

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Porovnání metod frézování drážek

Bakalářská práce

Jan Jindra

2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jindra** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **466580**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Porovnání metod frézování drážek

Název bakalářské práce anglicky:

Slot milling methods evaluation

Pokyny pro vypracování:

Drážka je jedním ze základních technologických prvků, který je možné vyrábět několika různými způsoby a různými nástroji. Dosahované parametry však nejsou stejné. Práce se zabývá jejich rozříděním, hodnocením a bude zahrnovat i praktické obrábění.

- 1) Rešerše na téma obrábění drážek
- 2) Rozbor možností obrábění a hodnocení parametrů - čas obrábění, silové zatížení, kvalita povrchu, doba programování apod.
- 3) Návrh testovacího tělesa a příprava drah pro obrábění
- 4) Hodnocení metod dle zvolených kritérií

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

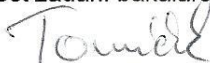
Ing. Jan Tomíček, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

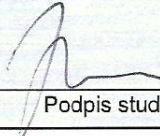

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem všechny zdroje uvedl v příloženém seznamu použité literatury.

Dále prohlašuji, že nemám žádný závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Janu Tomíčkoví, Ph.D. za vlídný přístup při konzultacích a za odborné vedení při zpracování mé bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval svému otci Tomáši Jindroví za poskytnutí polotovaru zkušebního tělesa a za řezné nástroje nezbytné pro uskutečnění experimentální části práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor:	Jan Jindra
Fakulta a ústav:	Fakulta strojní ČVUT, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie (ú12134)
Název práce:	Porovnání metod frézování drážek
Vedoucí práce:	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
Rozsah práce:	57
Rok:	2019
Klíčová slova:	Frézování, metody frézování drážek, rychlost a kvalita frézování, tvorba drah nástroje
Anotace:	Tato bakalářská práce obecně popisuje frézování drážek. Řeší problematiku řezných sil během frézování, kvalitu a rychlost tvorby drážek. Dále popisuje měření sil a drsnosti povrchu po obrábění. Pro praktickou část byl navržen a proveden experiment frézování drážek třemi různými metodami, na kterých byly měřeny časy obrábění, drsnosti povrchů a řezné síly při obrábění.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JINDRA, J. *Porovnání metod frézování drážek*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2019. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

SUMMARY OF BACHELOR THESIS

Author:	Jan Jindra
Faculty and department:	Faculty of mechanical Engineering department of Machining, Process Planning and Metrology
Title:	Slot milling methods evaluation
Supervisor:	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
Number of pages:	57
Year:	2019
Key words:	Milling, groove milling methods, speed and quality of milling, toolpath creation
Abstract:	This bachelor thesis focuses on groove milling. It deals with the matter of cutting forces during milling, surface roughness and speed of groove formation. It also describes the measurement of cutting forces and surface roughness of machined grooves. In the practical part, the experiment of groove milling was designed and performed using three different machining methods, while measuring machining time, surface roughness and cutting forces.

Obsah

1 Seznam zkratek	9
2 Úvod.....	10
3 Frézování	11
3.1 Frézování drážek	11
3.2 Frézy.....	12
3.3 Sousedné a nesousedné frézování	13
3.3.1 Úvod	13
3.3.2 Sousedné frézování.....	14
3.3.3 Nesousedné frézování.....	15
3.4 Symetrické a nesymetrické frézování	16
4 Utváření třísek.....	16
4.1 Fáze záběru nástroje	17
4.2 Úhel nastavení	18
4.2.1 Frézování s úhlem nastavení 90°	18
5 Řezné síly a řezné podmínky	20
6 Měření drsnosti	21
6.1 Profil povrchu.....	21
6.2 Hodnoty parametrů drsnosti	23
6.3 Metody měření drsnosti povrchu	25
6.4 Měřicí přístroje.....	25
6.5 Vyhodnocení měření drsnosti	26
7 CNC stroje a programování CNC strojů.....	27
7.1 CAD/CAM systémy	27
8 Experimentální část.....	28
8.1 Předpoklady.....	28
8.2 Návrh drážky	29
8.3 Návrh zkušebního tělesa	29
8.4 Technologické podmínky.....	30
8.4.1 Materiál obrobku	31
8.4.2 Řezný nástroj	32
8.4.3 Obráběcí stroj	33
8.4.4 Tvorba drah nástroje.....	34

8.4.5 Obrábění	35
8.4.6 Měření řezných sil	39
8.4.7 Měření drsnosti povrchu	40
8.5 Výsledky měření řezných sil	40
8.5.1 Konvenční frézování	41
8.5.2 Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu	42
8.5.3 Trochoidální frézování	44
8.6 Výsledky měření strojních časů	46
8.7 Výsledky měření jakosti povrchů.....	46
8.8 Opotřebenění řezných nástrojů	48
9 Závěr	51
10 Seznam použitých zdrojů.....	52
11 Seznam obrázků a tabulek	55
11.1 Tabulky	55
11.2 Obrázky	55
12 Příloha.....	57

