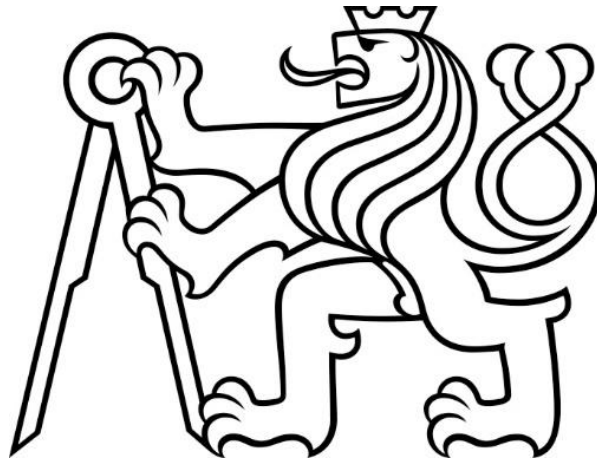


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A

METROLOGIE



## Bakalářská práce

Nástroje pro technologii mikrofrézování

Autor: Lukáš Flíček

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

Hlavní konzultant: Ing. Petr Mašek, Ph.D.

**Praha 2021**



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Flíček** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **484721**  
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
 Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
 Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Nástroje pro technologii mikrofrézování**

Název bakalářské práce anglicky:

**Cutting tools for micromilling**

Pokyny pro vypracování:

1. Popis třískového obrábění a technologie frézování
2. Řezné nástroje pro mikrofrézování a jejich aplikační oblasti
3. Testování vlastností vybrané mikrofrézy
4. Vyhodnocení testů

Seznam doporučené literatury:

Doporučená literatura:

- [1] MÁDL, J.: Teorie obrábění. Fakulta strojní, ČVUT Praha, 1990. 156 s.  
 [2] MÁDL, J.: Experimentální metody v teorii obrábění. Fakulta strojní, ČVUT Praha, 1989. 153 s.  
 Další odborná literatura na téma obrábění a frézování  
 Katalogy a další podklady výrobců nástrojů pro mikrofrézování.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

**Ing. Petr Mašek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

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

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Nástroje pro technologii mikrofrézování“ vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady, které jsou uvedené v seznamu citací.

V Praze dne:

.....

## Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá předběžným experimentálním stanovením vlivu řezných nástrojů nového typu na silové působení při procesu mikrofrézování. V rešeršní části jsou prezentovány řezné nástroje a mikronástroje pro frézování a aplikace diamantové řezné hrany z PKD u mikrofrézování. Práce dále popisuje analýzu geometrie vybraných nástrojů a dále nové řešení mikronástroje.

## Klíčová slova

Obrábění, mikrofrézování, řezné nástroje, řezné mikronástroje, PKD

## Annotation

This bachelor's thesis is based on preliminary experimental determination of influence of a new type cutting tool on the force actuation of the process micromilling. In the research part are presented cutting tools and microtools for milling and application with the cutting edge PKD at the micromilling. The work further shows the analysis geometry of the selected tools and further the new resolution for microcutter.

## Key words

Cutting, microcutting, micromilling, cutting tools, cutting microtools, PKD

## Seznam zkratek a symbolů

Označení	Název	Jednotka
$v_c$	Řezná rychlost	[m/min]
$v_f$	Rychlost posuvu	[mm/min]
$a_p$	Axiální hloubka řezu	[mm]
$a_e$	Radiální hloubka řezu	[mm]
$n$	Otáčky	[ot/min]
$f_z$	Posuv na zub	[mm]
$F$	Celková řezná síla	[N]
$F_c$	Řezná síla	[N]
$F_f$	Posuvová síla	[N]
$F_p$	Pasivní síla	[N]
$R_a$	Střední aritmetická úchylka profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$F_x$	Síla v ose x	[N]
$F_y$	Síla v ose y	[N]
$F_z$	Síla v ose z	[N]
$F_{x\max}$	Maximální síla v ose x	[N]
$F_{y\max}$	Maximální síla v ose y	[N]
$F_{z\max}$	Maximální síla v ose z	[N]
$R^2$	Hodnota spolehlivosti	[-]

## Obsah

Prohlášení .....	3
Anotace .....	4
Annotation .....	5
Seznam zkratk a symbolů .....	6
1. Úvod.....	10
2. Obrábění a mikrofrézování.....	11
2.1 Obrábění .....	11
2.1.1 Definice .....	11
2.1.2 Základní pojmy .....	12
2.1.3 Frézování.....	14
2.1.4 Řezné materiály .....	16
2.1.5 Síly při obrábění .....	17
2.2 Mikrofrézování.....	21
2.2.1 Požadavky technologie mikrofrézování.....	21
2.2.2 Mikrofréza.....	22
2.2.3 Porovnání s ostatními způsoby obrábění .....	24
2.2.4 Použití mikrofrézování .....	25
3 Přehled vybraných výrobců mikronástrojů a jejich produktů.....	26
3.1 FRAISA SA.....	26
3.1.1 Válcové mikrofrézy.....	26
3.1.2 Kulové mikrofrézy .....	27
3.1.3 Toroidní mikrofrézy.....	27
3.2 Sandvik Coromant.....	27
3.2.1 Válcové mikrofrézy.....	28
3.2.2 Kulové mikrofrézy .....	28
3.3 Seco Tools .....	29

3.3.1	Válcové mikrofrézy.....	30
3.3.2	Kulové mikrofrézy .....	30
3.4	WNT .....	31
3.4.1	Válcové mikrofrézy.....	31
3.4.2	Kulové mikrofrézy .....	32
3.4.3	Toroidní mikrofrézy.....	32
3.5	Silmax S. p. A. ....	33
3.5.1	Kulové mikrofrézy .....	33
3.5.2	Toroidní mikrofrézy.....	33
3.6	Telcon Diamond Ltd. ....	34
3.6.1	Kulové mikrofrézy .....	35
3.7	NS TOOL Co., Ltd. ....	35
3.7.1	Válcové mikrofrézy.....	35
3.7.2	Kulové mikrofrézy .....	35
3.7.3	Toroidní mikrofrézy.....	35
3.8	Kyowa Co., Ltd.....	36
3.8.1	Válcové mikrofrézy.....	36
3.8.2	Kulové mikrofrézy .....	36
3.9	ZECHA Hartmetall – Werkzeugfabrikation GmbH .....	37
3.9.1	Válcové mikrofrézy.....	38
3.9.2	Kulové mikrofrézy .....	38
3.9.3	Toroidní mikrofrézy.....	39
3.10	PM-TECH s.r.o.....	39
3.10.1	Válcové mikrofrézy.....	39
3.10.2	Kulové mikrofrézy .....	40
3.11	Hoffmann Group .....	40
3.11.1	Válcové mikrofrézy.....	40



3.11.2	Kulové mikrofrézy .....	40
4	Aplikace technologie mikrofrézování.....	41
4.1	Aplikace.....	41
4.1.1	Medicína.....	41
4.1.2	Elektrotechnika .....	42
4.1.3	Obecné aplikace.....	43
4.2	Základní charakteristiky geometrie břitu nástroje .....	43
4.2.1	Obrábění hliníku.....	44
4.2.2	Obrábění kompozitu .....	44
4.2.3	Obrábění plastů.....	44
4.3	Aplikace mikrofrézování PKD .....	44
4.4	Shrnutí řešeršní části.....	44
5	Experimentální testování vlastností vybraného nástroje .....	46
5.1	Realizace experimentu.....	46
5.1.1	Obráběcí stroj.....	47
5.1.2	Obráběcí nástroj.....	47
5.1.3	Upínání nástroje.....	48
5.1.4	Obráběný materiál .....	48
5.1.5	Měření sil .....	49
5.1.6	Videozáznam .....	50
5.2	Zpracování výsledků experimentálního testování.....	51
5.2.1	Grafické hodnocení experimentálního testování .....	52
5.2.2	Hodnocení experimentálního testování regresní analýzou.....	56
	Závěr .....	57
	Citovaná literatura .....	58
	Seznam obrázků.....	63
	Přílohy – Souhrnná tabulka.....	65

## 1. Úvod

Poptávka po miniaturizaci dílů v posledních desetiletích velmi stoupá, zejména v oborech bioinženýrství, mikroelektronika a letectví. Mezi hlavní výrobní proces, který dosahuje mikrometrických měřítek, je mikrofrézování, které se považuje za jedno z nejslibnějších mikro-výrobních procesů, ovšem jeho spolehlivost a předvídatelnost si vyžaduje ještě další výzkum. Mikrofrézování se používá jak k výrobě nástrojů a forem, tak i k výrobě nedokončených dílů anebo již konečných výrobků. Jak je uvedeno dále v práci, nejvíce obráběný materiál mikrofrézováním je hliník, proto je práce zaměřena na současný stav techniky v tomto odvětví [1] [2].

Práce je zaměřena na odvětví obrábění zvané mikrofrézování. Cíl práce je zpracování přehledu současného vývoje techniky v mikrofrézování pro účel návrhu PKD frézy malého průměru. Motivace práce je podpora při vývoji nové řady fréz. Práce se skládá ze dvou částí, a to rešeršní a experimentální.

Rešeršní část práce zahrnuje základní definice a základní pojmy pro obrábění a mikrofrézování. Dále jsou uvedeny a definovány rezné nástroje a mikronástroje pro frézování. Práce dále nabízí přehled předních světových výrobců mikronástrojů, základní portfolio jejich produktů v dané oblasti, zajímavé řešení okolo mikronástrojů a následně aplikace PKD rezné hrany u mikrofrézování.

Ve druhé „experimentální“ části je popsáno, jak byl realizován experiment s novou PKD frézou, která byla vyrobena na základě poznatků z rešeršní části práce. Dále je v této části popsáno, jak se experiment vyhodnocoval a jaké výsledky z toho vyplývají.

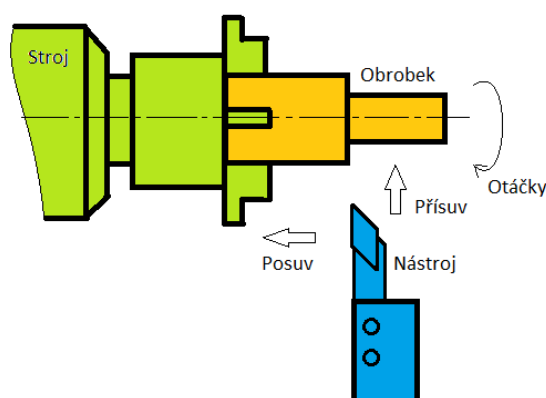
## 2. Obrábění a mikrofrézování

### 2.1 Obrábění

#### 2.1.1 Definice

Fyzikální podstata obrábění je odebrání materiálu, tzv. „přídavku na obrábění“, za účelem dosažení požadovaného geometrického tvaru, dané přesnosti a odpovídající kvality obrobené plochy za použití obráběcího nástroje a vzniká obráběný díl (dále obrobek). Metody se dále dělí na hrubovací a dokončovací. Hrubovací metody jsou operace s velkými úběry materiálu a s menšími nároky na přesnost a drsnost. Dokončovací metody se používají pro dosažení vyšší přesnosti a lepší drsnosti. Proces obrábění je také dále dělen podle technologie úběru materiálu. První technologie, kterou se bude práce zabývat, je třísková (mechanická). Druhá technologie, nekonvenční, je technologie fyzikálně-chemická, kde je místo mechanické práce pro úběr materiálu používán některý fyzikální nebo fyzikálně-chemický princip. Například u elektroerozivního obrábění dochází k úběru materiálu za pomoci opakujícího se elektrického výboje, a díky vysoké energii materiál taje a odpařuje se. A poslední technologie, speciální, jsou spíše tvářecí, které dodávají konečný tvar obrobeným plochám (válečkování, leštění, hlazení) [3].

Obráběcí soustava se skládá z obráběcího stroje (S), řezného nástroje (N), obrobku (O), a v některých případech i přípravku (P). Nebo se také soustava popisuje jen třemi částmi procesu (neobsahující přípravek) (Obrázek 1). Do této soustavy přivádí obráběcí stroj mechanickou energii potřebnou pro hlavní a vedlejší řezné pohyby (řezná rychlost, posuv a další). Řezný nástroj s definovanou geometrií břitu a určitou řezivostí utváří třísku. Obrobek je samotná přetvářená část procesu. A někdy používaný přípravek, který slouží ke zvýšení jakosti nebo produktivity výroby různými způsoby [4].

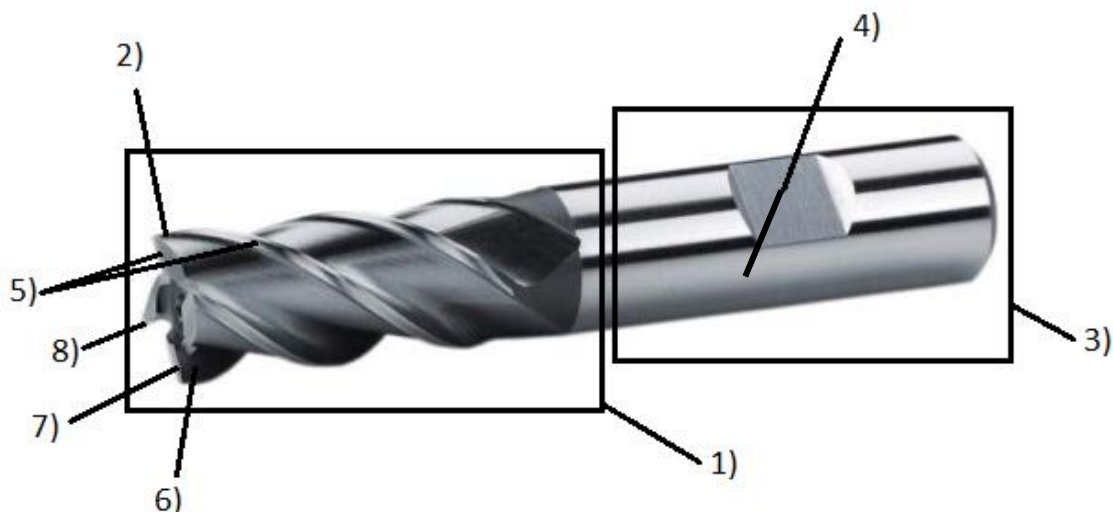


Obrázek 1 - Schematické znázornění obráběcí soustavy SNO (zde bez přípravku P)

## 2.1.2 Základní pojmy

Obrobek je obráběný nebo již obrobený díl, vznikající během obráběcího procesu. Základní prvky obrobku jsou obráběná plocha, obrobená plocha a přechodová plocha, která bývá někdy označována jako plocha řezu. Obráběná plocha je část obrobku, která je během obráběcího procesu z obrobku odstraňována. Obrobená plocha je plocha, kde působil řezný nástroj a dodal tak této ploše výsledné rozměry. Přechodová plocha je okamžitá plocha řezu, kde působí ostří daného řezného nástroje během jedné otáčky nebo zdvihu [4] [5].

Řezný nástroj je aktivní částí obráběcího procesu. Řezný nástroj společně s obrobkem, díky své interakci, tvoří řezný proces. Řezání je uskutečňováno pomocí pracovní části řezného nástroje (břitu), který posuvem nebo přísuvem vniká do obrobku a odděluje od něj části ve tvaru třísek. Řezný nástroj se skládá z několika částí (Obrázek 2) [4] [5] [6]:



Obrázek 2 - Popis řezného nástroje – fréza [21]

- 1) Řezná část – funkční část nástroje obsahující hlavní prvky pro tvorbu třísky. Do této skupiny patří čelo, hřbet a průsečnice těchto rovin zvaná ostří. U vícebřitých nástrojů je to tak, že každý zub nástroje má svou vlastní řeznou část [7].
- 2) Břit – je prvek řezné části nástroje. Jedná se o klín mezi čelem a hřbetem řezného nástroje. U nástrojů bývá označován jako  $\beta_0$  [7].
- 3) Upínací část – někdy nazývána stopka, je část obráběcího nástroje sloužící k upínání nástroje do obráběcího stroje. Někdy se uvádí ještě rozdělení upínací části na upínací část a ustavovací část, ale například u vrtáků, výstružníků, závitníků nebo fréz je ustavovací část totožná s upínací [7].

- 4) Základna – slouží pro umístění a orientaci nástroje při výrobě, kontrole a ostření. U frézy je to válcová broušená plocha [7].
- 5) Hřbet nástroje – část nástroje směřující během obráběcího procesu k obráběné ploše. Skládá se z jedné nebo více ploch. Dělí se na hlavní a vedlejší, kde hlavní hřbet je otočen k ploše obráběné a vedlejší hřbet k ploše obrobené [7].
- 6) Čelo nástroje – část obráběcího nástroje, po kterém odchází tříska. Jedná se o plochu nebo více ploch. Průsečnice rovin čela a hřbetu tvoří ostří [7].
- Utvařec třísky – součást čelní plochy sloužící k lámání třísky, aby nedocházelo k tvorbě plynulých třísek. Na tomto obrázku frézy není utvařec na čelní ploše zřetelný (Obrázek 2) [7].
- 7) Ostří nástroje – jedná se průsečnici rovin hřbetu a čela. Je to přímka, která iniciuje samotný řezný proces. Ostří se rozděluje podle toho, kde se nachází. Průsečnice hlavního hřbetu a čela se nazývá hlavní ostří, které je přímo řezací ostří. Průsečnice vedlejšího hřbetu a čela se nazývá vedlejší ostří a je otočeno k obrobené ploše [7].
- 8) Špička nástroje – průsečík přímek hlavního a vedlejšího ostří. Může být sražená nebo zaoblená (poloměr špičky) [7].

Pohyby u obrábění jsou další hlavní faktory obráběcího procesu. Bez těchto pohybů by nemohl být obráběcí proces uskutečněn. Některé zdroje uvádí pohyby jako kinematiku procesu. Dělíme je na hlavní a vedlejší. Na obrázku jsou pojmenovány tyto pohyby (Obrázek 3) [3] [4] [5] [6]:



Obrázek 3 - Řezné pohyby při čelním frézování [39]

- **Hlavní řezný pohyb** – vzájemný pohyb mezi obrobkem a nástrojem realizovaný obráběcím strojem. Směr je definován jako směr okamžitého hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří nástroje. U soustružení provádí tento pohyb obrobek

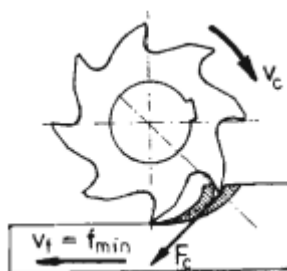
a například u frézování nástroj (fréza). Může být otáčivý, přímočarý nebo složený. Tento pohyb popisuje řezná rychlost  $v_c$  a je popisována, jako okamžitá rychlost mezi ostřím nástroje a obrobkem. Závisí na materiálu nástroje a obrobku, velikosti třísky a druhu prováděné operace [7].

- **Vedlejší řezný pohyb (posuvový)** –pohyb mezi obrobkem a nástrojem. Posuv udává hodnotu, o jakou se posune nástroj nebo obrobek vůči sobě. Jsou různé druhy posuvu, například posuv na otáčku, posuv za minutu, posuv na zub nebo posuv na zdvih [7].
- **Vedlejší řezný pohyb (přisuvný)** – pohyb nástroje do obrobku, který umožňuje nastavit polohu nástroje a obrobku před obráběním [7].

### 2.1.3 Frézování

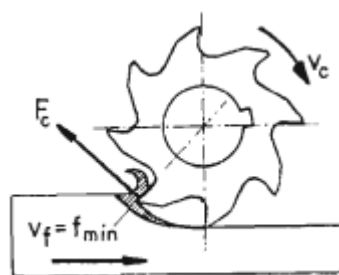
Podstata frézování je ubírání materiálu obrobku jednotlivými břity frézy. Fréza koná hlavní řezný pohyb a vedlejší řezný pohyb koná obrobek [7].

Frézování patří v dnešní době mezi jednu z nejrozšířenějších technologií obrábění rovinných a tvarových ploch. Hlavní řezný pohyb u této technologie zajišťuje nástroj, který se při frézování nachází při každé jedné otáčce nástroje v přerušovaném řezu, do kterého za jednu otáčku stihne vstoupit i vystoupit podle počtu břitů nástroje. Díky tomuto opakujícímu se vnikání, je nástroj velmi namáhán intenzivními silovými a tepelnými rázy. Tyto odlišnosti, na rozdíl od soustružení (kde je nůž většinou ve stálém záběru), musíme brát v potaz a přizpůsobit tomu i naše další řešení, aby se jednalo o efektivní provedení [7].



Obrázek 4 – Schéma sousměrného frézování [7]

Podle orientace osy frézovacího nástroje vůči obrobku se rozděluje frézování na válcové a čelní. U válcového frézování obrábí fréza svým obvodem a osa rotace frézy je rovnoběžná s rovinou obrobku. Naopak u čelního frézování je osa rotace frézy kolmá na rovinu obrobku. Výsledný řezný pohyb je tedy složen z otáčivého pohybu nástroje a přímočarého posuvu obrobku [7].



Obrázek 5 - Schéma nesousměrného frézování [7]

Podle orientace otáčení nástroje  $v_c$  a posuvu  $v_f$  obrobku se rozlišuje sousměrné a nesousměrné frézování. O sousměrné (sousedné) frézování se jedná, když směr výsledné řezné rychlosti  $v_c$  je shodný s posuvem obrobku  $v_f$  (Obrázek 4). U sousměrného frézování zub frézy zabírá třisku od největšího průřezu po nejmenší, proto u tohoto frézování vznikají velké rázy na nástroj. Směr řezné rychlosti příznivě působí na upnutí obrobku, jelikož obrobek je současně přitlačován ke stolu stroje. Tento postup ovšem vyžaduje velmi tuhé obráběcí stroje. Je všeobecně dáno, že sousměrným frézováním vzniká lepší povrch obrobku než u nesousměrného [7].

