

ZKOUŠKA ŘEZIVOSTI FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ POVLAKOVANÝCH METODOU PVD

Filip Hubáček

Bakalářská práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Filip Hubáček**
Osobní číslo: **T18181**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Zkouška řezivosti frézovacích nástrojů povlakovaných metodou PVD**

Zásady pro vypracování

1. Teoretická studie na téma povlakování a řezivosti obráběcích nástrojů
2. Provedení měření jakosti povlaku a kontroly geometrie nástrojů
3. Návrh a realizace řezné zkoušky při frézování
4. Vyhodnocení řezivosti nástrojů vzhledem k povlaku nástroje

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: ČVUT, 1998, 168 s. ISBN 8001018644.

STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. *Metal Cutting Theory and Practice*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016], XXI, 947 s. ISBN 9781466587533.

SHAW, Milton Clayton; COOKSON, J. O. *Metal Cutting Principles*. New York: Oxford university press, 2005.

Normy ČSN ISO 3002, ČSN ISO 8688-1 a ČSN ISO 8688-2

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na frézování povlakovanými nástroji metodou PVD za účelem testování jejich opotřebení. Teoretická část se zabývá frézováním, nástroji určenými k frézování, povlakováním a hodnocením řezivosti nástrojů. V praktické části byl proveden experiment, který zjišťoval vliv PVD povlakované vrstvy na opotřebení frézy. Závěr práce byl věnován vyhodnocení experimentu ze získaných dat.

Klíčová slova: fréza, PVD povlak, hodnocení řezivosti nástroje, obrábění, frézování.

ABSTRACT

The theses focuses on milling by coating tools with the use of Physical Vapour Deposition (PVD) method. The aim is to test the deterioration of the tools. In the theoretical part of the theses is discussed milling, milling tools, coating and evaluation of rustiness of the tools. The practical part of the theses pursue an experiment that was carried out. The experiment tested whether the PVD coating prevents the milling machine from deteriorating. In the final part of the theses the experimental data are evaluated.

Keywords: milling cutter, Physical Vapour Deposition, evaluation of tool wear of the tools, machining, milling

Chtěl bych poděkovat všem, kteří se nějakým způsobem podíleli na této bakalářské práci. Především bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a čas, který této práci věnoval a za celkové odborné vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Petru Bouchalovi a firmě Planička TOOLS s.r.o. za poskytnuté nástroje pro provedení experimentu a firmě SHM s.r.o. za nanesení povlaků na nástroje pro experiment.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická, nahraná do IS/STAG, jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 FRÉZOVÁNÍ	11
1.1 TECHNOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA FRÉZOVÁNÍ	11
1.1.1 Válcové frézování	11
1.1.2 Čelní frézování	13
1.1.3 Okružní frézování.....	14
1.2 PRŮŘEZ TRÍSKY	15
1.3 FRÉZKY	16
1.3.1 Konzolové frézky	16
1.3.2 Stolové frézky	19
1.3.3 Rovinné frézky	20
1.3.4 NC a CNC frézky	21
2 FRÉZY	22
2.1 DĚLENÍ PODLE MATERIÁLU	22
2.2 DĚLENÍ PODLE SMĚRU, TVARU A POČTU ZUBŮ	24
2.3 DĚLENÍ PODLE KONSTRUKCE.....	24
2.4 DĚLENÍ PODLE GEOMETRICKÉHO TVARU	25
2.5 DĚLENÍ Z HLEDISKA TECHNOLOGIE	25
2.6 DĚLENÍ PODLE UPÍNÁNÍ	25
2.7 DĚLENÍ PODLE SMĚRU OTÁČENÍ	25
3 POVLAŠOVÁNÍ	26
3.1 CVD POVLAŠOVÁNÍ.....	27
3.2 PVD POVLAŠOVÁNÍ	28
3.2.1 Napařování	29
3.2.2 Napařování.....	29
3.2.3 Iontová implantace	29
3.2.4 Vlastnosti a uplatnění povlaků	30
3.2.5 Běžně používané povlaky	30
4 HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁŠTROJŮ	32
OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁŠTROJŮ	32
5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁŠTI	36
II PRAKTICKÁ ČÁŠTI	37
6 POPIS ŠTESTOVANÝCH NÁŠTROJŮ	38
6.1 FRÉZA S POVLAŠEM TRIPLECOATING CR.....	38
6.2 FRÉZA S POVLAŠEM ALWIN	39

6.3	FRÉZA BEZ POVLAKU.....	41
7	POLOTOVAR.....	43
7.1	ROZMĚRY A ÚPRAVA.....	43
7.2	MATERIÁL A VLASTNOSTI OBROBKU.....	45
8	POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE.....	46
8.1	UNIVERZÁLNÍ FRÉZKA DMU 50.....	46
8.2	NASTAVOVACÍ ZAŘÍZENÍ HAIMER UNO 20/40.....	47
8.3	DYNAMOMETR KISTLER 9129AA.....	48
8.4	KISTLER LABAMP 5167A.....	49
9	ZPŮSOB PROVEDENÍ EXPERIMENTU.....	51
10	FRÉZOVACÍ PROGRAMY PRO PROVEDENÍ EXPERIMENTU.....	53
10.1	MĚŘICÍ PROGRAM PRO G55.....	53
10.2	PROGRAM PRO DLOUHODOBÉ OBRÁBĚNÍ PRO G54.....	54
11	ZPRACOVÁNÍ DAT.....	56
12	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	59
12.1	FRÉZA S POVLAKEM TRIPLECOATING CR.....	59
12.2	FRÉZA S POVLAKEM ALWIN.....	62
12.3	FRÉZA BEZ POVLAKU.....	67
12.4	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU.....	71
ZÁVĚR.....		73
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		75
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		77
SEZNAM OBRÁZKŮ.....		78
SEZNAM TABULEK.....		80

ÚVOD

V současné době jde vývoj obráběcích technologií nezadržitelně rychle dopředu. S tím je spojen i zvýšený důraz na přesné rozměry a jakost povrchu výrobku. Obráběcí stroje jsou dováděny k dokonalosti, a ani obráběcí nástroje nesmí zaostávat. S tím samozřejmě úzce souvisí i jejich povrchové úpravy, a to zejména PVD a CVD povlaky.

V bakalářské práci s názvem „Zkouška řezivosti frézovacích nástrojů metodou PVD“, jsou objasněny principy frézování, jsou zde popsány různé typy frézování a v neposlední řadě se práce zabývá problematikou v oblasti povlakování. Celá práce se dělí na dvě části: teoretickou a praktickou.

Na začátku teoretické části se píše o samotném frézování, rozebírá se zde technologická charakteristika frézování, popisují se zde jednotlivé typy frézování a také stroje, které se používají pro tento typ třískového konvenčního obrábění. Dále se teoretická část zabývá samotnými nástroji na frézování. Jsou zde popsány druhy fréz, materiály, ze kterých se nástroje vyrábí. V kapitole povlakování se rozebírají metody CVD a PVD, přičemž metoda PVD je popsána více do hloubky. V poslední kapitole teoretické části je popsáno hodnocení řezivosti nástrojů.

Praktická část je věnována experimentu, kde se měří řezné síly na frézách od firmy Planička TOOLS s.r.o. Pro měření jsou použity frézy se stejnou geometrií. Frézy jsou odlišné pouze povlakem, kterým jsou povlakované. Jedna z fréz je bez povlaku. Povlaky byly na frézy nanášeny metodou PVD firmou SHM s.r.o.. Tyto frézy jsou měřeny pomocí dynamometru a CNC frézky. Získaná data jsou zpracována pomocí programu Microsoft Excel a následně vyhodnocena.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je jeden ze způsobů třískového obrábění k vytváření rovinných, přímkových a tvarových ploch. Při této metodě se materiál odebírá břity rotujícího nástroje. Samotný proces ubírání materiálu je přerušovaný díky jednotlivým zubům na nástroji. Víceklínový nástroj, který vykonává hlavní pohyb, se nazývá fréza. Při otáčení odebírají jednotlivé zuby malé nesouvislé třísky. Vedlejší pohyb ve formě posuvu dělá upnutý obrobek. Posuv obrobku je většinou kolmý k ose nástroje. Stroj určený k frézování se nazývá frézka. Existuje několik druhů frézek, např. obráběcí centra či víceosé CNC. [1] [2] [3]

1.1 Technologická charakteristika frézování

Frézování se rozděluje na válcové a čelní, a to v závislosti na použitém nástroji. Kromě těchto dvou základních způsobů se můžeme setkat s dalšími druhy frézování – okružním a planetovým. [1]

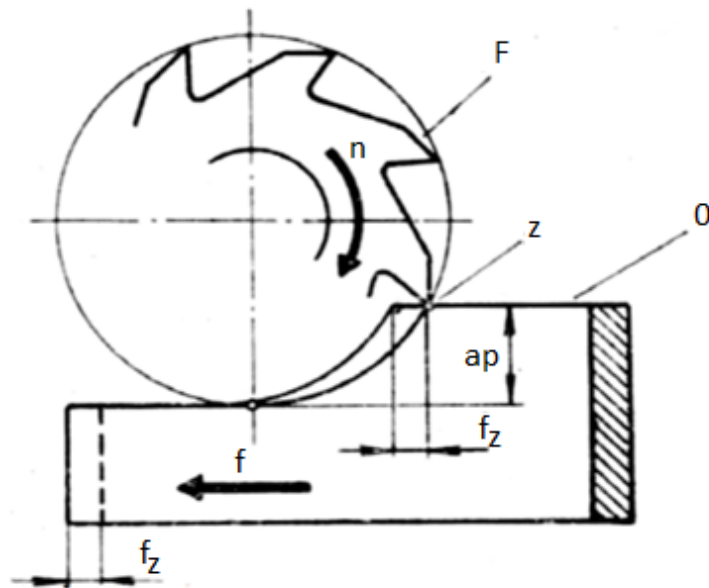
1.1.1 Válcové frézování

Při práci s válcovými frézami se používá metoda válcového frézování. Funkční část frézy – zuby, jsou umístěny po obvodu nástroje. Hloubka frézovaného materiálu se zadává kolmo na směr posuvu a osu frézy. Osa otáčení frézy je rovnoběžná s obráběnou plochou. Válcové frézování se dělí podle směru rotace frézy. Rozlišují se dva druhy válcového frézování: [1] [3]

- sousledné (sousměrné)
- nesousledné (protisměrné)

Sousledné frézování

Tento typ frézování je založen ve smyslu rotace ve směru posuvu obrobku. Při pronikání břitu do materiálu vzniká maximální tloušťka třísky. Když zub vystupuje ze záběru, vzniká obrobená plocha. Při souměrném (sousledném) frézování směřují řezné síly většinou dolů do materiálu. Stroj určený k souslednému frézování musí mít vymezenou vůli a přepětí mezi maticí stolu frézky a posuvným šroubem. Při nedodržení této podmínky by mohlo dojít k nestejnomyšernému posuvu, a tím k poškození frézy nebo frézky. [1] [3]



Obrázek 1 Záběr při sousledném frézování [26]

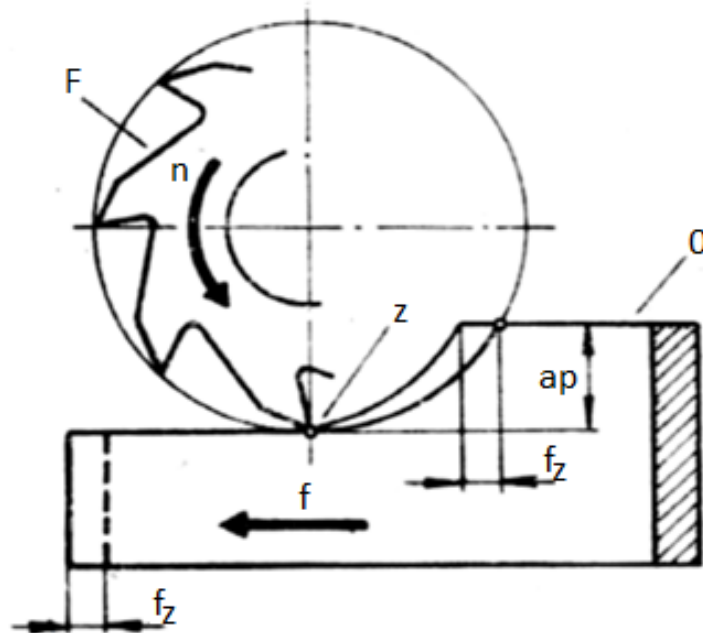
Výhody sousledného frézování:

- Potřebný řezný výkon je nižší.
- Použití vyšších řezných rychlostí a posuvů umožňuje vyšší trvanlivost břitů.
- Slabší sklon k tvorbě nárůstků.
- Řezná síla tlačí obrobek k upínacímu stolu, tím pádem umožňuje použití jednodušších upínacích přípravků.
- Menší sklon k vibracím.
- Obrobený materiál je méně drsný. [1]

Nesousledné frézování

Při nesousledném frézování odebíráme třísku zdola čili smysl otáčení nástroje je proti směru posuvu obrobku. Při vniknutí nástroje do obrobku vzniká obrobená plocha. Tloušťka třísky je měněna z nuly postupně na maximální velikost. To znamená, že k oddělení třísky dochází až po určitém skluzu břitu po ploše, kterou vytvořil předchozí zub, ne však v nulové tloušťce třísky. V této fázi mohou vznikat deformace a silové účinky, jež způsobují zvýšené

opotřebování nástroje. Obrobek musí být dobře upnut, aby nebyl uvolněn řeznou silou, která působí směrem nahoru a obrobek od stolu odtahuje. [1] [3]



Obrázek 2 Záběr při nesousledném frézování [26]

Výhody nesousledného frézování:

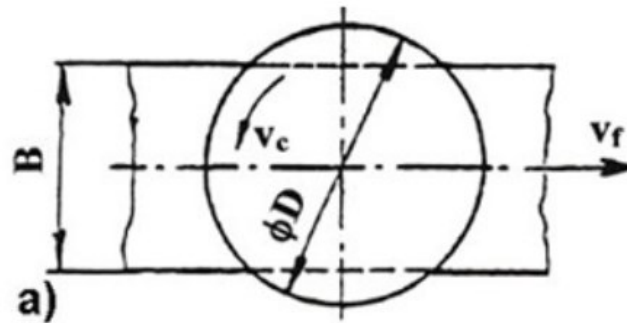
- Opotřebení šroubu a matice je menší.
- Vymezení vůle mezi posuvným šroubem a maticí není potřeba.
- Trvanlivost frézy není závislá na okujích.
- Hloubka řezu není závislá na záběru zubů frézy při jejich vnikání do obrobku.

[1]

1.1.2 Čelní frézování

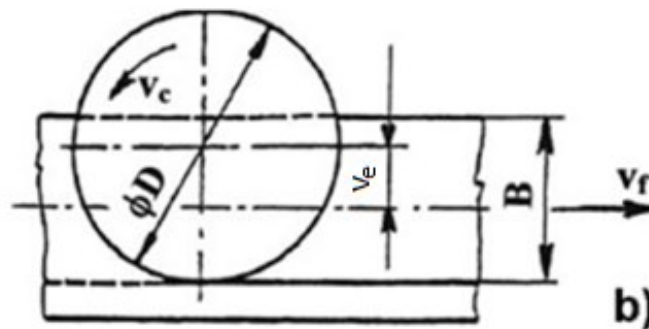
Na rozdíl od válcového frézování je osa frézovacího nástroje kolmá na plochu obrobku. Při čelním frézování se pracuje s čelními frézami. Plocha vzniklá čelním frézováním je většinou rovinná, případně tvarová. Frézovací břity u čelních fréz jsou na obvodu i na čele nástroje. K čelnímu frézování mohou být použity vodorovné i svislé frézky. Čelní frézování může být symetrické nebo nesymetrické, záleží na velikosti frézované plochy a průměru frézy. [1]

- a) Symetrické frézování - osa nástroje je zároveň osou frézované plochy.



Obrázek 3 Čelní frézování symetrické [5]

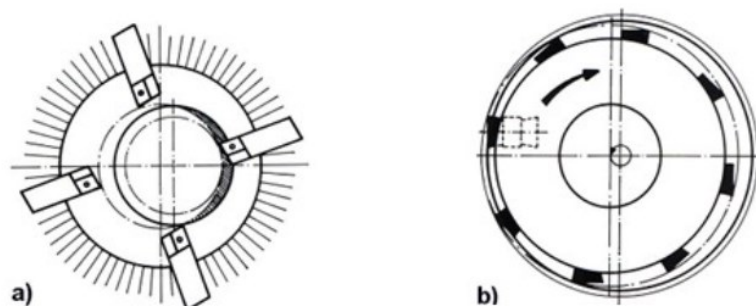
- b) Nesymetrické frézování – osa nástroje neprochází středem frézované plochy.



Obrázek 4 Čelní frézování nesymetrické [5]

1.1.3 Okružní frézování

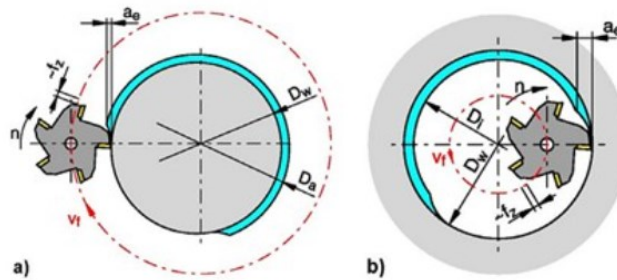
Okružní frézování pracuje za pomoci vícebřitých nástrojů. Mezi takové nástroje patří např. hlava osazená břitovými destičkami. Tyto nástroje pak rotují kolem obrobku – vnější okružní frézování nebo uvnitř obrobku – vnitřní okružní frézování. Touto metodou se nejčastěji vyřezávají závity nebo také slouží k obrábění dlouhých válcových tyčí. [4]



Obrázek 5 Okružní frézování a) vnější b) vnitřní [5]

1.1.4 Planetové frézování

Technologie planetového frézování spočívá v pohybu po kružnici, který vykonává nástroj. Stejně jako u okružního frézování se rozděluje na frézování vnitřní a vnější. Tento způsob umožňuje frézovat válcové či rotační plochy. [4]



Obrázek 6 Planetové frézování a) vnější b) vnitřní [5]

1.2 Průřez třísky

Velikost odřezávané třísky při válcovém sousledném frézování se mění od maximální tloušťky k nulové. Naopak je tomu při válcovém nesousledném frézování, kdy se hodnota tloušťky odřezávané třísky mění od nuly do maxima. Vztah k vyjádření jmenovité tloušťky třísky h_i v libovolné fázi jejího odřezávání se vyjádří vztahem:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z * \sin\varphi_i \quad (1)$$

f_z – posuv na zub

φ_i – úhel posuvového pohybu

Úhel φ_i se nemění jen v závislosti na poloze řešeného zubu, ale u nástrojů se zuby ve šroubovici nebo u nástrojů se šikmými zuby, také podél náležícího ostří. [1]

1.3 Frézky

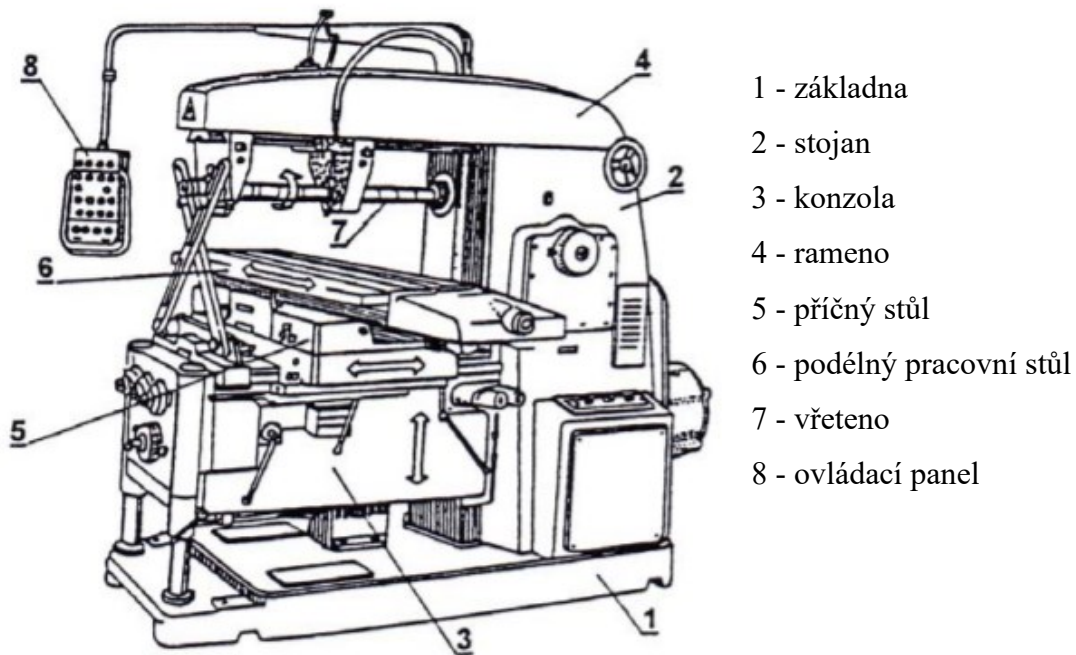
Jedním z nejuniverzálnějších obráběcích strojů je frézka, která dokáže obrobit jednu či více ploch obrobku za pomoci rotujících fréz. Vyrábí se celá řada frézovacích strojů, které se liší svým výkonem, velikostí nebo dalšími speciálními vlastnostmi. Na těchto strojích lze nejen frézovat, ale používají se také na závitování, vrtání, vyvrtávání nebo vyřezávání drážek. Frézovací stroje se dělí podle polohy vřetena na vodorovné a svislé, podle účelu a konstrukce na konzolové (obyčejné), stolové, rovinné a speciální a z hlediska řízení na stroje ruční, ruční s číslicovým ovládáním (NC) a stroje řízené počítačem (CNC). [5]

