- Axiální hloubka řezu a_p : 0,97 [mm]
- Radiální hloubka řezu a_e : 0,093 [mm]
- Úhel opásání: 25 [°]
- Chladicí médium: vzduch
- Bez vnitřního chlazení

Rozměry drážky:

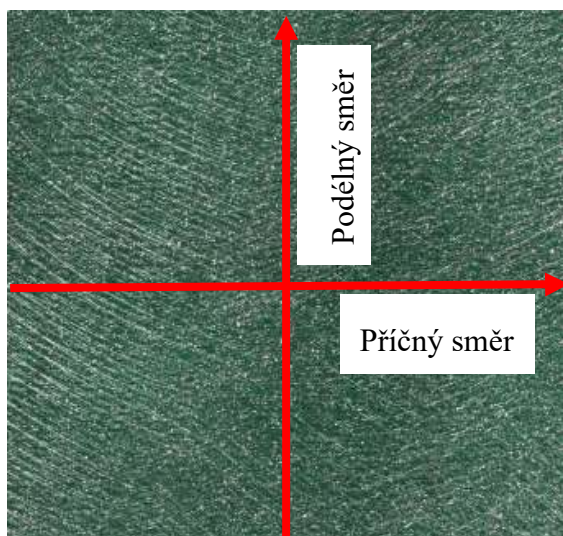
- Šířka 6 mm
- Délka 16 mm
- Hloubka 1 mm

7.6.1.1 Drsnost dna drážky po obrábění

Na obrázku 24, lze vidět naskenovaný povrch úseku dna drážky ve 3D. Povrch je viděn pod zeleným filtrem pro rozlišení drobných výčnělků. Pro objektivní měření, byla drsnost vždy měřena ve dvou na sebe kolmých směrech viz. obrázek 25.



Obrázek 24 - Sken povrchu dna drážky 1



Obrázek 25 - Schéma směrů měření drsnosti drážky 1

Podélný směr	
Ra	0,1154 μm
Rq	0,1476 μm
Rz	0,9859 μm
Příčný směr	
Ra	0,1173 μm
Rq	0,1485 μm
Rz	0,9818 μm

Tabulka 4 - Výsledky měření drsnosti drážky 1

7.6.2 Drážka 2

Tato drážka byla vyrobena frézou PM-D3Z20. V průběhu obrábění došlo k defektu nástroje. Drážka byla vyfrézována zhruba z 85 % (viz. obrázek 23) po vypnutí stroje, došlo ke zjištění, že na stopce chybí napájený PCD segment, který v důsledku vysokých teplot při obrábění. S největší pravděpodobností pájka nevydržela vysoké teploty a segment se odpájel. Pro obrábění byla zvolena trochoidní strategie obrábění. Celková doba obrábění stanovená CAM softwarem byla 5 minut. Řezné podmínky byly voleny následovně:

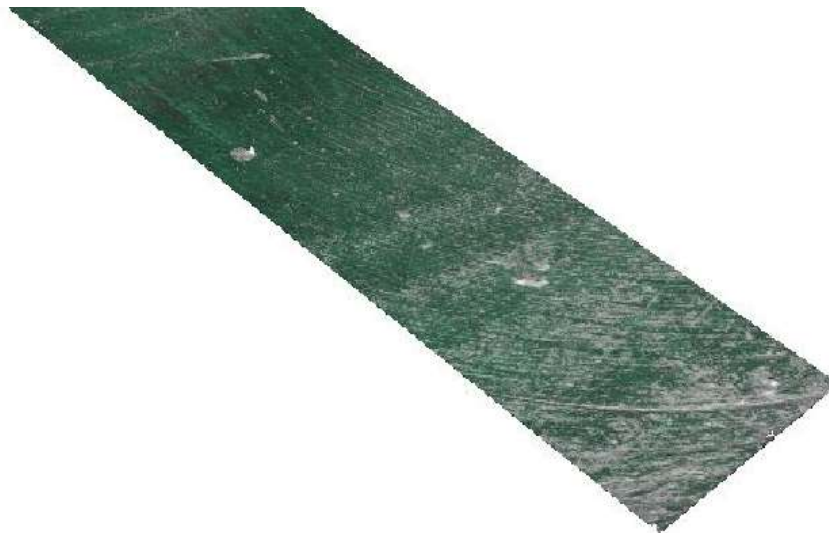
- Řezná rychlost V_c : 100 [m/min.]
- Maximální posuv na zub F_z : 0,002 [mm/zub]
- Axiální hloubka řezu a_p : 1 [mm]
- Radiální hloubka řezu a_e : 0,14 [mm]
- Úhel opásání: 25 [°]
- Chladicí médium: vzduch
- Bez vnitřního chlazení