Druhá možnost, nesousměrné (nesousledné) frézování, probíhá, když je směr řezné rychlosti  $v_c$  opačný než směr posuvu obrobku  $v_f$  (Obrázek 5). Na nástroj již nevznikají takové rázy, ale naopak působí na hřbet břitu tření díky posuvu do obrobku. Toto frézování působí negativně i na upnutí obrobku, jelikož vytahuje samotný obrobek, díky řezné síle směřující nahoru, a tak je potřeba lepší upnutí obrobku. Při čelním frézování jsou používány obě metody,



Obrázek 6 - Schéma čelního frézování [9]

pokud se odřezávaný materiál nachází na obou stranách roviny procházející osou nástroje rovnoběžnou se směrem posuvu (Obrázek 6) [7].

#### 2.1.4 Řezné materiály

Dnešní trh nabízí veliký sortiment materiálů. Obecně materiál na nástroj musí mít velkou tvrdost, která zvyšuje odolnost proti opotřebení a celkovou životnost. Nástroj musí být houževnatý, aby vydržel rázy při frézování. Tyto dvě vlastnosti si vzájemně odporují, proto se stále hledají další materiály, materiály budoucnosti. Dále jsou uvedeny nejpoužívanější řezné materiály [8].

##### *Rychlořezné oceli (HSS)*

Jsou to modifikované nástrojové oceli. Mají vyšší tvrdost a snášejí vyšší teploty. Tvrdost je dána tepelným zpracováním a obsahem karbidotvorných prvků jako jsou wolfram, chrom, vanad a molybden. Pro vylepšení řezných vlastností se některé nástroje vyrábí práškovou metalurgií [8].

##### *Slinuté karbidy (SK)*

Slinuté karbidy jsou nejrozšířenější materiál používaný na nástroje. Vyrábějí se práškovou metalurgií, jejíž princip spočívá ve spékání. Základní karbid je karbid wolframu a dále se přidávají karbidy titanu nebo tantalu. Slabina SK je pojivo, a to kobalt, protože s rostoucím obsahem kobaltu se zvyšuje pevnost v ohybu, ale klesá tvrdost. Na SK se používají řezné povlaky, které zlepšují řezné vlastnosti. V současnosti se používají z 90 % povlakované SK [8].

##### *Řezná keramika*

Řezná keramika má vysokou tvrdost, odolnost proti vysokým teplotám, odolnost proti mechanickému namáhání a opotřebení, trvanlivost, řezivost a odolnost proti korozi. Nevýhoda řezné keramiky je její křehkost s malou pevností v ohybu. Proto zabírá jen relativně malý podíl trhu s nástroji. Vyrábí se podobným procesem jako SK. Na keramiku se používají povlaky především pro zvýšení houževnatosti [9].

##### *Cermety*

Jedná se o sloučení řezné keramiky a kovu. Je zde snaha o větší pevnost v ohybu a zvýšení houževnatosti [9].



### *Kubický nitrid bóru (KNB)*

Tento materiál má velmi vysokou tvrdost, a to i za vysokých teplot (až 2000 °C). Má vyšší i houževnatost, je chemicky stálý a má lepší odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Problémem je vysoká cena, ale lze tímto materiálem obrábět například i kalené oceli [8].

### *Polykrystalický diamant (PKD) a CVD diamanty*

Práce je zaměřena především na nástroje s PKD řeznou hranou, proto tato část nástrojových materiálů bude více rozvedena. Diamant je nejtvrdší minerální materiál, proto je vhodný pro průmyslové potřeby. Dělí se na přírodní a syntetický. Přírodní diamant není vhodný na průmyslové užití díky nestejnorodým vlastnostem a omezeným množstvím diamantu [10].

Syntetické diamanty se dnes vyrábí ve dvou formách: HPHT a CVD. HPHT spočívá ve stlačování a pečení uhlíku za vzniku diamantu ve formě kruhových plošek o průměru 50 mm. Druhá metoda CVD spočívá v chemické reakci, při které kondenzují uhlíkové páry na vhodném povrchu a páry ztvrdnou v diamantový povlak [10].

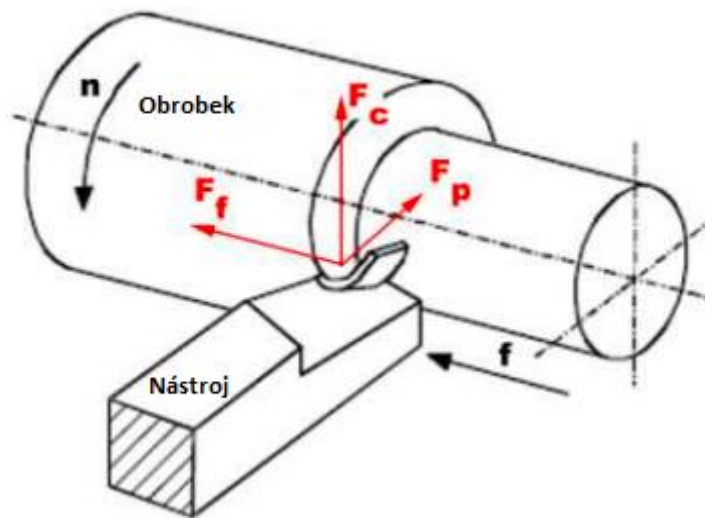
PKD, jako polykrystalický diamant s pojivem, je vyráběn právě metodou HPHT. Vzniká fúzním slinováním diamantového prášku s vhodným pojivem, nejčastěji na bázi kobaltu, na podpůrném nosiči ze slinutého karbidu. Oproti CVD zpracování má horší tvrdost, ale má lepší houževnatost. Tato metoda je používána na nástroje pro jemné obrábění načisto a frézování všech barevných kovů a neželezných materiálů. Tloušťka vrstvy se pohybuje od 0,5 mm do 1,5 mm [11].

Výhoda použití PKD spočívá v nahodilém uspořádání krystalů diamantu v pojivu, protože PKD vrstva vzniká na povrchu slinováním prachu s pojivem, a tím na sebe nenavazují jednotlivé krystaly. Poté je zde také nevýhoda v samotném pojivu, jelikož pojivo je náchylné k oxidaci a snížení tvrdosti. Použití je hlavně u obrábění hliníku, křemíku, grafitu a u jiných abrazivních nekovových materiálů [12].

#### 2.1.5 Síly při obrábění

Při obrábění klade břítu materiál řezný odpor, který musí být překonán celkovou řeznou silou. Celková síla se dále dělí na složky, které jsou: řezná síla, posuvová síla, pasivní síla. Je to dynamický jev, kde se hodnota síly v čase mění. Je tomu tak i za konstantních řezných podmínek díky drsnosti obráběné plochy, rozdílnými mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu a mechanikou tvorby třísky. Při vniknutí nože do řezu začne okamžitá velikost všech

složek sil kolísat kolem průměrné hodnoty a stanovením průměrné hodnoty síly odhadujeme její střední hodnotu. Odchyly při kolísání můžeme pochopit jako rozptyly všech složek sil pohybující se v jednotkách, resp. desítkách procent. Tyto síly lze odhadnout početně nebo zjistit experimentálně. Celková výsledná řezná síla  $F$  je výslednicí řezné síly  $F_c$ , posuvové síly  $F_f$  a pasivní síly  $F_p$ . Řezná síla působí ve směru řezné rychlosti, posuvová síla ve směru posuvu rovnoběžně s osou obrobku a pasivní síla působí ve směru přísuvu do osy obrobku (Obrázek 7) [13] [14].



Obrázek 7 - Rozklad sil při podélném soustružení [14]

### Experimentální určení sil

Experimentální určení řezných sil je významná část výzkumu v teorii obrábění. Tyto zjištěné síly mají velký význam při konstrukci obráběcích strojů, nástrojů, upínacích prostředků a při optimalizaci řezných podmínek. Spočívá to ve zjišťování složek řezných sil, resp. kroutících momentů, v závislosti na pracovních podmínkách. Měření sil lze brát z mnoha pohledů, například rozdělení podle způsobu měření na přímé a nepřímé. Přímé měření je prováděno přímo dynamometrem a u nepřímého měření se síla zjišťuje z příkonu při obrábění [15].

Přímé měření v dnešní době je prováděno měřením deformace jednoho z členů soustavy SNOP. Existují dvě možnosti provedení. První možnost provedení je zeslabením jednoho z prvků SNOP, například vřetena, které se stává samotným dynamometrem. Druhá možnost je vložení přídatného zařízení do soustavy SNOP, a to samotného dynamometru [15].

## Dynamometry

Každý dynamometr by měl vyhovovat, z hlediska konstrukce a celkového provedení, základním požadavkům, které jsou na něj kladeny. Hlavní, co musí dynamometr zaručit, je nezávislost měřené veličiny na provozních vlastnostech měřícího zařízení a musí ve zvoleném rozsahu a s určitou přesností měřit sledovanou veličinu [15].

Aby dynamometr vyhovoval obecným požadavkům na něj kladeným, musí být vhodně zvoleny [15]:

- Tuhost dynamometru – musí být dostatečně veliká, aby způsobované deformace dynamometru neovlivňovaly měření řezných sil. U mikrofrézování jsou síly velmi malé, proto i malé ovlivnění by bylo chybné [15].
- Citlivost dynamometru – úzce souvisí s tuhostí dynamometru, citlivostí použitého snímače a měřící aparatury. Musí být dobře zvolena, aby byly zachyceny všechny způsobované deformace. U mikrofrézování musí být použit zesilovač sil, aby byly síly měřitelné [15].
- Setrvačnost měřící soustavy – žádaná je co nejmenší setrvačnost soustavy při dynamickém měření síly. Největší vliv na charakter výstupního signálu má tlumení a také vlastní frekvence dynamometru [15].
- Rozsah měření – je dán minimální a maximální měřenou silou. Je omezen maximálním dovoleným zatížením deformačních elementů. S větším rozsahem dynamometru se snižuje citlivost. Mikrofrézování má rozsah velmi nízko [15].
- Přesnost měření – přesnost měřícího zařízení musí být vždy větší, než požadovaná přesnost výsledků měření. Snaha o co nejmenší ovlivňování jednotlivých složek řezných sil. Musí se zamezit vlivy, které by měření znehodnocovaly, jako je vliv opotřebení a další [15].
- Stabilita cejchování – je určena stálostí naměřených hodnot v cejchovní křivce, která by měla mít ideálně lineární průběh a minimální hysterezi [15].

Druhy dynamometrů:

**Mechanické dynamometry** – princip mechanických dynamometrů je snímání deformace mechanickým způsobem, a to například s použitím číselníkového úchylkoměru. Tyto dynamometry jsou velmi jednoduché, spolehlivé, vykazují stálé údaje a vyznačují se lineární závislostí mezi silou a naměřenými údaji. Nevýhodou je velmi nízká vlastní frekvence

(2-10 Hz), což neumožňuje použití pro dynamické metody. Nevýhoda je také závislost měření na teplotě, kdy při vyšší teplotě vzrůstá i deformace. Pro náš experiment jsou tyto dynamometry nevyhovující, protože je nelze použít pro dynamické metody měření [15].

**Hydraulické dynamometry** – zde je princip v přenosu účinku měřené síly nebo momentu na píst nebo membránu, což způsobuje změnu tlaku v kapalině a tento tlak je pak snímán. Výhoda je v konstrukčním provedení, které je jednoduché. Nevýhodou je malá citlivost, nutné dokonalé utěsnění hydraulického systému a velká setrvačnost, která neumožňuje použití pro dynamické měření. Pro náš experiment s frézou s malým průměrem jsou nevyhovující, kvůli malé citlivosti a nemožnosti použití pro dynamické metody [15].

**Pneumatické dynamometry** – podstata těchto dynamometrů je měření systémem klapka-tryska, kde se využívá dynamických vlastností vzduchu protékajícího štěrbinou. Založeno je to na měření tlakové nebo průtokové změny vzduchu v závislosti na změně mezery mezi klapkou a tryskou v čidle. Výhoda těchto dynamometrů je jednoduchost, snadná obsluha a údržba, velká spolehlivost a citlivost. Nevýhoda je udržování stabilního přívodu vzduchu o potřebné čistotě, kde se rozlišuje provedení nízkotlaké a vysokotlaké. Nevýhoda je také ve značné setrvačnosti, kvůli čemuž nelze měření provádět pro dynamické metody. Tyto dynamometry proto nejsou vhodné pro experiment [15].

**Elektrické dynamometry** – dnes nejrozšířenější. Je zde využíváno přeměny deformace, která je převáděna na elektrickou veličinu snímačem (mechanicko-elektrický transformátor). Tyto dynamometry umožňují provést transformaci s požadovanou přesností a citlivostí i při malých deformacích, proto budou vhodné pro náš experiment. Elektrické dynamometry se dále dělí podle principu měření na odporové, indukční, kapacitní a piezoelektrické. Pro experiment nejvíce vyhovují dynamometry piezoelektrické, které fungují na principu piezoelektrického jevu, který autor Mádl popisuje: „*Tento jev je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení ve směru určité metalografické osy.*“ [15] Výhoda je v jednoduchosti, malé hmotnosti, malých rozměrech, vysokých vlastních frekvencích a vysoké citlivosti. Jsou velmi tuhé a jsou vhodné pro statické i dynamické metody. Dnes jsou to nejdokonalejší dynamometry, ale je tu nevýhoda ve vysoké ceně. Díky svým vlastnostem je to nejlepší volba pro měření sil při mikrofrézování nebo frézování frézami malých průměrů [15].

## 2.2 Mikrofrézování

Mikrofrézování lze popsat na základě velikosti řezného nástroje, kde se velikost pohybuje od 1 do 1000  $\mu\text{m}$  (Obrázek 8). Oproti klasickému frézování je zde principiální odlišnost. Tloušťka odřezávané vrstvy a velikost zrna pracovního materiálu mají stejné rozměry jako poloměr ostří. Díky tomuto nemůžeme tento proces srovnávat s obyčejnými konvenčními technologiemi a neplatí zde downscaling, který lze vysvětlit jako postup, kde k získání předpovědi, jak se bude proces chovat v malém měřítku, použijeme informace známé z větších měřítek [1].



Obrázek 8 - Mikrofréza v upínáči [18]

Přechod do třetího tisíciletí klade čím dál větší nároky na miniaturizaci dílů ve všech možných odvětvích průmyslu (automobilový průmysl, počítačový průmysl, medicína, kontrolní technika a další). Na výrobu malých dílů se dříve používaly jiné metody než mikrofrézování. Tyto metody se ale vyplatily jen při výrobě velkých množství konečných produktů [16].

Mikrofrézování se používá u aplikací, kde by dříve byly možné jen nekonvenční metody obrábění, jako je elektroerozivní metoda. V dnešní době hledají firmy stále nové směry, jak výrobu zrychlit, zkvalitnit a jak snížit náklady. Mikrofrézování se jeví jako vhodná varianta. Pokud již firmy vyrábějí na součástech malé elementy, malé geometrické útvary nebo používají pro dokončování povrchů elektroerozivní metodu, musí zvážit, jestli by se jim přechod k mikrofrézování vyplatil [17] [18].

### 2.2.1 Požadavky technologie mikrofrézování

U mikrofrézování se používají nástroje velikostí desetin milimetrů, proto je nutno vyvinout velmi vysoké otáčky (až 250000 ot/min). Obyčejné obráběcí stroje nejsou na tyto otáčky stavěné, proto je zde nutnost nasazení urychlovacích vřeten. Jedna (dražší) možnost je použití stlačeného vzduchu nebo druhá, a to urychlovací elektrovřeteno. Stroje musí být velmi tuhé, aby bylo možno strojem mikrofrézovat, protože i malá vůle může vést ke zničení

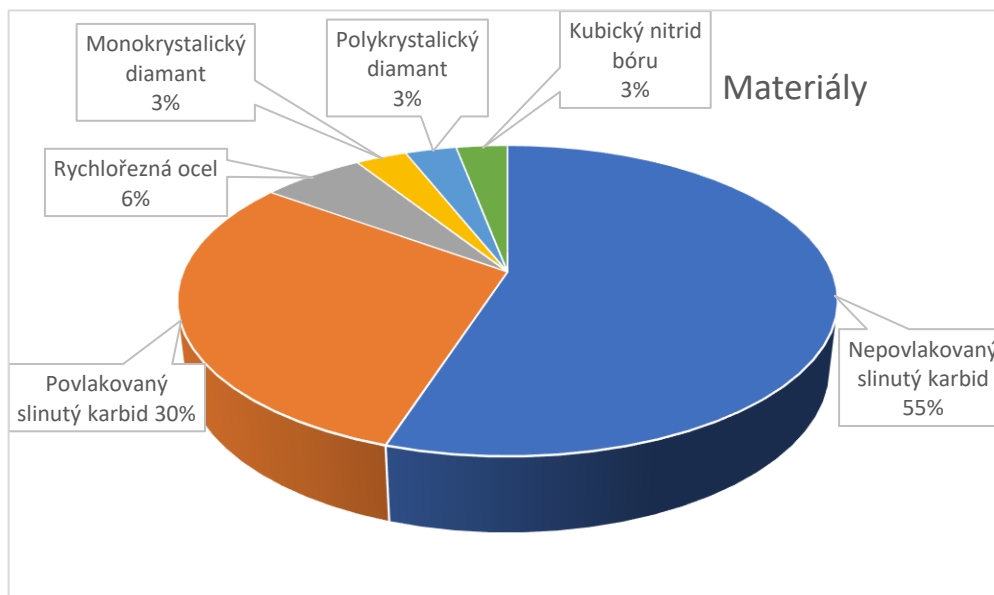
nástroje. Dříve se používaly tříosé stroje, dnes se už inklinuje k používání pětiosých strojů, ale to je závislé na aplikaci. Dále musí mít stroj dobrý řídicí systém, který dokáže dobře synchronizovat pohyby, a zároveň bude umět zpracovávat obrovské množství vstupních dat [17] [18].

CAD/CAM by měl mít na tuto aplikaci velmi přesné převádění modelů z jiných CAD formátů, dále možnost úpravy vstupních modelů, a to ve velmi dobré přesnosti, protože výpočet drah se musí počítat v přesnosti 500 nm. Software by měl chytrě navrhnout dráhy, aby nedocházelo ke zbytečným přejezdům nebo rázům. Kdyby to nebylo splněno a mikrofréza se zlomila, může dojít k poničení povrchu, a tím i výrobě nejakostního kusu, což je nežádoucí [17].

### 2.2.2 Mikrofréza

Nové progresivní a těžkoobrobitelné materiály vedou k vysokým nárokům na nástroje v oblastech, jako jsou vysoká tepelná odolnost a odolnost proti opotřebení. Velkým nárokem na nástroje u mikrofrézování je jeho submikronová přesnost, která musí být dosažena kvůli výsledným vynikajícím vlastnostem obrobeného povrchu mikrofrézou. U mikrofrézování je pro výrobce rozhodující přesnost geometrie tvaru a řezný úhel [17].

Přehled nejvíce používaných řezných materiálů při mikrofrézování (Obrázek 9):



Obrázek 9 - Přehled řezných materiálů při mikrofrézování z roku 2012 [1]

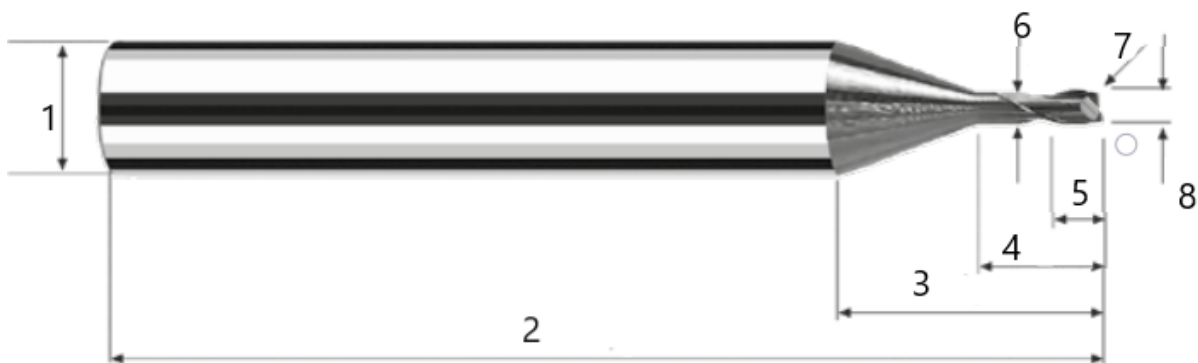
Velikost mikrofréz vede k výraznému omezení řezných sil, v některých případech to vede k nanesení tvrdé otěruvzdorné vrstvy na nástroj a kluzné vrstvy, tzv. samomazné. Nanesení této nanokompozitní vrstvy vede k výraznému zvýšení životnosti nástroje. Tyto

nanokompozitní vrstvy vedou i k nepotřebě užití chladící kapaliny a jedná se tedy o suché obrábění, tedy i ekologičtější řešení [17].

Problém je výroba samotných ostrých břitů u menších nástrojů. Nezávisle na průměru nástroje má ostří zaoblení 2 až 6  $\mu\text{m}$  u nástrojů menších než 1 mm. Na to musí být hleděno u fréz ještě menších (<0,5 mm), a to zmenšením třísky, a to třeba jen o něco málo větší než poloměr ostří. Jinak dochází k plastické deformaci, a proto se značně zvětšuje opotřebení břitu. To vede k menší kvalitě obrobenej plochy [19].