1.3.1 Konzolové frézky

Název je odvozen od jejich základních částí – výškově nastavitelné konzoly se stolem a podstavce stroje v podobě stojanu. Pohyblivý příčný stůl s podélným pracovním stolem je umístěn na konzole. Díky konzole se oba tyto stoly pohybují ve vertikálním směru. Každý z těchto stolů vykonává pohyb v jiném vodorovném směru. Tyto směry jsou k sobě navzájem kolmé. Tento systém umožňuje přenastavovat upnutý obrobek na pracovním stole ve třech pravouhlých rovinách vzhledem k nástroji. Konzolové frézky se používají při sériové či kusové výrobě. Umožňují frézovat rovinné i tvarové plochy u malých nebo středně velkých obrobků. Existují tři typy konzolových frézek - vodorovné, svislé a univerzální. [5]

Vodorovné frézky

Jejich název je odvozen od polohy osy pracovního vřetene, která je vodorovná. Zároveň je rovnoběžná s podélným stolem a také je kolmá ke směru pohybu pracovního podélného stolu. Tento typ se používá převážně k frézování ploch, které jsou rovnoběžné s upínací plochou stolu, tvarových ploch nebo drážek. K frézování se nejčastěji používají válcové, kotoučové a tvarové frézy. Frézovací trn nebo fréza se upíná kuželovou stopkou do kuželové dutiny, která se nachází v přední části vřetene. Opačným koncem je trn umístěn do opěrného ložiska. [5]



Obrázek 7 Vodorovná konzolová frézka [5]

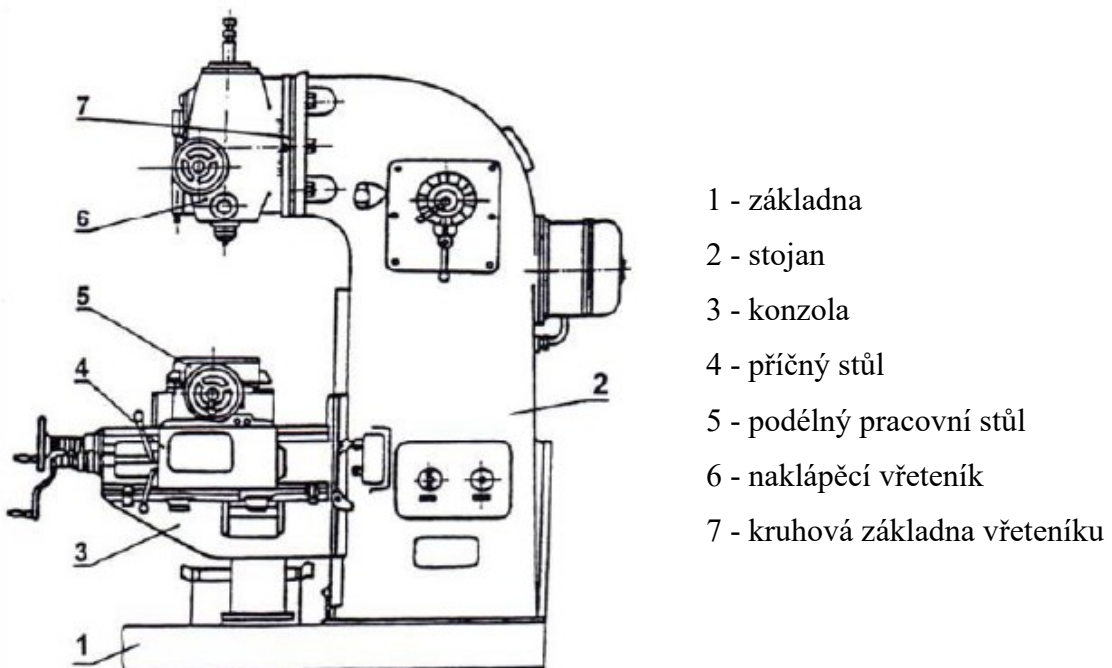
Svislé frézky

Upínací plocha stolu těchto frézek je kolmá k ose pracovního vřetene, odtud pochází jejich název. Pracovní vřeteno se nachází ve stojanu frézky nebo ve svislé hlavě, která je ke stojanu frézky připevněna. Svislá hlava je otočná v rozmezí 90°. Tyto frézky se používají převážně k frézování rovinných ploch, které jsou rovnoběžné s upínací plochou stolu. Dále se mohou tímto způsobem obrábět drážky a tvarové plochy. Pro tento typ frézování se používá celá řada čelních fréz. [5]

K frézování se používají čelní frézy:

- upnuté na krátkém trnu,
- s kuželovou stopkou,
- s válcovou stopkou.

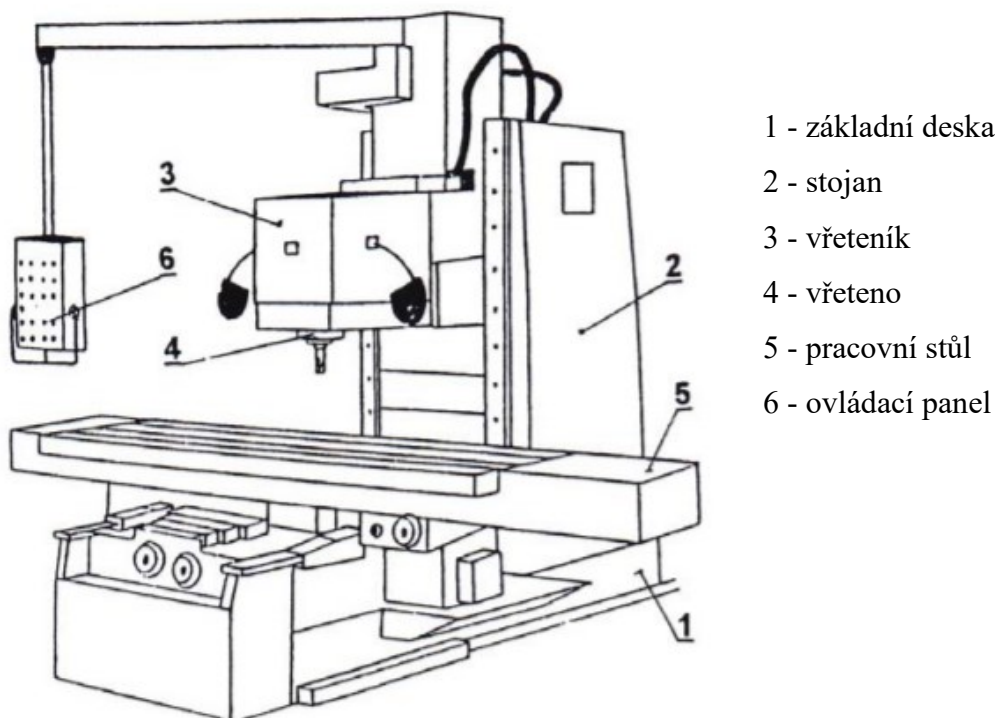
U větších frézek můžeme používat i frézovací hlavy. [5]



Obrázek 8 Svislá konzolová frézka [5]

1.3.2 Stolové frézky

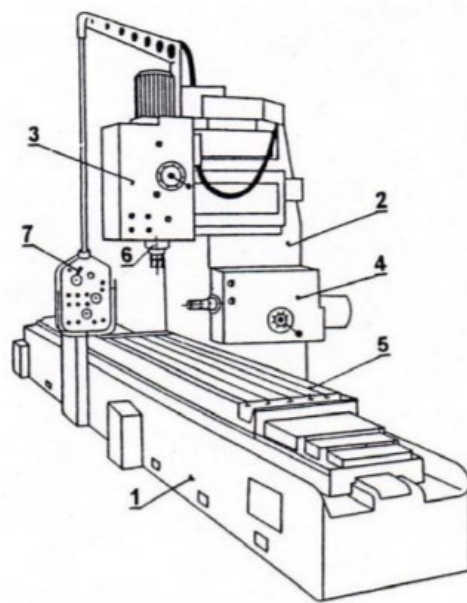
Jak je již patrné z názvu, základ stolových frézek je tvořen stolem - podélným a příčným, přičemž zde chybí konzola. Nastavení nástroje vzhledem k obrobku se provádí pohybem ve svislém směru. Tento pohyb je možný díky přemísťování frézovacího vřetene po vedení stroje. Tyto frézky se využívají k obrábění velkých a těžkých součástí. Stolové frézky jsou vyráběny ve vodorovném či svislém provedení. [5]



Obrázek 9 Svislá stolová frézka [5]

1.3.3 Rovinné frézky

Rovinné frézky mají široké pole použití od kusové výroby k sériové výrobě. Tyto stroje jsou jedny z nejvýkonnějších druhů frézek. Mají mohutnou konstrukci, a tak jsou vhodné k obrábění robustních a hmotných obrobků. K frézování svislých, vodorovných nebo šikmých ploch se nejčastěji používají frézovací hlavy. Naopak při obrábění úzkých ploch nebo drážek se uplatňují stopkové frézy. Pracovní stůl rovinných frézek se pohybuje jen ve vodorovném směru a má pouze jeden stupeň volnosti. U tohoto druhu frézek se může používat více vřeteníků, vodorovných nebo svislých. Mohou být také vyráběny jako portálové frézky. [5]



- 1 - lože
- 2 - stojan
- 3 - svislý vřeteník
- 4 - vodorovný vřeteník
- 5 - pracovní stůl
- 6 - vřeteno
- 7 - ovládací panel

Obrázek 10 Rovinná frézka [5]

1.3.4 NC a CNC frézky

Předchůdci dnešních plně automatizovaných obráběcích strojů CNC (Computer Numerical Control) jsou stroje NC (Numerical Control), kdy příkazy k práci jsou zadávány pomocí kódů (např. děrná páska), které je nutné dekodovat pomocí čtecího zařízení. S rozvojem IT se ve výrobě postupně přecházelo k využití CNC obráběcích strojů, které jsou již plně automatizované tzn., že veškeré úkony spojené s provozem těchto strojů, které by u předešlých generací obráběcích strojů byly obsluhovány člověkem, jsou řízeny počítačem. Pilířem CNC strojů je řídicí systém, který na základě příslušných počítačových programů řídí výrobu. Všechny CNC stroje jsou schopny vykonávat jeden nebo více pohybů (lineárních nebo otáčivých) v různých osách. Podle počtu os jsou rozlišovány druhy CNC strojů 2,5-osé, 3-osé a 5-osé. [6]

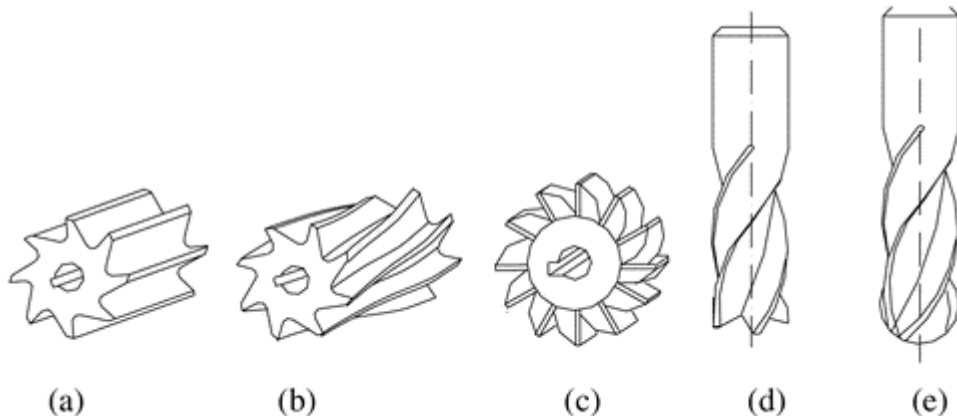
Výhody obrábění na CNC strojích: [6]

- přesnost (odvislá na kvalitě programu),
- automatizace (výroba probíhá téměř bez vlivu obsluhy),
- pružnost a přizpůsobivost (rychlá a snadná změna programu a seřízení stroje).

2 FRÉZY

Při obrábění frézováním se používají speciální nástroje - frézy. Jelikož má tento typ obrábění ohromné uplatnění, existuje široká škála fréz od jednodušších nástrojů až po vícebřité a tvarově složité frézy. Frézy se dělí do skupin podle různých hledisek: [7] [4]

- podle materiálu,
- podle směru, tvaru nebo počtu zubů v závislosti na velikosti frézy,
- podle konstrukce,
- podle tvaru,
- podle použité technologie,
- podle způsobu upnutí,
- podle směru otáčení.



Obrázek 11 Typy fréz a) válcová fréza s přímými zuby b) válcová fréza se spirálovými zuby c) kotoučová fréza d) čelní válcová fréza e) kulová fréza [27]

2.1 Dělení podle materiálu

Existují dva druhy nástrojových materiálů. Jsou to rychlořezné oceli a slinuté karbidy. Každý z nich má své výhody i nevýhody, ale v praxi se stále častěji používají slinuté karbidy - řezné keramiky, kubický nitrid bóru a diamantu. [4]

Frézy z rychlořezné oceli

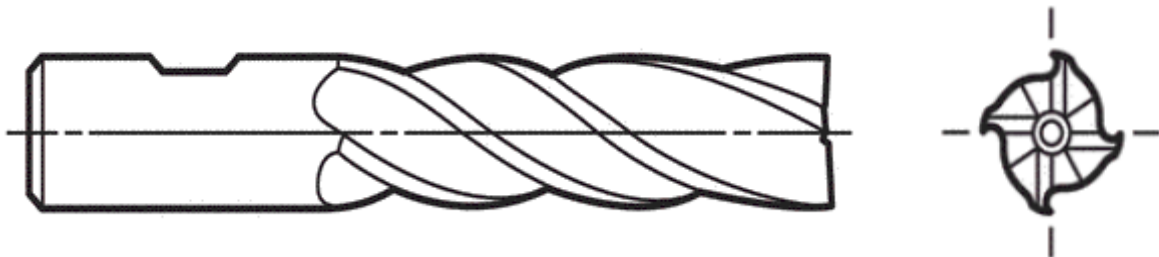
Tyto frézy se vyrábí z válcovaného nebo kovaného materiálu či se lijí metodou vytavitelného modulu. Pro lité frézy se nejčastěji používá ocel 19 824 a pro ostatní druhy např. 19 802, 19 830 a 19 856. [4] [8]

Výhody:

- jednoduchá výroba,
- nízká pořizovací cena,
- snadno se ostří.

Nevýhody:

- nutnost použití řezné kapaliny,
- nízká výkonnost.



Obrázek 12 Čelní fréza z rychlořezné oceli [28]

Frézy s břitem ze slinutého karbidu

Jak již bylo zmíněno, tento typ frézovacího nástroje nachází ve výrobě čím dál větší uplatnění a rychlořezné oceli jsou jimi stále častěji nahrazovány. Podle typu a houževnatosti materiálu se používá vhodný druh slinutého karbidu. [4]

Výhody:

- vysoký úběr materiálu,
- delší životnost.

Nevýhody:

- dražší pořizovací cena,
- složitější výroba.

2.2 Dělení podle směru, tvaru a počtu zubů

Podle směru zubů

Frézovací nástroje se dělí na frézy s přímými zuby a se zuby ve šroubovici. Frézy se zuby ve šroubovici se dále rozdělují na pravé a levé. Uspořádání zubů ve šroubovici je výhodné, jelikož umožňuje plynulý záběr díky většímu počtu zubů vykonávajících práci, které postupně vstupují do záběru podél řezné délky nástroje. Úhel šroubovice se volí 10 až 45°, případně i více. [4]

Podle tvaru zubů

Existují dva typy tvaru zubů, které se liší způsobem výroby - frézováním nebo soustružením. Frézy s frézovanými zuby mají čelo i hřbet zubů vytvořené rovinnými plochami. Pro zpevnění břitu je na hřbet zubu přidaná tenká fazeta o velikosti 0,5 až 2 mm. Při ostření fréz s frézovanými zuby se mění profil zubu. Tyto frézy se ostří na hřbetě. Druhý typ fréz, frézy s podsoustruženými zuby, se skládá z čela zubů, které tvoří rovinná plocha a z hřbetu, který je tvořen částí Archimedovy spirály. Úhel řezu se obvykle volí v rozmezí mezi 75 a 90°. Nespornou výhodou těchto fréz je ostření, u kterého téměř nedochází ke změně profilu na čele, a proto se může využít velká část tloušťky zubu. [4]

Podle počtu zubů

Rozlišují se tři skupiny fréz podle počtu zubů vzhledem k velikosti nástroje – jemnozubé, polohrubozubé a hrubozubé. K dosažení plynulého chodu frézy musí mít nástroj takový počet zubů, aby byly v záběru vždy alespoň dva. Jednozubé frézy se používají pro obrábění načisto, mají standardně větší počet zubů než je dán výrazem $z = 1,25 * \sqrt{D}$. Pro frézování středně velkých úběrů se používají polohrubozubé frézy a pro velké úběry při hrubování zase hrubozubé frézy. [4]

2.3 Dělení podle konstrukce

Dělení podle konstrukce rozlišuje tři skupiny fréz – celistvé, s vkládanými řeznými destičkami (dělené a sdružené) a s vyměnitelnými břitovými destičkami. Celistvé frézy jsou vyráběny z rychlořezné oceli a mají tělo i zuby z jednoho kusu. Menší typy těchto fréz

mohou být vyrobeny ze slinutých karbidů. U fréz s vkládanými řeznými destičkami jsou tyto destičky vyrobeny z rychlořezných ocelí nebo ze slinutých karbidů. U fréz s břitovými destičkami jsou břitové destičky upevněny k tělu nástroje. V současnosti mají tyto frézy čím dál vyšší využití. [4]

2.4 Dělení podle geometrického tvaru

Z tohoto hlediska je možno nástroje rozdělit do pěti skupin. První skupinu tvoří frézy válcové, které mohou být nástrčné nebo se stopkou. Zde jsou zuby umístěny na válcovou plochu. Druhou skupinu zastupují frézy čelní válcové (nástrčné a se stopkou). Oproti první zmíněné skupině mají zuby i na čelní ploše. Do třetí skupiny se řadí kotoučové frézy s přímými zuby nebo zuby ve šroubovici, střídavě pravé a levé se zuby jen na válcové ploše nebo na jedné, případně na obou čelních plochách. Čtvrtá skupina je zastoupena úhlovými frézami (jednostranné nebo dvoustranné). Do poslední skupiny patří frézy tvarové. [4]

2.5 Dělení z hlediska technologie

Toto dělení je založeno na způsobu použití frézy. Pro obrábění rovinných ploch se používají válcové, čelní frézy a frézovací hlavy, ke zhotovování tvarových ploch zase tvarové a kopírovací frézy, frézy na upínací drážky apod. [4]

2.6 Dělení podle upínání

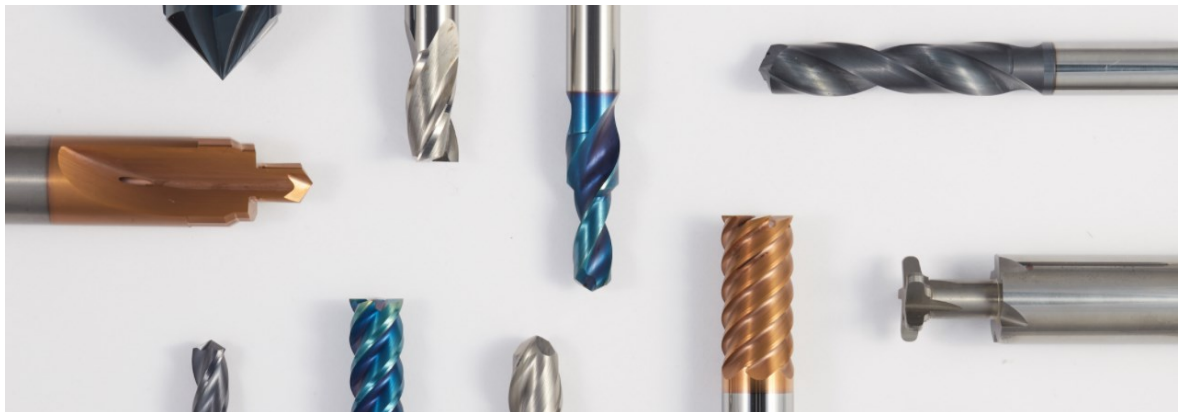
Upínání fréz na stroji může být různé, existují frézy nástrčné a frézy se stopkou (válcovou nebo kuželovou). Frézy s kuželovou stopkou se do frézky upínají za pomoci redukčních pouzder do upínacího kužele ve vřetenu. Frézy s válcovou stopkou se často upínají pomocí hydraulických nebo tepelných upínačů. [5] [4]

2.7 Dělení podle směru otáčení

Směr otáčení se určuje pohledem od vřetene. Z tohoto hlediska dělíme frézy na pravořezné a levořezné. [4]

3 POVLAKOVÁNÍ

Povlakování vzniklo na základě potřeby zlepšení vlastností povlakovaných nástrojů. Typy povlaků se liší v závislosti na jejich funkci např. odolnosti proti mechanickým rázům, tepelným šokům, erozi, teplotě a opotřebení. Požadované vlastnosti povlaků jsou dosahovány kombinací několika prvků. Kombinace prvků pro otěruvzdorné povlaky jsou např. TiN, TiC, Al₂O₃ a SiC. Pro ochranu proti působení vysokých teplot se používá ZrO₂ + CaO₂, ZrO₂ + MgO a další. Velmi často se aplikuje také tzv. mezivrstva, která odděluje základní materiál od povlaku, vyrovnává rozdíly modulu pružnosti, působí jako protioxidační ochranná vrstva atd. Materiály vhodné pro mezivrstvu jsou např. Mo, Ni + Al a další. Tloušťka mezivrstvy je obvykle 2-15 μm. [5] [6]

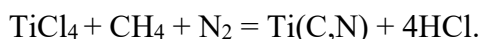
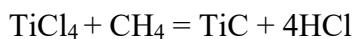