Rozměry drážky:

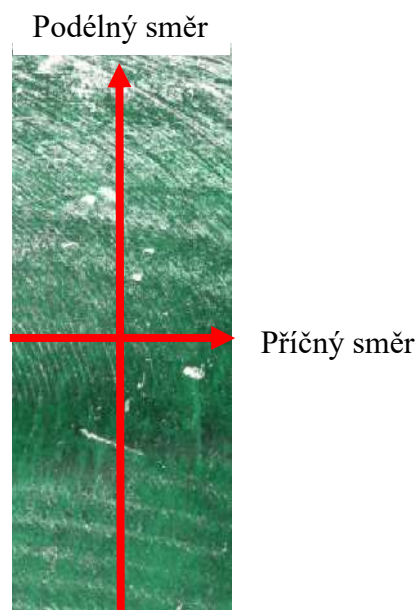
- Šířka 6 mm
- Délka 16 mm
- Hloubka 1 mm

7.6.2.1 Drsnost drážky po obrábění

Po vizuální stránce byl povrch lesklý a byly vidět pouze dráhy po nástroji. Pro bližší přezkoumání povrchu bylo potřeba naskenovat texturu dna drážky (obrázek 26) pomocí optického mikroskopu. Na naskenované textuře jsou vidět výrazné stopky po nástroji, obzvláště v místě, kde došlo k ulomení nástroje.



Obrázek 26 - Sken povrchu dna drážky 2



Obrázek 27 - Schéma směru měření drsnosti drážky 2

Podélný směr	
Ra	0,2740 μm
Rq	0,3689 μm
Rz	2,8061 μm
Příčný směr	
Ra	0,2928 μm
Rq	0,3875 μm
Rz	2,2385 μm

Tabulka 5 - Výsledky měření drsnosti drážky 2

Rozdíly naměřené drsnosti ve dvou navzájem kolmých směrech jsou minimální. Lehce zdrsňený povrch v blízkosti místa, kde došlo k defektu nástroje nijak zvlášť neovlivnil výsledky měření.

7.6.3 Drážka 3

Drážka 3 vznikla jako opakování předchozího experimentu za snížené řezné rychlosti. Nástrojem je opět PM-D3Z20. Na obrázku 23 si lze povšimnout, že drážka není vyfrézována až do konce, protože původním záměrem bylo nedělat drážku celou. Kvůli chybě v programu, zůstala drážka vzadu otevřená. Za strategii obrábění bylo voleno trochoidní obrábění. A kvůli sníženým řezným podmínkám vzrostl celkový čas na obrábění stanovený CAM softwarem o více než polovinu, a to konkrétně na 11 minut. Řezné podmínky byly stanoveny následovně:

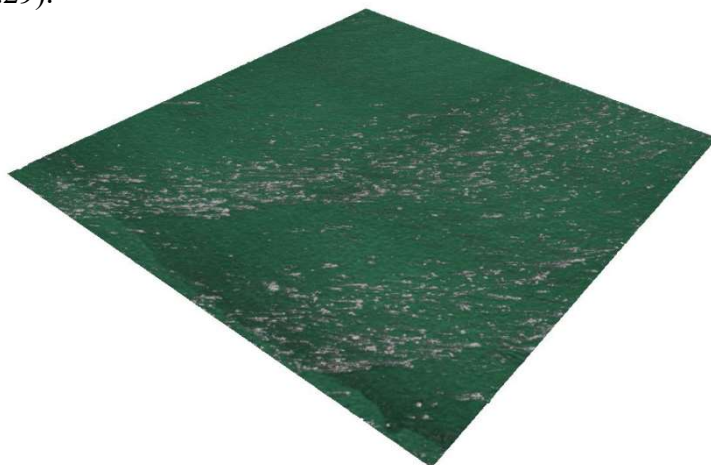
- Řezná rychlost V_c : 50 [m/min.]
- Maximální posuv na zub F_z : 0,0014 [mm/zub]
- Axiální hloubka řezu a_p : 0,1 [mm]
- Radiální hloubka řezu při prvním úběru a_e : 1 [mm]
- Radiální hloubka řezu při druhém úběru a_e : 0,14 [mm]
- Úhel opásání: 25 [°]
- Chladicí médium: vzduch
- Bez vnitřního chlazení

Rozměry drážky:

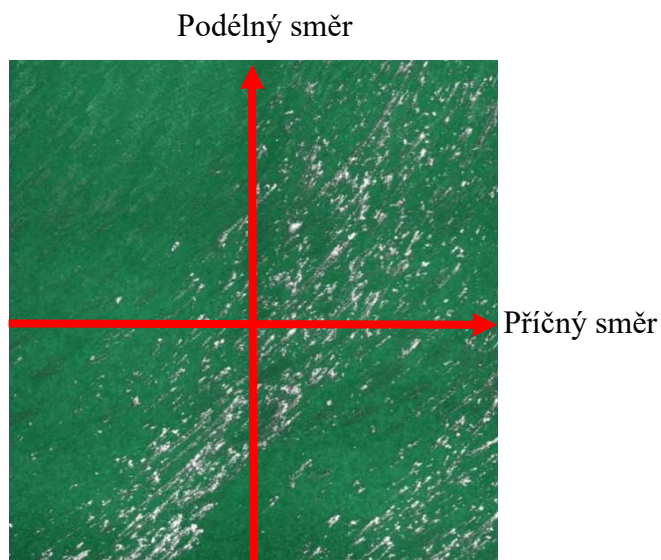
- Šířka 6 mm
- Délka 16 mm
- Hloubka 1 mm

7.6.3.1 Drsnost dna drážky po obrábění

Povrch drážky byl stejně jako u předchozího frézování velmi lesklý a hladký a po vizuální stránce byly stopy po nástroji sotva znatelné. To odpovídalo také naskenované 3D textuře (obr. č.29).



Obrázek 28 - Sken povrchu dna drážky 3



Obrázek 29 – Schéma směrů měření drsnosti drážky 3

Podélný směr	
Ra	0,1932 μm
Rq	0,2426 μm
Rz	1,5337 μm
Příčný směr	
Ra	0,1772 μm
Rq	0,2328 μm
Rz	1,5659 μm

Tabulka 6 - Výsledky měření drsnosti drážky 3

7.6.4 Drážka 4

Drážka 4 byla vyrobena nástrojem UnionTool. Na rozdíl od předchozího frézování, zde byla zvolena strategie hladinového frézování dle doporučení od výrobce. V průběhu obrábění nedošlo ke komplikacím v podobě zlomení nástroje. Po vizuálním zkoumání nástroje bylo zjištěno, že fréza má vyštípnutý jeden zub v oblasti maximální hloubky řezu (0,05 mm). Důvodem vyštípnutí zubu bylo přílišné zastrčení frézy do upínače (i s povlakem). To mělo za následek větší házení nástroje. Celková doba obrábění stanovená CAM softwarem byla 18 minut. Řezné podmínky byli následující:

- Řezná rychlost V_c : 125 [m/min.]
- Maximální posuv na zub F_z : 0,0047 [mm/zub]
- Axiální hloubka řezu a_p : 0,05 [mm]
- Radiální hloubka řezu při prvním úběru a_{e-1} : 2 [mm]

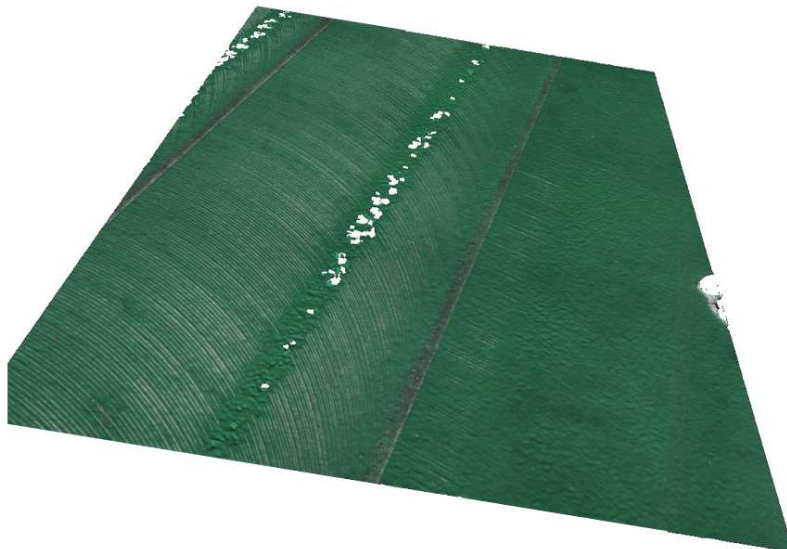
- Radiální hloubka řezu při druhém úběru a_e -ostatní: 0,8 [mm]
- Úhel opásání: 25 [°]
- Chladicí médium: vzduch
- Bez vnitřního chlazení

Rozměry drážky:

- Šířka 6 mm
- Délka 16 mm
- Hloubka 1 mm

7.6.4.1 Drsnost dna drážky po obrábění

Po vizuální stránce měla drážka velmi hladký a lesklý povrch, pouze v některých místech šli vidět stopy nástroje. Pro měření byl znovu použit měřicí přístroj Alicona G4 InfiniteFocus. Postupovalo se stejně jako při předchozím měření. Nejdříve se naskenoval povrch dna drážky a následně se na 3D textuře měřila drsnost ve dvou navzájem kolmých směrech. Bílá místa na textuře jsou chybami skenu.