Aplikace mikrofrézování pro výrobu forem pro tlakové lití a tváření pro práci za studena i za tepla. Tyto formy, aby něco vydržely, musí být vyrobeny z nástrojových ocelí, které jsou ještě kaleny a až poté probíhá proces mikrofrézování, proto je problém obrábění tak tvrdých materiálů, díky jejich opotřebovávání a odtlačení od obráběného povrchu. Odtlačení se dá třeba až úplně vymýt korekcemi při obrábění. Pro dosažení vysoké přesnosti formy se nesmí během procesu fréza zlomit, protože by se musela vyměnit, a to by znamenalo vytvoření stopy na povrchu obrobku, což je nežádoucí u velmi přesných forem [19].

*Popis společných částí všech mikrofréz (Obrázek 10):*



Obrázek 10 - Popis mikrofrézy [21]

- 1) Průměr stopky: u většiny firem se používá průměr stopky okolo 4 až 6 mm. U větších průměrů mikrofréz se používají větší průměry, ale vždy se dá nalézt velký průměr mikrofrézy s malou stopkou či naopak, jelikož portfolia firem u mikrofréz jsou veliká.
- 2) Délka nástroje: většina firem nabízí délky okolo 50 až 70 mm, ale existují i délky 90 mm u obrábění ve větších hloubkách, ovšem tyto nástroje už nemají takovou tuhost. Speciální jsou nástroje dlouhé až 120 mm, ale tyto mikrofrézy jsou již určeny jen na obrábění grafitu a méně tvrdých materiálů.

- 3) Efektivní délka nástroje: tuto hodnotu většina firem neuvádí. Odvíjí se od ní délka přechodu válcového (nebo kuželového) krčku k upínací stopce. Pohybuje se okolo 15 až 40 mm, ale je zde i možnost délky 80 mm nebo extrémně malé například 4,5 mm.
- 4) Délka vyložení nebo délka krčku: pohybuje se okolo 15 až 40 mm, ale je to spíše dle užití, u dlouhých mikrofréz je větší a u malých menší. Krček může být buď kuželový nebo válcový, dle použití, u kuželového je lepší tuhost, zatímco válcovým lze vyrábět žebrování nebo hluboké prohlubně s rovnou stěnou.
- 5) Délka řezné části: někdy se nazývá též maximální hloubka řezu v bočním směru posuvu. Délky se odvíjí podle průměru mikrofréz, například pro průměr 1 mm se délka pohybuje od 1 mm do 1,2 mm u mikrofréz na grafit.
- 6) Průměr krčku: jak již bylo řečeno, jedná se buď o válec nebo kužel, podle použití. Průměry jsou vždy o málo menší než samotný průměr mikrofrézy. Například u menších mikrofréz jsou o 5 setin milimetru menší, u nástrojů okolo 1 mm a větších se průměr pohybuje okolo 1 desetiny menší a u větších mikrofréz okolo 3 mm se průměr pohybuje o 2 desetiny menší.
- 7) Zaoblení špičky: všechny mikrofrézy mají zaoblení na špičkách. I válcové mají velmi nepatrné zaoblení, které je ale zanedbatelné. U kulové mikrofrézy se zaoblení rovná polovině průměru. A u toroidních se zaoblení pohybuje většinou okolo 1 desetiny průměru mikrofrézy, ale není to pevně dáno.
- 8) Průměr mikrofrézy: je udávajícím rozměrem při koupi mikrofrézy. Pohybují se od 0,2 mm do 3 mm, ale vyrábějí se i menší a zároveň i větší.

### 2.2.3 Porovnání s ostatními způsoby obrábění

Pro výrobu miniatur forem se dnes používají metody jako je elektroerozivní obrábění (dále EDM), laser nebo mikrofrézování. EDM metoda je velmi přesná a má dobrou kvalitu povrchu, ale její problém spočívá, že nelze použít u nevodivých materiálů a do výrobních časů se taky musí započítat výroba elektrody, která obrábí. U laseru je výhoda, a zároveň i nevýhoda, obrábění miniaturních tvarů a obrysů, které jsou dané jen šířkou paprsku. Naproti tomu mikrofrézování má výhodu ve větší geometrické rozmanitosti tvarů a má větší úběr materiálu a lepší kvalitu povrchu. Nevýhoda naproti tomu u mikrofrézování je v nespolehlivosti procesu, a to díky opotřebení břitu, nebo jeho zlomení, jelikož je používán velmi malý průměr nástroje [19].



Co se týče drsností povrchů, tak mikrofrézováním se dosahuje nejlepších parametrů, a to až  $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ . Druhá technologie, co se týče drsnosti, je EDM, kde se dosahuje parametrů  $R_a = 0,06 \mu\text{m}$ . A laserem se dá dosáhnout drsnosti  $R_a = 0,5 \mu\text{m}$  [20].

#### 2.2.4 Použití mikrofrézování

Mikrofrézování svými výhodami předčí některé metody nekonvenčního obrábění (EDM, laser). Uplatňuje se ve výrobě jednodušších až středně těžkých forem, grafitových a měděných elektrod, ve výrobě lidských kostních náhrad a dentálních náhrad (kde se naskenuje předešlá náhrada a přes CAD/CAM se vyrobí nová náhrada), elektronice a u výroby prototypů. Ještě by se dalo počítat rytectví a úprava šperků. Tato oblast technologie se bude dále jen zvětšovat díky větší poptávce po menších a menších komponentech. Produktivně lze vyrábět jen při správné volbě stroje, nástroje a CAD/CAM systému. U nástroje je nutná optimalizace řezných podmínek pro spolehlivost u obrábění velmi tvrdých materiálů, a tím i minimalizace opotřebení břitu [17] [19].

### 3 Přehled vybraných výrobců mikronástrojů a jejich produktů

#### 3.1 FRAISA SA

FRAISA SA (dále FRAISA) je světovým výrobcem nástrojů na obrábění. Společnost byla založena již v roce 1934 ve Švýcarsku a je jeden z předních výrobců v oboru nástrojů. Firma zajišťuje mnoho odvětví obrábění, od jemného obrábění a válcového broušení až po broušení vlastních nástrojů a povrchové technologie, které provádí firma na vlastních zařízeních. Program zabývající se mikrofrézováním u této firmy zastupuje program MicroX. Tento program v sobě obsahuje okolo 370 různých mikrofréz od průměrů 0,1 mm do 3 mm. Nástroje mají garantovanou toleranci zaoblení v +/- 0,005 mm. Tyto mikrofrézy jsou použitelné do meze pevnosti obráběného materiálu do 850 N/mm<sup>2</sup> a tvrdosti do 60 HRC pro oceli, nerezové oceli, anebo titanu. Pro materiály tvrdší než 60 HRC existuje možnost použití mikrofréz v programu MicroHX. Existuje varianta pro obrábění grafitu s názvem MicrospheroXG a MicrotoroXG [21].

**Cylindrical end mills MicroX**  
Shank Ø 6mm, cylindrical neck, 5xd

**HM XA** λ 25° γ-10°

45°

**new!**

<b>Rm</b> < 850	<b>Rm</b> 850-1100	<b>Rm</b> 1100-1300	<b>Rm</b> 1300-1500	<b>HRC</b> 48-56	<b>HRC</b> 56-60	<b>HRC</b> > 60	<b>Inox</b> Stainless	<b>Ti</b> Titanium	<b>Cobalt-Chrome</b> <b>Copper</b>
--------------------	-----------------------	------------------------	------------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------------	-----------------------	---------------------------------------

Example: Order-Nº.										X-AL
										X6504
α Code	d1 0/-0.01	d2 h5	d3	l1	l2	l3	45°	α	z	
.100	1.0	6	0.95	57	1.0	5.0	0.07	10.0°	2	●
.108	1.2	6	1.10	57	1.2	6.0	0.07	9.5°	2	●
.120	1.5	6	1.40	61	1.5	7.5	0.07	8.5°	2	●
.140	2.0	6	1.90	61	2.0	10.0	0.10	7.0°	2	●
.160	2.5	6	2.30	61	2.5	12.5	0.10	5.5°	2	●
.180	3.0	6	2.80	66	3.0	15.0	0.10	4.5°	2	●

Coating: X Article-Nº: 6504 α-Code: .100

Obrázek 11 - Ukázka z katalogu FRAISA [21]

#### 3.1.1 Válcové mikrofrézy

Válcové mikrofrézy nabízené firmou FRAISA jsou od průměru 1 mm do 3 mm. Tyto mikrofrézy mají pouze 2 zuby (Obrázek 11) [21].

Firma nabízí také mikrofrézy s povrchovou úpravou, které jsou určeny na frézování grafitu, například pro úpravu nástroje pro technologii EDM. Pro tuto metodu se průměry pohybují od 0,2 mm do 3 mm a součinitel délky k průměru nástroje se zde pohybuje od 3 do 20 [21].

### 3.1.2 Kulové mikrofrézy

Kulové frézy nabízí tato firma od rozměrů 0,1 mm do 3 mm se dvěma zuby. Počítá zde se součinitelem délky vyložení mikronástroje vůči průměru mikronástroje a tento součinitel se pohybuje od 1 do 10. FRAISA u kulových fréz nabízí obyčejné mikronástroje s tímto malým vysazením nebo je tu alternativní možnost, kde se mezi stopku a mikronástroj vloží kuželový krk, a tím se zvětší i vysazení mikrofrézy, a tím může obrábět hlouběji, ovšem neznamená to zvětšení řezné hloubky, ale jen hloubky, ve které může obrábět. Součinitel je zde 8, 10, 12 a 15 [21].

V nabídce firmy FRAISA jsou také mikrofrézy na tvrdší materiály přes 60 HRC. Tyto mikrofrézy se vyrábějí jen kulové se 2 zuby a průměry od 0,4 mm do 3 mm. Součinitel od 1 do 5 [21].

Kulové mikrofrézy se také vyrábějí s povrchovou úpravou na obrábění grafitu, a to od průměru 0,2 mm až 6 mm [21].

### 3.1.3 Toroidní mikrofrézy

Toroidní mikrofréza je nástroj se zaoblením na špičce. Firma FRAISA nabízí mikrofrézy od průměru 0,2 mm do 3 mm se 2 nebo 4 zuby se zaoblením od 0,1 mm do 0,5 mm. S menším zaoblením nabízí firma pouze mikrofrézu bez krku a se 2 zuby s poloměrem zaoblení 0,05 mm [21].

Také nabízí toroidní mikrofrézy na obrábění grafitu, a to od průměru 0,2 mm do 6 mm se zaoblením 0,05 mm; 0,1 mm; 0,2 mm; 0,5 mm [21].

## 3.2 Sandvik Coromant

Tato společnost je součástí celosvětové skupiny strojírenských podniků Sandvik a zaujímá vedoucí postavení ve výrobě nástrojů a řešení v oblasti obrábění kovů. Samotný podnik Sandvik Coromant vlastní více než 3100 patentů a své zastoupení má ve 150 zemích světa [22].

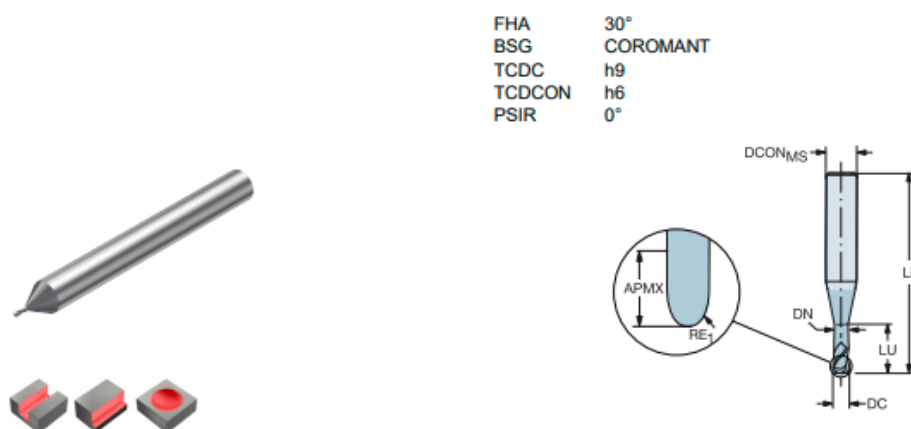
Společnost Sandvik Coromant má ve své nabídce mikrofrézy s kulovým čelem nebo obyčejné válcové mikrofrézy. Mikrofrézy u této společnosti jsou pod programem CoroMill® Plura [22].

### 3.2.1 Válcové mikrofrézy

Válcové mikrofrézy od tohoto výrobce jsou určeny na hrubování drobných součástí. Tvrdost obrobku musí být do tvrdosti 63 HRC. Dělí se podle velikosti upínací stopky. První možnost s průměrem stopky 3 mm a druhá možnost s průměrem stopky 6 mm. Průměr mikrofréz se pohybuje od 0,4 mm do 1 mm s délkami vyložení od 1,3 do 5 mm; u první možnosti s průměrem stopky 3 mm. A pro druhou možnost, s průměrem stopky 6 mm; se průměry mikronástroje pohybují od 0,4 mm do 1 mm také, ale délka vyložení je od 1 mm; pro nejmenší nástroj a až 10 mm pro nástroj o průměru 1 mm [22].

### Monolitní karbidová stopková fréza CoroMill® Plura s kulovým čelem pro frézování mikrofrézami

Různorodé materiály s tvrdostí ≤ 63 HRC



#### Provedení s metrickými rozměry

DC	CZC <sub>MS</sub>	APMX	RE <sub>1</sub>	LU	ZEFP	Objednací kód	Materiál					Rozměry, mm			
							P	M	K	N	S	H	DCON <sub>MS</sub>	LF	DN
0.4	6	0.4	0.20	1.0	2	R216.42-00430-AE04G	*	*	*	*	*	*	6.0	54.0	0.4
0.5	6	0.5	0.25	1.2	2	R216.42-00530-AE05G	*	*	*	*	*	*	6.0	54.0	0.5
0.6	6	0.6	0.30	1.5	2	R216.42-00630-AE06G	*	*	*	*	*	*	6.0	54.0	0.6
0.8	6	0.8	0.40	2.0	2	R216.42-00830-AE08G	*	*	*	*	*	*	6.0	54.0	0.8
1.0	6	1.0	0.50	2.5	2	R216.42-01030-AE10G	*	*	*	*	*	*	6.0	54.0	1.0

FHA 30°  
 BSG COROMANT  
 TCDC h9  
 TCDCON h6  
 PSIR 0°

Obrázek 12 - Ukázka z katalogu Sandvik Coromant [22]

### 3.2.2 Kulové mikrofrézy

Kulové mikrofrézy tohoto výrobce jsou určeny pro tvarové obrábění a obrábění drobných součástí (Obrázek 12). Jsou určeny pro obrábění všech materiálů s tvrdostí do 63

HRC a tvrzené materiály s tvrdostí od 43 do 63 HRC. U kulových mikrofréz, na různorodé materiály, je použita pouze stopka s průměrem 6 mm a se dvěma zuby ostří. Průměry nástroje se pohybují od 0,4 mm do 1 mm a délkami vyložení od 1 mm do 10 mm. Kulové mikrofrézy, určené pro tvrzené materiály, mají stopku buď 4 mm nebo 6 mm. Průměry se pohybují od 0,2 mm po 2,5 mm. Každý průměr se vyrábí s různými délkami vyložení, například průměr 0,4 mm se prodává mikrofréza s vyložení 0,6; 1,2; 2; 4 mm [22].

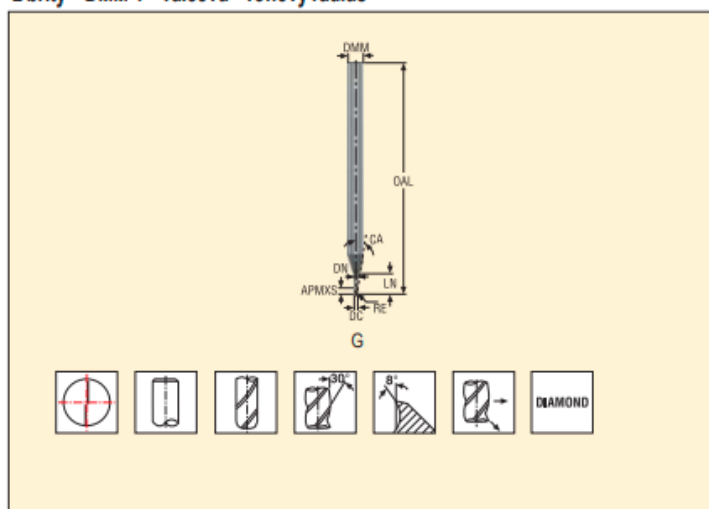
### 3.3 Seco Tools

Společnost Seco Tools (dále Seco) je světovým expertem v oblasti řešení technologií frézování, soustružení, obrábění otvorů a závitování. Společnost sídlí ve Švédsku ve městě Fagersta a má zastoupení ve více než 75 zemích světa. Seco je součástí skupiny Sandvik Group, která se také zabývá výrobou a prodejem obráběcích nástrojů [23].

#### JME642 – Miniaturní frézy – grafit – rohová – Diamond – 2 břity – DMM 4 – válcová – rohový rádius



Tolerance:  
 Házení = <0,005 mm  
 DMM= h5  
 DC= Ø0/-0,015 mm  
 RE= ±0,007 mm



Produktové číslo	Objednací kód	Index délky LV	Tvar nástroje	Rozměry v mm								PCEDC	CA	Max. hloubka řezu*					
				DC	DMM	APMXS	OAL	LN	DN	RE	WDX0			WDX05	WDX1	WDX15	WDX2	WDX3	
03215524	JME642002G1R002.0Z2-DIA	1	G	0,2	4	0,3	40	0,4	0,18	0,02	2	14,32	0,59	0,65	0,72	0,78	0,84	0,95	
03215525	JME642003G1R002.0Z2-DIA	1	G	0,3	4	0,5	40	0,5	0,28	0,02	2	14,1	0,74	0,81	0,87	0,94	1,0	1,11	
03215526	JME642004G1R004.0Z2-DIA	1	G	0,4	4	0,6	40	2,0	0,37	0,04	2	11,67	2,29	2,44	2,57	2,68	2,78	2,96	
03215527	JME642005G3R005.0Z2-DIA	3	G	0,5	4	0,7	40	2,5	0,45	0,05	2	10,97	2,83	3,0	3,13	3,25	3,36	3,56	
03215528	JME642006G3R006.0Z2-DIA	3	G	0,6	4	1,0	60	3,0	0,55	0,06	2	10,31	3,33	3,52	3,67	3,8	3,92	4,13	
03215529	JME642008G3R008.0Z2-DIA	3	G	0,8	4	1,2	60	4,0	0,75	0,08	2	9,31	4,33	4,57	4,74	4,89	5,02	5,25	
03215530	JME642010G3R010.0Z2-DIA	3	G	1,0	4	1,6	60	5,0	0,95	0,1	2	8,04	5,33	5,61	5,81	5,97	6,12	6,37	
03215531	JME642012G3R012.0Z2-DIA	3	G	1,2	4	1,6	60	6,0	1,15	0,12	2	7,09	6,33	6,65	6,87	7,05	7,2	7,46	
03215532	JME642015G3R015.0Z2-DIA	3	G	1,5	4	2,4	60	7,5	1,4	0,15	2	5,8	7,99	8,29	8,52	8,71	8,87	9,36	
03236441	JME642020G3R015.0Z2-DIA	3	G	2,0	4	2,2	60	10,0	1,9	0,15	2	4,11	10,53	10,88	11,22	11,55	11,99	12,87	
03215533	JME642020G3R020.0Z2-DIA	3	G	2,0	4	3,0	60	10,0	1,9	0,2	2	4,11	10,49	10,87	11,13	11,35	11,53	12,48	

Obrázek 13 - Ukázka z katalogu Seco [23]

Nabídka společnosti zahrnuje jak frézování do ostrých rohů pomocí válcových čelních mikrofréz, tak i kulové frézy s malými reznými průměry (Obrázek 13). Univerzální nástroje jsou určeny pro obrábění běžných materiálů a obrábění grafitu nebo speciální mikrofrézy na

obrábění kalené oceli. Na všech druzích mikrofréz je nanesen povlak pro delší životnost a optimální výkon při mikrofrézování [23].

### 3.3.1 Válcové mikrofrézy

Na obrábění grafitu firma Seco nabízí válcové mikrofrézy JME 642 s diamantovým povlakem, zesílenými čelními 2 zuby, kde se průměry pohybují od 0,2 mm do 2 mm v 5 délkových řadách (až 15x průměr mikrofrézy). Zaoblení na špičkách se pohybuje okolo 1/10 průměru nástroje [23].

Na obrábění různých materiálů firma nabízí univerzální válcové mikrofrézy s leštěným povlakem SIRA se 2-4 zuby, kde se průměry pohybují od 0,2 mm do 3 mm v 7 délkových řadách (až 20x průměr mikrofrézy). Firma také nabízí 3 různé typy geometrie pro toto určení mikrofréz. Typová řada JME 542 je označována jako mikrofrézy se 2 zuby a průměrem stopky 4 mm. S označením JME 562 jsou mikrofrézy s průměrem stopky 6 mm a 2 zuby, a poslední JME 564 s průměrem stopky 6 mm a 4 zuby. Druhou možností, kterou firma Seco nabízí jsou válcové mikrofrézy s povlakem MEGA se 2 zuby, kde se průměry pohybují od 0,1 mm do 2 mm v 7 délkách, a to například pro nejmenší průměry mikrofréz s délkou 2 mm a u největších průměrů s délkou 12-16 mm. Mikrofrézy se skládají ze dvou typových řad, a to JM905, kde je stopka průměru 3 mm, a JM 920, kde je stopka průměru 6 mm [23].