Obrázek 13 příklady povlakovaných nástrojů [9]

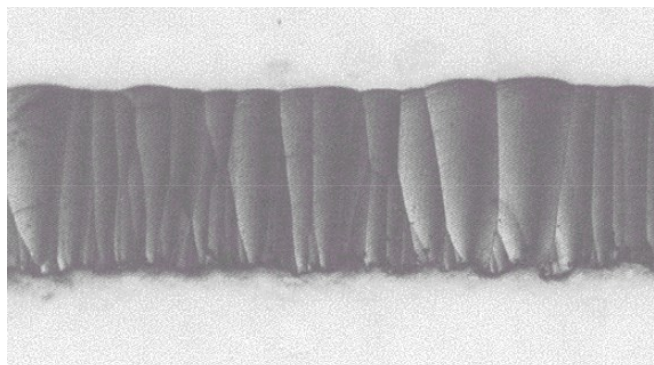
Z hlediska vývoje se hovoří o čtyřech generacích povlaků. První generace se objevila ve výrobě koncem šedesátých let dvacátého století. Jednalo se o povlak TiC o tloušťce 4 - 5 μm. Tento povlak byl vytvořen na břitovou destičku ze slinutého karbidu metodou CVD (Chemical Vapour Deposition). V první polovině 70. let se začaly používat povlaky druhé generace TiC, TiCN a TiN. Toto zdokonalení technologie výroby umožnilo tloušťku povlaku 13 μm bez nebezpečí odlupování při práci nástroje. Technologie PVD (Physical Vapour Deposition) se začala rozvíjet na začátku 80. let díky poptávce po povlakování nástrojů z rychlořezné oceli. Pro tento materiál nebyla vhodná metoda CVD kvůli vysokým teplotám při napařování. Povlak 3. generace je povlak vícevrstvý. Mezi jednotlivými vrstvami z různých materiálů jsou patrné ostré přechody. Vrstvy povlaku jsou nanášeny v závislosti na přilnavosti k materiálu a na míře opotřebení. Při povlakování se tak postupuje od vrstev s lepší přilnavostí k vrstvám s vyšší odolností. Čtvrtá generace povlaků je také vícevrstvá, obvykle 10 a více vrstev, s přechody více či méně viditelnými. [6] [5] [10]

3.1 CVD povlakování

Je to metoda, která je založena na chemické reakci plynných sloučenin na rozhraní plynné a pevné fáze za předpokladu daného tlaku a teploty. Základem procesu povlakování je chemická reakce v bezprostřední blízkosti povlakovaného materiálu, při níž vzniká produkt, který se ukládá na povrchu povlakovaného materiálu. Reakce mohou probíhat homogenně v plynné fázi, tím vznikají prášky nebo krystalické aglomeráty, nebo heterogenně růstem povlaku na povrchu podložky. To vše v závislosti na míře přesycení a teplotě. Větší přesycení se zároveň nízkou teplotou vede ke vzniku polykrystalických až amorfních povlaků. Naopak při vysokých teplotách a menším přesycení vznikají krystalické (epitaxní) povlaky. Druh přechodové vrstvy mezi podložkou a povlakem a struktura povlaku udávají základní vlastnosti povlaku. Aby se povlakovaná vrstva dobře spojila s povlakovaným materiálem je zapotřebí postupný přechod ve složení a důkladná příprava materiálu (odmaštění, očištění). Nejčastěji se používá čištění v ultrazvukových myčkách. Závěrečné čištění probíhá v samotném povlakovacím centru pomocí atomů argonu. Proces vzniku povlaků TiN a TiC se popisuje rovnicemi:



Teploty, za kterých reakce probíhají, se pohybují v rozmezí mezi 800-1000 °C. Ke správnému průběhu reakce je zapotřebí tlak 10^3 až 10^4 Pa. Zařízení, na kterém CVD povlaky vznikají, není složité. Určitou nevýhodou může být omezený výběr materiálu pro části těchto strojů, které musí být odolné vůči vysokým teplotám. Problematické může být také odstraňování agresivních plynů z chemických reakcí z reakčního prostoru. Povlaky vytvořené touto metodou jsou poměrně stejnoměrné a homogenní.



Obrázek 14 Příklad struktury vrstvy CVD [29]

Výhody CVD povlakování:

- vysoká přilnavost mezi podkladem a povlakem,
- povlakování předmětů náročných tvarů,
- všestrannost a variabilita druhů povlaků,
- tloušťka vrstvy až 13 μm .

Nevýhody CVD povlakování:

- nelze povlakovat ostré hrany,
- nízká pevnost ohybu,
- zbytková napětí v povlaku.

[6] [5] [10] [11] [12]

3.2 PVD povlakování

V procesu PVD povlakování (Physical Vapour Deposition) nejsou na rozdíl od CVD metody zapotřebí vysoké teploty. Pracovní teploty se pohybují zpravidla pod 600 °C a v některých případech to však může být i teplota nižší, až pod 350 nebo 180 °C. Metoda PVD povlakování byla zprvu využívána pro povlakování nástrojů z rychlořezné oceli, protože její nižší pracovní teplota nemá vliv na materiál povlakovaného nástroje. Nyní se s jejím použitím lze často setkat i u nástrojů ze slinutých karbidů. Rozlišují se tři způsoby PVD povlakování: napařování, naprašování a iontová implementace. [5] [13]

Výhody PVD povlakování:

- lze povlakovat i ostré hrany,
- vysoká odolnost vrstev,
- probíhá za nižších teplot,
- nemá nežádoucí dopad na vlastnosti povlakovaného materiálu.

Nevýhody PVD povlakování:

- nutná dokonalá příprava povlakované součásti,

- povlakovaná vrstva bývá tenčí,
- méně druhů povlaků,
- složitý vakuový systém,
- nutnost pohybovat povlakovanými součástmi k zaručení rovnoměrné vrstvy povlaku,
- síťový efekt povlaku.

[6]

3.2.1 Napařování

Jednou z metod fyzikálního povlakování je napařování. Probíhá ve vakuové komoře při tlaku pod 1 Pa v atmosféře tvořené interním a reaktivním plynem. Kov se odpařuje díky působení elektrického oblouku, svazku elektronů nebo odporového ohřevu. Částice kovu, které reagují s atmosférou komory a tepelnou energií 0,1 – 0,5 eV, se usazují ve velmi tenké vrstvě pevně spojené s povrchem podkladu. [5]

3.2.2 Naprašování

Proces naprašování probíhá také v plynné atmosféře komory za pomoci elektrického výboje. Při elektrickém výboji vznikají kationy, které narážejí do katody z kovu. Katoda je záporně nabitá díky zápornému pólu elektrického napětí o velikosti 0,5 – 5,0 kV, který je na ni připojen. Uvolňování částic z terče čistého kovu způsobují ionty s velkou kinetickou energií. Částice kovu se poté usazují na povlakované součásti a vytváří požadovanou vrstvu povlaku. [5]

3.2.3 Iontová implantace

Kombinací obou předchozích metod je iontová implantace. K ionizaci částic plynu a odpařeného kovu dochází v plynné atmosféře za pomoci elektrického výboje, který vzniká v elektrickém poli mezi substrátem (katodou) a odpařovačem. Povlak vytvářející se reakcí iontů ulpívá na povrchu povlakovaných součástí. Při iontové implantaci je zvýšený počet iontů v materiálu díky plazmaticky aktivovanému procesu. [5]

3.2.4 Vlastnosti a uplatnění povlaků

Vlastnosti povlaků jsou:

- otěruvzdornost – prodlužuje životnost nástroje,
- tepelná odolnost,
- zmenšování třecího odporu,
- mikrotvrдость.

PVD povlakování má široké uplatnění. Nejčastěji se však používá pro povlakování obráběcích nástrojů. Povlaky zajišťují tepelnou bariéru i otěruvzdornost. Tím prodlužují životnost nástrojů a je možné obrábět houževnatější materiály. Dále se mohou povlakovat např. vstříkovací formy (tvárník a tvárnice). K tomuto povlakování se používají povlaky proti abrazi a korozi. Povlakování se používá i pro medicínské účely – kloubní náhrady a zubní protézy. [14] [6]

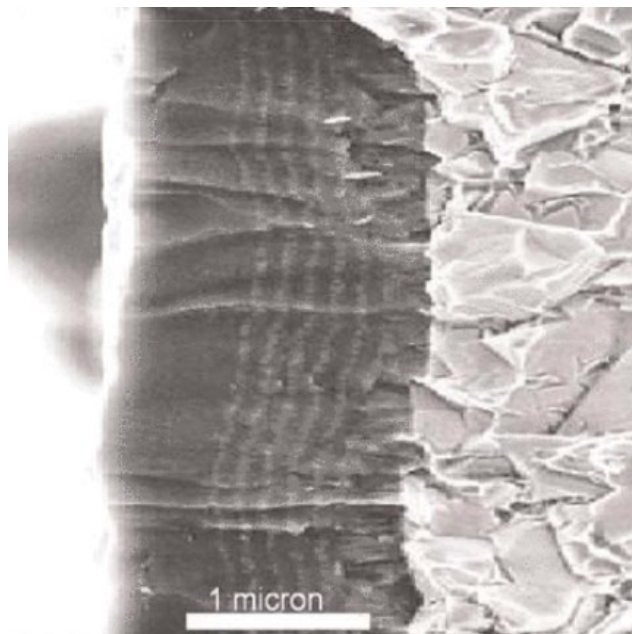
3.2.5 Běžně používané povlaky

Nitrid titanu (TiN) je jeden ze základních a nejběžněji používaných povlaků s mikrotvrđostí od 20 do 25 GPa. Je charakteristický svojí zlatou barvou, dobrou elasticitou a adhezí. Díky těmto vlastnostem a nízkým pořizovacím nákladům má široké pole využití.

Titan carbonitrid (TiCN) je čím dál méně používaným materiálem, a to z důvodu problematického dosažení rovnoměrnosti a složité údržbě komory po povlakování. Je nahrazovaný vrstvou TiAlN především u řezných nástrojů. Další využití tohoto hnědočerného povlaku s mikrotvrđostí 30 až 40 GPa je na poli dekorativních povlaků.

Titan aluminium nitrid (TiAlN) má mikrotvrdotost 25 až 33 GPa a barevnou škálu od růžovofialové po černošedou. I když je ve srovnání s TiN dražší, nachází stále vyšší využití, a to především u řezných nástrojů, kde povlak TiN nahrazuje.

Odolává vysokým teplotám, proto se používá pro vysokorychlostní obrábění. Ke zlepšení řezných vlastností a snížení tření přispívá povrchová vrstva Al_2O_3 , kterou TiAlN vytváří.



Obrázek 15 Detail vrstvy TiAlN [30]

Diamond – Like Carbon (DLC) na rozdíl od výše jmenovaných nitridových vrstev nitrid neobsahuje. Tento povlak vyniká vysokou tvrdostí (až 60 GPa) a nízkým koeficientem tření. Má černou barvu. Tyto povlaky nejsou vhodné pro nástroje, které obrábějí ocel. [14] [5]

Tabulka 1 Srovnání jednotlivých typů povlaků [14]

	Složení	Tvrdotost [GPa]	Barva	Výhody	Nevýhody
Nitrid titanu	TiN	20 - 25	zlatá	dobrá elasticita a adheze	porozita
Titan carbonitrid	TiCN	30 - 40	hnědočerná	dobrá adheze	špatné dosažení rovnoměrnosti
Titan aluminium nitrid	TiAlN	25 - 33	růžovofialová – černošedá	odolá vysokým teplotám	dražší
Diamond		60	stříbrná	vysoká tvrdost	nelze použít na ocel

4 HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJŮ

Opotřebení řezných nástrojů

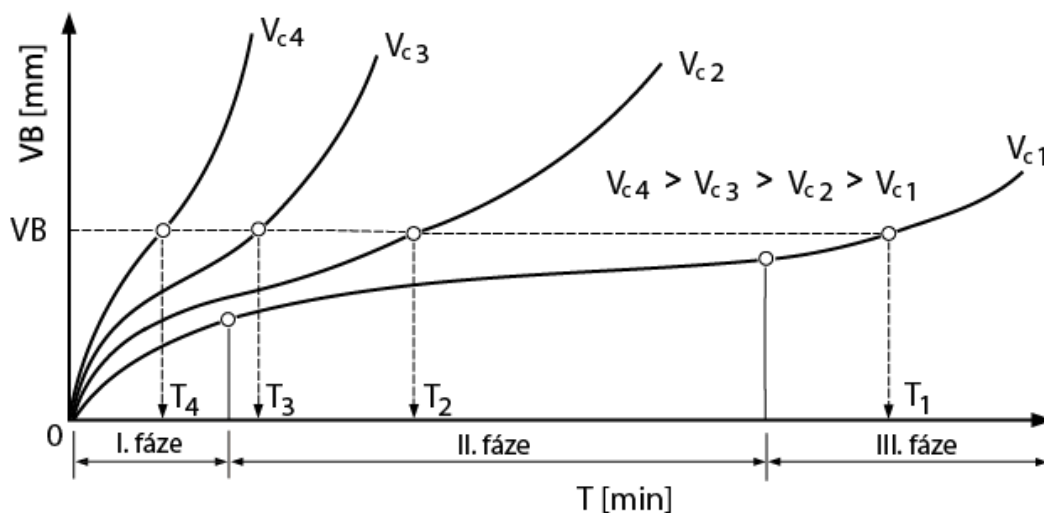
Opotřebení nástrojů tzn. ztráta materiálu na hřbetě či čele nástroje, se hodnotí přímo:

- porovnáním hmotností nástroje před a po obrábění,
- měřením změn rozměrů v čase

nebo nepřímo:

- pozorováním změny vizuální podoby třísek (barva a tvar),
- sledováním teplotní změny nástroje, obrobků nebo třísek,
- mírou změny sil působících při obrábění,
- vzrůstem potřebného výkonu k obrábění,
- zvýšením hlasitosti obrábění,
- pozorováním změny velikosti obrobku.

Jednou z metod ke zjištění opotřebení řezných nástrojů je analýza pomocí rozboru křivek opotřebení. Díky této metodě lze nalézt u hřbetního opotřebení pásmo záběru (fáze I), pásmo normálního opotřebení (fáze II) a zrychleného opotřebení (fáze III). Tyto křivky pak pomáhají stanovit dílčí účinky kvality bříty, řezného prostředí a řezných podmínek na trvanlivost bříty. [15] [16]



Obrázek 16 Časový rozvoj velikosti hřbetního opotřebení v závislosti na řezné rychlosti

Trvanlivost řezných nástrojů T

Trvanlivost řezného nástroje je definovaná součtem časů řezání od počátku obrábění po opotřebení břitu. Přičemž míra opotřebení je předem stanovena (kritérium opotřebení). Tato hodnota je stanovena tak, aby obrobek splňoval všechny předem stanovené parametry (tvar, kvalita, rozměry). Zvolená metoda obrábění je hlavním aspektem trvanlivosti a opotřebení nástroje. Další faktory ovlivňující trvanlivost řezných nástrojů jsou vlastnosti obráběného i nástrojového materiálu a řezné podmínky. [15]

Životnost řezných nástrojů

Životnost nástroje označuje dobu od uvedení nástroje do provozu až po jeho vyřazení. Frézy, které lze ostřit, se vyřazují až po odbroušení celé jejich funkční části. Životnost nástroje se tedy vyjadřuje vztahem: [15]

$$Z = 1 + \sum_1^n T_i \quad (2)$$

Taylorův vztah

F. W. Taylor zjistil, že na trvanlivost nástroje má největší vliv řezná rychlost a odvodil základní vztah pro jejich závislost. Na tomto vztahu jsou založeny normy ČSN ISO 3685, ČSN ISO 8688-1 a ČSN ISO 8688-2. Matematicky je Taylorův vztah popsán rovnicemi:

$$T = \frac{C_T}{v^m} \quad (3)$$

$$v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}} \quad (4)$$

$$v_c \cdot T^m = C_v \quad (5)$$

Tyto vztahy se často používají při přepočtu trvanlivostí ve tvaru:

$$T_1 \cdot v_1^m = T_2 \cdot v_2^m = C_T \quad (6)$$

Velikost konstanty C_T pro obráběný materiál a řezné podmínky f a a_p se odečítají na ose T při řezné rychlosti $v_c = 1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Velikost konstanty C_v na ose v_c pro trvanlivost

$T = 1$ min, exponent m vyjadřuje směrnici přímky $m = \operatorname{tg} \alpha$. Platnost těchto vztahů závisí na níže uvedených podmínkách:

- šířka záběru $a_p = \textit{konst.}$,
- posuv na otáčku $f = \textit{konst.}$,
- opotřebení $VB = \textit{konst.}$,
- mazání, chlazení, stav polotovaru, stroje, atd = *konst.*.

Exponent m a konstanty jsou proměnlivé, jelikož jsou ovlivněny řadou činitelů. Důležitá je hodnota exponentu m , která závisí na vlastnostech materiálu nástroje. Udává citlivost nástrojového materiálu vůči změně řezné rychlosti. Exponent m má hodnotu u rychlořezných ocelí 5,0-8,0 a u nástrojových ocelí 6,0-10,0.

Základní Taylorův vztah může být dále rozšířen o hodnotu posuvu a šířku záběru pro danou trvanlivost T . Rozšířený Taylorův vztah má tvar:

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad (7)$$

K zobecnění tohoto vztahu dochází při použití trvanlivosti T , hodnoty opotřebení VB a dalších konstant:

$$v_c = \frac{C_{v1} \cdot VB^n}{T^{\frac{1}{m}} a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \prod_1^n K_{vci} \quad (8)$$

kde

$$\prod_1^n K_{vci} = k_{vc1} \cdot k_{vc2} \cdot k_{vc3...} \cdot k_{vcn} \quad (9)$$

[14]

Testování řezivosti fréz

Rozbor silového zatížení pro porovnání zatížení nástrojů se provádí ve třech souřadných systémech. Data tímto způsobem získaná se filtrují a dále zpracovávají. Nejčastěji se volí poloha břitu, ve které je dosažen maximální průřez třísky, a tudíž také maximální síla, která působí na jeden břit. Novější způsob testování je střídání sousledného a nesousledného frézování, kdy se celková síla zatížení břitu rozkládá jiným způsobem v každém z těchto druhů frézování. Vysoká hodnota síly ve směru posuvu stolu vůči pasivní složce se projevuje většími rázy a chvěním. Pokud jsou tyto síly v opačném poměru, mají kladný vliv

na obrábění, kvalitu obráběného materiálu a trvanlivost břitu. Z tohoto důvodu se dává přednost souslednému frézování.

Dále je vhodné se při analýze silového namáhání zaměřit na zatížení frézy v rovině základní a v rovině kolmé k hlavnímu ostří břitu (ortogonální rovině). Jednotlivé složky podávají informace o síle vertikální (citlivost na hřbetní opotřebení), horizontální (citlivost na ztrátu geometrie ostří) a transversální (dokumentuje stav drsnosti čelní plochy a stupeň její degradace).

Měrné veličiny obrábění jsou srovnatelné se základními fyzikálními parametry obráběného materiálu. Tyto parametry pak určují energetickou náročnost, rychlost opotřebení obráběcího nástroje. Když jsou tyto hodnoty překročeny, dochází ke zlomení břitu, lavinovitému otěru nebo ke zničení frézy. Průběžné měření rezných sil po dobu testování je výhodné k monitorování rozvoje opotřebení v čase. [17]

5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

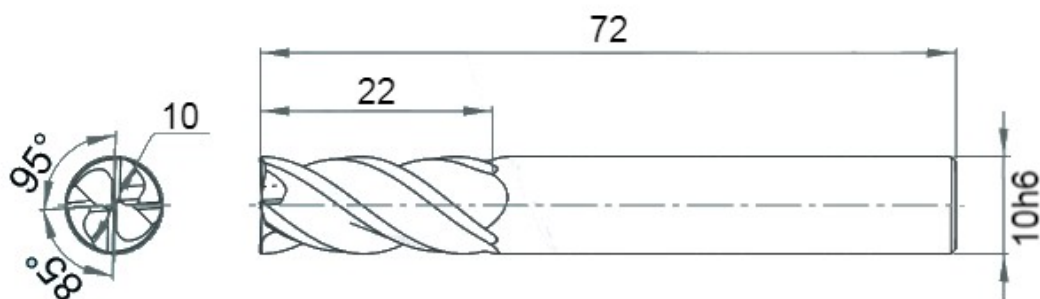
V první kapitole teoretické části se pojednávalo o frézování. Bylo zde řečeno, co samotné frézování je, jaké jsou technologie frézování, či jaký je rozdíl mezi sousledným a nesousledným frézováním. Dále byly v této kapitole popsány typy strojů neboli frézek. V kapitole druhé je psáno o samotných frézovacích nástrojích. Je zaměřena na druhy fréz, materiály, ze kterých jsou frézy vyráběny a řeší také jejich rozdělení z různých hledisek. Kapitola s řadovým čísle 3 poskytuje informace o povlakování. Jsou zde uvedeny rozdíly mezi CVD nebo PVD povlakováním a informace o jednotlivých povlacích, jejich druhy a srovnání povlaků. V poslední čtvrté kapitole se pojednává o hodnocení řezivosti nástrojů, o jejich životnosti, a jak probíhá samotné testování řezivosti u frézovacích nástrojů.

Praktická část bude zaměřena na zkoušku řezivosti fréz. K dispozici jsou tři frézy stejné geometrie, z nichž 2 frézy mají každá jiný povlak a třetí fréza je bez povlaku. Cílem experimentu je zjistit, zda je PVD povlakování účinná úprava nástrojů pro frézování a následně vyhodnotit, který povlak je vhodnější pro frézování v použitých podmínkách.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 POPIS TESTOVANÝCH NÁSTROJŮ

Pro měření řezných vlastností byly zajištěny tři monolitní frézy od firmy Planička TOOLS s.r.o.. Byly použity nástroje stejné geometrie, pouze s jinými povlaky. Dvě frézy byly povlakované, poslední fréza byla bez povlaku. Samotné nástroje byly z materiálu TSF 22, což je ultra jemný slinutý karbid. Tyto frézy jsou vhodné pro nerezové materiály s tvrdostí do 55 HRC. Přesné rozměry fréz jsou uvedeny na obrázku 17 ve všech případech s úhlem šroubovice 35°. Každá fréza je opatřena sražením, které je odhadováno na 0,02 mm.