Obrázek 30 - Sken povrchu dna drážky 4



Obrázek 31 - Schéma směrů měření drsnosti drážky 4

Podélný směr	
Ra	0,1264 μm
Rq	0,1318 μm
Rz	1,0177 μm
Příčný směr	
Ra	0,1317 μm
Rq	0,1478 μm
Rz	1,3734 μm

Tabulka 7 - Výsledky měření drsnosti drážky 4

Výsledky měření v podélném a příčném směru se vzájemně liší pouze v malých hodnotách. Lze tedy předběžně konstatovat, že při konstantním hladinovém obrábění pomocí frézy Union Tool lze dosáhnout také velmi kvalitního povrchu stejně jako v případě trochoidního obrábění toroidní frézou.

7.6.5 Drážka 5

Tato drážka byla vyrobena pomocí poslední dostupné frézy PM-D3Z20 oproti drážce 3, zde bylo záměrem vyfrézovat drážku po celé délce. Byly opět sníženy řezné podmínky, konkrétně posuv na zub, tudíž se lehce zvýšila celková doba obrábění stanovená CAM softwarem na 12 minut. Řezné podmínky byly následující:

- Řezná rychlost V_c : 50 [m/min.]
- Maximální posuv na zub F_z : 0,0012 [mm/zub]
- Axiální hloubka řezu a_p : 1 [mm]
- Radiální hloubka řezu a_e : 0,14 [mm]
- Úhel opásání: 25 [°]
- Chladicí médium: vzduch
- Bez vnitřního chlazení

Rozměry drážky:

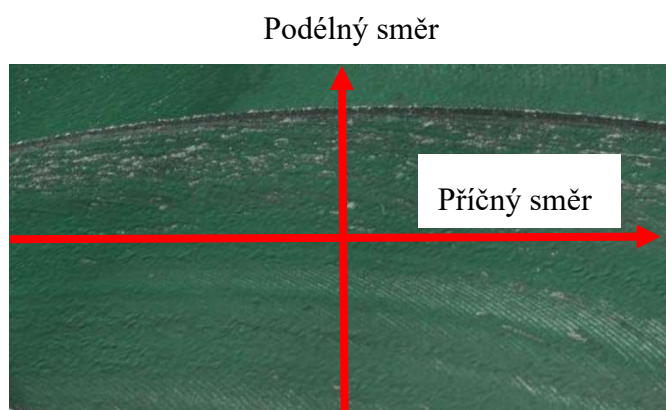
- Šířka 6 mm
- Délka 16 mm
- Hloubka 1 mm

7.6.5.1 Drsnost dna drážky po obrábění

Po vizuální stránce měla drážka velmi hladký a lesklý povrch, stejně jako u předchozích testů nástrojů PM-Tech. Po bližším zkoumání textury povrchu dna drážky byla pouze po celé délce viditelná rýha, která jak bylo později zjištěno, byla s největší pravděpodobností způsobená defektem nástroje, spojeným se špatnou geometrií nástroje, která generovala větší řezné síly.



Obrázek 32 - Sken povrchu dna drážky 5



Obrázek 33 - Schéma směrů měření drsnosti drážky 5

Podélný směr	
Ra	1,5861 μm
Rq	2,3169 μm
Rz	10,0626 μm
Příčný směr	
Ra	0,5877 μm
Rq	1,0121 μm
Rz	4,4327 μm