Na obrábění kalených materiálů s tvrdostí od 48 HRC až 70 HRC, nabízí firma typové řady JME 142 a JME 144 se 2 a 4 zuby s povlakem HXT. JME 142 nabízí mikrofrézy od 0,2 mm do 3 mm, kde portfolio produktů je velmi rozsáhlé, co se týče délek řezných hran a délek vyložení. A JME 144 nabízí průměry mikrofréz od 1 mm do 3 mm [23].

Další mikrofrézy, nabízené firmou, které mají pozitivní geometrii, jsou vyrobené z jiných materiálů, s tenkým povlakem MEGA-T. Průměry se pohybují od 0,5 mm do 2 mm a mají 3 délkové řady. Typové řady jsou JM 403, JM 404 a JM 406 s odlišnými průměry stopky postupně 3, 4 a 6 mm [23].

### 3.3.2 Kulové mikrofrézy

Na obrábění grafitu, obdobně jako u válcových mikrofréz, firma nabízí mikrofrézy s diamantovým povlakem, průměry od 0,2 mm do 3 mm v 5 délkových řadách (až 15x průměr mikrofrézy). Tyto mikrofrézy nesou označení JMB 642 [23].

Na obrábění různých materiálů, zase obdobně jako u válcových, jsou nabízeny mikrofrézy s leštěným povlakem SIRA, které mají zesílené čelní břity. Nesou značení JMB 542/562/563 obdobně podle průměru stopky a počtu zubů, zde tedy nejsou 4 zuby, ale 3 zuby. Průměry se pohybují od 0,2 mm do 3 mm a v 7 délkových řadách (délky až do 20x průměr mikrofrézy). Druhou možností jsou mikrofrézy s povlakem MEGA, s průměry od 0,5 mm do 1,5 mm a 6 délkami (1,5 mm až 10 mm pro největší průměry). Označení nesou JM915 s průměrem stopky 3 mm a JM 925 s průměrem stopky 6 mm [23].

Pro obrábění kalených materiálů s tvrdostí od 48 HRC do 70 HRC nabízí firma mikrofrézy pod 2 označeními, a to JM 113/116 podle průměru stopky 3 a 6 mm s povlakem M64. A druhé řešení JMB 112 s průměrem stopky 6 mm s povlakem HXT. Druhé řešení obsahuje velké množství mikrofréz s různými parametry, avšak od průměru 0,2 mm do průměru 3 mm. První řešení obsahuje pouze průměry od 1,2 mm do 2 mm v dnešní nabídce [23].

Další kulové mikrofrézy s označeními JM 413/414/416 jsou nabízeny s povlakem MEGA-T, s břity s pozitivní geometrií a průměry od 0,5 mm do 2 mm se 3 délkami [23].

### 3.4 WNT

Jedná se o prodejní společnost zabývající se přesnými nástroji pro třískové obrábění. Firma velmi dbá na kvalitu svých výrobků a servis pro své zákazníky. Firma sídlí v Německu a působí ve více než 19 dalších zemích a zaměstnává něco okolo 9000 zaměstnanců. Jedná se o firmu, která je součástí koncernu CERATIZIT [24].

Firma WNT nabízí mikrofrézy válcové stopkové, dále kulové, nazývané zde jako rádiusové, a se zaoblením na špičkách, jako toroidní [24].

#### 3.4.1 Válcové mikrofrézy

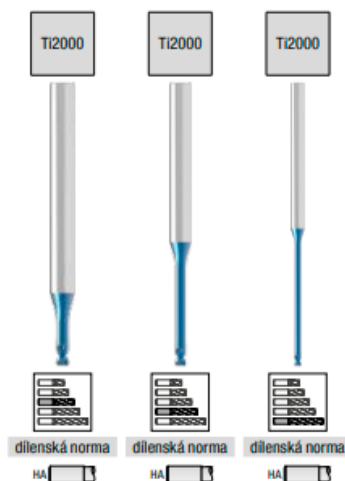
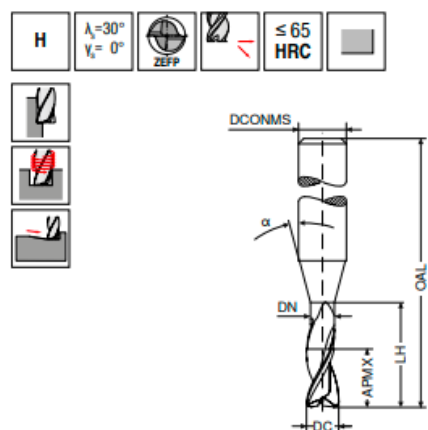
Firma WNT nabízí stopkové mikrofrézy od průměrů 0,2 mm do 2 mm s různými délkami vyložení, a to například pro průměr nástroje 1 mm s vyložení 2,2 mm až 10 mm anebo délkou řezné části 0,6 nebo 1 mm. Jsou zde také možnosti 2 povlaků zlepšující obrábění. Jeden povlak je Ti2000, který je určen pro tvrdé materiály do 65 HRC, a druhý povlak DPA 72S pro všestranné použití [24].

### 3.4.2 Kulové mikrofrézy

Kulové neboli rádiusové mikrofrézy má firma v nabídce od 0,2 mm do 2 mm s různými délkami vyložení, například pro průměr 1 mm vyložení 2,2 mm; 5 mm a 10 mm a délkou řezné hrany 0,6 mm nebo 1 mm; které se dále liší průměry stopek (3 mm, 4 mm a 6 mm) a jinými parametry. Kulové mikrofrézy jsou pokryté jen povlakem DPA 72S a nemají tedy druhou možnost jako válcové mikrofrézy [24].

#### BlueLine – Stopková mikrofréza

▲  $T_x$  = maximální hloubka záběru



DC <sub>-0.01</sub>	APMX	DN	LH	OAL	$\alpha^\circ$	DCONMS <sub>16</sub>	$T_x$	ZEFP	dílenská norma	HA	V1	Artikl č.	Kč	V1	Artikl č.	Kč	V1	Artikl č.	Kč
1,0	1,5	0,95	10,0	45	16	4	10 x DC	2				52 345 ...							
1,0	1,5	0,95	12,0	45	16	4	12 x DC	2				1 268	310		1 294	410			
1,0	1,5	0,95	14,0	45	16	4	14 x DC	2				1 294	510		1 354	610			
1,0	1,5	0,95	16,0	50	16	4	16 x DC	2										1 502	310
1,0	1,5	0,95	20,0	54	16	4	20 x DC	2										1 629	410
1,0	1,5	0,95	25,0	70	16	4	25 x DC	2										1 652	510
1,0	1,5	0,95	30,0	70	16	4	30 x DC	2											
1,2	1,8	1,14	6,0	45	16	4	5 x DC	2			1 372	312							
1,2	1,8	1,14	8,0	45	16	4	6,6 x DC	2			1 372	412							
1,2	1,8	1,14	10,0	45	16	4	8,3 x DC	2			1 409	512							
1,2	1,8	1,14	12,0	45	16	4	10 x DC	2						1 409	312				
1,2	1,8	1,14	16,0	50	16	4	13,3 x DC	2						1 551	412				
1,2	1,8	1,14	20,0	60	16	4	16,6 x DC	2						1 594	512				
1,4	2,1	1,34	6,0	45	16	4	4,2 x DC	2			1 372	314							
1,4	2,1	1,34	8,0	45	16	4	5,7 x DC	2			1 372	414							
1,4	2,1	1,34	10,0	45	16	4	7,1 x DC	2			1 409	514							
1,4	2,1	1,34	12,0	45	16	4	8,5 x DC	2			1 409	614							
1,4	2,1	1,34	14,0	45	16	4	10 x DC	2						1 409	314				
1,4	2,1	1,34	16,0	50	16	4	11,4 x DC	2						1 551	414				
1,4	2,1	1,34	22,0	54	16	4	15,7 x DC	2						1 594	514				
1,5	2,3	1,44	6,0	45	16	4	4 x DC	2			1 323	315							
1,5	2,3	1,44	8,0	45	16	4	5,3 x DC	2			1 323	415							
1,5	2,3	1,44	10,0	45	16	4	6,6 x DC	2			1 340	515							
1,5	2,3	1,44	12,0	45	16	4	8 x DC	2			1 340	615							
1,5	2,3	1,44	14,0	50	16	4	9,3 x DC	2			1 499	715							
1,5	2,3	1,44	16,0	50	16	4	10,6 x DC	2						1 499	315				
1,5	2,3	1,44	18,0	54	16	4	12 x DC	2						1 499	415				
1,5	2,3	1,44	20,0	54	16	4	13,3 x DC	2						1 499	515				
1,5	2,3	1,44	25,0	70	16	4	16,6 x DC	2						1 649	615				
1,5	2,3	1,44	30,0	70	16	4	20 x DC	2						1 649	715				
1,5	2,3	1,44	35,0	70	16	4	23,3 x DC	2										1 669	315

Obrázek 14 - Ukázka z katalogu WNT [24]

### 3.4.3 Toroidní mikrofrézy

Firma nabízí také možnost zakoupení mikrofréz se zaoblením na špičkách nástroje (Obrázek 14). Každý průměr toroidní mikrofrézy zde, pohybující se od 0,5 mm do 2 mm, má své vlastní zaoblení. Například mikrofréza průměru 1 mm má vždy zaoblení velikosti 0,2 mm. Je to odstupňované; 0,5 mm mikrofrézy mají zaoblení 0,1 mm; 1,5 mm frézy zaoblení 0,3 mm a 2 mm frézy zaoblení 0,4 mm. Povrchová úprava, nabízená firmou, je DPA 72S. Průměry stopky jsou 3, 4 a 6 mm [24].



### 3.5 Silmax S. p. A.

Silmax S. p. A. (dále Silmax) je vůdčí italská společnost zabývající se obráběcími nástroji. I s 50 lety zkušeností na trhu, je to moderní a dynamicky se rozvíjející společnost. Firma vyrábí nástroje především ze slinutého karbidu a rychlořezné oceli pro hrubování, polodokončování a dokončování obrábění kovů a lehkých slitin. Tato firma vyrábí mikrofrézy určené pro obrábění tvrdých forem s tvrdostí do 60 HRC a druhé odvětví v technologii mikrofrézování, pro obrábění grafitu. Pro obrábění tvrdých ocelí firma používá 2 povlaky pro lepší mechanické vlastnosti, a to ALTiN a TiSiXN. Pro druhou možnost, grafit, firma nabízí mikrofrézy s diamantovým povlakem CVD s tvrdostí až 10000 HV, které však nelze použít na obrábění oceli. Firma pro tyto účely nabízí i svůj software pro mikrofrézy, a to SILMAX 360° [25].

#### 3.5.1 Kulové mikrofrézy

Kulové mikrofrézy na těžkoobrobitelné materiály použitelné na povrchové úpravy s větším průměrem od 1 mm do 12 mm. Rozdíly u těchto mikrofréz jsou. Jedno provedení mikrofréz má zúžený krk za řeznou částí, přičemž u další mikrofrézy přechází řezná část rovnou do stejného průměru jako je řezná část a kuželově se zvětšuje. Pro žebrování se vyrábí různé mikrofrézy. První jsou obyčejné mikrofrézy, které mají pouze válcový krk o trochu menší než konečná řezná část s průměry od 0,2 mm do 3 mm. Další zastupuje mikrofrézy se zesíleným přechodem mezi válcovým krkem a válcovou stopkou s průměry od 0,5 mm do 3 mm. A poslední se zúženým kuželovým krkem a zesíleným přechodem s průměry od 0,5 mm do 3 mm s velkým výběrem dalších možných parametrů, nabízí velké množství možností [25].

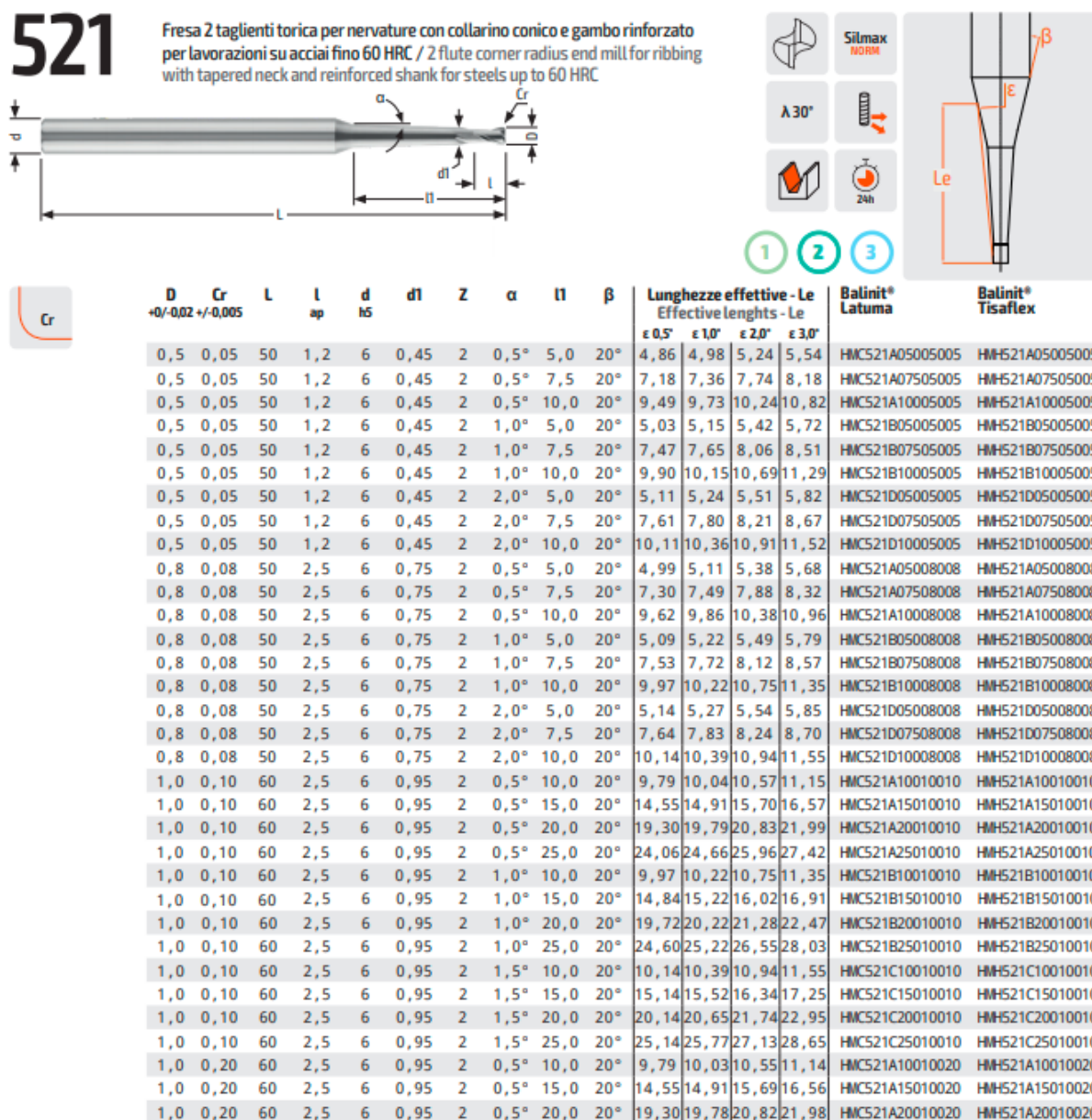
Kulové mikrofrézy, na obrábění grafitu, jsou nabízeny s diamantovým povlakem CVD. První jsou nabízeny mikrofrézy s normálním válcovým krkem na výrobu žebrování od průměru mikrofrézy 0,5 mm do 4 mm. Další nabízí kuželový zúžený krk na výrobu žebrování od průměru 1 mm do 4 mm [25].

#### 3.5.2 Toroidní mikrofrézy

Mikrofrézy se zaoblením na špičce pro těžkoobrobitelné materiály mají několik produkčních řad, které mají vždy 2 zuby. Mikrofrézy s kuželovým krkem k řezné části, kde se jedná o mikrofrézy větších průměrů, a to od 1 mm do 12 mm. Dále mikrofrézy pro žebrování bez kuželového krku a bez zesíleného přechodu z krku na stopku od průměru 0,2 mm do 3 mm. Poté také mikrofrézy bez kuželového krku, ale se zesíleným přechodem ke stopce od průměru 0,5 mm do 3 mm a poslední s kuželovým krkem a zesíleným přechodem od průměru

0,5 mm do 3 mm s velkým portfoliem všech možných jiných parametrů. A speciální řada se 4 zuby s kuželovým krkem a zesíleným přechodem od stopky ke krku, firma nabízí průměry 1,5 mm až 4 mm [25].

Mikrofrézy se zaoblením na špičce pro obrábění grafitu nabízí firma jen ve dvou provedeních, a to obyčejné mikrofrézy pro žebrování od průměru 0,5 mm do 4 mm a druhou se zesíleným krkem od průměru 1 mm do 4 mm (Obrázek 15) [25].



Obrázek 15 - Ukázka z katalogu Silmax [25]

### 3.6 Telcon Diamond Ltd.

Telcon Diamond Ltd. (dále Telcon) je světový výrobce diamantových PKD a CVD řezných nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů [26].

### 3.6.1 Kulové mikrofrézy

Firma nabízí PKD mikrofrézy pouze s kulovým čelem, průměry mikrofréz se pohybují od 0,6 mm do 3 mm s celkovou délkou mikrofrézy 50 mm a průměrem stopky 3 mm (Obrázek 16). Je určena na obrábění tvrdých keramických materiálů, používané v polovodičích [26].



[Home](#) » PCD end-mill – micro ball-nose

## PCD END-MILL – MICRO BALL-NOSE

- Highest technology micro PCD end-mills.
- Machining of hard ceramics in the semiconductors industry.
- Designed with superb surface quality and edge sharpness.
- Finest PCD grade for edge continuity.
- Other dimensions are available per request.

Obrázek 16 - Ukázka z katalogu Telcon [26]

### 3.7 NS TOOL Co., Ltd.

Japonská firma NS TOOL Co., Ltd. (dále NS TOOL) je výrobcem a prodejcem řezných nástrojů, sídlící v Tokyu. Firma má v nabídce PKD mikrofrézy kulové, válcové a toroidní [27].

#### 3.7.1 Válcové mikrofrézy

V nabídce jsou válcové mikrofrézy s označením PCDSE, průměru od 0,1 mm do 1 mm. U menších průměrů má mikrofréza 2 břity a u větších 6 břitů. Průměr stopky je 4 mm [27].

#### 3.7.2 Kulové mikrofrézy

Kulové mikrofrézy označené PCDRB nabízí firma od průměru 0,1 mm do 2 mm (Obrázek 17). Úhel čela je 15°. Průměr stopky je 4 mm [27].

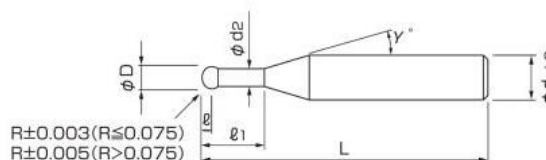
#### 3.7.3 Toroidní mikrofrézy

Toroidní mikrofrézy s označením PCDRS má firma v nabídce od průměru 0,3 mm do 1 mm s poloměrem zaoblení 0,05 mm nebo 0,1 mm. Počet břitů se liší podle průměru, průměr 0,3 mm má 2 zuby, průměr 0,4 mm a 0,5 mm 4 zuby. Od průměru 0,6 mm mají mikrofrézy 6 zubů [27].

**Realizes nano-level surface roughness by finishing on carbides.**



材 質            PCD  
Material        Polycrystalline Diamond



- 安定した加工面を得るためのユニークな工具デザイン。  
● Unique tool geometry makes stable surface.
- 3次元仕上げ加工においてナノレベルの面粗さを得られ、磨きレスが可能。  
● Polish-less machining become reality by nano-level roughness on profiling finish.

単位 (寸法 : mm / 価格 : 円)  
Unit (Size : mm / Retail Price : JPY)

コードNo. Code No.	(R)ボール半径 Radius	( $\ell_1$ )有効長 Effective Length	( $\ell$ )刃長 Length of Cut	(D)刃径 Dia	(d <sub>2</sub> )首下径 Neck Dia.	( $\gamma$ )首角 Neck Taper Angle	(d)シャンク径 Shank Dia.	(L)全長 Overall Length	標準価格 Retail Price
04-00500-00501	0.05	0.15	0.05	0.1	0.09	15°	4	48	65,000
04-00500-00502	0.05	0.25	0.05	0.1	0.09	15°	4	48	65,000
04-00500-00751	0.075	0.23	0.075	0.15	0.14	15°	4	48	65,000
04-00500-00752	0.075	0.38	0.075	0.15	0.14	15°	4	48	65,000
04-00500-01001	0.1	0.5	0.1	0.2	0.18	15°	4	48	56,000
04-00500-02001	0.2	1	0.2	0.4	0.37	15°	4	48	54,000
04-00500-03001	0.3	1.5	0.3	0.6	0.56	15°	4	48	50,000
04-00500-05001	0.5	2.5	0.5	1	0.95	15°	4	48	56,000
04-00500-07501	0.75	3.8	0.75	1.5	1.45	15°	4	48	60,000
04-00500-10001	1	5	1	2	1.94	15°	4	48	60,000

オーダー方法 ■PCDRB ボール半径寸法(R)×有効長( $\ell_1$ )を指示して下さい。 ※( $\gamma$ )は参考値です。  
■When you order, indicate PCDRB (R)( $\ell_1$ ). ※( $\gamma$ ) is reference Value.