Obrázek 17 Rozměry a geometrie monolitních fréz [18]

6.1 Fréza s povlakem TripleCoating Cr

TripleCoating Cr povlak má modrofialovou barvu a skládá se ze tří jednotlivých vrstev, kterými jsou – základní vrstva TiN, střední vrstva AlTiN a vrchní nanokompozitní vrstva CrAlSiN. Tento povlak je nejmodernější povlak na trhu, jehož předností je výjimečná houževnatost a tvrdost, a to díky kombinaci více vrstev. Na obrázku 18 je vidět tato fréza před začátkem experimentu. [19]



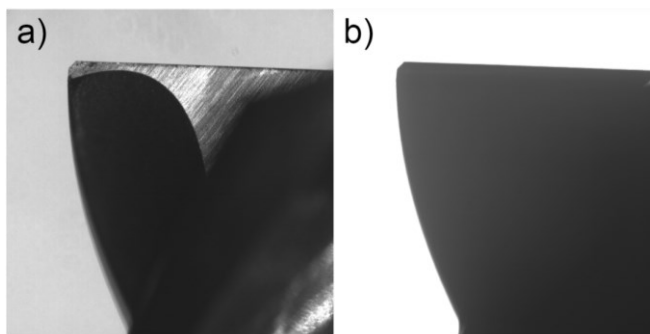
Obrázek 18 Fréza s povlakem TripleCoating

V tabulce 2 je možné si všimnout reálných poloměrů na jednotlivých břitech naměřené přístrojem HAIMER 20/40, tyto poloměry lze porovnat s měřením frézky, které se o několik setin milimetru liší.

Tabulka 2 Reálné poloměry frézy

fréza s povlakem TripleCoating Cr		
přístroj	břit	poloměr [mm]
HAIMER UNO 20/40	1	4,982
	2	4,961
	3	4,972
	4	4,989
TT160 Heidenhain		5,023

Na obrázku 19 lze vidět břit frézy s povlakem TripleCoating Cr. Na obrázku a) je monochromatická fotka, na snímku b) je silueta břitu. Na obou fotkách je vidět sražení, které je tam z důvodu ochrany frézy před štípáním.



Obrázek 19 Břit frézy s povlakem TripleCoating Cr

6.2 Fréza s povlakem Alwin

Povlak Alwin je povlak stříbrné barvy, který je nanášen metodou PVD. Povlak je na bázi CrAlSiN s velkým obsahem chromu. Vyniká svou vysokou tvrdostí až 3500 HV.



Obrázek 20 Fréza s povlakem Alwin

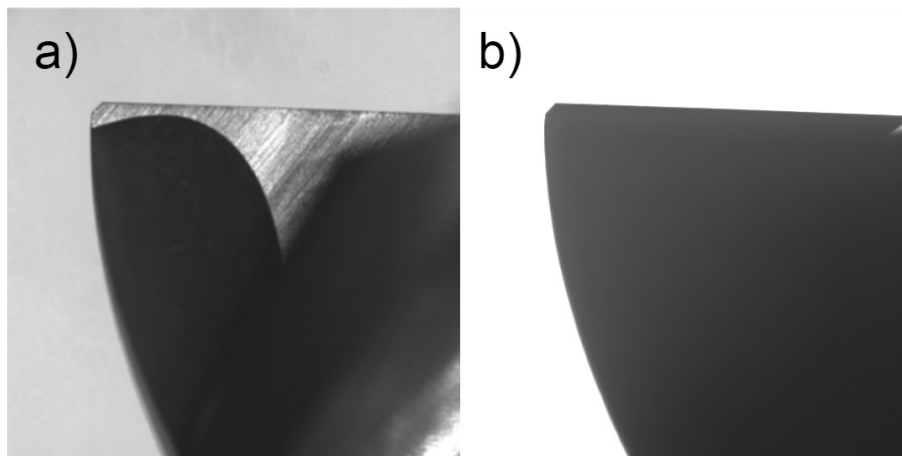
Mezi jeho další přednosti patří odolnost vůči vysokým teplotám při obrábění (až 1000 °C) nebo jeho odolnost proti oxidaci a také odolnost proti nalepování obráběného materiálu na nástroj. Povlak je vhodný pro operace jako je vrtání, frézování, ale i stříhání. Obrázek 20 zobrazuje frézu před začátkem experimentu. [19]

Reálné rozměry měřené na přístroji HAIMER 20/40 a CNC frézku se nachází v tabulce 3.

Tabulka 3 Reálné rozměry frézy s povlakem Alwin

fréza s povlakem Alwin		
přístroj	břit	poloměr [mm]
HAIMER UNO 20/40	1	5,010
	2	4,975
	3	4,953
	4	4,975
TT160 Heidenhain		5,036

Na obrázku 21 je zachycen detail břitu této frézy. Na obrázku a) je černobílá fotka břitu a na obrázku b) je fotka stejného břitu, ale pouze jen jeho obrys.



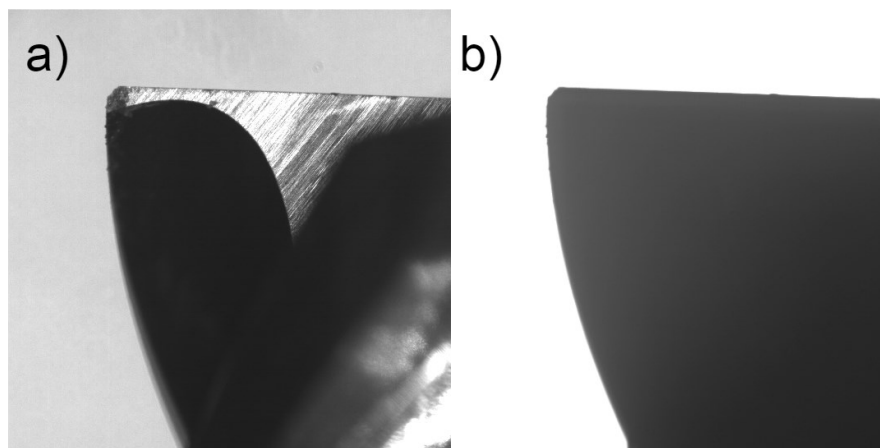
Obrázek 21 Fotky břitu frézy s povlakem Alwin

6.3 Fréza bez povlaku

Fréza bez povlaku byla zvolena pro porovnání sil a míry opotřebení nástrojů povlakovaných a nepovlakovaných. Nepovlakovaná fréza má stejnou geometrii jako povlakované nástroje. Tím je možné zjistit, jak moc se liší nástroje s povlakem a bez povlaku. Na obrázku 22 je zachycena nepovlakovaná fréza před experimentem. Její břit je vidět na dvou fotkách na obrázku 23. Rozměry této frézy jsou uvedeny v tabulce 4, které jsou měřeny dvěma způsoby, samotnou frézku DMU 50 a přístrojem HAIMER 20/40.



Obrázek 22 Nepovlakovaná fréza



Obrázek 23 Břit nepovlakované frézy

Tabulka 4 Reálné rozměry frézy bez povlaku

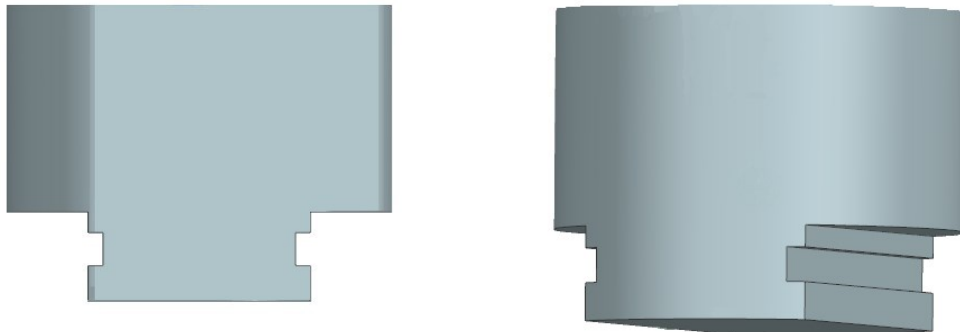
fréza bez povlaku		
přístroj	břit	poloměr [mm]
HAIMER UNO 20/40	1	4,972
	2	5,019
	3	4,994
	4	4,961
TT160 Heidenhain		5,036

7 POLOTOVAR

Pro testování fréz byl zvolen polotovár ve tvaru válce z materiálu 17 240, s výškou 100 mm a průměrem 130 mm. Tyto rozměry byly ale pro provedení experimentu příliš velké, proto byl polotovár upraven tak, aby se dal upnout do dynamometru.

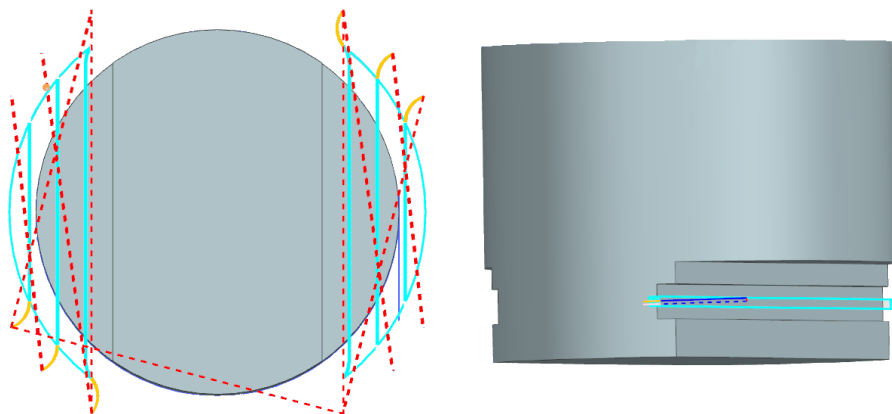
7.1 Rozměry a úprava

Polotovár ve tvaru válce byl vymodelován v programu NX, kde byl upraven do negativu upínky. Vymodelovaný polotovár je vidět na obrázku 24.



Obrázek 24 Model polotovaru

Podle modelu v programu NX byl vytvořen frézovací program, který je zachycen na obrázku 25. Program byl rozdělen na dvě části, jeden pro zúžení polotovaru na určitou šířku a druhý program byl vytvořen pro frézování drážky, za kterou obrobek držel v dynamometru.



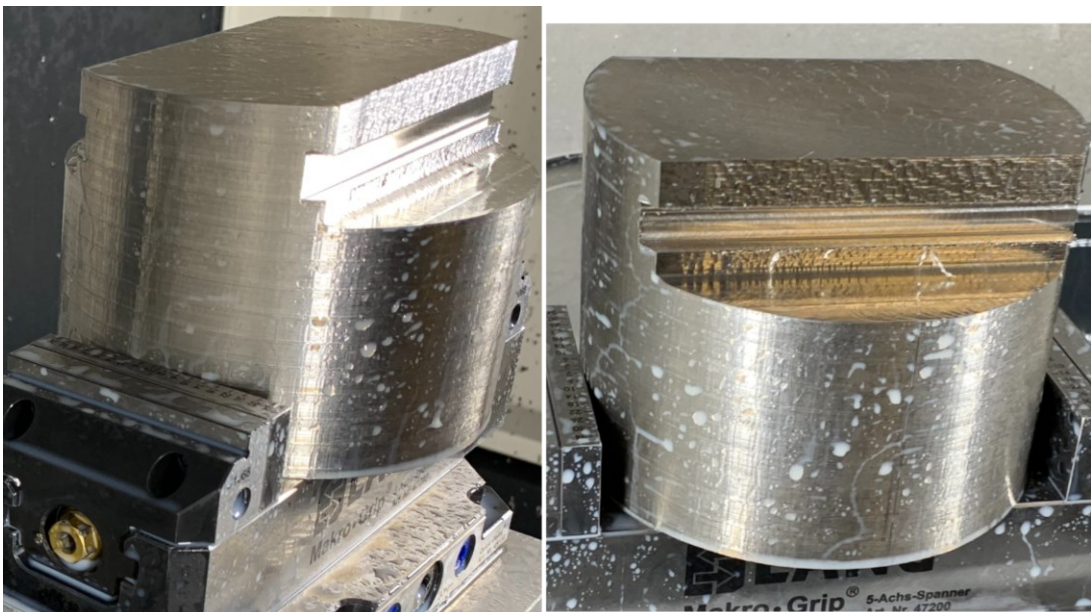
Obrázek 25 Frézovací program polotovaru a) odběr na určitou šířku
b) pro frézování drážky

Při samotném frézování byla použita fréza s průměrem 8. Nemohly být použity frézy, které byly testované, protože by došlo k nerovnovážnému opotřebení na jednotlivých frézách. Frézy na obrobení obrobku byly využity dvě, jelikož první byla zničena. Chlazení, které fréza vyžadovala bylo spuštěno, až když fréza byla oranžové barvy. Po spuštění chlazení se fréza uštípla. Na obrázku 26 je fréza po incidentu.



Obrázek 26 Rozbitá fréza při frézování polotovaru

Po výměně nástroje se povedlo obrobek dofrézovat a obrázek 27 tedy zobrazuje již hotový obrobek připravený na experiment. Je možné si všimnout, že kvalita povrchu není moc dobrá, ale na tom nyní nezáleží. Tvar slouží jen k upnutí do dynamometru. Experiment byl prováděn na neobrobené straně obrobku.



Obrázek 27 Upravený obrobek pro experiment

7.2 Materiál a vlastnosti obrobku

Materiál obrobku byl zvolen podle fréz, které jsou určeny na nerez. Vybraný materiál má označení 17 240, podle normy Evropské unie je označována DIN 1.4301. Je to materiál s výbornou odolností vůči korozi v okolním prostředí (voda, vlhký vzduch nebo jedlé kyseliny). Je velmi dobře tvárný za studena a má výbornou svařitelnost i bez přídavného kovu. Je použitelný pro teplotní namáhání do 400 °C. Je to jedna z nejpoužívanějších nerezových ocelí. Austenitická chromniklová ocel se často používá v potravinářství nebo farmacii. [20] [21]

Chemické složení (hm. %) ⁷⁾							
C	Si	Mn	P	S ¹⁾	Cr	Ni	N ²⁾
max 0,07	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	17,5–19,5	8,00–10,5	max 0,11

Obrázek 28 Chemické složení materiálu [31]

Mechanické vlastnosti za zvýšených/snížených teplot										
Min. hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ a $R_{p1,0}$ a meze pevnosti R_m při zvýšených teplotách (stav +AT)										
Teplota [°C]	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Mez kluzu [MPa]	$R_{p0,2}$	157	142	127	118	110	104	98	95	92
	$R_{p1,0}$	191	172	157	145	135	129	125	122	120
Mez pevnosti R_m [MPa]	450	420	400	390	380	380	380	370	360	330
Hodnoty modulu pružnosti E při normální a zvýšených teplotách										
Teplota [°C]	20	100	200	300	400	500				
Modul pružnosti E [GPa]	200	194	186	179	172	165				
Min. mechanické vlastnosti při snížených teplotách (norma [2])										
Teplota [°C]	20	-80	-150	-196						
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	210	270	315	300						
Mez kluzu $R_{p1,0}$ [MPa]	250	350	415	400						
Pevnost R_m [MPa]	520	860	1100	1250						
Tažnost A [%]	45	35	30	30t						

Obrázek 29 Mechanické vlastnosti materiálu za výkyvu teplot [31]

Fyzikální vlastnosti				
Hustota ρ [kg·m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_t [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Elektrický odpor při 20 °C [Ω ·mm ² ·m ⁻¹]
7900	500	18,0·10 ⁻⁶ (20–500 °C)	15	0,73

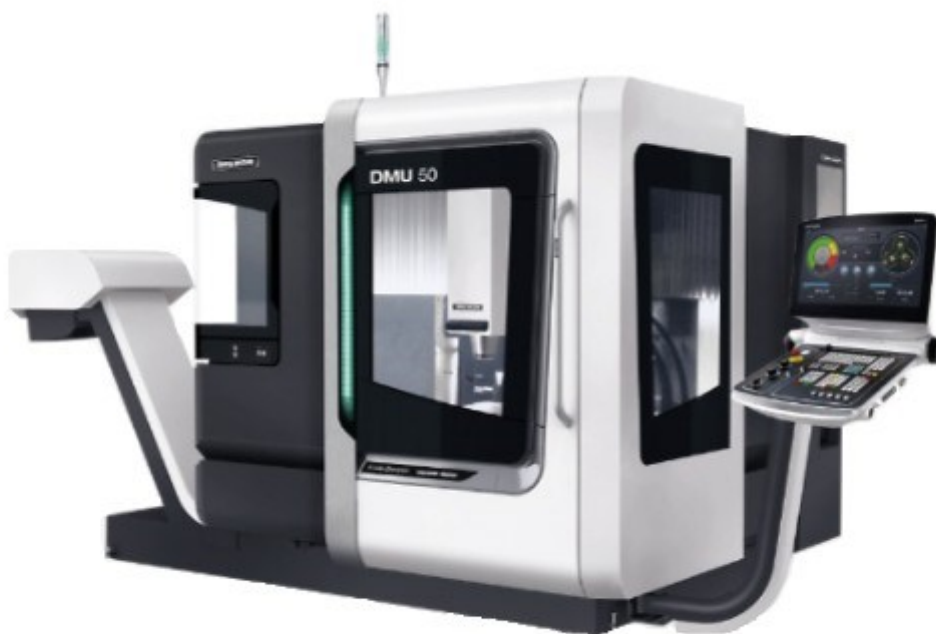
Obrázek 30 Fyzikální vlastnosti materiálu [31]

8 POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE

Při experimentu byly použity 4 hlavní přístroje. Frézka, která byla použita pro přípravu polotovaru i k vykonání samotného experimentu. Dalšími důležitými přístroji byly dynamometr, který sloužil k zaznamenání údajů při vykonávání experimentu, zesilovač a převodník dat do počítače. V neposlední řadě byl také použit přednastavovací přístroj pro přesné měření nástrojů.

8.1 Univerzální frézka DMU 50

Frézka DMU 50 je stroj od firmy DMG MORI. Je to pětiosá frézka s maximálním pracovním prostorem v ose X 500 mm, v ose Y 450 mm, v ose Z 400 mm a naklápění v ose B se pohybuje od -5 do 110°. Únosnost stolu s průměrem 630 mm je 300 kg. Frézku lze obrábět obrobek s maximální výškou 300 mm. Vřeteno u frézky DMU 50 má standardní otáčky 14 000 ot/min, maximální otáčky však mohou být až 18 000 ot/min. Těchto otáček dosahuje díky výkonnému pohonu 14 kW s točivým momentem 84 Nm. Frézka má zásobník s kapacitou až šestnácti nástrojů. Nástroje mohou být dlouhé maximálně 300 mm a mají maximální průměr 130 mm. Stroj se ovládá pomocí operačního panelu ERGOline s 21,5“ multidotykovou obrazovkou. Frézka byla použita jak k přípravě polotovaru, tak k vykonání samotného experimentu. [22]



Obrázek 31 Frézka DMU 50 [22]

8.2 Nastavovací zařízení HAIMER UNO 20/40

Je to nastavovací přístroj pro nástroje na vrtání, frézování a soustružení. Měření se pohybuje ve dvou osách X a Z, které umožňují měřit nástroje s maximálním průměrem až 400 mm a s maximální výškou nástroje 400 mm. Nejvyšší hmotnost nástroje může být až 60 kg. Stabilitu při měření zajišťuje tepelně stabilní konstrukce z šedé litiny. Přístroj dokáže zobrazovat s přesností 5 μm s opakovatelností s $\pm 2 \mu\text{m}$. Pro posouvání ramene v osách X, Z je určena inteligentní rukojeť, která uvolňuje pneumatickou brzdu. K zobrazování slouží monitor 21,5“ a software se spouští na stolním počítači. Na přístroji lze měřit průměr nebo sledovat opotřebení hran nástrojů. [23]



Obrázek 32 Nastavovací zařízení HAIMER UNO 20/40

8.3 Dynamometr KISTLER 9129AA

Tento vícesložkový dynamometr slouží k měření výsledných sil při frézování a tří výsledných vektorů. Dynamometr se skládá ze čtyř třísložkových snímačů sil. Tyto snímače jsou umístěny pod vysokým tlakem mezi kryt a dvě boční základní desky. Díky speciální montáži senzorů dochází pouze k malým odchylkám vlivem teploty. Senzory síly vždy obsahují tři krystalové desky, jedna z nich je citlivá na tlak ve směru Y a další dvě jsou citlivé na smykovou sílu v osách X a Z. Síly se dají měřit téměř bez odchylky. Výstupy všech čtyř vestavěných snímačů jsou odváděny do devítipólové příruby. Je možné měřit vícesložkový silový moment. Dynamometr je odolný vůči korozi i proti vniknutí chladicí kapaliny. Dynamometr je opatřen stupněm krytí IP67. Informace z dynamometru putují do převodníku kabelem 1687B nebo 1677A. [24]



Obrázek 33 Dynamometr KISTLER 9129AA [24]

Dynamometrem se dají měřit například řezné síly při superfinišování, vícekomponentní síly, síly ve stísněných prostorech a řezné síly F_c , F_f a F_p . Dynamometr KISTLER 9129AA patří mezi menší dynamometry, největší rozměry jsou 150 mm na 105 mm. Na dynamometr je možné, díky děrám, které jsou v pěti řádcích vzdáleny 21 mm a čtyřem sloupcům s roztečí 20 mm, upnout širokou škálu obrobků o různých tvarech. Dynamometr měří v rozsahu od - 10 do 10 kN a je schopný pracovat v teplotním rozmezí od 0 do 70°C. [24]