Tabulka 8 - Výsledky měření drsnosti drážky 5

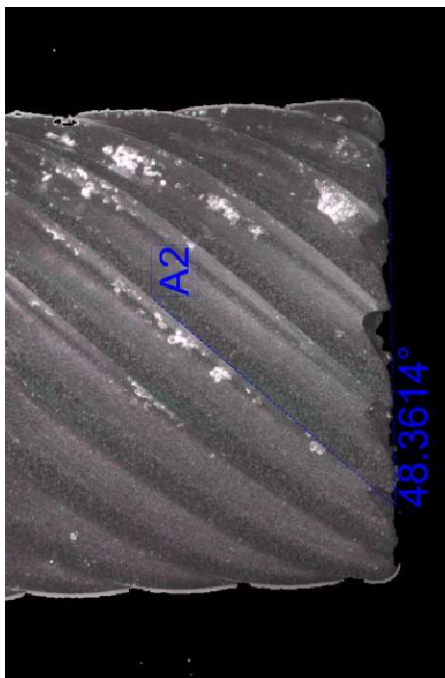
7.6.6 Opotřebení nástrojů

Dalším významným parametrem po kvalitě obrobeného povrchu jsou známky opotřebení nástrojů po obrábění. Všechny zmíněné obrázky jsou součástí přílohy 1. Díky překvapivým výsledkům byla fréza 6C Tools ještě použita pro obrábění mělké kapsy, kde provedla jak hrubovací, tak dokončovací operace. V současné době má po veškerém testování zhruba 40 minut v řezu a nejeví větší známky opotřebení. Na obrázcích 36 a 40 lze vidět snímek nového a opotřebeného nástroje. Na snímku 36 jsou znatelné pouze vlásečnicové vrypy na hřbetě zubů, které nejsou způsobeny obráběním polotovaru, ale výrobou samotného nástroje. Oproti tomu fréza od společnosti UnionTool, která vytvářela pouze drážku č. 4 si vedla v obrábění o dost hůře. V průběhu frézování došlo k plastické deformaci a následnému lomu špičky zubu v oblasti maximální hloubky řezu. Vyštípnutí lze vidět na obrázku 39. Jedna z možných příčin vyštípnutí zubu, je chyba založení nástroje ve stroji. Nástroj byl zastrčen příliš hluboko a v upínači byla i část nástroje s diamantovým povlakem. To mělo za následek větší

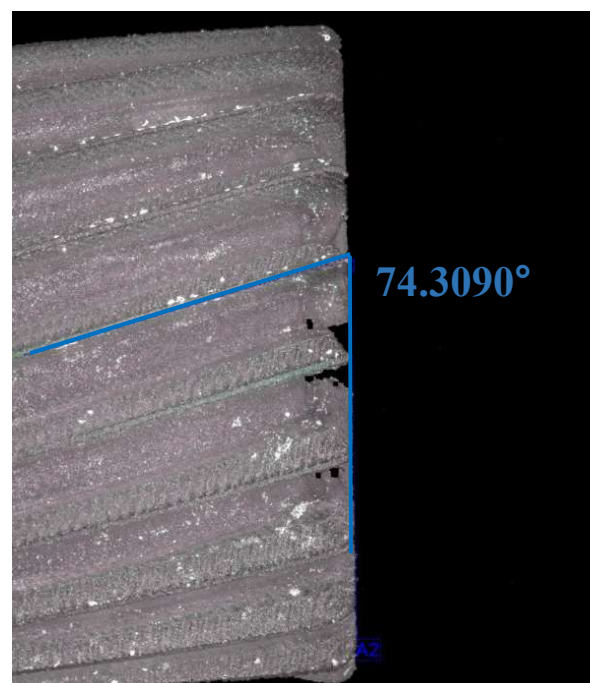
házení nástroje. Otázkou je, zda by došlo k tomuto poškození i při dodržení optimální tuhosti soustavy S-N-O. Pro frézy od společnosti PM-Tech došlo k odpájení PCD segmentu nástroje při frézování drážky 2, nejspíše v důsledku vysokých teplot a nevhodně volených řezných podmínek. Dále následovaly drážky 4 a 5 za snížených řezných podmínek. V obou případech byly zuby vylámany zhruba do výšky 0,4 mm od špičky (obrázek. 37). S největší pravděpodobností došlo k vylámaní během výjezdu z drážek. Navržená geometrie frézy generuje větší řezné síly.

7.7 Technické hodnocení navržených variant

Z výsledků získaných experimentálního měření je patrné, že všechny frézy dosahují překvapivě dobré jakosti povrchu (R_a 0,2740 μm – R_a 1,5861 μm). V oblasti životnosti a produktivity exceluje fréza 6C Tools v kombinaci s trochoidním obráběním, důkazem je časový rozdíl ve výrobě drážky. Fréza Union Tool vyrobila hladinovým obráběním drážku za 18 minut, kdežto fréza 6C Tools vyrobila trochoidním obráběním stejnou drážku za 6 minut. 6C tools prokázala také zdatelně vyšší životnost, po obrábění nástroj nejeví skoro žádné známky opotřebení. Otázka, jak by si v životnosti vedla fréza Union Tool v případě lepšího upnutí bude předmětem dalších experimentů. Fréza společnosti PM-Tech se projevila co do kvality povrchu velmi obstojně. Problém nastává v životnosti frézy, kdy kvůli nevhodně volenému levému směru stoupání šroubovice v kombinaci s pravořezným nástrojem dochází ke tlačení třísek směrem dolů a na konci drážky v důsledku vyštípání větších kousků karbidů se zuby vyštípají. V případě odpájení segmentu by bylo vhodné volit druh pájky s vyšší teplotní odolností. Dále bude třeba vzít v potaz, zda změnit i úhel stoupání šroubovice (rozdíl ve stoupání šroubovice viz. obrázky 34-35). Významný rozdíl je také v tom, že fréza PM-D3Z20 má výraznou fazetku, zatímco 6C Tools nemá skoro žádnou. Případné testování dalších konstrukčních úprav fréz bude předmětem dalšího zkoumání.