Obrázek 17 - Ukázka z katalogu NS TOOL [27]

### 3.8 Kyowa Co., Ltd.

Kyowa Co., Ltd. (dále Kyowa) je japonská firma, která vyrábí a prodává řezné nástroje a zároveň se i věnuje výrobě a prodeji hodinek. Firma věří, že znalost těchto dvou technologií výroby jim pomůže vytvářet jedinečné produkty. Firma má v nabídce válcové a kulové PKD mikrofrézy na obrábění neželezných materiálů a těžkoobrobitelných materiálů, jako je keramika. Tyto mikrofrézy od této firmy mají šroubovici pod úhlem 30° [28].

#### 3.8.1 Válcové mikrofrézy

Firma nabízí průměry od 0,2 mm do 6 mm a má v nabídce velké množství velikostí v průměru od 0,2 mm do 3 mm (Obrázek 18). Tyto mikrofrézy nesou označení DSE-2. Průměr stopky je, do 3 mm průměru mikrofrézy, 4 mm. Větší má velikost 6 mm. Má vždy 2 břity [28].

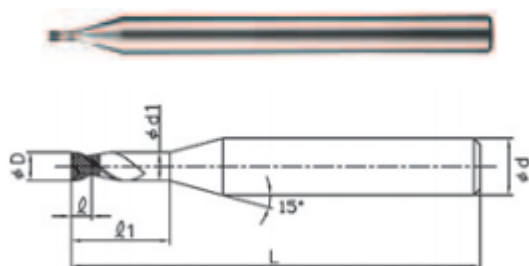
#### 3.8.2 Kulové mikrofrézy

Kulové mikrofrézy nabízí firma v rozpětí průměrů 0,2 mm až 3 mm. Mikrofrézy nesou označení DBE-2. Mají 2 břity a průměr stopky 4 mm, jen průměr mikrofrézy 3 mm má 6 mm stopku [28].

# DSE-2

PCD 2 枚刃スパイラルスクエアエンドミル  
PCD 2 Flutes Spiral Square Endmill

- ソリッドPCDの刃先部はスパイラル形状。  
Spiral Shape at Flute Edge of Solid PCD
- 非鉄金属やセラミック等の難削材まで加工可能。  
Possible to cut Nonferrous metal and Difficult-to cut Materials such as Ceramics



**PCD** PCD多結晶ダイヤモンド Poly crystalline Diamond

刃径の許容差 Flute Diameter Tolerance  
D 0 ~ -0.01

柄径の許容差 Shank Diameter Tolerance  
d 0 ~ -0.003

ネジレ角30° Twist Angle 30°

●切削条件表は P167に記載

●Cutting conditions are recommended on page 167.

単位 [寸法: mm / 価格: 円]

Unit [size: mm / Retail Price: JPY]

品番 Code No.	刃径 D Flute Diameter	有効長 ℓ1 Effective Length	刃長 ℓ Flute Length	PCD 層 PCD Length	全長 L Total Length	柄径 d Shank Diameter	標準価格 Retail Price
DSE-2020	0.2	0.6	0.2	1	50	4	100,000
DSE-2030	0.3	0.9	0.3	1	50	4	94,500
DSE-2040	0.4	1.2	0.4	1	50	4	91,700
DSE-2050	0.5	1.5	0.5	1	50	4	88,900
DSE-2060	0.6	1.8	0.6	1	50	4	88,900
DSE-2070	0.7	2.1	0.7	1	50	4	83,400
DSE-2080	0.8	2.4	0.8	1	50	4	77,800
DSE-2090	0.9	2.7	0.9	1	50	4	77,800
DSE-2100	1	3	1	1	50	4	77,800
DSE-2110	1.1	3.3	1	1	50	4	77,800
DSE-2120	1.2	3.6	1	1	50	4	77,800
DSE-2130	1.3	3.9	1	1	50	4	77,800
DSE-2140	1.4	4.2	1	1	50	4	77,800
DSE-2150	1.5	4.5	1.5	2	50	4	83,400
DSE-2160	1.6	4.8	1.5	2	50	4	83,400
DSE-2170	1.7	5.1	1.5	2	50	4	83,400
DSE-2180	1.8	5.4	1.5	2	50	4	83,400

Obrázek 18 - Ukázka z katalogu Kyowa [28]

## 3.9 ZECHA Hartmetall – Werkzeugfabrikation GmbH

ZECHA Hartmetall-Werkzeugfabrikation GmbH (dále ZECHA) je německá firma zaměřující se na oblast mikrořezných, děrovacích a tvářecích nástrojů. V roce 1999 se německá firma spojila s indickou firmou Dagger Master Tool Industries Limited. Nyní spolupracují na dalším vývoji [29].

Firma ZECHA má v nabídce mikrofrézy na obrábění neželezných materiálů s diamantovým povlakem. Jsou to válcové, kulové i toroidní mikrofrézy [29].

**High-end solid carbide micro end mill with coolant channels in shank**

- Laser-sharpened cutting edges with sealed high-performance diamond coating
- Easy cutting tool geometry
- Cutting pressure minimisation
- One tooth over the center
- With free length
- For wet and dry processing
- Concentric accuracy: 0.002 mm  $\leq \varnothing$  6.0 mm
- Linear form max. 3  $\mu$ m  $\leq \varnothing$  6.0 mm

**High-End VHM-Schaftfräser mit Schaftkühlung**

- Lasergeschärfte Schneidkanten mit geschlossener Hochleistungsdiamantschicht
- Leichtschneidende Werkzeuggeometrie
- Schneiddruckminimierung
- Eine Schneide übers Zentrum
- Mit Freilänge
- Für Nass- und Trockenbearbeitung
- Rundlaufgenauigkeit: 0,002 mm  $\leq \varnothing$  6,0 mm
- Linienform max. 3  $\mu$ m  $\leq \varnothing$  6,0 mm

Bestell-Nr. order no	d1	l1	d	l	Z	Neigungswinkel / Inclination angle				
						30°	1°	1° 30'	2°	3°
918.F3.0040.000.008	0,4	0,8	4,0	39	3	1,11	1,27	1,41	1,53	1,75
918.F3.0050.000.010	0,5	1,0	4,0	39	3	1,34	1,51	1,66	1,79	2,02
918.F3.0070.000.014	0,7	1,4	4,0	39	3	1,80	1,99	2,15	2,29	2,55
918.F3.0080.000.016	0,8	1,6	4,0	39	3	2,02	2,22	2,39	2,54	2,80
918.F3.0100.000.020	1,0	2,0	4,0	39	3	2,46	2,68	2,86	3,02	3,30
918.F3.0120.000.024	1,2	2,4	4,0	39	3	2,90	3,14	3,33	3,50	3,80
918.F3.0150.000.030	1,5	3,0	4,0	39	3	3,56	3,81	4,02	4,20	4,52
918.F3.0160.000.032	1,6	3,2	4,0	39	3	3,77	4,04	4,25	4,43	4,76
918.F3.0200.000.040	2,0	4,0	4,0	39	3	4,63	4,92	5,15	5,35	5,70

Obrázek 19 - Ukázka z katalogu ZECHA [29]

### 3.9.1 Válcové mikrofrézy

Diamantové mikrofrézy této firmy jsou nabízeny s vnitřním chlazením nebo bez vnitřního chlazení. Nástroje bez vnitřního chlazení se nabízejí pouze v průměrech 0,5 mm; 1 mm; 1,5 mm; 2 mm a 3 mm. Naproti tomu s vnitřním chlazením jsou mikrofrézy od průměru 0,4 mm do 2 mm a se 3 zuby (Obrázek 19) [29].

### 3.9.2 Kulové mikrofrézy

Kulové nástroje jsou v nabídce mezi průměry 0,4 mm až 3 mm [29].

### 3.9.3 Toroidní mikrofrézy

Toroidní mikrofrézy jsou v nabídce s i bez vnitřního chlazení. S vnitřním chlazením jsou mikrofrézy od průměrů 0,5 mm do 4 mm se 3 zuby a nesou označení 931.T3. Bez vnitřního chlazení od průměrů 0,5 do 3 mm. Zaoblení se pohybují podle průměrů od 0,03 mm do 0,3 mm [29].

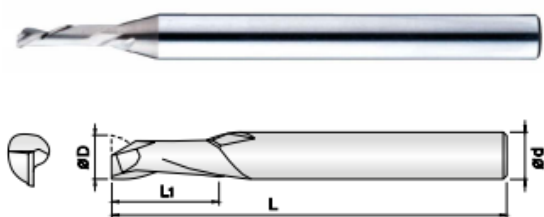
### 3.10 PM-TECH s.r.o.

PM-TECH s.r.o. (dále PM-TECH) je česko-slovenská firma zabývající se prodejem, testováním, poradenstvím a vývojem CNC řezných nástrojů a upínání. Tato firma nabízí mikrofrézy na obrábění hliníku a jeho slitin, mědi a jejích slitin a na plasty. V nabídce jsou nástroje válcové nebo kulové, bez povlaku nebo s povlakem DLC nebo s povlakem AlCrN s vyšší odolností proti opotřebení [30].

#### 3.10.1 Válcové mikrofrézy

Firma má v nabídce válcové mikrofrézy s 1, 2 nebo 3 břity. Průměry těchto mikrofréz se pohybují od 0,1 mm do 12 mm s povlakem DLC nebo bez povlaku. Délka vysazení od 0,3 mm pro nejmenší průměr po 40 mm pro větší. Specialita u této firmy je u jednobřité mikrofrézy, která je nabízena pravořezá s levou šroubovicí což slouží k tomu, že nebudou na hranách zůstat otřepy (Obrázek 20) [30].

## ► 1REM 1-břité OSTRÉ frézy - PRAVOŘEZNÉ S LEVOU ŠROUBOVICÍ pro obrábění HLINÍKU, MĚDI A MĚKKÝCH PLASTŮ



- Určeno pro obrábění hliníku, mědi a měkkých plastů
- Odvod třísek směrem dolů díky obrácené (levé) šroubovici
- Minimalizace otřepů, optimální pro nestabilní upnutí obrobku
- Vysoká životnost nástroje díky ultrajemnému tvrdokovu



Objednací číslo	D (mm)	L1 (mm)	L (mm)	d h5 (mm)	Standardní položka
1REM-005-010-S04	0,5	1	45	4	<input checked="" type="checkbox"/>
1REM-005-015-S04		1,5	45	4	<input checked="" type="checkbox"/>
1REM-005-020-S04		2	45	4	<input checked="" type="checkbox"/>
1REM-006-012-S04	0,6	1,2	45	4	<input checked="" type="checkbox"/>
1REM-006-018-S04		1,8	45	4	<input checked="" type="checkbox"/>
1REM-006-025-S04		2,5	45	4	<input checked="" type="checkbox"/>
1REM-007-014-S04	0,7	1,4	45	4	<input checked="" type="checkbox"/>
1REM-007-021-S04		2,1	45	4	<input checked="" type="checkbox"/>

Obrázek 20 - Ukázka z katalogu PM-TECH [30]

### 3.10.2 Kulové mikrofrézy

Nabízené kulové mikrofrézy jsou od průměrů 0,1 mm do 16 mm, jen s 2 zuby. Provedení bez povlaku, s povlakem DLC a AlCrN, který je využitelný i na tvrdé plasty [30].

## 3.11 Hoffmann Group

Hoffmann Group je jedna z předních společností na evropském trhu pro systémová řešení kvalitního nářadí. Mikrofrézy této společnosti mají značku GARANT. V nabídce jsou mikrofrézy válcové a toroidní. Používané povlaky jsou DLC a diamant. Povlaky DLC jsou používány na obrábění hliníku a jeho slitin. Diamantový povlak je určen pro obrábění kompozitních materiálů a grafitu [31].

### 3.11.1 Válcové mikrofrézy

Válcové mikrofrézy se nabízejí s oběma povlaky. Průměry se pohybují od průměrů 0,1 mm až 3 mm. Obě možnosti jsou se 2 zuby [31].

### 3.11.2 Kulové mikrofrézy

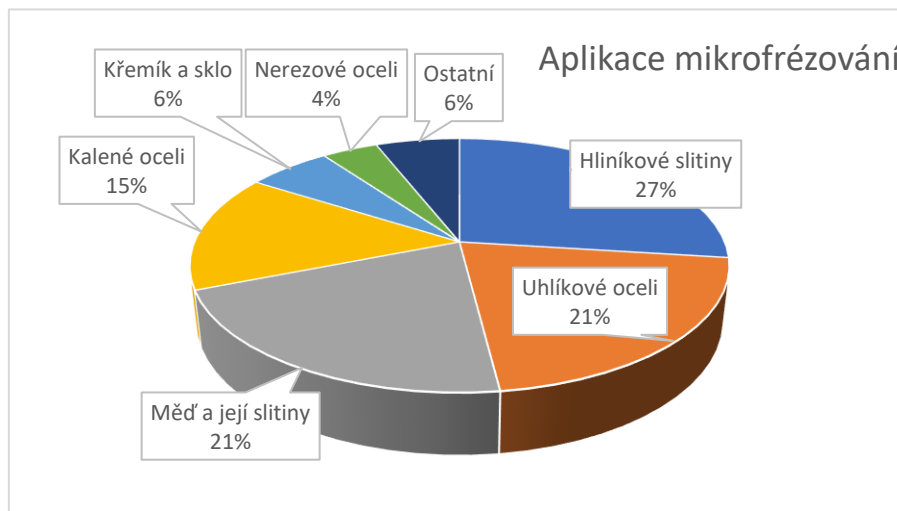
Tyto mikrofrézy se nabízejí pouze s diamantovým povlakem. Průměr této mikrofrézy je 1 mm s délkou vysazení 8 mm se dvěma zuby [31].



## 4 Aplikace technologie mikrofrézování

### 4.1 Aplikace

Obvykle jsou pro mikrofrézování určeny materiály s nízkou tvrdostí, které lze snadno obrábět. Nejvíce se obrábí mikrofrézováním hliník a hliníkové slitiny díky dobré obrobitelnosti. Stále se pracuje na vývoji obrábění těžkoobrobitelných materiálů (jako jsou kalené oceli, titanové slitiny a keramické materiály), které se hojně využívají (Obrázek 21) [1].



Obrázek 21 - Nejvíce obráběné materiály mikrofrézováním z roku 2012 [1]

#### 4.1.1 Medicína

Nejhojněji se mikrofrézování používá v medicíně. Hlavní aplikace v medicíně jsou ve výrobě dentálních a kloubních náhrad z titanových a chrom-kobaltových slitin. Dále se také využívají pro výrobu mikro-nástrojů pro chirurgické účely, mikro-kanálky „lab-on-a-chip“ (vysvětleno v dalším odstavci), formy na výrobu zubních a kloubních náhrad a na oční protézy [8].

Mikro-kanálky „lab-on-a-chip“, jinak řečeno laboratoř na čipu, je aplikace mikrofrézování, kde se využívá jedné nebo více laboratorních funkcí na jednom čipu. Umožňuje to manipulaci jen s malým množstvím kapaliny, tím se snižují náklady a zkrátí se doba potřebná k analýze kapaliny, například krve [8].

Díky rozvoji CNC řízení a oboru mikrofrézování je dnes již možnost vyrábět velmi přesné zubní a kloubní náhrady (Obrázek 22). Dnes je velké množství materiálů pro výrobu náhrad, je jím například nejpoužívanější chrom-kobaltová slitina Cr-Co. Dále se také využívá titan nebo zirkon-oxidová keramika  $ZrO_2$  neboli zirkon [8].



Obrázek 22 - Výroba zubní náhrady mikrofrézováním [35]

#### 4.1.2 Elektrotechnika

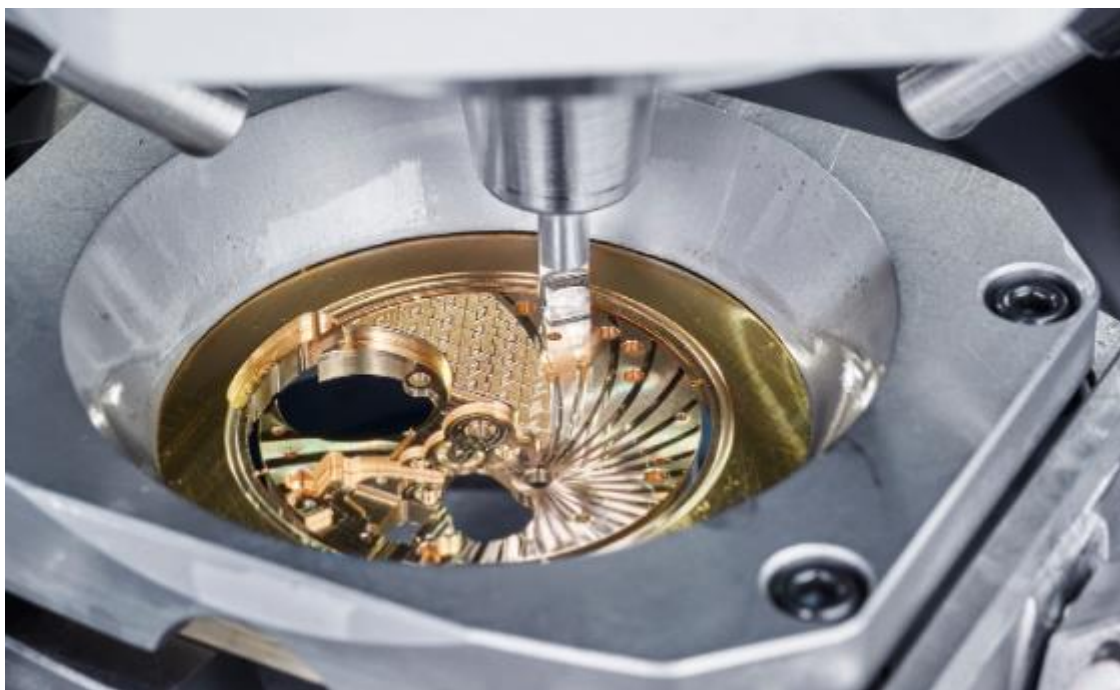
V elektrotechnice dochází také k velkému množství miniaturizace dílů, a proto se vyžaduje aplikace mikrofrézování. Především se frézují plasty, hliníkové a měděné slitiny, a to na dílech, jako jsou konektory, adaptéry, elektronické panely a žebrované chladičí díly (Obrázek 23). Dříve se musely používat technologie chemického leptání, které jsou také velmi přesné, ale proces je složitý a způsobuje znečištění životního prostředí. Také se dá vyrábět laserem, ale tento proces je energeticky náročný. Nevýhoda u mikrofrézování je tvorba otřepů, ale těch se dá zbavit vhodnou strategií frézování nebo optimálními řeznými podmínkami [8].



Obrázek 23 - Mikrofrézovaný pasivní chladič PC [36]

#### 4.1.3 Obecné aplikace

Díky miniaturizaci se mikrofrézování dostává prakticky do všech odvětví, kde je potřeba výroby malých rozměrů. Používá se například v letectví při výrobě gyroskopů a drobných součástí. Dále se používá hojně pro výrobu nástrojů jiných technologií, jako například elektrod pro elektroerozivní obrábění nebo výrobu vstřikovacích forem. V neposlední řadě také v hodinářství pro výrobu těl hodin (Obrázek 24), ozubených kol, rohatek a západek [8].



Obrázek 24 - Použití mikrofrézování v hodinářství [37]

#### 4.2 Základní charakteristiky geometrie břitu nástroje

Nástroje pro mikrofrézování jsou vyráběny různými metodami. Nejproduktivnější metoda je broušení, ale je tu nevýhoda ve výrobě nástroje, kdy se dá vyrábět nástroj až od průměru 0,1 mm. Kvalita nástroje velmi závisí na kvalitě brousícího kotouče, velikosti abrazivních zrn a zaoblení brousící hrany. Další metodou výroby je elektroeroze, kde se vyrábějí složitější tvary a dají se obrábět i těžkoobrobitelné a tvrdé materiály. Další metodou výroby je fokusovaný iontový paprsek, kterou lze vyrábět velmi malé a přesné nástroje. Využívá se zde kinetické energie ionizovaných atomů vhodného prvku. Používá se v optice, elektrotechnice a biomedicíně. Poslední metodou je laserová výroba, kdy se materiál vlivem vysoké energie odpařuje [8].

#### 4.2.1 Obrábění hliníku

Hliník je měkký a adhezivní materiál při obrábění, proto je zapotřebí specifická geometrie. Nejlepší je řezná hrana s malým zaoblením a s velkým úhlem čela mezi 20-25°. Také je zapotřebí velký úhel sklonu šroubovice okolo 45° pro dobrý odvod třísek a také jako tlumení nárazu při vstupu nástroje do řezu. Dále je ideální použít, kvůli větší ploše břitů, břitů méně a to 2 až 3 a průměr jádra o něco méně než 50 % průměru nástroje. Poté je zapotřebí chladicí kapalina pro odvod třísek, aby v řezu nezůstávalo teplo a hliník neulpíval (nedělal nárůstek) na nástroji [32].

#### 4.2.2 Obrábění kompozitu

Podobně jako u hliníku, je u nástrojů na obrábění kompozitu lepší větší úhel čela a velký úhel šroubovice. Navíc u kompozitu je problém ve vláknech uvnitř kompozitu, protože po něm zůstávají otřepy, které jsou nežádoucí, proto některé firmy nabízejí stoupání šroubovice na obě strany, a tím i lepší odřezávání zbylých otřepů. Pro obrábění kompozitu nabízejí firmy, například Seco, úhel šroubovice okolo 20° [33].