8.4 KISTLER LabAmp 5167A

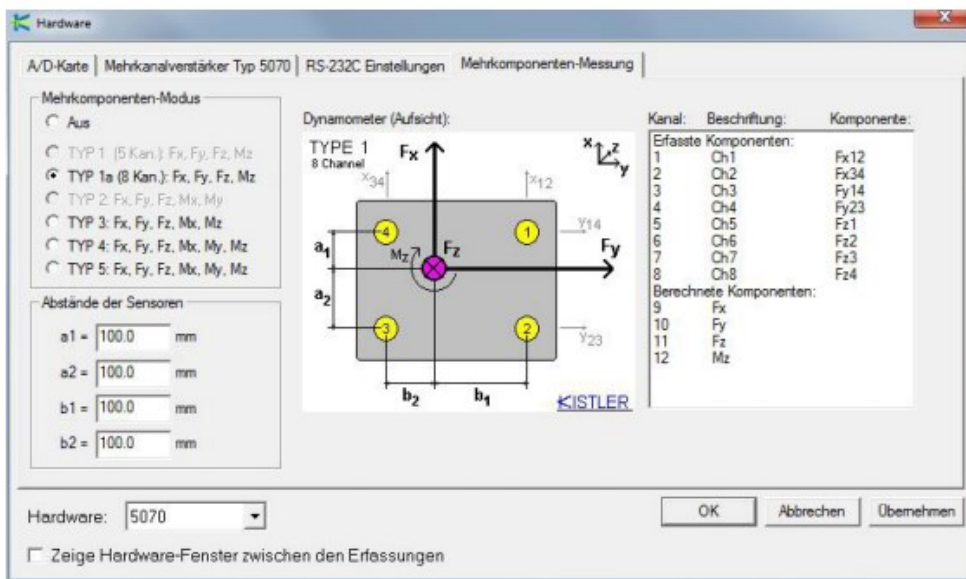
Toto zařízení slouží jako zesilovač piezo-elektrických výbojů, které přijímá z dynamometru. Piezo-elektrické snímače (dynamometry) produkují elektrické výboje, které jsou přímo úměrné zatížení na dynamometru. Zesilovač převádí informace do digitální podoby a odesílá je do externího počítače pro další analýzu. Informace jsou konfigurovány na webové rozhraní, tím pádem jsou jednoduše přístupné i ve standardním webovém prohlížeči. Zesilovač nabízí široké uživatelské rozhraní, a to jak jednoduchým způsobem konfigurace se zařízením, tak také zobrazuje různé hodnoty měření, kterými jsou například živá hodnota, maximální i minimální hodnota nebo aritmetický průměr či součet čtverců. V případě vícesložkového dynamometru lze ze zaznamenaných sil vypočítat části výsledného vektoru točivého momentu. Způsob použití se liší podle použitého dynamometru. Čtyřkanálový přístroj slouží zejména k měření řezných sil a zpracování dat v softwaru DynoWare. Osmikanálový přístroj je vhodný pro šesti komponentní měření sil a momentů, jak v laboratoři, tak ve vývoji. Největší rozměry tohoto zesilovače jsou 228 mm na 217,5 mm, s výškou 93 mm. Na obrázku 31 je vidět zesilovač dat od firmy Kistler. [25]



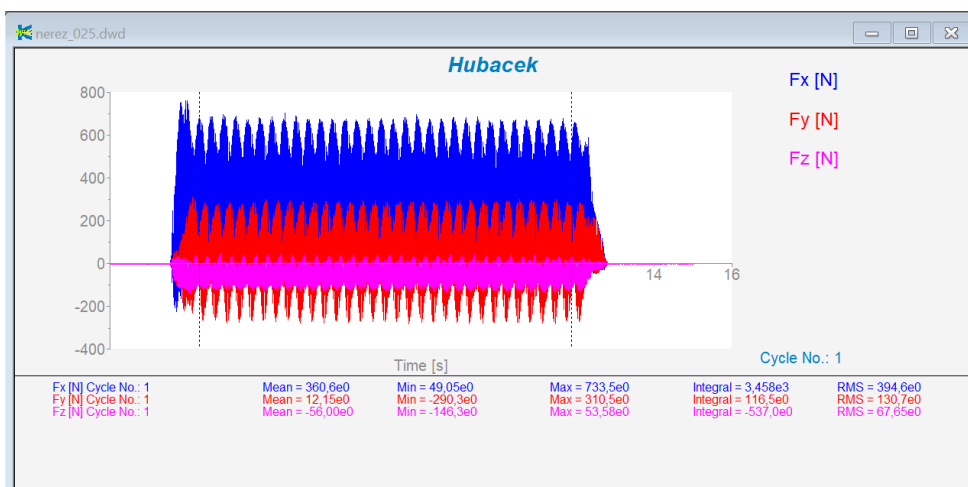
Obrázek 34 Kistler LabAmp 5167A [25]

DynoWare

Kistler DynoWare je univerzální, snadno použitelný software, který je vhodný pro měření sil. Výhodou tohoto softwaru je jeho jednoduchá ovladatelnost. DynoWare lze spojit s řadou různých měřících přístrojů. Software DynoWare poskytuje užitečné funkce jako je vyhodnocení a výpočet signálu přicházejícího ze zesilovače. Systém DynoWare nabízí obsluhu vizualizaci křivek společně s užitečnými výpočty a grafickými funkcemi v reálném čase. Software ukládá individuální dokumentaci o měření spolu s naměřenými daty. [25]



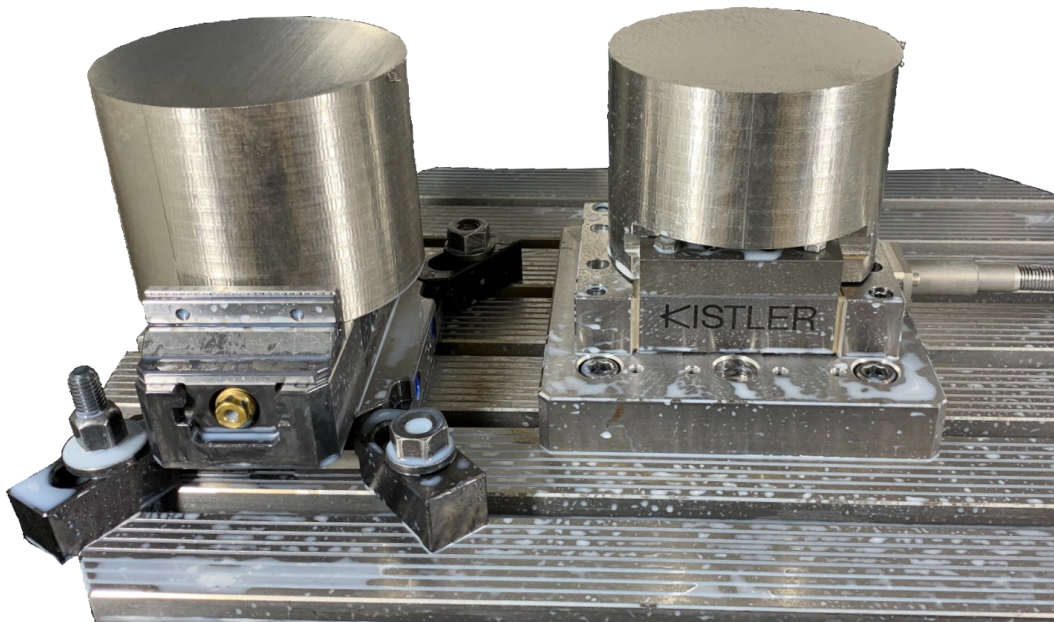
Obrázek 35 Příklad nastavení v programu DynoWare [25]



Obrázek 36 Příklad grafu v programu DynoWare

9 ZPŮSOB PROVEDENÍ EXPERIMENTU

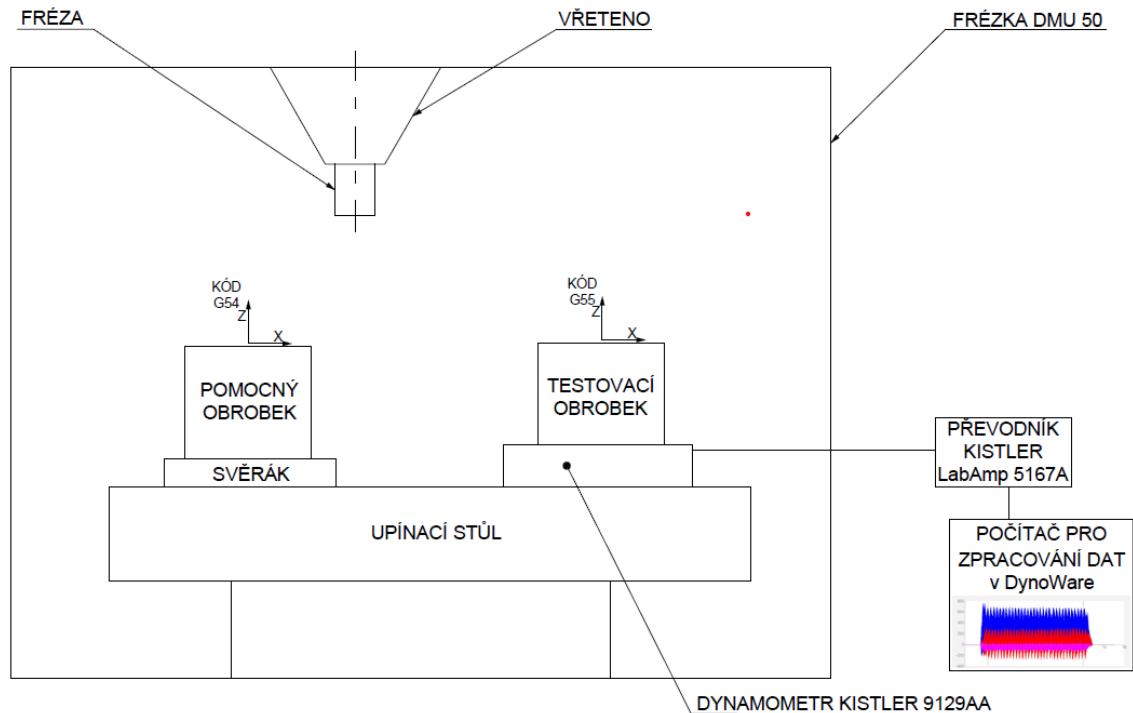
Po úpravě testovacího obrobku se přistoupilo k samotnému experimentu. Nejprve byly připraveny dva samostatné frézovací programy G54 a G55, které budou samostatně představeny v následující kapitole. Tyto frézovací kódy sloužily k otestování fréz. Z důvodu složité přípravy testovacího obrobku upnutého v dynamometru byl zvolen následující postup. Byly použity dva identické obrobky, jeden z obrobků byl upnut ve svěráku na levé straně upínacího stolu a vpravo pak byl upnutý obrobek v dynamometru. Na obrázku 37 jsou vidět oba upnuté obrobky.



Obrázek 35 Způsob upnutí obou obrobků

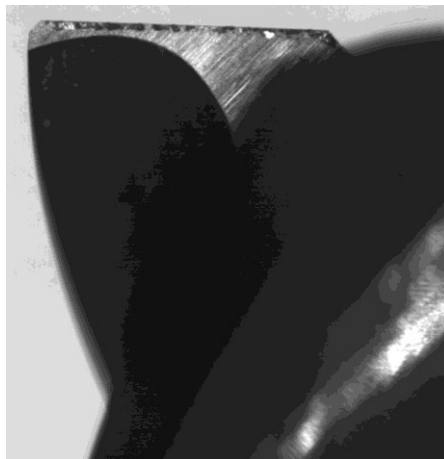
Obrobek v dynamometru sloužil k samotnému měření sil při frézování, zatímco obrobek nalevo byl určen k samotnému opotřebení nástroje. Testovací obrobek, který byl upnutý v dynamometru, musel být uprostřed upínacího stolu, a to kvůli technologii upnutí dynamometru. U obou obrobků byla frézována první vrstva jinou frézou, aby bylo zajištěno, že mají testované frézy stejné podmínky. Obráběná plocha u obrobku sloužící k opotřebení nástroje zůstala kruhového tvaru, zatímco u obrobku upnutého v dynamometru se vrchní strana upravila do čtverce. Samotné měření bylo prováděno tak, že se programy střídaly, nejdřív byly změřeny síly na neopotřebené fríze na kódu G54, následně byla fríza opotřebována pomocí programu G55, po zfrézování jedné vrstvy obrobku na opotřebení se zase měřilo, takhle bylo provedeno několik měření podle použitých fréz.

Informace z dynamometru putovaly do převodníku, kde se informace převáděly do počítačové podoby. Z převodníku šla data do samotného počítače, kde byla dále zpracována. Obrázek 38 zachycuje schéma rozmístění přístrojů a obrobků při experimentu.



Obrázek 36 Schéma rozmístění přístrojů po čas experimentu

Před začátkem experimentu byly všechny frézy přeměřeny a vyfoceny na nastavovacím zařízení od firmy HAIMER. U každé z fréz byly vyfoceny všechny břity. Fotografie fréz před experimentem byly poté porovnány s fotografiemi fréz po experimentu. Na obrázku 39 je příklad jedné fotografie řezného nástroje před experimentem.



Obrázek 37 Fotografie řezného nástroje před experimentem

10 FRÉZOVACÍ PROGRAMY PRO PROVEDENÍ EXPERIMENTU

Jak již bylo řečeno, pro vykonání experimentu byly použity dva odlišné programy, které byly připraveny v programu NX. První hlavní program G55 byl přichystán pro samotné měření na obrobku upnutém v dynamometru. Druhý kód byl připraven pro samotné opotřebení nástroje dlouhodobým obráběním. Obrobek na opotřebení byl umístěn na levé straně upínacího stolu.

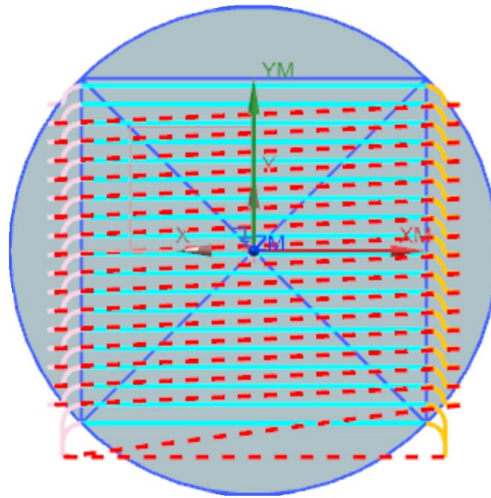
10.1 Měřicí program pro G55

Program G55 byl vytvořen k měření sil na dynamometru. Kód byl vytvořen v programu NX, kde se díky simulaci zjistilo, zda vypadá tak, jak má. Řezné podmínky byly zvoleny podle frézovaného materiálu, kterým byl materiál 17 240. Doporučené podmínky byly nalezeny v katalogu od firmy Planička TOOLS s.r.o.. Tyto podmínky byly mírně upraveny, aby frézy byly v nekomfortní zóně. Byly zvoleny parametry: hloubka řezu 3 mm a šířka záběru 5 mm, obvodová rychlost 80 m/min a posuv na zub 0,1021 mm. Celkový posuv nástroje činí 520 mm/min a otáčky vřetene jsou 2546 ot/min. Všechny tyto parametry jsou shrnuty v tabulce 5.

Tabulka 5 Řezné podmínky programu G55

řezné podmínky	
a_p	3 mm
a_e	5 mm
v_f	520 mm/min
n	2546 ot/min
v_c	80 m/min
f_z	0,1021 mm

Aby mohl program proběhnout, musel být na obrobku vyfrézován čtverec o velikosti strany a 91,9 mm a s výškou totožnou s hloubkou řezu čili 3 mm. Program G55 byl nachystán na tento čtverec. Při každém měření byla frézována jedna drážka. Program musel být spouštěný tak, aby pokračoval následující drážkou čili byl spouštěn od bodu, kdy skončilo předchozí měření.



Obrázek 38 Frézovací program G55

Obrázek 40 ukazuje program G55, který se skládá z několika částí, které jsou označeny jednotlivými barvami. Tyrkysová označuje hlavní část programu a tou je část, kdy nástroj vykonává práci. Červené čárkované čáry vykazují rychloposuv tzn. přemísťování frézy bez vykonávání práce. Oranžová barva napravo od tyrkysové označuje vniknutí do záběru a růžová barva naopak zobrazuje vyjetí ze záběru.

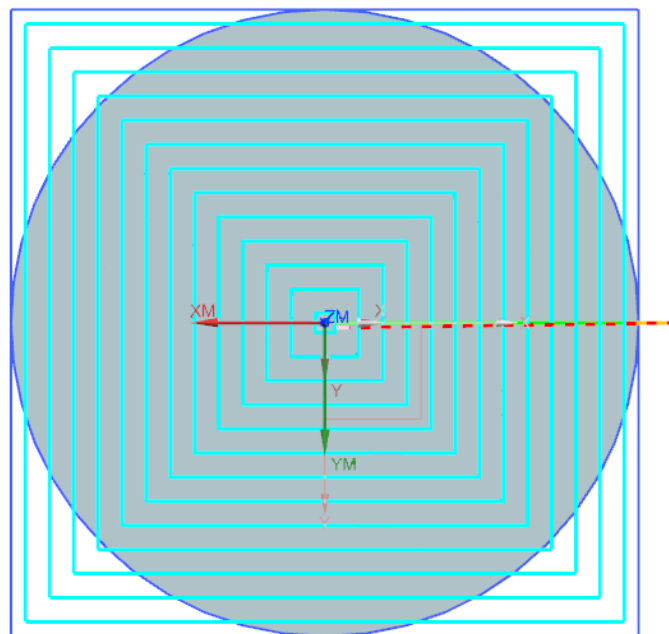
10.2 Program pro dlouhodobé obrábění pro G54

Program G54 byl vytvořen pro samotné opotřebení fréz. Frézy se opotřebovávaly na obrobku ze stejného materiálu jako probíhalo měření. Program měl za úkol frézovat obrobek ve tvaru válce o průměru 130 mm. Pro zjednodušení programu bylo zvoleno frézování čtverce o stranách 130 mm. Hloubka řezu byla 3 mm. Program byl nastaven tak, aby frézoval deset vrstev, po každé z vrstev byl zastaven, aby mohlo být změřeno opotřebení nástroje. Šířka záběru byla 50 % průměru frézy, takže 5 mm. Obvodová rychlost nástroje byla 80 m/min a posuv na zub byl 0,1021mm. Otáčky vřetene byly 2546 ot/min, nástroj se posouval rychlostí 520 mm/min. Řezné podmínky byly stejné jako u předchozího programu G55, aby bylo měření co nejoptimálnější. Všechny řezné parametry jsou zaznamenány v tabulce 6.

Tabulka 6 Řezné parametry programu G54

řezné podmínky	
a_p	3 mm
a_e	5 mm
v_f	520 mm/min
n	2546 ot/min
v_c	80 m/min
f_z	0,1021 mm

Na obrázku 41 je vidět jeden cyklus programu G54. Nástroj začíná obrábět na okraji obrobku a kopíruje čtverec o straně 130 mm, který označuje tmavě modrá barva. Tyrkysová barva značí frézu v záběru s řeznými parametry, které jsou uvedeny v tabulce 6. Fréza postupným frézováním zmenšuje čtverec až do jeho středu. Každé posunutí blíže středu značí zelená čára. Nástroj ze zmíněného středu čtverce odjíždí rychloposuvem, který je značen červenou čárkovanou čarou.



Obrázek 39 Program G54

11 ZPRACOVÁNÍ DAT

V kapitole zpracování dat se pojednává o datech, která byla naměřena na dynamometru a následně vyhodnocena programem DynoWare. V tabulkách se nachází Mean (průměr) měřených hodnot, minimální a maximální hodnoty jednotlivých měření a také nejdůležitější hodnota RMS, což je kvadratický průměr naměřených sil. Všechny tyto hodnoty lze vidět ve všech třech osách X, Y a Z. V tabulce 7 lze pozorovat data naměřená pro frézu s povlakem TripleCoating Cr.