Obrázek 34 – Úhel stoupání šroubovice 6C Tools



Obrázek 35 – Úhel stoupání šroubovice PM-Tech

8 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na obrábění materiálů skupiny ISO O, konkrétně slinutého karbidu. Teoretická část byla věnována představení skupiny materiálů ISO O a následně proběhla analýza současného stavu řešené problematiky obrábění vysoce tvrdých materiálů. V praktické části byl vybrán obrobek ze slinutého karbidu G1.1 K30, na kterém se postupně vyzkoušelo frézování rovných drážek za pomoci dvou nástrojů od různých výrobců. Cílem bylo prověřit, zda dokážou frézy dosáhnout tak uspokojivých výsledků, jako je prezentováno výrobcí. Zároveň proběhl test nových prototypů fréz od společnosti PM-Tech, které slouží pro stejnou aplikaci obrábění slinutého karbidu.

Ve všech testech si nejlépe vedl nástroj TM-P-1115-200-010 od společnosti 6C Tools, který dosáhl excelentních výsledků jak v oblasti kvality obrobeného povrchu, tak v oblasti efektivity obrábění a životnosti nástroje. Lze tedy konstatovat, že pro obrábění slinutého karbidu je tento nástroj vhodný.

Druhým zkoumaným byl nástroj UDCLRSF2020-010040 od společnosti Union Tool. Dosažené výsledky tohoto nástroje jsou uspokojivé nicméně v porovnání s nástrojem 6C Tools má především nižší životnost a není ani zdaleka tak efektivní. O životnosti nástroje vypovídá fakt, že hned po první drážce došlo k lomu špičky břitů, ovšem po bližším zkoumání bylo zjištěno, že nástroj byl s největší pravděpodobností špatně upnut ve vřetenu stroje. Zjištění, zda se opravdu jednalo o špatné uložení nástroje bude předmětem dalšího testování. Z hlediska kvality obrobeného povrchu jsou rozdíly s nástrojem 6C Tools minimální. Ovšem rozdíl mezi drsností, kterou uvádí výrobce ve svých propagačních materiálech ($Ra\ 0,010\ \mu m$) a drsností naměřenou po experimentu je znatelný. Bohužel výrobce se nezmiňuje, jakou strategií docílil takto kvalitního povrchu a vzhledem k tomu, že také rezné podmínky pro experiment byly voleny jinak, než uvádí výrobce, jsou tyto výrazné rozdíly zcela na místě. Pro docílení stejné kvality povrchu bude potřeba provést zcela nový experiment za odlišných podmínek.

Poslední nástroj, který byl předmětem testování, byl nově navržený a zkonstruovaný společností PM-Tech. Tento nástroj se do jisté míry inspiroval konstrukcí nástroje 6C Tools. Celkem byly použity 3 nástroje, ale pouze dva byly schopny dokončit drážku až do konce. U prvního se odpálil segment z polykrystalického diamantu vlivem generování vysokých teplot při obrábění. Zbylé dva nástroje drážky dokončily, ale u obou byly po bližším přezkoumání vylámané zuby. Vylámané zuby jsou výsledkem nevhodně volené geometrie, a to především ve smyslu stoupání šroubovice, nevhodně voleného úhlu stoupání šroubovice. Jelikož nástroj je pravořezný a má levé stoupání šroubovice, tlačí třísky směrem dolů pod nástroj namísto ven od nástroje a tím dochází ke generování značných rezných sil, obzvláště pak při výjezdu z drážky. Z hlediska jakosti povrchu pak obstála fréza podobně dobře jako předchozí zmíněné nástroje. Pro další testování tohoto nástroje je nutné opravit konstrukční nedostatky.

Na základě excelentních výsledků v oblasti jakosti, produktivity a životnosti nástroje, lze konstatovat, že toroidní frézy 6C Tools je možné plnohodnotně využít pro aplikaci frézování slinutého karbidu. Ve srovnání s metodou EDM vítězí frézování už jen z hlediska produktivity, kdy tato drážka trvala vyrobit 6 minut, a v případě EDM metody by se doba výroby drážky pohybovala v řádu desítek minut.