#### 4.2.3 Obrábění plastů

Podobně jako předešlé materiály, je lepší způsob nástroje s větším úhlem čela. Plasty na čipy při obrábění vytváří především malé úlomky („střepy“) na rozdíl od měkkých plastů [34].

### 4.3 Aplikace mikrofrézování PKD

Mikrofrézování se stalo hlavním konkurentem pro elektroerozivní obrábění. Jelikož není potřebná žádná dlouhá příprava, jako tomu je u elektroerozivního obrábění. Proto hlavní aplikací pro mikrofrézování s PKD řeznou hranou je obrábění hliníku, křemíku, grafitu nebo dalších abrazivních materiálů. Výhoda mikrofrézování, oproti EDM, spočívá taky v materiálech, které lze obrábět. Pro EDM je potřeba, aby byl materiál elektricky vodivý, aby mohlo probíhat obrábění. Naproti tomu u mikrofrézování můžete ofrézovat jakýkoliv materiál elektricky nevodivý, jako jsou například keramika, sklo, plasty a další materiály, takže má širší využití. V dnešní době se prodávají mikrofrézy s diamantovou PKD hranou především na obrábění grafitu, který po obrobení může také sloužit jako elektroda při elektroerozivním obrábění.

### 4.4 Shrnutí řešeršní části

Řešeršní část se zabývá nalezením geometrie mikronástrojů pro různé aplikace. Podle definice mikrofrézování je obrábění nástrojem do průměru 1 mm. Hodně výrobců ovšem tuto

definici nedodrží a nazývá frézy malých průměrů mikrofrézami až do průměru 3 mm a jiní výrobci i větší nástroje, a to až do průměru 12 mm. Nástroje určené přímo pro obrábění hliníku nabízí například firmy (viz. Přílohy – Souhrnná tabulka): Sandvik Coromant, WNT, Seco, NS-TOOL, Kyowa, ZECHA, PM-TECH a GARANT. Podle rešerše tyto firmy nabízejí mikronástroje na mnoho aplikací, které jsou uvedeny v práci, ale práce se zaměřuje především na nástroje pro obrábění hliníku, kde se nejvíce vyskytují mikronástroje se 2 zuby, s úhlem čela okolo 10-15° a s úhlem šroubovice 30°. Úhel čela lze vyrobit i větší podle kapitoly 4.2.1 zaměřené na nástroje pro obrábění hliníku.

## 5 Experimentální testování vlastností vybraného nástroje

### 5.1 Realizace experimentu



Obrázek 25 - Náhled do obráběcího prostoru při experimentu

Jedním z cílů této práce bylo provedení funkčních testů jednoho typu frézy v hliníkové slitině s postupným zatěžováním frézy s měřením sil (Obrázek 25). Firma ROTANA a.s. vyrobila sadu fréz malých průměrů. Tyto frézy byly vyrobeny podle navržené geometrie břitu dle závěrů v rešeršní části práce. Nástroj byl vyroben z materiálu PKD. Experiment byl realizován na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Celkem bylo provedeno 182 měření, kdy se postupně měnily otáčky  $n$ , posuv na zub  $f_z$ , axiální hloubka řezu  $a_p$  a radiální hloubka řezu  $a_e$  (Obrázek 26).

Číslo měření	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$f_z$ [mm]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]
1	12000	0,005	0.05-0.35	0,375
2	12000	0,01	0.05-0.35	0,375
3	12000	0,015	0.05-0.35	0,375
4	12000	0,02	0.05-0.35	0,375
5	16000	0,005	0.05-0.35	0,375
6	16000	0,015	0.05-0.35	0,375
7	16000	0,02	0.05-0.35	0,375
8	20000	0,005	0.05-0.35	0,375
9	20000	0,015	0.05-0.35	0,375
10	12000	0,005	0.05-0.35	0,75
11	12000	0,01	0.05-0.35	0,75
12	12000	0,015	0.05-0.35	0,75
13	12000	0,005	0.05-0.35	0,75
14	12000	0,01	0.05-0.35	0,75
15	16000	0,005	0.05-0.35	0,75
16	16000	0,01	0.05-0.35	0,75
17	16000	0,015	0.05-0.35	0,75
18	20000	0,005	0.05-0.35	0,75
19	20000	0,01	0.05-0.35	0,75
20	20000	0,015	0.05-0.35	0,75
21	20000	0,02	0.05-0.35	0,75
22	12000	0,005	0.05-0.35	1,5
23	12000	0,01	0.05-0.35	1,5
24	12000	0,015	0.05-0.35	1,5
25	12000	0,02	0.05-0.35	1,5
26	12000	0,025	0.05-0.35	1,5

Obrázek 26 - Tabulka provedených měření s měnícími se řeznými podmínkami

### 5.1.1 Obráběcí stroj

Na experiment bylo použito vertikální frézovací centrum MCVL 1000 vybavené otočně-sklopným stolem 5AX-220 II ZA Nikken (Obrázek 27). Díky otočně-sklopnému stolu lze na stroji provádět pětiosé obrábění běžnými nástroji. Stroj dokáže vyvinout až 40 000 ot/min. Pohyb v ose X je 1 000 mm a v osách Y a Z 600 mm. Stroj je vybaven řídicím systémem Heidenhain iTNC530.



Obrázek 27 - Obráběcí stroj MCVL 1000

### 5.1.2 Obráběcí nástroj

Jedná se o sadu PKD fréz o průměru 1,5 mm (Obrázek 28). Jsou to frézy se 4 zuby (jiní výrobci používají jen například 2 zuby, ale se 4 zuby se zvýší celková produktivita obrábění), úhlem šroubovice 30° a úhlem čela 15°.



Obrázek 28 - Jedna z testovaných PKD fréz malého průměru

### 5.1.3 Upínání nástroje

Nástroj byl upínán za pomoci tepelného upínače od firmy HAIMER E40.180.03 s otvorem o průměru 3 mm s výstupkem 70 mm (Obrázek 29). Upínač do stroje byl kužel HSK-E40.



Obrázek 29 - Tepelný upínač HAIMER

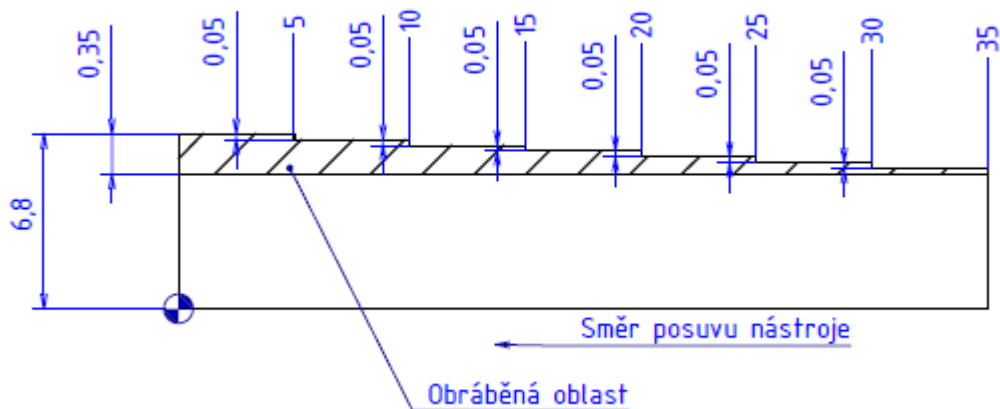
### 5.1.4 Obráběný materiál



Obrázek 30 - Finální podoba obrobku upnutá na dynamometru KISTLER

Při experimentu byla obráběna hliníková slitina EN AW-7075, která se vyznačuje vysokou tvrdostí a nízkou hmotností zároveň. Obrobek měl rozměry 58,8 x 35 x 6,8 mm (Obrázek 30). Obrobek byl připraven tak, že na povrchu bylo vyfrézováno 7 schodů s převýšením 0,05 mm (Obrázek 31). Při obrábění nebyla použita procesní kapalina.





Obrázek 31 - Schématické znázornění obrobku a určení směru nástroje

### 5.1.5 Měření sil

#### *Dynamometr*

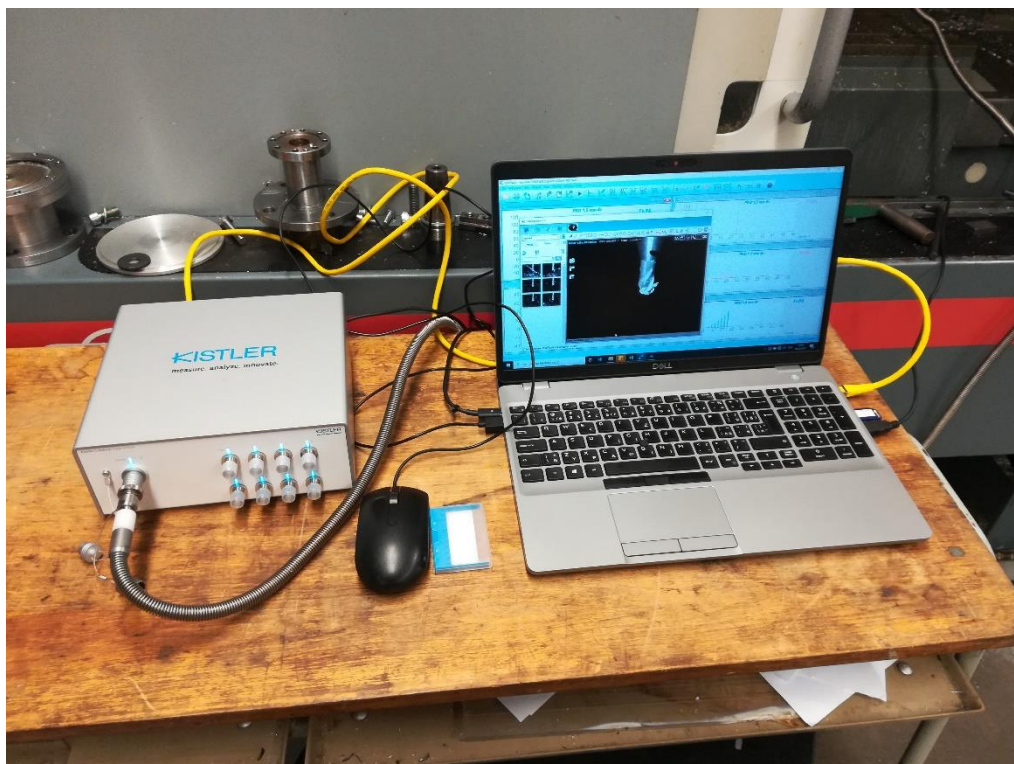
Pro měření sil byl použit univerzální vícesložkový dynamometr Typ 9119AA2 od firmy KISTLER s vysokou vlastní frekvencí, silou do 4 kN, s rozměry 107 x 80 mm a upínací plochou 55 x 80 mm (Obrázek 32). Jedná se o vysoce citlivý dynamometr, který umožňuje přesné měření velmi malých sil a zaručuje minimální vlivy tepelných účinků.



Obrázek 32 - Dynamometr KISTLER

#### *Zesilovač dynamometru*

Při měření byl použit univerzální 4 kanálový nábojový zesilovač dynamometru KISTLER LabAmp 5167Ax0. Tento dynamometr je ideální pro aplikace s vícesložkovými dynamometry. Na obrázku je vidět propojení zesilovače s dynamometrem na jedné straně a s notebookem s vyhodnocovacím softwarem na straně druhé (Obrázek 33).



Obrázek 33 - Zapojení zesilovače dynamometru KISTLER

### Software

Pro záznam sil byl použit software DinoWare 3.1.

#### 5.1.6 Videozáznam

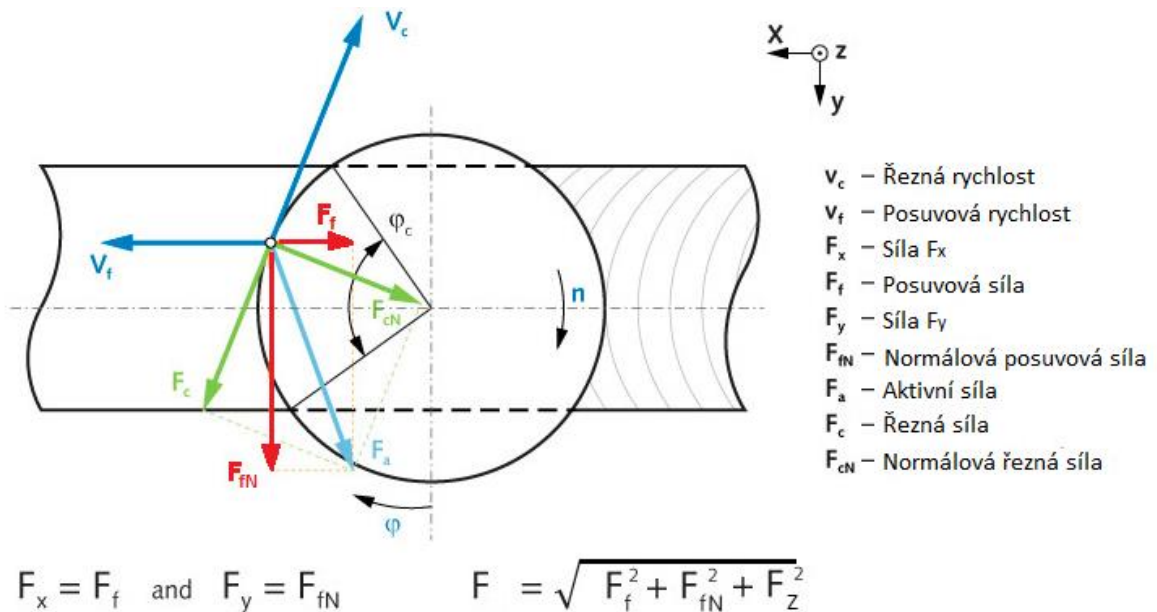
Při experimentu byla použita mikroskopická kamera Dino-Lite AM7515MT8A pro další vyhodnocení a porovnání sil se skutečností (Obrázek 34). Tato kamera má rozlišení 2592 x 1944 pixelů se zvětšením 700x až 900x a má také vestavěné koaxiální osvětlení.



Obrázek 34 - Mikroskopická kamera Dino-Lite

5.2 Zpracování výsledků experimentálního testování

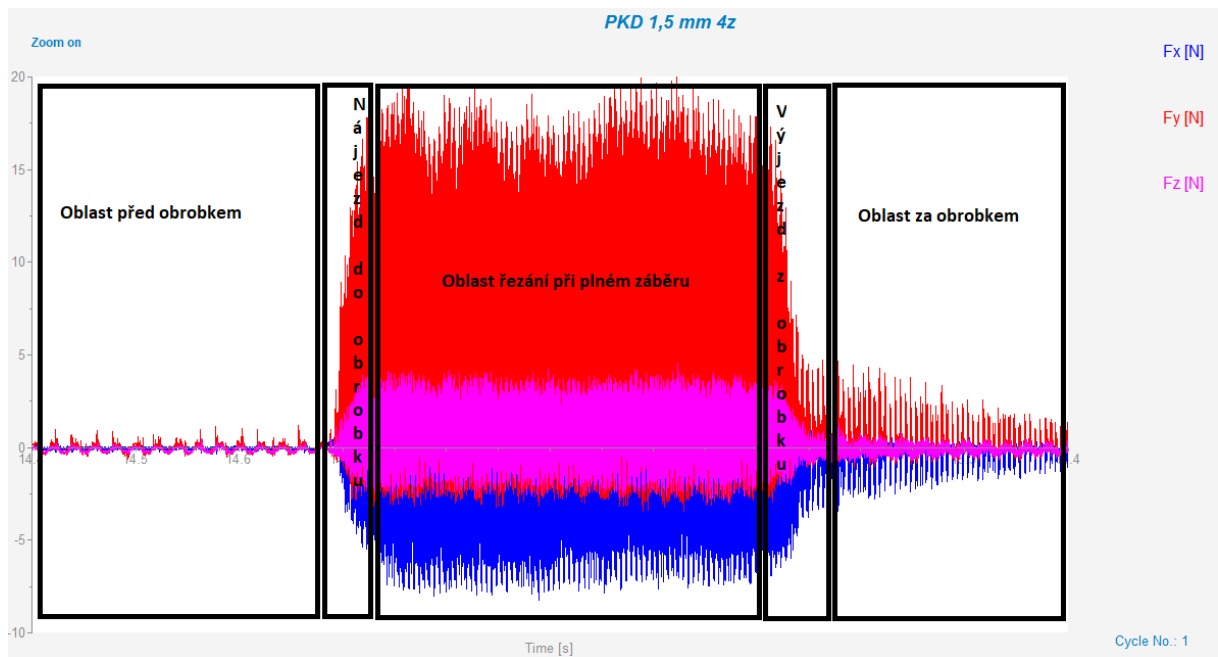
Pro zobrazení průběhu sil byl použit software Dynoware 3.1, kde se odečítaly průměrné síly ve třech základních osách  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . Kde  $F_x$  je síla posuvová ( $F_f$ ) a síla  $F_y$  je normálová posuvová síla ( $F_{fN}$ ) (Obrázek 35). Síla  $F_z$  není na obrázku zobrazena, protože se nejedná o složku aktivní síly  $F_a$ , ale jedná se o sílu, která působí do osy nástroje. Ze záznamu sil se také odečítaly maximální síly ve třech základních osách  $F_{xmax}$ ,  $F_{ymax}$  a  $F_{zmax}$ . Vyhodnocovali se vždy síly v oblasti před řezem, v oblasti za řezem a ze tří oblastí sil v řezu (Obrázek 36).



Obrázek 35 - Rozklad řezných sil při čelním frézování [38]

Všechny síly byly zpracovávány v softwaru MS Excel, kde se vypočetla výsledná síla při každém měření. Provedlo se 182 experimentů, kde se dále vyhodnocovalo u každého experimentu 6 sil v jedné oblasti ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $F_{xmax}$ ,  $F_{ymax}$ ,  $F_{zmax}$ ) a při jednom měření bylo vyhodnoceno 5 oblastí. Celkově ze záznamu sil bylo vyhodnoceno 5 460 hodnot.

Další práce spočívala ve zhodnocení zjištěných hodnot. Jaké jsou závislosti sil na řezných podmínkách (klesající, stoupající, lineární, nelineární atp.)? Jsou zde nějaké podezřelé hodnoty v datech (nebudou sedět do závislosti)? Souhlasí naměřené závislosti s teorií v literatuře? Toto byly hlavní otázky, které musely být zodpovězeny.

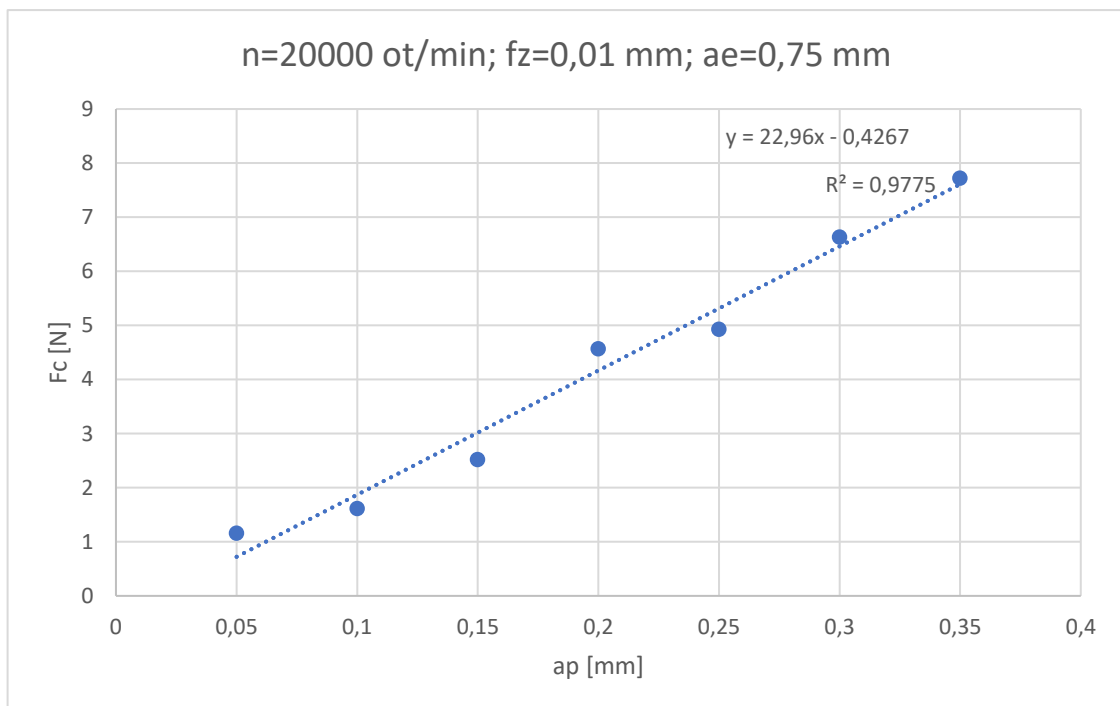


Obrázek 36 - Ukázka z vyhodnocovacího softwaru Dinoware 3.1

### 5.2.1 Grafické hodnocení experimentálního testování

#### Závislost řezné síly na axiální hloubce řezu

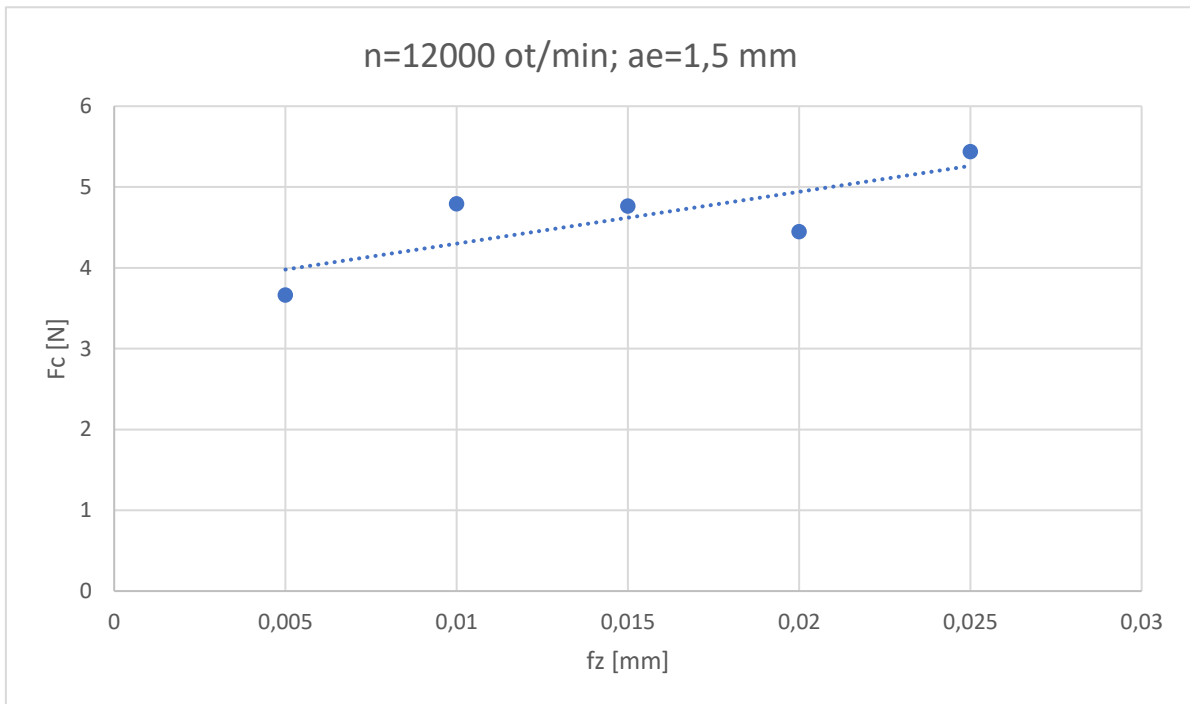
V těchto závislostech se postupně měnily axiální hloubky řezu vždy o 0,05 mm. Jednalo se o hodnoty  $a_p = 0,05 - 0,35$  mm (Obrázek 37). Z těchto závislostí bylo zjištěno, že při konstantních otáčkách, radiální hloubce řezu a posuvu na zub se síly mění lineárně s průměrnou hodnotou spolehlivosti  $R^2 = 0,92$ . Celkem bylo vytvořeno 26 grafů.