Tabulka 7 Naměřené hodnoty pro frézu s povlakem TripleCoating Cr

fréza s povlakem TripleCoating Cr					
měření	osa	Mean [N]	Min [N]	Max [N]	RMS [N]
1.	F_x	264,8	-41,41	708,5	314,4
	F_y	-6,84	-355,7	339,2	144,2
	F_z	-70,89	-203,5	86,87	87,24
2.	F_x	312,7	19,5	725,1	355,9
	F_y	25,71	-327,7	345,4	143,3
	F_z	-57,77	-194,1	91,95	76,46
3.	F_x	-5,135	-287,6	400,5	167,6
	F_y	14,56	-343,5	346,1	147
	F_z	-8,089	-144,3	139	53,02
4.	F_x	319,3	32,63	728,3	360,5
	F_y	23,51	-337	347,5	144,3
	F_z	-58,77	-191,4	89,99	77,33
5.	F_x	330,4	44,7	740,3	372,5
	F_y	17,98	-387,7	372	156,5
	F_z	-58,36	-207,2	106,6	82,9
6.	F_x	340,1	48,37	732,5	383,5
	F_y	10,16	-418,1	390,9	160,6
	F_z	-56,54	-201,3	112,4	82,93
7.	F_x	349,8	54,31	737,8	393,1
	F_y	3,122	-428,2	377,8	156,8
	F_z	-54,69	-182,7	96,25	79,7
8.	F_x	380,8	-62,66	877,3	421,9
	F_y	-13,99	-384,4	376,2	157,2
	F_z	-51,86	-176,3	102,2	72,8
9.	F_x	493,5	62,29	895,4	525,7
	F_y	7,51	-518,4	530,3	210,3
	F_z	19,27	-254,3	283,5	103,1
10.	F_x	666,3	133	1119	688,1
	F_y	21,96	-443	503,8	167,6
	F_z	158,6	-118,5	396,3	183,5

V tabulce je možno si všimnout, že třetí měření je zvýrazněné červenou barvou. Je to z důvodu chybného měření, proto se 3. měření nebude dále využívat ke zpracování dat. S další frézou s povlakem Alwin bylo provedeno 9 měření, která jsou popsána v tabulce 8.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty pro frézu s povlakem Alwin

fréza s povlakem Alwin					
měření	osa	Mean [N]	Min [N]	Max [N]	RMS [N]
1.	F_x	311,5	-0,6213	690	349,8
	F_y	28,5	-243	317,9	121,1
	F_z	-55,53	-153,1	54,45	66,1
2.	F_x	308,4	3,292	692,7	346,9
	F_y	29,7	-233,1	303	115,4
	F_z	56,82	-150,3	52,17	66,12
3.	F_x	318	15,96	705,4	354,9
	F_y	27,64	-221,9	308,1	114,7
	F_z	-58,26	-148,6	50,13	67,42
4.	F_x	326,2	19,08	704,6	361,6
	F_y	25,56	-229,4	297,1	114,9
	F_z	-59,23	-151,7	49,89	68,32
5.	F_x	339,1	41,31	701,7	372,8
	F_y	21,92	-268	314,6	121,8
	F_z	-59,16	-159,6	65,66	69,55
6.	F_x	360,6	49,05	733,5	394,6
	F_y	12,15	-290,3	310,5	130,7
	F_z	-56	-146,3	53,58	67,65
7.	F_x	383,2	53,29	722,9	416,4
	F_y	3,805	-316,5	332,9	140,8
	F_z	-50,86	-138,4	60,11	65,57
8.	F_x	416	83,68	838,1	450,1
	F_y	-15,21	-306,4	354,8	146,4
	F_z	-34,97	-134,3	96,73	50,48
9.	F_x	616,4	211,6	950,6	634,1
	F_y	26,82	-372,6	483,2	161
	F_z	67,5	-190	320	112,7

Jako poslední byla měřena fréza bez povlaku, hodnoty z jejího měření jsou zřejmé z tabulky 9. Díky tomu, že fréza nebyla povlakovaná, nemohl být zvolen stejný počet měření jako u předchozích dvou povlakovaných fréz, takže na této fríze byla provedena pouze 3 měření.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty pro frézu bez povlaku

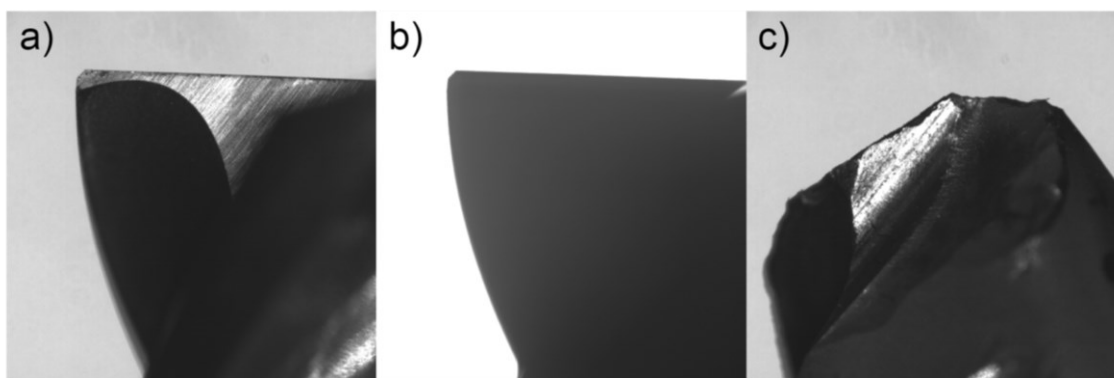
fréza bez povlaku					
měření	osa	Mean [N]	Min [N]	Max [N]	RMS [N]
1.	<i>F_x</i>	340,9	42,55	688,8	366,3
	<i>F_y</i>	13,55	-218,4	320,3	117,9
	<i>F_z</i>	-60,07	-156,9	44,41	68,43
2.	<i>F_x</i>	415,2	-199	839,4	448,5
	<i>F_y</i>	3,308	-271	361,4	142,6
	<i>F_z</i>	-44,5	-147,4	58,15	59,51
3.	<i>F_x</i>	855,9	314,2	1544	876,1
	<i>F_y</i>	-55,1	-688,6	630,3	218,3
	<i>F_z</i>	102,4	-241,4	405,1	133,2

12 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

V této kapitole, vyhodnocení experimentu, vyhodnotím opotřebení fréz povlakovaných různými povlaky metodou PVD, a to jak samotné opotřebení frézy v závislosti na odfrézovaném čase, tak porovnání fréz s různými povlaky nebo bez povlaku mezi sebou. Porovnávat se budou jak pohledově před a po začátku experimentu, tak pomocí výstupních hodnot z dynamometru.

12.1 Fréza s povlakem TripleCoating Cr

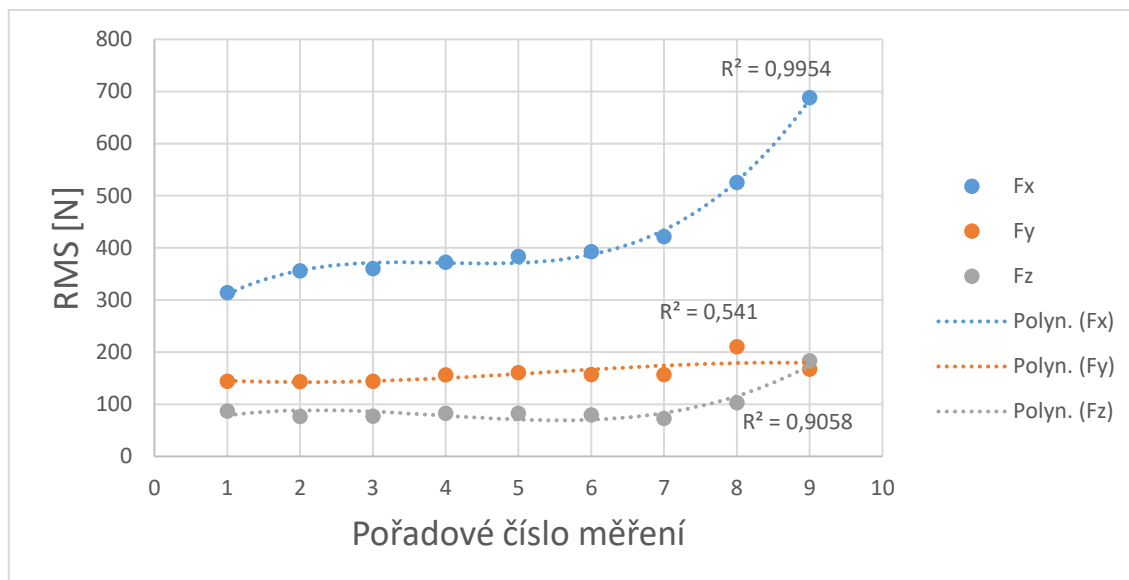
Tato fréza byla měřena jako první. Při prvních dvou měřeních došlo k chybě měřicího přístroje, takže fréza byla v provozu o něco delší čas než další dvě testované frézy. Na obrázku 42 možné vidět frézu s povlakem TripleCoating Cr a) monochromatická fotka třetího břitu b) silueta třetího břitu c) monochromatická fotka třetího břitu po ukončení experimentu. Jak je možné si všimnout, fréza se při posledním opotřebovacím cyklu rozbila. Mohlo to být zapříčiněno náhlými vibracemi nástroje nebo obrobku. Také v tom mohlo hrát roli upnutí frézy. Fréza byla upnuta příliš na dlouho. Opotřebení nástroje po vykonání experimentu tedy nelze určit.



Obrázek 40 Fréza s povlakem TripleCoating Cr

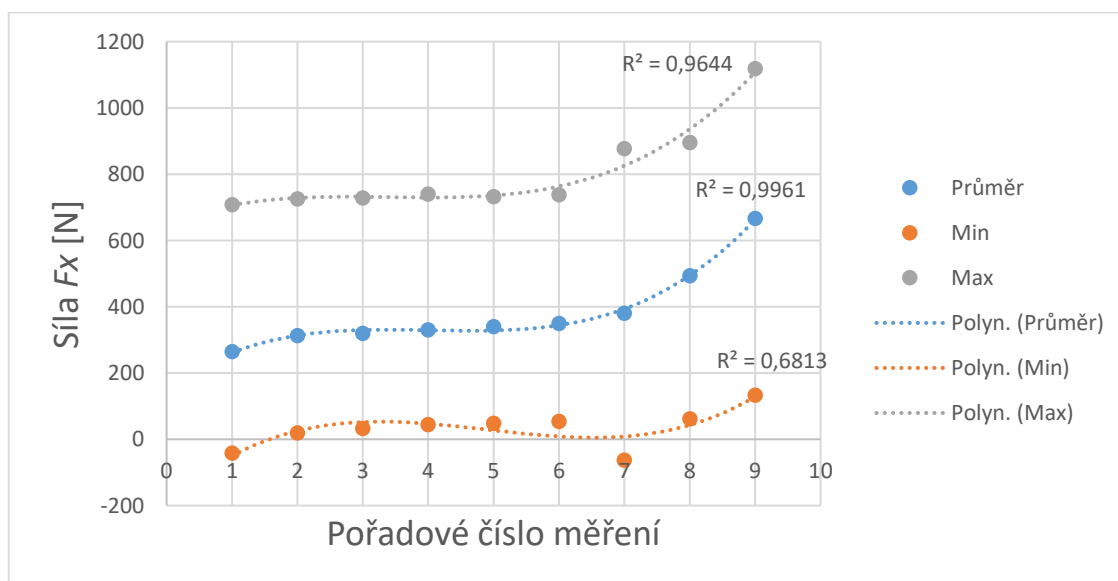
Co ale u frézy s tímto povlakem můžeme vyhodnotit, je změna sil, kterou fréza působí na obrobek mezi jednotlivými měřeními. Síly jsou změřeny v osách X, Y a Z. V každé této ose jsou zpracovány 4 parametry, kterými jsou: průměr, maximum, minimum a kvadratický průměr sil.

Graf popisuje RMS v jednotlivých osách X, Y a Z ve všech měřeních. Z grafu je vidět, že síla v ose X je největší a zároveň také nejvíce narůstá. Druhé dvě síly jsou o poznání menší. Průběh sil v osách X a Z jsou si relativně podobné, ale v ose Y se liší předposlední hodnota, která je nadměrně velká. Tento výkyv mohl být způsobený náhlým otřesem obrobku nebo jinými vibracemi.



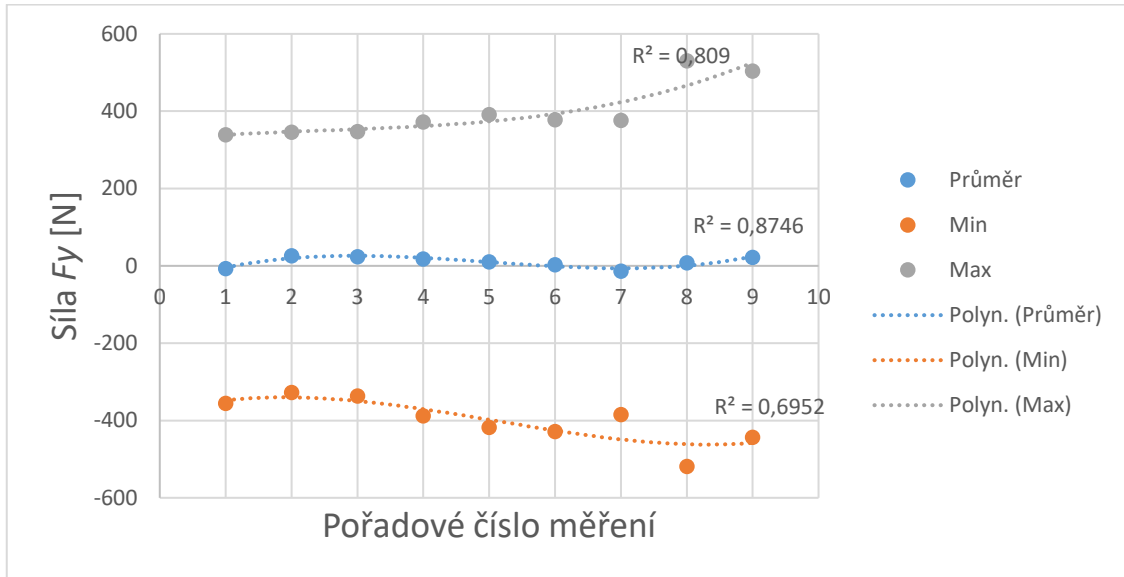
Obrázek 41 Graf kvadratického průměru sil

V následujícím grafu s názvem Průběh síly F_x , je zachycen průběh sil v ose X. Je zde zřejmé, že maximum, minimum i průměr kopírují stejnou křivku, pouze s rozdílnými hodnotami. Hodnota R^2 je u maxima vysoká, což značí dobrou shodu modelu s daty. Zatímco u minima je relativně nízká, což může být dáno jednou vychýlenou hodnotou.



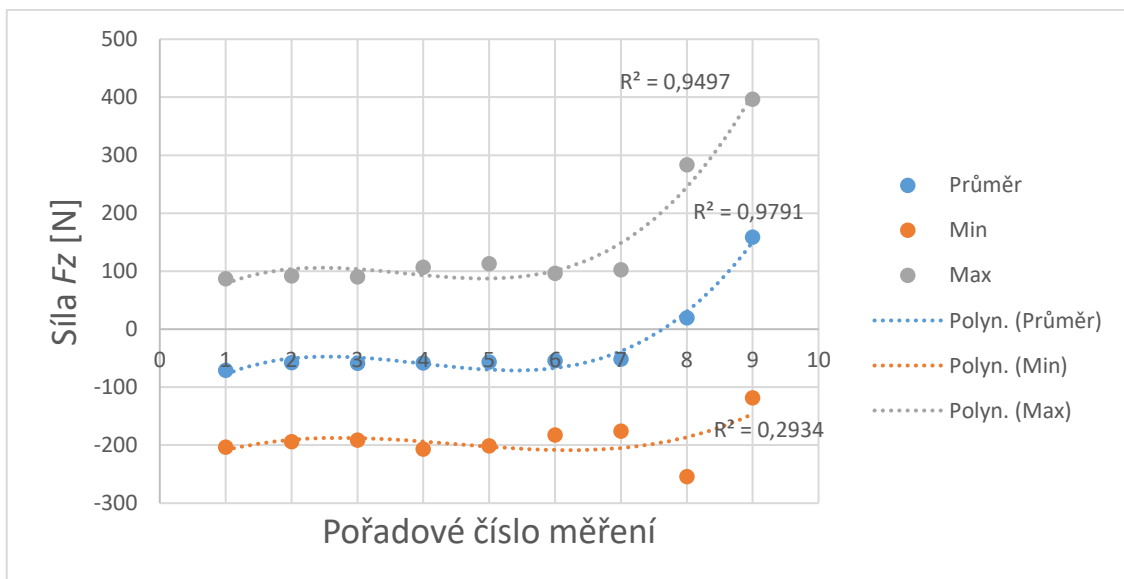
Obrázek 42 Graf průběhu síly F_x

V grafu Průběh síly F_y je možné se všimnout, že data průměru tvoří mírnou sinusoidu a jeho R^2 je rovno 0,8746. Z pohledu na data minima a maxima je vidět, že vytváří zrcadlově převrácené křivky.



Obrázek 43 Graf průběhu síly F_y

V grafu pro sílu F_z je vidět, že výsledné křivky průměru a maxima jsou skoro stejné, u minima to říct nelze. S tím souvisí i hodnoty R^2 , které jsou u průměru a maxima velice vysoké, ale u minima je tomu naopak.



Obrázek 44 Graf průběhu síly F_z

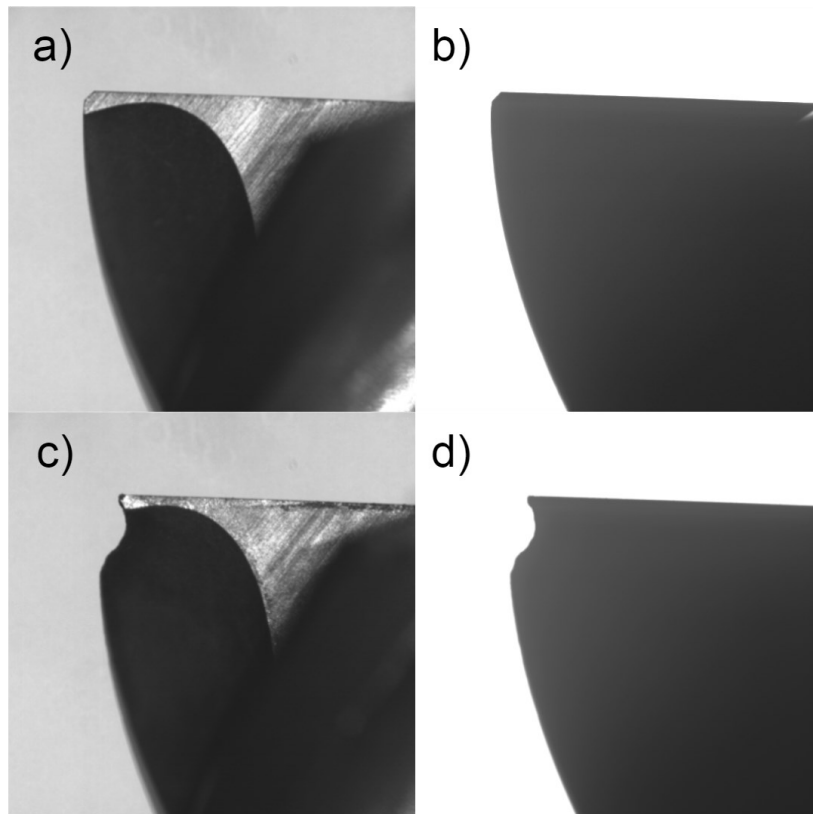
Ve výše uváděných grafech je popsáno měření u frézy s povlakem TripleCoating Cr. V tabulce 10 jsou uvedeny parametry, které měla fréza před jednotlivými měřeními. Těmito parametry jsou celkový obráběný čas, doposud obrobený materiál a jeho celková dráha obrábění. V tomto případě došlo na začátku experimentu k menším komplikacím s měřicí technikou, proto hodnoty nezačínají od nuly.

Tabulka 10 Parametry frézy před jednotlivými měřeními

počet měření	Obráběný čas	Obrobený materiál	dráha obrábění
	τ [s]	q [cm ³]	l [mm]
1	21,2	2,744	183,8
2	451,8	43,926	3915,7
3	1313,0	126,290	11379,5
4	1743,6	167,472	15111,4
5	2174,2	208,654	18843,3
6	2604,8	249,836	22575,2
7	3035,4	291,018	26307,1
8	3466,0	332,200	30039,0
9	3896,6	373,382	33770,9

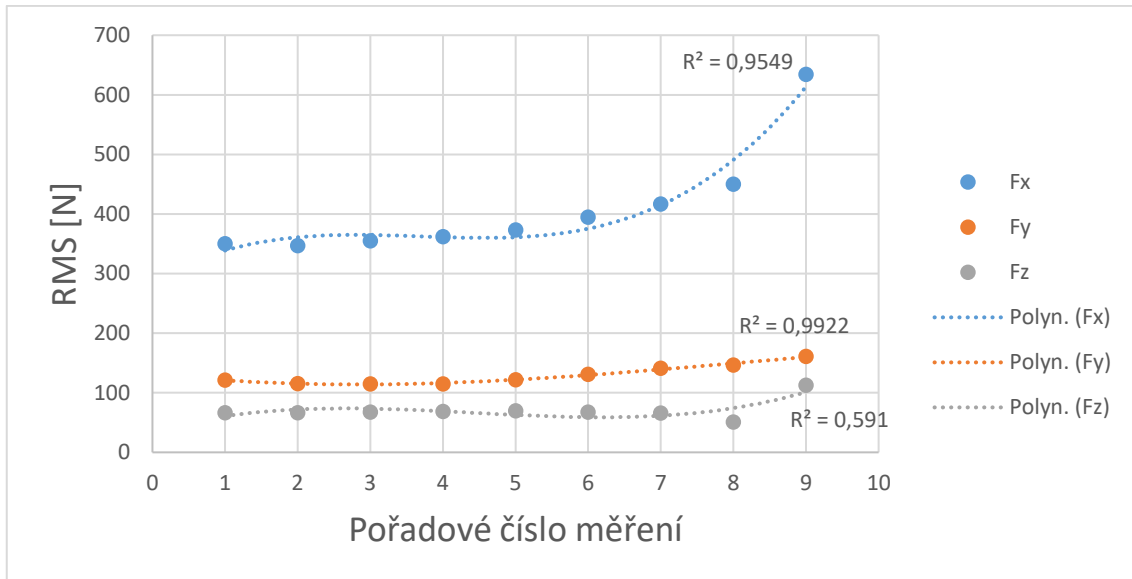
12.2 Fréza s povlakem Alwin

Tato fréza byla měřena jako druhá v pořadí. Při testování byly pečlivě sledovány hodnoty u jednotlivých měření, aby se nestalo to, co s první měřenou frézou. Testování bylo ukončeno po devátém měření, kdy hodnoty v síle F_x byly podobné hodnotě u desátého měření předchozí frézy. Už jen z toho, že fréza s povlakem Alwin měla o jedno měření méně a vykazovala podobné hodnoty, můžeme říct, že povlak TrippleCoating Cr je pro tento typ materiálu a celkové nastavení rezných podmínek o něco lepší. Na obrázku 47 je znázorněn jeden břit frézy s povlakem Alwin. Břit je vykreslen ve dvou variantách před obráběním a ve dvou variantách po obrábění. Na obrázku a) je monochromatická fotka břitu této frézy, na obrázku b) je silueta stejného břitu. Na dalších dvou obrázcích je taktéž stejný břit, ale již po dokončení experimentu. Obrázek c) je monochromatická fotka a obrázek d) je silueta břitu. Když srovnáme oba typy fotek jak a) a c) nebo b) a d), je dobře vidět opotřebení nástroje. Zatímco na fotkách b) a d) lze vidět jen rozdíl šroubovice nástroje, tak na fotkách a) a c) je patrný i rozdíl jak v opotřebení šroubovice, tak opotřebení ostří nástroje.