Seznam použitých zdrojů

- [1] PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [2] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. Nauka o materiálech. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-874-9.
- [3] Kompozitní materiály. Západočeská univerzita [online]. [cit. 2023-10-3]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
- [4] Obrábění materiálů. Sandvik Coromant [online]. [cit. 2023-20-5] Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece-materials>
- [5] ČSN ISO 513: Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů určeným ostřím – Označování skupin a podskupin použití. 2015. Praha.
- [6] Bearings Technology. Ceramic Seal Rings, Bearings and Sealing Technology in Automotive Engineering [online]. CeramTec-Platz 1-9: CeramTech, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.ceramtec-industrial.com/en/products-applications/bearings-and-sealing-technology/automotive-engineering>
- [7] Polymer Composites. Polymer Matrix Composites [online]. London W1T 5HF: Hindawi, 2020 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://matmatch.com/learn/material/polymer-matrix-composites.com>
- [8] Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-97-2299-4-6.
- [9] Zkoušky tvrdosti. Západočeská univerzita [online]. [cit. 2023-10-3]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [10] BORO VAN, Petr. Trískové obrábění. T-support [online]. Praha 6: technology-support, 2018 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/triskove-obrabeni-4?langchang=11>
- [11] 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)
- [12] DAVIM, J. Paulo, editor. Machining of hard materials. London: Springer, 2011. ISBN 978-1-84996-449-4.
- [13] Obrábění v extrémních podmínkách. Technický týdeník [online]. Praha: walter-tools, 2019 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-jejich-prislusenstvi/vyssi-produktivita-s-tvrdym-soustruzenim_48111.html
- [14] Hrubé vyvrtávání. Sandvik Coromant [online]. Brno: Sandvik Coromant, 2019 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/tools/boring-and-reaming-tools/fine-boring-tools/fine-boring-head-391-37-392-410>
- [15] Lapování. ELUC [online]. Praha: ELUC, 2021 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1385>
- [16] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část [online]. 2005 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijniopory/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf

- [17] COPTTEL. Nekonenční metody obrábění. Coptel [online]. Zlín: Mechatronik pro Zlínský kraj, 2022 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://coptel.cz/pluginfile.php/16439/mod_resource/content/1/10%20Nekonven%C4%8Dn%C3%AD%20metody%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%281%29.pdf
- [18] MOHAMED, Fakkir a K. LENIN. MFG-246 Application Of Taguchi Design Method To Optimize The Wire Electrical Discharge Machining Parameters. Researchgate [online]. Tamil Nadu: CDAMIES, 2018, s. 6 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/342146546_MFG-246_Application_Of_Taguchi_Design_Method_To_Optimize_The_Wire_Electrical_Discharge_Machining_Parameters
- [19] DOLEŽEL, Zdeněk. Elektroerozivní obrábění. Nástrojárna CB [online]. České Budějovice: Nástrojárna CB, 2017, s. 6 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.nastrojarnacb.cz/vyroba/elektroeroze/>
- [20] LEVY, G.N. a W. WERTHEIM. EDM-Machining of Sintered Carbide Compacting Dies. In: ScienceDirect [online]. Losone/Switzerland: Elsevier, 2008, s. 6 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850607616126?via%3Dihub>
- [21] NOVOTNÝ, Jan. Elektroerozivní obrábění. Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Pavel Novák, Ph.D.
- [22] Electro-discharge machining. In: Engineering clicks [online]. King's Lynn, Spojené království: Rivmedia, 2020 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/electro-discharge-machining-edm/>
- [23] FORMAN, Vojtěch. Ultrazvukové obrábění. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Pavel Novák, Ph.D.
- [25] PCD Torus Mill. 6C Tools [online]. Dietlikon: 6C Tools AG, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://6c-tools.ch/en/produkte/fraeser/fraeser-r0-1/>
- [26] Tungsten Carbide End Mills UNIMAX Series [online]. Union Tool Europe S.A. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.uniontool.com/technical-data/catalogue/Metal%20working%20tools/UDC%20Vol.12%20Low%20Res.pdf>
- [27] DMU 40 eVo linear. DMG MORI [online]. Brno: DMG MORI, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu-evo/dmu-40-evo-linear>
- [28] BORSUK, Matěj. Proč používat strategii trochoidního frézování?. Průmyslové spektrum [online]. 2018, 2 [cit. 2023-05-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/proc-pouzivat-strategii-trochoidniho-frezovani>
- [29] GRYČ, Ing. Jan. Evoluce v trochoidním frézování. Průmyslové spektrum [online]. 2017, 2 [cit. 2023-05-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/evoluce-v-trochoidnim-frezovani>
- [30] Hladinové obrábění. ISSUU [online]. Horoměřice: Kosmas, 2023, s. 2 [cit. 2023-05-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://issuu.com/kosmas-cz/docs/515961_99
- [31] Fang, Z. Z.; et al. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide. [Online] 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.07.011> (accessed Oct 05, 2023).