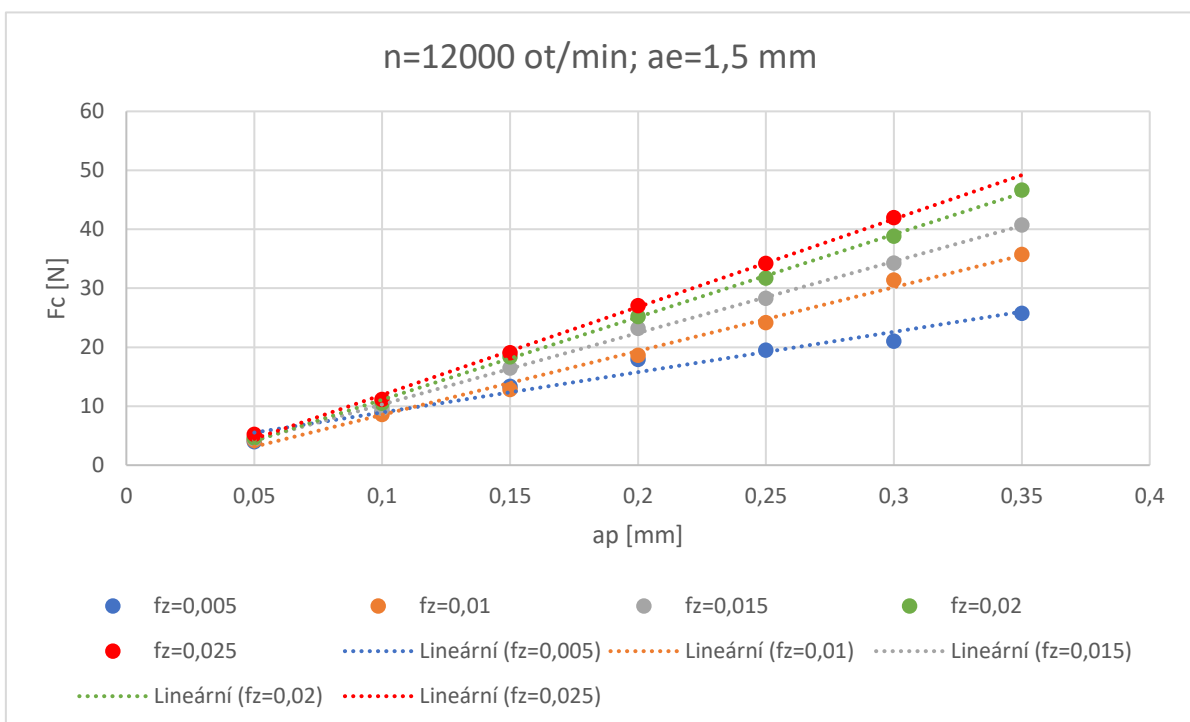
Obrázek 37 - Závislost řezné síly na axiální hloubce řezu

*Porovnání jednotlivých měření při různých posuvech na zub*

V grafu je uvedena řezná síla v závislosti na posuvu na zub, kde se hodnoty vždy lišily o 0,005 mm a jsou to hodnoty  $f_z=0,005-0,025$  mm (Obrázek 38). Další závislosti, které byly vyneseny, byly porovnávací grafy výsledných řezných sil při měnící se axiální hloubce řezu, kde se porovnávaly různé posuvy na zub (Obrázek 39). Zjistilo se, že s větším posuvem na zub se zvyšuje i celková řezná síla, což byl očekávaný průběh.



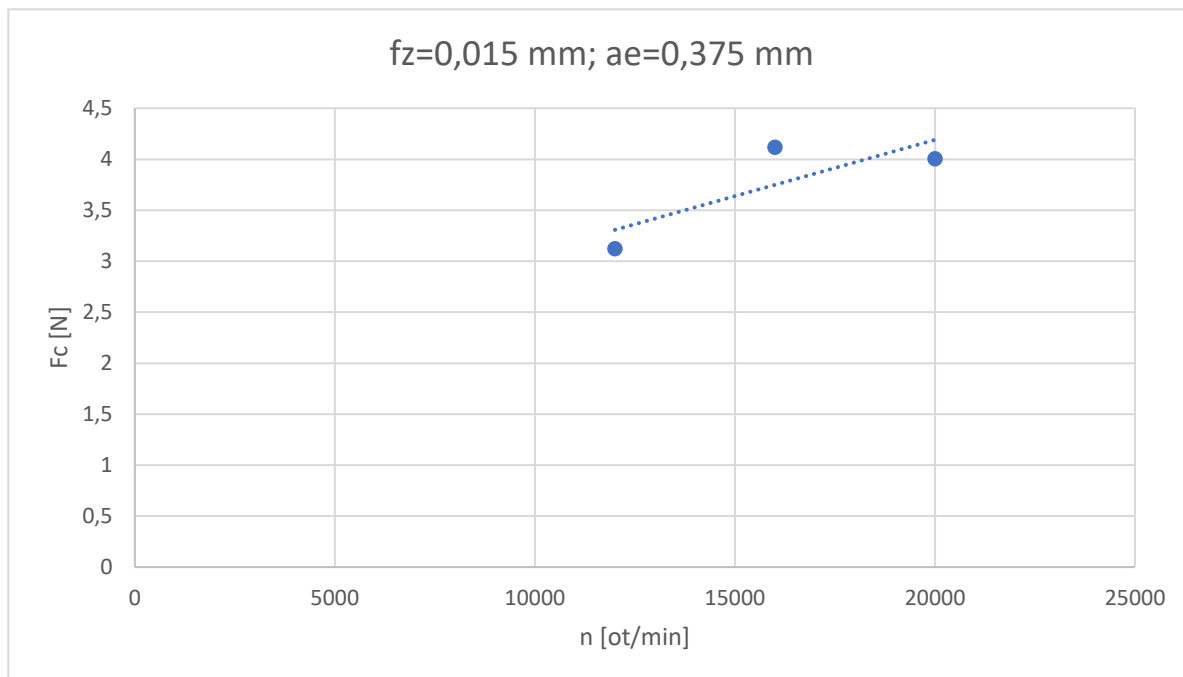
Obrázek 38 - Závislost řezné síly na posuvu na zub



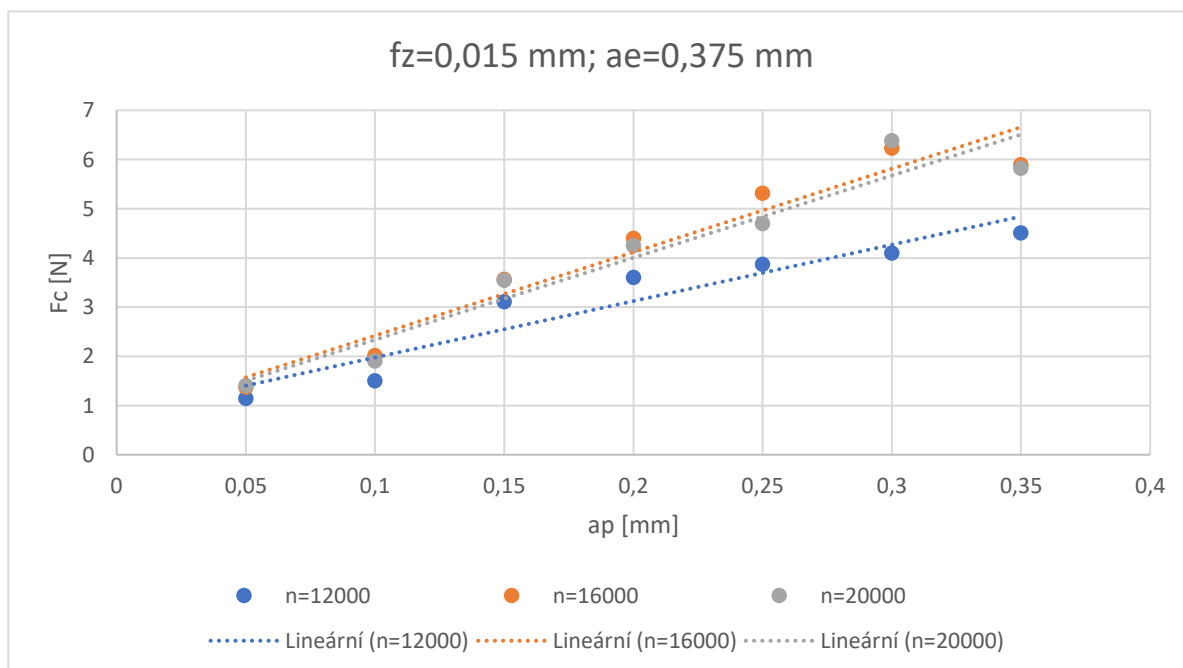
Obrázek 39 - Závislost řezné síly na axiální hloubce řezu při různých posuvech na zub

*Porovnání jednotlivých měření při různých otáčkách*

Zde se porovnávala jednotlivá měření v závislosti na měnících se otáčkách. Zkoušené otáčky byly  $n = 12\ 000\ \text{ot/min}$ ,  $n = 16\ 000\ \text{ot/min}$  a  $n = 20\ 000\ \text{ot/min}$  (Obrázek 40) a jako u předešlého porovnání i závislost při různých hloubkách záběru je uvedena v grafu (Obrázek 41). Průběhy byly různé, ale z grafů je patrné, že největší síly jsou při otáčkách  $n=16\ 000\ \text{ot/min}$ . Při otáčkách  $n = 12\ 000\ \text{ot/min}$  jsou síly nejnižší, ale od  $16\ 000\ \text{ot/min}$  do  $20\ 000\ \text{ot/min}$  má řezná síla klesající trend, takže je možné, že při vyšších otáčkách by řezná síla ještě dále klesala, ale to by se muselo ověřit dalšími experimenty.



Obrázek 40 - Závislost řezné síly na otáčkách

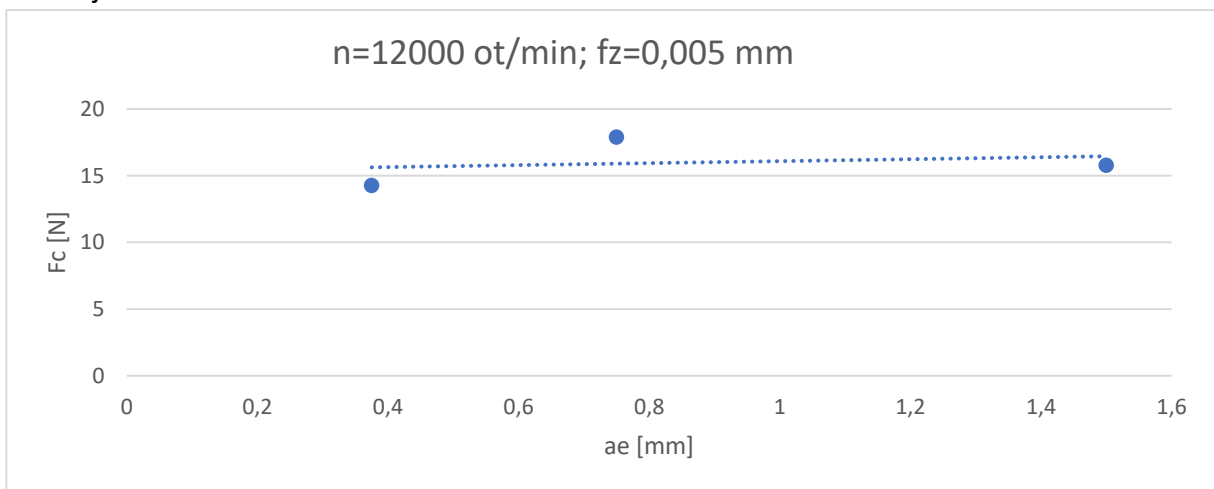


Obrázek 41 - Závislost řezné síly na axiální hloubce řezu pro různé otáčky

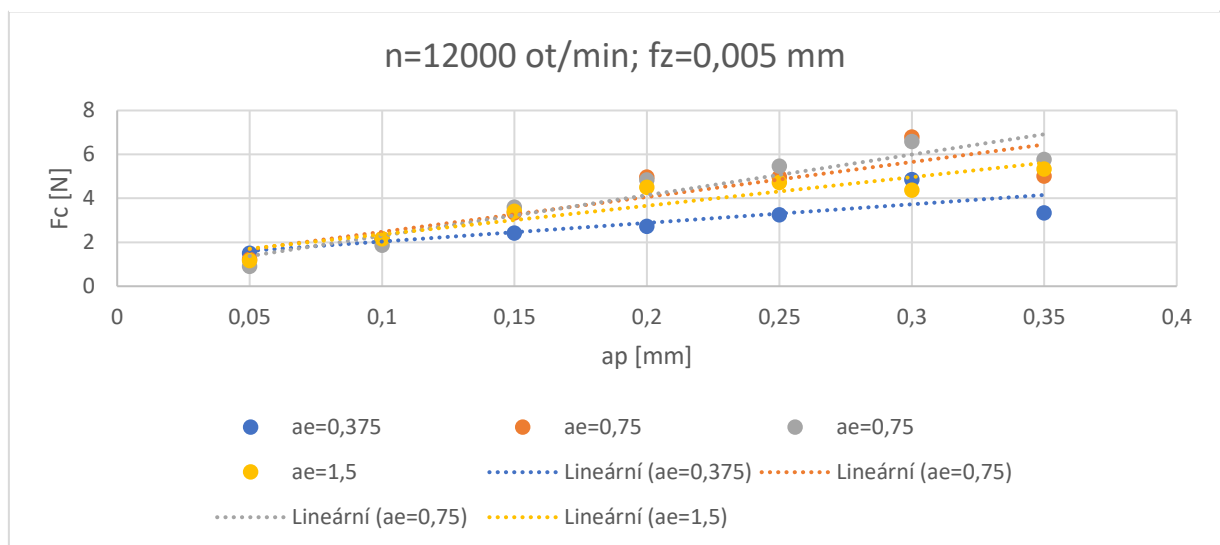
*Porovnání jednotlivých měření pro různé radiální hloubky záběru*

Zde byla porovnána řezná síla v závislosti na radiální hloubce záběru. Radiální hloubky záběru byly  $a_e=0,375$  mm;  $a_e=0,75$  mm a  $a_e=1,5$  mm (Obrázek 42) a jako u předešlého porovnání, ukázka závislosti řezné síly na hloubce řezu při různých hloubkách záběru je uvedena v grafu (Obrázek 43). Zde bylo vyzorováno, že nejvyšší síly působí na nástroj při záběru  $a_e=0,75$  mm.

Z těchto porovnaní je patrné, že při větší axiální hloubce řezu  $a_p$  se řezná síla zvyšuje lineárně. Tento trend má i posuv na zub  $f_z$ , kde s větším posuvem řezná síla roste. U otáček je tomu jinak. Zde vidíme, že nejnižší síly jsou při menších otáčkách, dále se zvýší a potom mírně klesají, ale v tomto ohledu navrhuji pro následující řešení prací přidat další měření, jestli síly ještě dále budou klesat. Ohledně radiální hloubky záběru, zde bylo zjištěno, že největší síla působí při polovičním záběru průměru frézy. Kdy při plném záběru již vymizí síly při odtlačování nástroje.



Obrázek 42 - Závislost řezné síly na radiální hloubce záběru



Obrázek 43 - Závislost řezné síly na axiální hloubce záběru při různých radiálních hloubkách záběru

5.2.2 Hodnocení experimentálního testování regresní analýzou

Regresní analýza pro toto měření byla provedena v softwaru MS Excel. Regresní analýzou byla zjištěna hodnota T statistiky, která vypovídá o závislosti závisle proměnné na nezávisle proměnných. Podle této statistiky byly hodnoty (Obrázek 44):

- Pro axiální hloubku záběru  $a_p \Rightarrow$  T-statistika = 24,26
- Pro radiální hloubku záběru  $a_e \Rightarrow$  T-statistika = 3,26
- Pro otáčky  $n \Rightarrow$  T-statistika = 1,49
- Pro posuv na zub  $f_z \Rightarrow$  T-statistika = 5,22

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	VÝSLEDEK								
2									
3	<i>Regresní statistika</i>								
4	Násobné R	0,884062485							
5	Hodnota spolehlivosti R	0,781566478							
6	Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,776630127							
7	Chyba stř. hodnoty	1,18598229							
8	Pozorování	182							
9									
10	ANOVA								
11		<i>Rozdíl</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Významnost F</i>			
12	Regrese	4	890,792003	222,6980007	158,3287965	2,37629E-57			
13	Rezidua	177	248,9600566	1,406553992					
14	Celkem	181	1139,75206						
15									
16		<i>Koeficienty</i>	<i>Chyba stř. hodnoty</i>	<i>t Stat</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>Dolní 95%</i>	<i>Horní 95%</i>	<i>Dolní 95,0%</i>	<i>Horní 95,0%</i>
17	Hranice	-1,956974635	0,564973489	-3,463834452	0,000667935	-3,071925635	-0,842023635	-3,071925635	-0,842023635
18	Soubor X 1 - $a_p$	21,32310769	0,879108562	24,25537483	3,62318E-58	19,58822457	23,05799082	19,58822457	23,05799082
19	Soubor X 2 - $a_e$	0,780844252	0,239860737	3,255406708	0,001356778	0,307489353	1,254199151	0,307489353	1,254199151
20	Soubor X 3 - $n$	4,23574E-05	2,84772E-05	1,487412791	0,138685104	-1,38412E-05	9,8556E-05	-1,38412E-05	9,8556E-05
21	Soubor X 4 - $f_z$	79,00492045	15,14436118	5,216787919	5,05029E-07	49,11817181	108,8916691	49,11817181	108,8916691
22									

Obrázek 44 - Regresní statistika z MS Excel

Podle této analýzy je vidět, že největší podíl na výsledné řezné síle má axiální hloubka řezu  $a_p$ . Na dalších místech je posuv na zub  $f_z$ , radiální hloubka řezu  $a_e$  a otáčky  $n$ . Pro snížení sil při obrábění musíme tedy zmenšit axiální hloubku řezu, díky čemuž se nám nejvíce sníží síly. Naopak pro zvýšení produktivity můžeme zvýšit otáčky.



## Závěr

Bakalářská práce se zaměřuje na nástroje pro mikrofrézování. Cíl práce je zpracování přehledu mikronástrojů (průměr nástroje do 1 mm) a nástrojů malých průměrů (průměr nástroje větší než 1 mm). Průzkum se týká i základní geometrie, která slouží pro návrh vlastního PKD nástroje. Dalším cílem práce je experimentální testování vlastností navrhovaného PKD nástroje. Práce je rozdělena na dvě části.