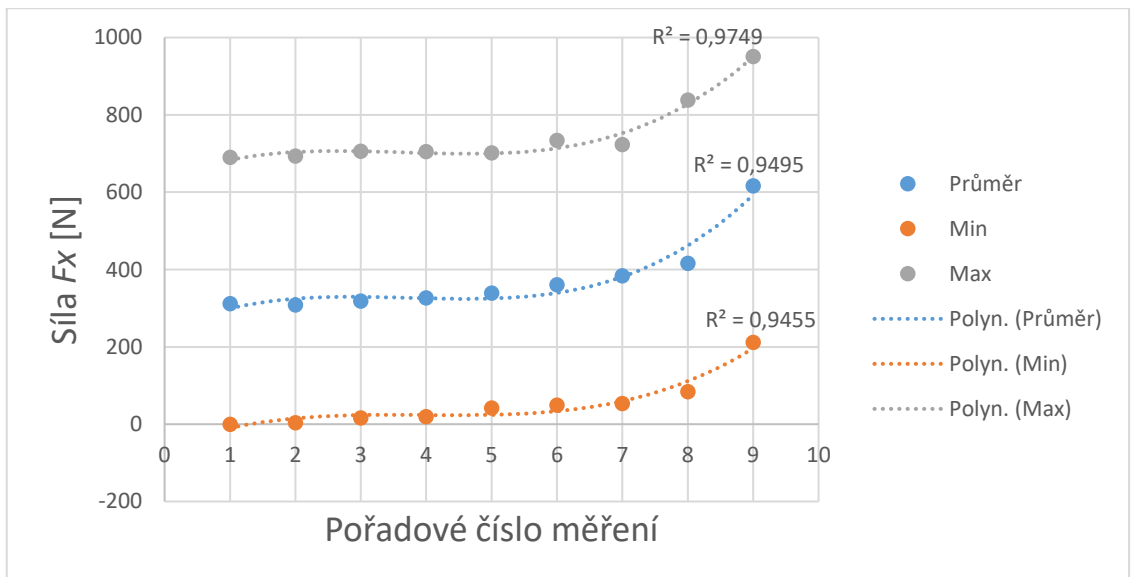
Obrázek 45 Břit frézy s povlakem Alwin

Jako u předchozí frézy si nejdříve ukážeme graf s kvadratickým průměrem sil, který obsahuje všechny tři složky síly F_x , F_y a F_z . Z grafu na obrázku 48 je zřejmé, že hlavní síla F_x je největší a velmi se shoduje s křivkou F_x z grafu na obrázku č.40. Další dvě síly F_y a F_z jsou oproti síle F_x téměř konstantní.



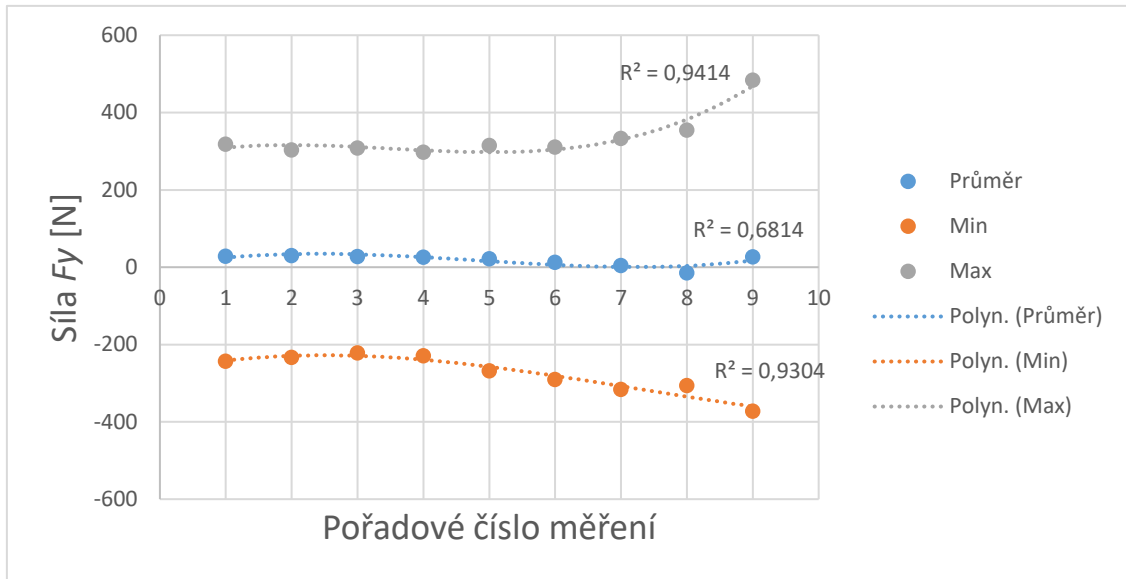
Obrázek 46 Graf kvadratického průměru sil

V grafu Průběh síly F_x je vidět, že po dobu šesti měření je téměř konstantní. Z toho lze usoudit, že fréza si své rezné vlastnosti ponechala po všech šest měření skoro stejné, následující tři měření se síla zvětšila, což ukazuje na větší opotřebení nástroje. Data průměru, minima i maxima vytváří téměř identickou křivku.



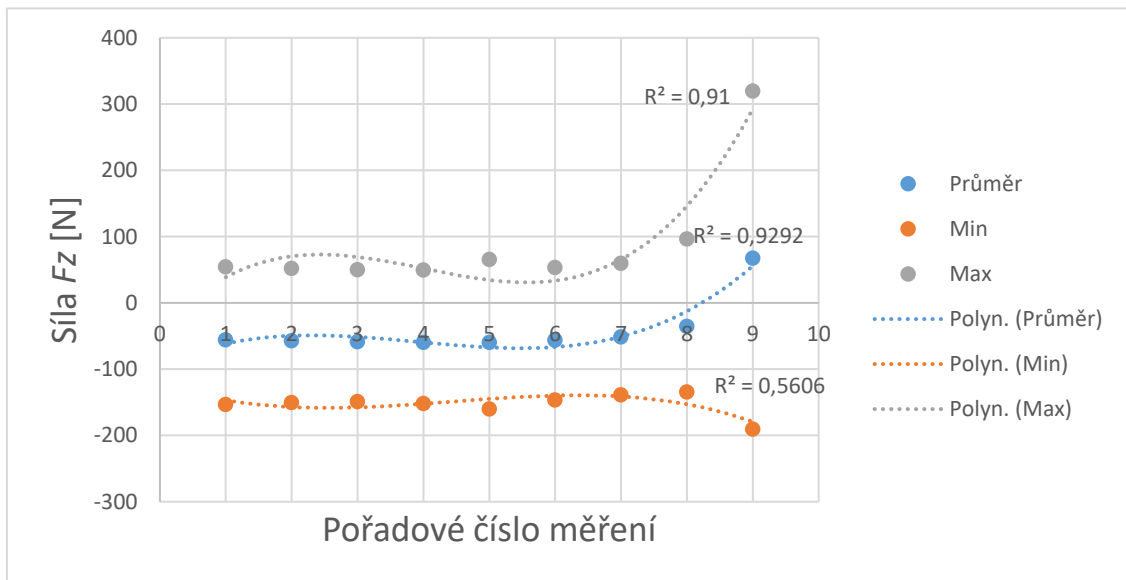
Obrázek 47 Graf průběhu síly F_x

V grafu pro sílu F_y je zřejmé, že působení v ose Y bylo v průměru takřka nulové. Stejně jako u předchozí frézy jsou křivky minima a maxima velice identické, jen zrcadlově převrácené.



Obrázek 48 Graf průběhu síly F_y

Na obrázku 51 je zobrazen graf průběhu síly F_z . Z tohoto grafu lze vyčíst, že síla v ose Z působí pořád stejně, kromě posledních dvou měření, kde se síla zvětšuje. V porovnání s předchozí frézou je možno říct, že jsou si síly v ose Z velice blízké.



Obrázek 49 Graf průběhu síly F_z

V tabulce 11 jsou zaznamenány parametry frézy před jednotlivými měřeními. První měření proběhlo s úplně nepoužitou frézou, proto jsou všechny parametry rovny nule. Těmito

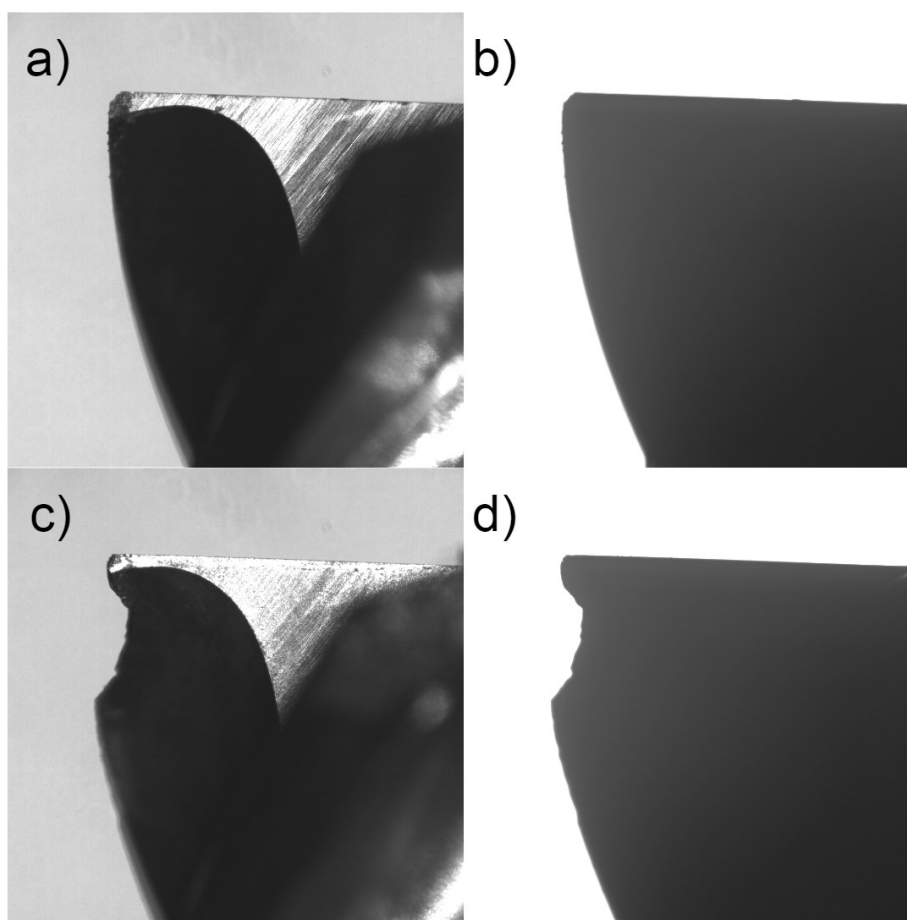
parametry jsou jako u předešlé frézy obráběný čas, množství obrobeneho materiálu a uražená dráha při obrábění.

Tabulka 11 Parametry frézy před jednotlivými měřeními

počet měření	Obráběný čas [s]	Obrobený materiál [cm ³]	dráha obrábění [mm]
	τ [s]	q [cm ³]	l [mm]
1	0	0	0
2	430,6	41,182	3731,9
3	861,2	82,364	7463,8
4	1291,8	123,546	11195,7
5	1722,4	164,728	14927,6
6	2153,0	205,910	18659,5
7	2583,6	247,092	22391,4
8	3014,2	288,274	26123,3
9	3444,8	329,456	29855,2

12.3 Fréza bez povlaku

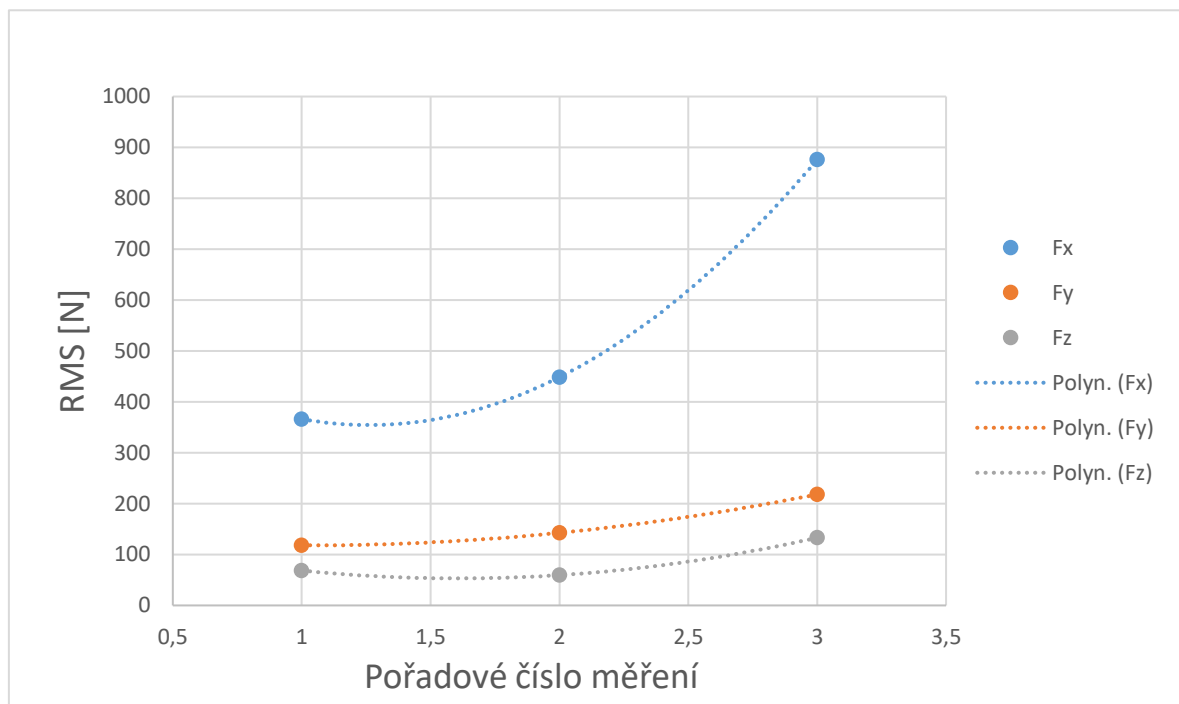
Poslední třetí měřená fréza byla bez povlaku. Podle očekávání fréza bez povlaku vydržela nejméně. Měření s frézou bez povlaku bylo ukončeno po třetím měření, protože sledovaná síla v ose X se dostala do maxima 1544 N, přičemž předchozí dvě měly maximum okolo 1000 N při posledním měření. To indikovalo ukončení experimentu. Fréza byla po třech měřeních silně opotřebovaná. Její opotřebení je vidět na obrázku 52.



Obrázek 50 Břit frézy bez povlaku

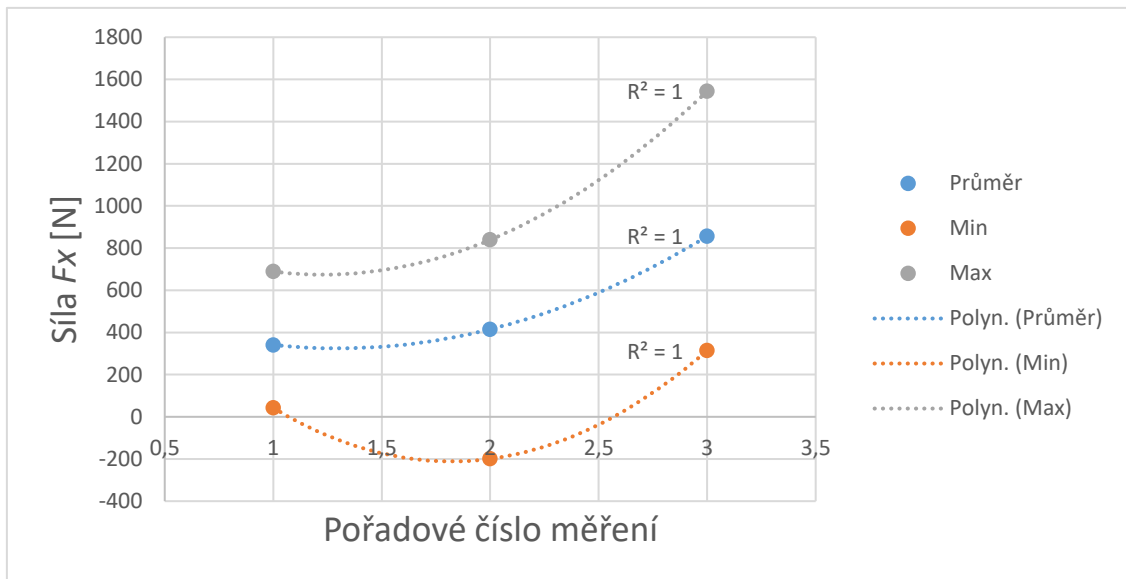
Na obrázku a) je znázorněn břit před začátkem experimentu, na obrázku c) je vidět ten stejný břit po ukončení experimentu. Lze zde dobře pozorovat jak opotřebení břitu, tak odštípnutý kus v místě šroubovice. Na obrázcích b) a d) je vidět silueta stejných břitů jako na obrázcích a) a c). Je zde lépe vidět opotřebení na šroubovici, ale zato opotřebení břitu nelze pozorovat vůbec.

V grafu na obrázku 53 je vidět, že kvadratický průměr sil v ose X při prvním měření byl relativně stejný jako u předchozích dvou měření. Při druhém měření je kvadratický průměr sil F_x podobný silám při sedmém až osmém měření u předchozích fréz, takže je tam rychlejší opotřebení znát. Při posledním třetím měření byl kvadratický průměr sil nejvyšší ze všech tří měřených. Při pohledu na kvadratický průměr sil v osách Y a Z jsou v prvních dvou měřeních srovnatelné s předchozími frézami. V posledním měření byla naměřena o něco vyšší hodnota než u předchozích dvou.



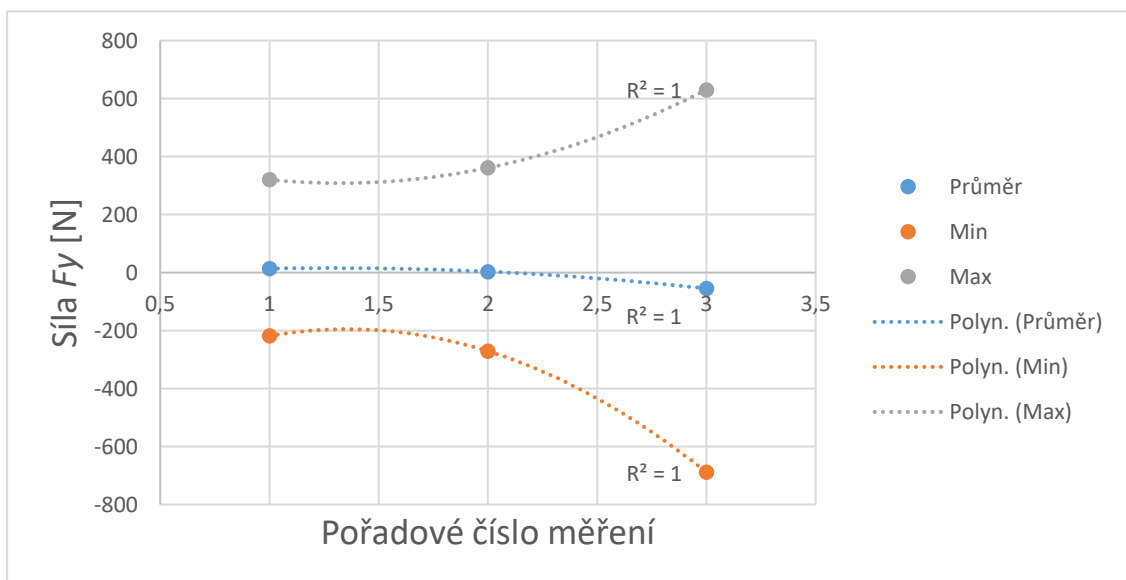
Obrázek 51 Graf kvadratického průměru sil

V grafu na obrázku 54 jsou zaznamenána data průměru, maxima a minima síly v ose X. Je zde patrné, že maximální síla u posledního měření byla největší ze všech měření experimentu. Minimální síla je při druhém měření minusová, což může být dáno nějakými nežádoucími vlivy např. vibracemi.