Seznam příloh

Příloha č.1 – Porovnávací snímky nástrojů před a po obrábění

Příloha č.2 – Technické parametry univerzální obráběcího centra DMG MORI DMU 40 eVo linear

Příloha č. 1

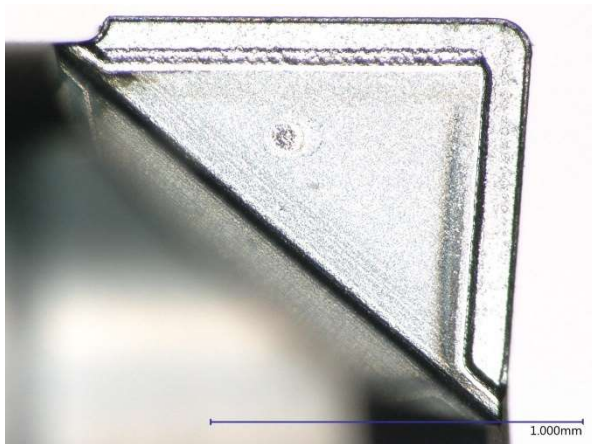
Porovnávací snímky nástrojů před a po obrábění



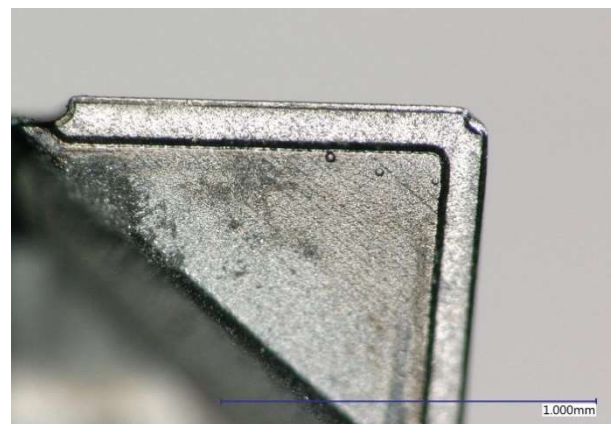
Obrázek 36 - Nástroj 6C Tools před obráběním



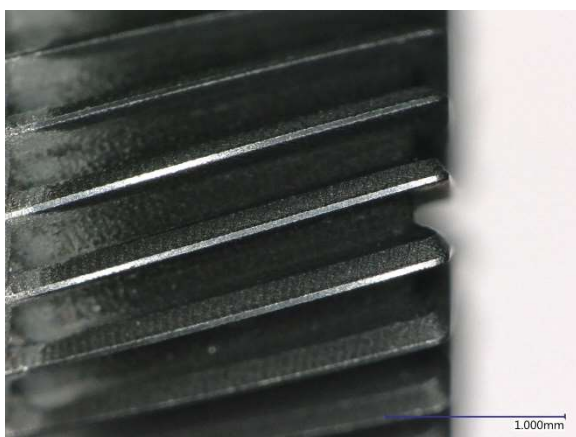
Obrázek 40 – Nástroj 6C Tools po obrábění



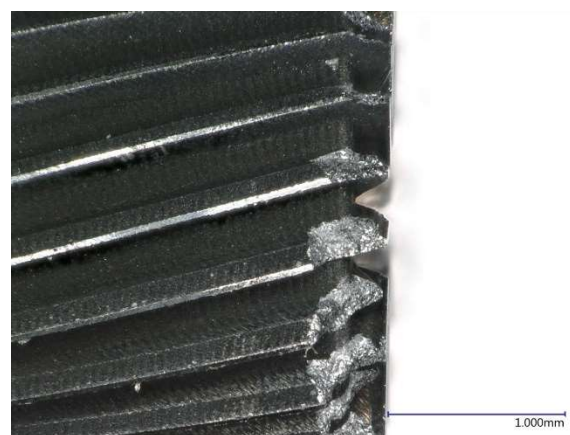
Obrázek 41 – Zub nástroje Union Tool před obráběním



Obrázek 39 – Zub nástroje Union Tool po obrábění



Obrázek 38 – Nástroj PM-Tech před obráběním



Obrázek 37 - Nástroj PM-Tech po obrábění

Příloha č. 2

Technické parametry univerzální obráběcího centra DMG MORI DMU 40 eVo linear

DMU eVo series

Technical data

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

*Optional

Obrázek 42 - Technické specifikace DMG MORI DMU 40 eVo linear