První část práce je zaměřena na samotnou rešerši mikronástrojů a nástrojů malých průměrů. Uvádí základní definice a pojmy v obrábění, frézování a mikrofrézování. Dále popisuje silové působení při obrábění a měření těchto sil. Poté se v této části nachází přehled mikronástrojů od vybraných výrobců, podle kterého je sestavena souhrnná tabulka s přehledem geometrie a základních parametrů (viz. Přílohy – Souhrnná tabulka). Záměrem práce bylo, na základě tohoto průzkumu, navrhnutí originálního PKD frézovacího nástroje pro obrábění slitiny hliníku, na který se práce zaměřuje. Na konci této části jsou uvedeny aplikace mikrofrézování.

Druhá část práce je zaměřena na experiment, kde byla dodána sada PKD fréz malých průměrů s průměrem 1,5 mm. Tato část popisuje všechny komponenty a průběh experimentu a dále hodnocení naměřených sil. Hodnocení sil je provedeno pomocí XY grafů v MS Excel a dále pomocí regresní analýzy, kde se zjistilo, jaká proměnná má na výslednou sílu největší vliv. Pomocí těchto prostředků se zjistilo, že největší vliv na výsledné řezné síly má axiální hloubka záběru  $a_p$  a dále posuv na zub  $f_z$ . Bylo také zjištěno, že nejmenší vliv na řeznou sílu mají otáčky  $n$ , resp. řezná rychlost  $v_c$ .

## Citovaná literatura

- M. A. Camara, J. C. Campos Rubio, A. M. Abrao a J. P. Davim, „State of the Art on  
1] Micromilling of Materials,“ ScienceDirect, 22 7 2012. [Online]. Available:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030212601157>. [Přístup  
získán 28 5 2021].
- B. Z. Balázs, N. Geier, M. Takács a J. P. Davim, „Critical review,“ The International  
2] Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28 12 2020. [Online]. Available:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-06445-w>. [Přístup získán 28 5  
2021].
- J. Mádl, J. Kafka, M. Vrabec a R. Dvořák, Technologie obrábění 3. díl, Praha: ČVUT,  
3] 2007.
- R. Čep a J. Petru, „MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH  
4] METOD,“ VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2013. [Online].  
Available:  
[http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_002/%C3%A9avod%20do%20terorie%20ob  
r%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_002/%C3%A9avod%20do%20terorie%20ob<br/>r%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf). [Přístup získán 25 10 2020].
- J. Brychta, R. Čep, M. Sadílek, L. Petřkovská a J. Nováková, „Studijní materiály pro  
5] studijní obor strojírenská technologie Fakulty strojní,“ Vysoká škola báňská – Technická  
univerzita Ostrava, 2007. [Online]. Available:  
<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>. [Přístup získán 26 10 2020].
- R. Bugayevskiy, „Diplomová práce,“ České vysoké učení technické v Praze, 2018.  
6] [Online]. Available: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80863/F2-BP-2019-  
Bugayevskiy-Ruslan-  
Bakalarska%20prace%28Bugayevskiy%20Ruslan%29.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80863/F2-BP-2019-Bugayevskiy-Ruslan-Bakalarska%20prace%28Bugayevskiy%20Ruslan%29.pdf?sequence=-1&isAllowed=y).  
[Přístup získán 26 10 2020].

J. Mádl a J. Barcal, *Základy technologie II.*, Praha: Česká technika - nakladatelství  
7] ČVUT, 2002.

J. Tkadlec, „Diplomová práce,“ *Vysoké učení technické v Brně*, 2019. [Online].  
8] Available:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=192932](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=192932).  
[Přístup získán 30 5 2021].

K. Hasoň, „Bakalářská práce,“ *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně*, 2013. [Online].  
9] Available:  
[http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24665/haso%20\\_2013\\_bp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24665/haso%20_2013_bp.pdf?sequence=1). [Přístup získán 29 5 2021].

F. Plánička, „MM spektrum,“ *MM průmyslové spektrum*, 4 9 2012. [Online].  
10] Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pkd-a-cbn-nastroje.html>. [Přístup  
získán 27 12 2020].

ROTANA, „Ultravrdé nástroje,“ ROTANA A.S., [Online]. Available:  
11] <https://www.rotana.cz/35-ultratvrde-nastroje.html>. [Přístup získán 27 12 2020].

M. Cmiel, „DIPLOMOVÁ PRÁCE,“ *VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ*, 2009.  
12] [Online]. Available:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15579](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15579).  
[Přístup získán 29 12 2020].

J. Mádl, *Teorie obrábění*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1990.  
13]

P. Zeman a J. Kovalčík, „Principles of Cutting Process Modelling and New  
14] Algorithm Proposal,“ 12 2014. [Online]. Available:  
[https://www.researchgate.net/publication/270279219\\_Principles\\_of\\_Cutting\\_Process\\_](https://www.researchgate.net/publication/270279219_Principles_of_Cutting_Process_Modelling_and_New_Algorithm_Proposal)  
[Modelling\\_and\\_New\\_Algorithm\\_Proposal](https://www.researchgate.net/publication/270279219_Principles_of_Cutting_Process_Modelling_and_New_Algorithm_Proposal). [Přístup získán 19 7 2021].

J. Mádl, *Experimentální metody v teorii obrábění*, Praha: České vysoké učení  
15] technické v Praze, 1988.

M. Takács, B. Verő a I. Mészáros, „Micromilling of metallic materials,“ v *Journal of*  
16] *materials processing technology*, Elsevier, 2003.

M. Pagáč, „MM spektrum,“ MM Průmyslové spektrum, 16 3 2011. [Online].  
17] Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/webovy-seminar-predstavil-mikrofrezovani.html>. [Přístup získán 2 11 2020].

V. Janoušek, „MM spektrum,“ MM Průmyslové spektrum, 20 6 2007. [Online].  
18] Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mikrofrezovani-oceli-zdroj-uspor.html>. [Přístup získán 2 11 2020].

D. Benešová, „MM spektrum,“ MM průmyslové spektrum, 14 12 2010. [Online].  
19] Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mikrofrezovani-jemnych-tvaru-a-struktur-ve-vyrobe-forem.html>. [Přístup získán 26 11 2020].

LASCAM, „Mikroobábění,“ LASCAM, 12 6 2017. [Online]. Available:  
20] <https://www.lascam.cz/mikroobrabeni/>. [Přístup získán 28 5 2021].

FRAISA SA, „Katalog FRAISA,“ FRAISA, [Online]. Available:  
21] <https://www.fraisa.com/en/assets/media/pdf/kataloge/en/FRAISA-end-milling-tools-2014.pdf>. [Přístup získán 26 11 2020].

Sandvik Coromant, „Katalog Sandvik Coromant,“ Sandvik Coromant, 2020.  
22] [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/downloads/pages/default.aspx#query=%7B%22n%22:%22%22,%22l%22:%22%22,%22r%22:%5B%7B%22n%22:%22TIBPAvailability%22,%22v%22:%5B%7B%22n%22:%22Available%22%7D%5D%7D,%7B%22n%22:%22TIBPMetadataLanguage%22,%22v%22:%5B%7B%22n>. [Přístup získán 29 11 2020].

Seco Tools, „Katalog Seco,“ SECO TOOLS, 2020. [Online]. Available:  
23] <https://usercontent.azureedge.net/Content/UserContent/Documents/027780.pdf>.  
[Přístup získán 21 12 2020].

WNT, „WNT-download,“ WNT Ceratizit, 2020. [Online]. Available:  
24] <https://www.wnt.com/cz/download.html>. [Přístup získán 21 12 2020].

Silmax S. p. A., „Katalog Silmax,“ SILMAX S.p.A., [Online]. Available:  
25] <https://www.silmax.it/toolkit-search/wp-content/uploads/silmax-hrc-brochure-web.pdf>. [Přístup získán 27 12 2020].

Telcon Diamond Ltd., „Telcon,“ Telcon Diamond Ltd., [Online]. Available:  
26] [https://telconpcd.com/catalog\\_product/micro-pcd-em/](https://telconpcd.com/catalog_product/micro-pcd-em/). [Přístup získán 12 2 2021].

NS TOOL Co., Ltd., „Katalog NS TOOL,“ NS TOOL CO., LTD., [Online]. Available:  
27] [https://www.ns-tool.com/en/download/pdf/PCD\\_1811.pdf](https://www.ns-tool.com/en/download/pdf/PCD_1811.pdf). [Přístup získán 12 2 2021].

Kyowa Co., Ltd., „Katalog Kyowa,“ Kyowa Seiko Co., Ltd., [Online]. Available:  
28] <https://www.kyowaseiko.co.jp/img/data/pcd201611.pdf>. [Přístup získán 2 12 2021].

ZECHA Hartmetall - Werkzeugfabrikation GmbH, „Katalog ZECHA,“ ZECHA,  
29] [Online]. Available: [https://www.zecha.de/images/pdf/Iguana\\_Flyer\\_low\\_10-2020.pdf](https://www.zecha.de/images/pdf/Iguana_Flyer_low_10-2020.pdf).  
[Přístup získán 20 3 2021].

PM-TECH s.r.o, „Katalog PM-TECH,“ PM-TECH, [Online]. Available:  
30] [https://www.pm-tech.cz/wp-content/uploads/2018/07/PM-TECH\\_frezy-tvrdokovove-nezelezne-kovy-a-plasty-2.pdf](https://www.pm-tech.cz/wp-content/uploads/2018/07/PM-TECH_frezy-tvrdokovove-nezelezne-kovy-a-plasty-2.pdf). [Přístup získán 20 3 2021].

Hoffmann Group, „Ekatalog HoffmannGroup,“ HoffmannGroup, [Online].  
31] Available: [https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=ces\\_CZ\\_CZE/catalogs/&catalog=90000001#page\\_1](https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=ces_CZ_CZE/catalogs/&catalog=90000001#page_1).  
[Přístup získán 20 3 2021].

D. Brown, „MoldMaking technology,“ MoldMaking technology, 1 3 2007.  
32] [Online]. Available: <https://www.moldmakingtechnology.com/careers/selecting-a-carbide-end-mill-for-aluminum-applications>. [Přístup získán 30 5 2021].

B. Morey, „sme,“ SME Media, 1 4 2009. [Online]. Available:  
33] <https://www.sme.org/technologies/articles/2009/grinding-gamma-titanium-aluminide-2/>. [Přístup získán 30 5 2021].

J. Benes, „American Machinist,“ American Machinist, 12 10 2009. [Online].

34] Available:

<https://www.americanmachinist.com/archive/features/article/21896752/cutters-for-plastics>. [Přístup získán 30 5 2021].

WILLEMIN MACODEL, „Dentaire,“ WILLEMIN MACODEL, [Online]. Available:

35] <https://willemin-macodel.com/dentaire/>. [Přístup získán 18 7 2021].

AliExpress, „CPU hliníkový chladič,“ AliExpress, [Online]. Available:

36] <https://www.aliexpress.com/i/33015168933.html>. [Přístup získán 18 7 2021].

WILLEMIN-MACODEL, „Horlogerie,“ WILLEMIN-MACODEL, [Online]. Available:

37] <https://willemin-macodel.com/horlogerie/>. [Přístup získán 18 7 2021].

KISTLER innovate. measure. analyze., „Measuring cutting forces in milling

38] operations,“ KISTLER, 2021. [Online]. Available:

<https://www.kistler.com/en/glossary/term/measuring-cutting-forces-in-milling-operations/>. [Přístup získán 19 7 2021].

ELUC Olomouc, „Pohyby při obrábění,“ ELUC Olomouc, [Online]. Available:

39] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1185>. [Přístup získán 28 5 2021].

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schematické znázornění obráběcí soustavy SNO (zde bez přípravku P)...	11
Obrázek 2 - Popis řezného nástroje – fréza [21] .....	12
Obrázek 3 - Řezné pohyby při čelním frézování [35].....	13
Obrázek 4 – Schéma sousměrného frézování [7] .....	14
Obrázek 5 - Schéma nesousměrného frézování [7].....	15
Obrázek 6 - Schéma čelního frézování [9] .....	15
Obrázek 7 - Rozklad sil při podélném soustružení [14] .....	18
Obrázek 8 - Mikrofréza v upínači [18] .....	21
Obrázek 9 - Přehled řezných materiálů při mikrofrézování z roku 2012 [1] .....	22
Obrázek 10 - Popis mikrofrézy [21] .....	23
Obrázek 11 - Ukázka z katalogu FRAISA [21] .....	26
Obrázek 12 - Ukázka z katalogu Sandvik Coromant [22].....	28
Obrázek 13 - Ukázka z katalogu Seco [23] .....	29
Obrázek 14 - Ukázka z katalogu WNT [24] .....	32
Obrázek 15 - Ukázka z katalogu Silmax [25] .....	34
Obrázek 16 - Ukázka z katalogu Telcon [26].....	35
Obrázek 17 - Ukázka z katalogu NS TOOL [27] .....	36
Obrázek 18 - Ukázka z katalogu Kyowa [28].....	37
Obrázek 19 - Ukázka z katalogu ZECHA [29].....	38
Obrázek 20 - Ukázka z katalogu PM-TECH [30] .....	39
Obrázek 21 - Nejvíce obráběné materiály mikrofrézováním z roku 2012 [1] .....	41
Obrázek 22 - Výroba zubní náhrady mikrofrézováním [36] .....	42
Obrázek 23 - Mikrofrézovaný pasivní chladič PC [37] .....	42
Obrázek 24 - Použití mikrofrézování v hodinářství [38] .....	43
Obrázek 25 - Náhled do obráběcího prostoru při experimentu.....	46
Obrázek 26 - Tabulka provedených měření s měnicími se řeznými podmínkami.....	46
Obrázek 27 - Obráběcí stroj MCVL 1000 .....	47
Obrázek 28 - Jedna z testovaných PKD fréz malého průměru .....	47
Obrázek 29 - Tepelný upínač HAIMER .....	48
Obrázek 30 - Finální podoba obrobku upnutá na dynamometru KISTLER .....	48
Obrázek 31 - Schématické znázornění obrobku a určení směru nástroje.....	49

Obrázek 32 - Dynamometr KISTLER.....	49
Obrázek 33 - Zapojení zesilovače dynamometru KISTLER.....	50
Obrázek 34 - Mikroskopická kamera Dino-Lite.....	50
Obrázek 35 - Rozklad řezných sil při čelním frézování [39].....	51
Obrázek 36 - Ukázka z vyhodnocovacího softwaru Dinoware 3.1 .....	52
Obrázek 37 - Závislost řezné síly na axiální hloubce řezu.....	52
Obrázek 38 - Závislost řezné síly na posuvu na zub.....	53
Obrázek 39 - Závislost řezné síly na axiální hloubce řezu při různých posuvech na zub .....	53
Obrázek 40 - Závislost řezné síly na otáčkách .....	54
Obrázek 41 - Závislost řezné síly na axiální hloubce řezu pro různé otáčky.....	54
Obrázek 42 - Závislost řezné síly na radiální hloubce záběru.....	55
Obrázek 43 - Závislost řezné síly na axiální hloubce záběru při různých radiálních hloubkách záběru.....	55
Obrázek 44 - Regresní statistika z MS Excel.....	56



## Přílohy – Souhrnná tabulka

TYP	VÝROBCE	PRŮMĚRY (od-do)	POČET BŘITŮ	ŘEZNÁ GEOMETRIE – ÚHEL ČELA $\gamma_0$	ŘEZNÁ GEOMETRIE – ÚHEL ŠROUBOVICE $\kappa_f$	APLIKACE	VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	ODKAZ
Válcová – univerzální použití 	FRAISA	0,2 mm – 3 mm	2	-10°	25°	Různé materiály s tvrdostí do 60 HRC a titan	Neuvedeno	<a href="#">FRAISA</a> (od str. 237)
Válcová – na titan a nerezové ocele	FRAISA	0,2 mm – 3 mm	2, 3	6°	25°	Titan a nerezové ocele	Neuvedeno	<a href="#">FRAISA</a> (243)
Válcová – na zlato, platínu, mosaz a měď	FRAISA	0,1 mm – 3 mm	2, 3	8°	30°	Zlato, platina, mosaz a měď	Neuvedeno	<a href="#">FRAISA</a> (245)
Válcová – na grafit	FRAISA	0,2 mm – 3 mm	2	6°	25°	Grafit	Neuvedeno, povlak CVD diamant	<a href="#">FRAISA</a> (625)
Válcová – univerzální použití	Sandvik Coromant	0,4 mm – 1 mm	2	Neuvedeno	30°	Různé materiály s tvrdostí do 63 HRC	Neuvedeno	<a href="#">Sandvik Coromant</a> (105)
Válcová – univerzální použití	SECO	0,2 mm – 1,5 mm	2	3°, 0°	45°	Různé materiály	Neuvedeno, povlak SIRA	<a href="#">SECO</a> (133)
Válcová – univerzální použití	WNT	0,2 mm – 2 mm	2	11°	30°	Různé materiály s tvrdostí do 62 HRC	Neuvedeno, povlak DPA 72S	<a href="#">WNT</a> (TK frézy 14/114)
Válcová – na kalené materiály	SECO	0,2 mm – 2 mm	2, 4	-1°	28°	Kalené materiály od 48 HRC do 70 HRC	Neuvedeno, povlak HXT	<a href="#">SECO</a> (331)
Válcová – na hliník 	SECO	0,5 mm – 2 mm	1	18°	30°	Obrábění hliníku	Neuvedeno, povlak MEGA-T	<a href="#">SECO</a> (302)
Válcová – na grafit CVD	SECO	0,2 mm – 3 mm	2, 4	10°, 8°	30°	Obrábění grafitu	Neuvedeno, povlak CVD diamant	<a href="#">SECO</a> (407)
Válcová – PKD 	NS-TOOL	0,1 mm – 1 mm	2, 6	15°	0°	Obrábění neželezných materiálů	Neuvedeno	<a href="#">NS-TOOL</a>
Válcová – PKD 	KYOWA	0,2 mm – 6 mm	2	Neuvedeno	30°	Obrábění neželezných materiálů	Neuvedeno	<a href="#">KYOWA</a>
Válcová 918– povlak diamant, vnitřní chlazení 	ZECHA	0,4 mm – 4 mm	3	Neuvedeno	5°	Obrábění abrazivních a neželezných materiálů a mědi	Neuvedeno, povlak diamant	<a href="#">ZECHA</a>
Válcová 915– povlak diamant 	ZECHA	0,5 mm – 3 mm	3	Neuvedeno	5°	Obrábění vysoce abrazivních materiálů	Neuvedeno, povlak diamant	<a href="#">ZECHA</a>
Válcová 930.F3– povlak diamant 	ZECHA	0,5 mm - 3 mm	3	Neuvedeno	12°	Obrábění kompozitů nebo slitiny mosazi bez obsahu olova	Neuvedeno, povlak diamant	<a href="#">ZECHA</a>
Válcová – jednobřitá, bez povlaku 	PM-TECH	0,2 mm – 12 mm	1	Neuvedeno	30°, -30°	Obrábění hliníku, mědi a měkkých plastů	Neuvedeno	<a href="#">PM-TECH</a>

	PM-TECH	0,2 mm – 20 mm	2, 3	Neuvedeno	30°, 45°	Obrábění hliníku, mědi a měkkých plastů	Neuvedeno	<a href="#">PM-TECH</a>
	PM-TECH	0,1 mm – 12 mm	2	Neuvedeno	30°	Obrábění hliníku, mědi a tvrdých plastů	Neuvedeno, povlak DLC	<a href="#">PM-TECH</a>
	GARANT	0,1 mm – 3 mm	2	Neuvedeno	Pro $\leq 0,8$ mm 25° Pro $\geq 1$ mm 30°	Obrábění hliníkových materiálů	Neuvedeno, povlak DLC	<a href="#">GARANT</a> (506)
	GARANT	0,1 mm – 3 mm	2	Neuvedeno	Pro $\leq 0,8$ mm 25° Pro $\geq 1$ mm 30°	Obrábění kompozitních materiálů a grafitu	Neuvedeno, povlak diamant	<a href="#">GARANT</a> (383)
	FRAISA	0,5 mm – 3 mm	2	-10°	25°	Různé materiály s tvrdostí od 48 HRC do 60 HRC, titan a nerez ocele	Neuvedeno	<a href="#">FRAISA</a> (479)
	FRAISA	1 mm – 3 mm	2	6°	25°	Titan a nerezové ocele	Neuvedeno	<a href="#">FRAISA</a> (495)
	WNT	0,5 mm – 2 mm	2	12°	30°	Různé materiály s tvrdostí do 62 HRC	Neuvedeno, povlak DPA 72S	<a href="#">WNT</a> (TK frézy 14/117)
	SILMAX	0,2 mm – 12 mm	2, 4	Neuvedeno	20°, 30°, 45°	Chromové a měkké oceli do 60 HRC	Neuvedeno	<a href="#">SILMAX</a> (46)
	SILMAX	0,5 mm – 4 mm	2	Neuvedeno	35°	Grafit	Neuvedeno, povlak CVD diamant	<a href="#">SILMAX</a> (62)
	ZECHA	0,5 mm – 4 mm	3	Neuvedeno	25°	Obrábění abrazivních a neželezných materiálů a mědi	Neuvedeno, povlak diamant	<a href="#">ZECHA</a>
	ZECHA	0,5 mm – 3 mm	2	Neuvedeno	5°	Obrábění vysoce abrazivních materiálů	Neuvedeno, povlak diamant	<a href="#">ZECHA</a>
	ZECHA	0,5 mm – 3 mm	3	Neuvedeno	25°	Obrábění kompozitů nebo slitiny mosazi bez obsahu olova	Neuvedeno, povlak diamant	<a href="#">ZECHA</a>