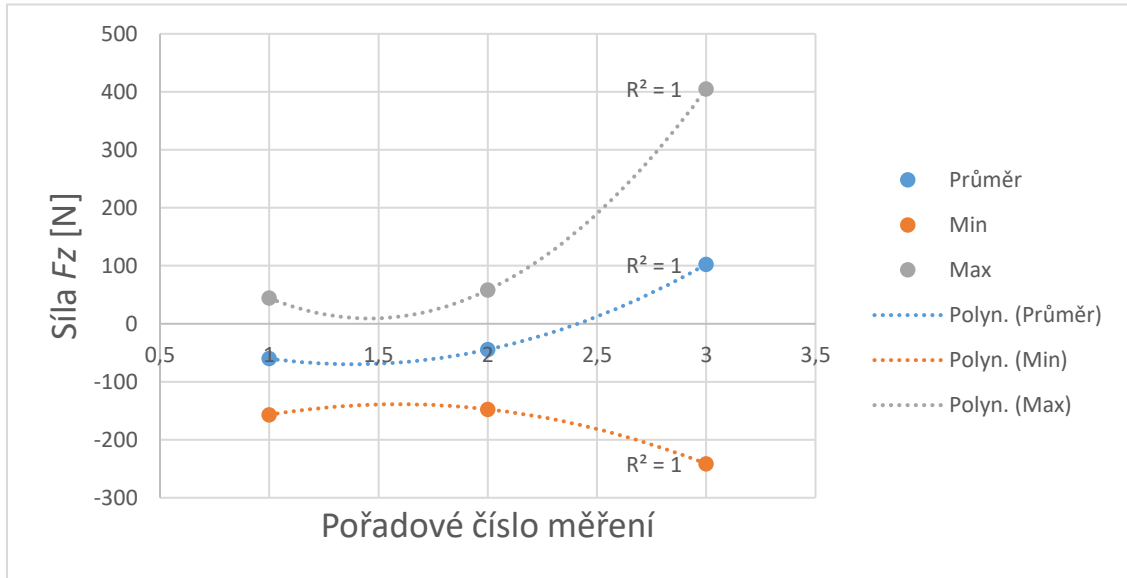
Obrázek 52 Graf průběhu síly F_x

Na obrázku 55 je vidět graf s průběhem sil v ose Y, na kterém je možno si všimnout, že maximum a minimum se u prvního měření moc neliší od prvních dvou experimentálních fréz, naopak síla v minimum a maximum u posledního měření je vyšší než u předchozích fréz.



Obrázek 53 Graf průběhu síly F_y

Hodnoty síly F_z , které lze vidět v grafu na obrázku 56, jsou velmi podobné hodnotám s předchozími měřeními. Z toho vyplývá, že povlak a opotřebení frézy nemají vliv na síly v ose Z.



Obrázek 54 Graf průběhu síly F_z

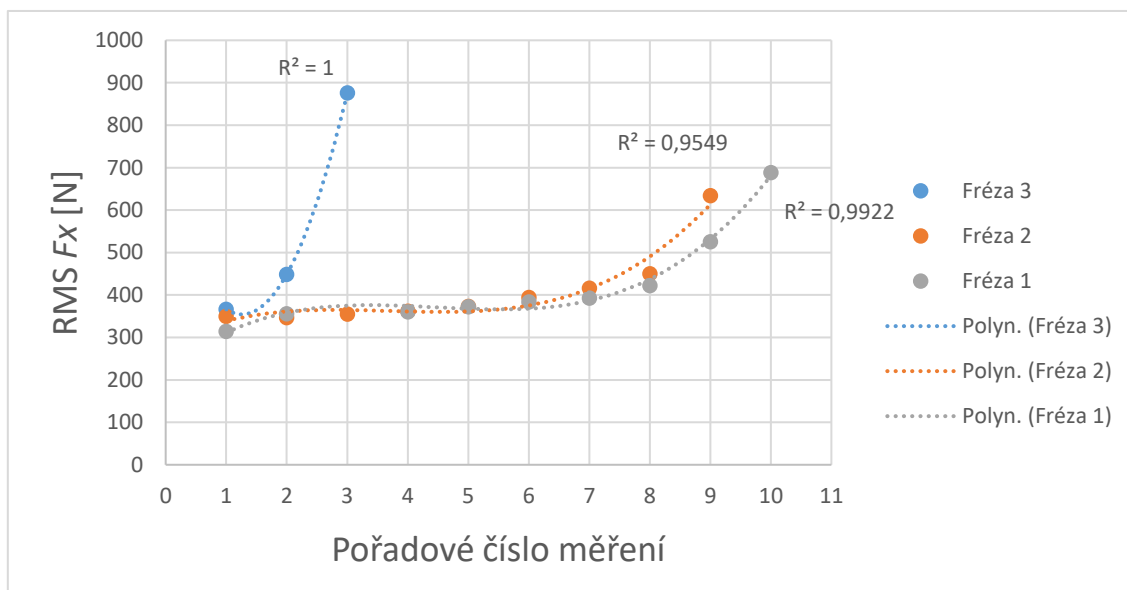
Parametry jako je doba obrábění, obrobený materiál a uražená dráha obrábění před jednotlivými měřeními jsou zapsány v tabulce 12. Jelikož měření probíhalo bez problému, hodnoty jsou stejné jako prvních třech měřeních frézy s povlakem Alwin.

Tabulka 12 Parametry frézy před jednotlivými měřeními

počet měření	Obráběný čas [s]	Obrobený materiál [cm ³]	dráha obrábění [mm]
	τ [s]	q [cm ³]	l [mm]
1	0	0	0
2	430,6	41,182	3731,9
3	861,2	82,364	7463,8

12.4 Shrnutí výsledků experimentu

Jako frézu s nejlepšími výsledky lze označit frézu s povlakem TripleCoating Cr. Přestože se tato fréza při posledním cyklu rozbila a zpočátku proběhla chybná měření, měla výsledky nejlepší. Fréza s povlakem Alwin byla sice o něco konzistentnější, ale její opotřebení bylo znát dříve než u předchozí frézy. Nejhorší podle očekávání skončila fréza bez povlaku, která už při třetím měření měla síly v ose F_x vyšší než předchozí dvě.



Obrázek 55 Kvadratický průměr sil F_x všech fréz

Na obrázku lze vidět graf, kde jsou kvadratické průměry sil v ose F_x všech tří fréz. Fréza 1 je fréza s povlakem TripleCoating Cr, 10 měření má kvůli chybnému třetímu měření, které nebylo do předchozích započítáno. Fréza povlakovaná povlakem Alwin je označena jako fréza 2 a fréza 3 označuje frézu bez povlaku. V grafu lze jasně vidět, že fréza 3 má méně měření, ale zato s nejvyšší naměřenou hodnotou síly. Data obou povlakovaných fréz se do šestého měření prakticky shodují, u sedmého měření je již patrný rozdíl, díky kterému z experimentu vychází nejlépe fréza 1.

Když se v grafu na obrázku 57 zamění osa X, jakožto pořadové číslo měření, za obrobený čas v sekundách, vznikne relativně identický graf. R^2 se u proložených křivek neliší, ale rovnice křivek se liší. Rovnice křivek od všech tří fréz v závislosti na čase vypadají následovně:

$$\text{Fréza 1:} \quad F_X = 3\text{E-}08\tau^3 - 0,0001\tau^2 + 0,1585\tau + 307,79 \quad (10)$$

$$\text{Fréza 2:} \quad F_X = 2\text{E-}08\tau^3 - 8\text{E-}05\tau^2 + 0,0813\tau + 338,74 \quad (11)$$

$$\text{Fréza 3:} \quad F_X = 0,0009\tau^2 - 0,2102\tau + 366,3 \quad (12)$$

Při výměně hodnoty X, v grafu na obrázku 57, za obrobený materiál v centimetrech krychlových je vidět, že i v tomto případě se graf výrazně neliší. Stejně jako u obráběného času je u obrobeného materiálu hodnota R^2 obdobná. Jako v přechozím případě se liší rovnice jednotlivých polynomických křivek třetího řádu, jsou to rovnice 13, 14, 15.

$$\text{Fréza 1:} \quad F_X = 3\text{E-}05q^3 - 0,0127q^2 + 1,676q + 306,6 \quad (13)$$

$$\text{Fréza 2:} \quad F_X = 3\text{E-}05q^3 - 0,0086q^2 + 0,8505q + 338,74 \quad (14)$$

$$\text{Fréza 3:} \quad F_X = 0,1018q^2 - 2,1976q + 366,3 \quad (15)$$

Poslední variantou výměny osy X, jakožto pořadového čísla měření, je dráha obrábění. I v tomto případě je graf téměř shodný s grafem na obrázku 57. R^2 jsou totožné stejně jako u předchozích třech grafů. Odlišné jsou jejich rovnice, které jsou:

$$\text{Fréza 1:} \quad F_X = 4\text{E-}11l^3 - 2\text{E-}06l^2 + 0,0183l + 307,79 \quad (16)$$

$$\text{Fréza 2:} \quad F_X = 4\text{E-}11l^3 - 1\text{E-}06l^2 + 0,0094l + 338,74 \quad (17)$$

$$\text{Fréza 3:} \quad F_X = 1\text{E-}05l^2 - 0,0243l + 366,3 \quad (18)$$

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na měření řezivosti frézovacích nástrojů povlakovaných metodou PVD. Cílem této práce bylo zjistit, zda se jednotlivé povlaky liší svojí životností, řezivostí nebo zda jsou nezbytnou součástí posouvání technologií vpřed.

Teoretická část práce byla věnována tématům týkajících se frézování, frézovacích nástrojů, metod povlakování CVD a PCD. Metoda PVD byla rozebrána podrobněji. Závěr teoretické části byl zaměřen na problematiku hodnocení řezivosti.

Praktická část bakalářské práce byla věnována experimentu, jehož cílem bylo zjistit řezivost a tím životnost jednotlivých nástrojů. Frézy pro vykonání experimentu byly získány od firmy Planička TOOLS s.r.o.. Dvě ze tří fréz byly povlakovány ve firmě SHM s.r.o., jedna povlakem TripleCoating Cr a druhá povlakem Alwin. Třetí fréza povlakovaná nebyla. Všechny tři frézy byly testovány za stejných podmínek. Před posledním měřením s frézou s povlakem TripleCoating Cr došlo k jejímu zničení. To bylo dáno nejspíše neočekávanými vibracemi. Kvůli této události byl upraven počet měření v závislosti na velikosti síly F_x . Z toho vyplývá, že fréza s povlakem TripleCoating Cr byla měřena desetkrát, fréza s povlakem Alwin byla měřena devětkrát a fréza bez povlaku pouze třikrát. Odhad síly byl správný, jelikož žádná další fréza nebyla zničena. Po získání veškerých dat následovalo vyhodnocení experimentu.

Vyhodnocení experimentu nejprve probíhalo subjektivním porovnáním jednotlivých fréz před a po experimentu. Následně byla vyhodnocena data z dynamometru pomocí programu Excel, kde se z nich vytvořily patřičné grafy. Z výsledků vyplývá, že fréza s povlakem TripleCoating Cr byla nejlepší a vydržela nejdéle, a i když byla při posledním cyklu zničena, považuji povlak TripleCoating Cr za lepší z povlaků při mnou zvolených obráběcích podmínkách. Fréza s povlakem Alwin byla sice o něco konzistentnější, ale ke stejné maximální síle F_x se dostala o jeden cyklus dříve. S frézou s povlakem TripleCoating Cr bylo zfrézováno 4,5x více materiálu než s frézou bez povlaku. Rozdíl mezi frézou s povlakem Alwin a bez povlaku je sice menší, ale stále činí čtyřnásobek obrobeného materiálu. O fríze bez povlaku je tedy možné konstatovat, že její opotřebení bylo mnohonásobně rychlejší než u obou povlakovaných.

Z ekonomického hlediska se povlakované nástroje taktéž vyplatí. Ze srovnání ceny fréz a množství obrobeného materiálu v cm^3 jasně vyplývá, že i když je povlakování nákladnou záležitostí, tak rozhodně několikanásobně prodlouží životnost nástroje. Náklady na obrábění

u frézy s povlakem TripleCoating Cr na cm^3 jsou 2,79 Kč/ cm^3 . U frézy s povlakem Alwin jsou jen o málo vyšší a činí 3,165 Kč/ cm^3 . U frézy bez povlaku jsou náklady téměř 4x vyšší a činí 11,09 Kč/ cm^3 .

Na závěr nezbývá než dodat, že povlaky jsou nedílnou součástí nástrojů nejen u frézování, ale i u dalších konvenčních metod obrábění. Povlaky a povlakování je určitě směr, kterým by se nástrojárny měly ubírat.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 9788072047222.
- [2] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: ČVUT, 1998, 168 s. ISBN 8001018644.
- [3] STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. *Metal Cutting Theory and Practice*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016], XXI, 947 s. ISBN 9781466587533.
- [4] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění. 2. díl, Korozie, základy obrábění, výrobní postupy*. Brno: CERM, 2001, 176 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [5] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: Technologie obrábění - 1.část*. Brno, 2003.
- [6] ŘASA, Jaroslav, Vladimír GABRIEL a Přemysl POKORNÝ. *Strojírenská technologie 3.: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění. 2.* Praha, 2005. ISBN 8071833363.
- [7] ŘASA, Jaroslav, Václav HANĚK a Jindřich KAFKA. *Strojírenská technologie: Návrhy nástrojů, přípravků a měřidel : zásady montáže. 4.* Praha: Scientia, 2003, 505 s. ISBN 8071832847.
- [8] SHAW, Milton Clayton; COOKSON, J. O. *Metal Cutting Principles*. New York: Oxford university press, 2005.
- [9] *Planička TOOLS s.r.o* [online]. Dostupné z: <http://www.planickanastroje.cz/html/sortiment.html>.
- [10] KRÍŽ, Antonín. *Nové trendy vývoje tenkých vrstev vytvořených PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000, 985 s. ISBN 80-7082-668-1.
- [12] JONES, Anthony C. a Michael L. HITCHMAN. *Chemical Vapour Deposition - Precursors, Processes and Applications*. Royal Society of Chemistry, 2009. ISBN 978-0-85404-465-8. Retrieved from: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCVDPPA04/chemical-vapour-deposit>.
- [13] POLMEAR, Ian, David STJOHN, Jian-Feng NIE a Ma QIAN. *Light Alloys - Metallurgy of the Light Metals. 5.* Elsevier, 2017. ISBN 978-0-08-099431-4. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpLAMLME01/light-alloys-metallurgy/light-alloys-metallurgy>.
- [14] *Současnost a trendy povlakování technologií PVD*. MM Průmyslové spektrum, 2003. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>.
- [15] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [16] PŘIKRYL, Zdenek a Rosa MUSÍKOVÁ. *Teorie obrábění*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975, 234 s.
- [17] PROKOP, Jaroslav. *Rozvoj progresivních vysoce přesných strojírenských technologií*. Brno: Vysoké učení v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ústav strojírenské technologie, 2004. ISBN 80-214-2786-8.
- [18] *Katalog [online]*. Planička TOOLS S.R.O, 2018 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <http://www.planickanastroje.cz/web/viewer.html?file=%2F../files/katalog.pdf>.

- [19] *Základní nabídka povlaků SHM* [online]. SHM super hard materials, 2018 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: https://shm-cz.cz/wp-content/uploads/2018/09/nabidka_povlaku_2018.pdf.
- [20] *Jakosti materiálů* [online]. Nerezinox [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://nerezinox.cz/jakosti-materialu/>.
- [21] *Materiálové normy* [online]. NOVEL [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <http://www.novel.sk/materialove-normy/>.
- [22] *DMG MORI: DMU 50* [online]. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50-2nd-generation>, [Online].
- [23] *HAIMER* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.haimer.biz/products/presetting-technology/uno-series/uno-premium.html>, [Online].
- [24] *KISTLER: Data sheet, Type 9129AA* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/document/000-709e.pdf?callee=frontend>, [Online].
- [25] *KISTLER: Data sheet, Type 5167Ax1* [online]. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/document/003-278e.pdf?callee=frontend>, [Online].
- [26] *Sousledné a nesousledné frézování*. Kolmanl.info [online]. 26.01.2020 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: http://www.kolmanl.info/?show=SHOW_TXT&alias=F360_20190616142346.
- [27] BOLJANOVIC, Vukota. *Metal Shaping Processes - Casting and Molding; Particulate Processing; Deformation Processes; and Metal Removal*. Industrial Press, 2010. ISBN 978-0-8311-3380-1. Retrieved from: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMSPCMPP1/metal-shaping-processes/metal-shaping-processes>.
- [28] OBERG, Erik, Franklin D. JONES, Holbrook L. HORTON a Henry H. RYFFEL. *Machinery's Handbook*. 30. Industrial Press, 2016. ISBN 978-0-8311-3091-6. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMHE00024/machinerys-handbook-30th/machinerys-handbook-30>.
- [29] PIERSON, H.O. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD) - Principles, Technology and Applications*. 2. William Andrew Publishing/Noyes, 1999. ISBN 978-0-8155-1432-9. Retrieved from, <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHCVDCVD4/handbook-chemical-vapor/handbook-chemical-vapor> .
- [30] QIN, Yi. *Micro-Manufacturing Engineering and Technology*. Elsevier, 2010. ISBN 978-0-81-551545-6. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMMET0002/micro-manufacturing-engineering/micro-manufacturing-engineering>.
- [31] *Techportal* [online]. Techportal.cz [cit. 2021-03-23]..

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

v_c	[m/min]	Řezná rychlost
v_f	[m/min]	Rychlost posuvu
n	[min ⁻¹]	Otáčky na obrobku
a_e	[mm]	Šířka záběru
a_p	[mm]	Hloubka řezu
f_z	[mm]	Posuv na zub
T	[min]	Čas
h_i	[mm]	Tloušťka třísky
φ_i	[°]	Úhel posuvového pohybu
z		Počet zubů
TiC		Karbid titanu
TiCN		Titan Carbonitrid
TiN		Nitrid titanu
Al ₂ O ₃		Oxid hlinitý
SiC		Karbid křemíku
TiAlN		Titan aluminium nitrid
DCL		Diamond-like Carbon
TiCl ₄		Chlorid titaničitý
PVD		Fyzikální metoda povlakování
CVD		Chemická metoda povlakování
VB		Opotřebení na hřbetě
HV		Tvrдость podle Vickerse
F_c	[N]	Tangenciální složky řezné síly
F_f	[N]	Axiální složky řezné síly
F_p	[N]	Radiální složky řezné síly

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Záběr při sousledném frézování [26]	12
Obrázek 2 Záběr při nesousledném frézování [26].....	13
Obrázek 3 Čelní frézování symetrické [5]	14
Obrázek 4 Čelní frézování nesymetrické [5]	14
Obrázek 5 Okružní frézování a) vnější b) vnitřní [5]	14
Obrázek 6 Planetové frézování a) vnější b) vnitřní [5].....	15
Obrázek 7 Vodorovná konzolová frézka [5].....	17
Obrázek 8 Svislá konzolová frézka [5].....	18
Obrázek 9 Svislá stolová frézka [5]	19
Obrázek 10 Rovinná frézka [5].....	20
Obrázek 11 Typy fréz a) válcová fréza s přímými zuby b) válcová fréza se spirálovými zuby c) kotoučová fréza d) čelní válcová fréza e) kulová fréza [27]	22
Obrázek 12 Čelní fréza z rychlořezné oceli [28]	23
Obrázek 13 příklady povlakovaných nástrojů [9].....	26
Obrázek 14 Příklad struktury vrstvy CVD [29].....	27
Obrázek 15 Detail vrstvy TiAlN [30]	31
Obrázek 16 Časový rozvoj velikosti hřbetního opotřebení v závislosti na řezné rychlosti .	32
Obrázek 17 Rozměry a geometrie monolitních fréz [18]	38
Obrázek 18 Fréza s povlakem TripleCoating	38
Obrázek 19 Břit frézy s povlakem	39
Obrázek 20 Fréza s povlakem Alwin.....	39
Obrázek 21 Fotky břitu frézy s povlakem Alwin	40
Obrázek 22 Nepovlakovaná fréza	41
Obrázek 23 Břit nepovlakované frézy	41
Obrázek 24 Model polotovaru	43
Obrázek 25 Frézovací program polotovaru a) odběr na určitou šířku b) pro frézování drážky.....	43
Obrázek 26 Rozbitá fréza při frézování polotovaru.....	44
Obrázek 27 Upravený obrobek pro experiment.....	44
Obrázek 28 Chemické složení materiálu [31].....	45
Obrázek 29 Mechanické vlastnosti materiálu za výkyvu teplot [31].....	45
Obrázek 30 Fyzikální vlastnosti materiálu [31].....	45
Obrázek 31 Frézka DMU 50 [22]	46
Obrázek 32 Nastavovací zařízení HAIMER UNO 20/40.....	47

Obrázek 33 Dynamometr KISTLER 9129AA [24]	48
Obrázek 34 Kistler LabAmp 5167A [25]	49
Obrázek 37 Způsob upnutí obou obrobků	51
Obrázek 38 Schéma rozmístění přístrojů po čas experimentu.....	52
Obrázek 39 Fotografie řezného nástroje před experimentem.....	52
Obrázek 40 Frézovací program G55.....	54
Obrázek 41 Program G54	55
Obrázek 42 Fréza s povlakem TripleCoating Cr	59
Obrázek 43 Graf kvadratického průměru sil.....	60
Obrázek 44 Graf průběhu síly F_x	60
Obrázek 45 Graf průběhu síly F_y	61
Obrázek 46 Graf průběhu síly F_z	61
Obrázek 47 Břit frézy s povlakem Alwin	63
Obrázek 48 Graf kvadratického průměru sil.....	64
Obrázek 49 Graf průběhu síly F_x	64
Obrázek 50 Graf průběhu síly F_y	65
Obrázek 51 Graf průběhu síly F_z	65
Obrázek 52 Břit frézy bez povlaku	67
Obrázek 53 Graf kvadratického průměru sil.....	68
Obrázek 54 Graf průběhu síly F_x	69
Obrázek 55 Graf průběhu síly F_y	69
Obrázek 56 Graf průběhu síly F_z	70
Obrázek 57 Kvadratický průměr sil F_x všech fréz	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Srovnání jednotlivých typů povlaků [14]	31
Tabulka 2 Reálné poloměry frézy	39
Tabulka 3 Reálné rozměry frézy s povlakem Alwin	40
Tabulka 4 Reálné rozměry frézy bez povlaku	42
Tabulka 5 Řezné podmínky programu G55	53
Tabulka 6 Řezné parametry programu G54	55
Tabulka 7 Naměřené hodnoty pro frézu s povlakem TripleCoating Cr	56
Tabulka 8 Naměřené hodnoty pro frézu s povlakem Alwin	57
Tabulka 9 Naměřené hodnoty pro frézu bez povlaku	58
Tabulka 10 Parametry frézy před jednotlivými měřeními	62
Tabulka 11 Parametry frézy před jednotlivými měřeními	66
Tabulka 12 Parametry frézy před jednotlivými měřeními	70