1 Seznam zkratek

CNC	Computer numerical control (počítačem řízené)
NC	Numerical control (číslicově řízené)
CAD	Computer aided design (počítačová podpora konstruování)
CAM	Computer aided Manufacturing (počítačová podpora výroby)
ČSN	česká státní norma
EN	evropská norma
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci
RO	rychlořezné oceli
SK	slinuté karbidy
KNB	kubický nitrid bóru
PKD	polykrystalický diamant
CVD	chemical vapour deposition (chemická metoda depozice vrstev)
PVD	physical vapour deposition (nanášení odpařením z pevné fáze)
VBD	vyměnitelné břitové destičky
KAPR	úhel nastavení břitové destičky
a_e/CD	poměr záběru frézy
+N	normalizační žíhání
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rq	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
Rsk	šikmost posuzovaného profilu
Rku	špičatost posuzovaného profilu
Rp	největší výška výstupku profilu
Rv	největší hloubka prohlubně profilu
Rz	největší výška profilu
IT	stupeň přesnosti
v_f	rychlost posuvu [m/min]
v_c	řezná rychlost [m/min]
a_p	hloubka řezu [mm]
a_e	šířka řezu [mm]
s	otáčky [1/min]
h_{ex}	tloušťka třísky [mm]
f_z	posuv na zub [mm]
l_r	vyhodnocovaná délka [mm]
M_z	kroučící moment [Nm]
F_x, F_y, F_z	zatížení [N]
X, Y, Z	souřadnice [N]

2 Úvod

V současnosti se v moderním průmyslu klade stále větší důraz na používání co nejefektivnějších, nejlevnějších a nejpresnějších metod obrábění. Velký rozmach v těchto oblastech zaznamenal průmysl s příchodem CAD/CAM systémů a CNC a NC strojních center. Ty nám umožňují tvorbu náročnějších drah nástroje spolu s lepší výslednou kvalitou povrchu. Možnost vytvořit co nejideálnější tvar dráhy nástroje s sebou přináší i lepší strojní časy a menší opotřebení nástroje. Naopak kladou větší důraz na kvalitu obsluhy a vyžadují delší čas na programování stroje.

Volba správné strategie obrábění je tedy jedním z hlavních úkonů, které by měl správný technolog zvládat a je tedy nutné, aby měl představu o ekonomičnosti různých metod frézování.

Cílem této práce je tedy porovnání tří metod frézování drážek z hlediska strojního času, řezných sil a kvality obrobeneho povrchu. Jedná se o konvenční frézování jednou z plna, konvenční frézování jednou z plna a cyklickým dokončením po obvodu stěny a poslední metoda je trochoidální frézování.

3 Frézování

Frézování je druhá nejvíce rozšířená metoda obrábění, především pro výrobu rovinných a tvarových ploch, drážek, závitů, ozubení apod. Velkou předností frézování je poměrně velká výkonnost při velmi dobré kvalitě obrábění. Hlavní pohyb rotační vykonává vícebřitý nástroj (fréza), vedlejší pohyby obrobek a u některých strojů (frézek) vřeteník. Vedlejším pohybem obrobku se rozumí přímočarý pohyb, který je u moderních strojů plynule měnitelný a může se realizovat ve více směrech zároveň (víceosá obráběcí centra). Frézovat můžeme obvodem nástroje sousledně, nesousledně nebo čelem nástroje, popřípadě kombinací těchto pohybů. Mezi další dělení způsobů frézování může patřit například frézování okružní (vnější a vnitřní) a planetové (vnější a vnitřní). Řezný proces je přerušovaný, protože se nástroj skládá z několika břitů, které odřezávají krátké třísky většinou proměnlivé tloušťky. [1; 2]

3.1 Frézování drážek

Frézování drážek je operace, která se dá zhotovit buďto kotoučovou frézou, která je častěji upřednostňována nebo frézou stopkovou. Drážky mohou být krátké nebo dlouhé, uzavřené nebo otevřené, lineární nebo nelineární, hluboké nebo mělké, široké či úzké. Při výběru nástroje se zaměřujeme zejména na šířku a hloubku drážky a do určité míry i na délku drážky. Dále o výběru nástroje rozhoduje typ stroje, který je k dispozici a také četnost prováděné operace. Nejúčinnější způsob frézování velkého množství dlouhých hlubokých drážek je použití kotoučových fréz, zejména za využití horizontálních frézek. Avšak to, že narůstá počet vertikálních frézek a obráběcích center, znamená, že se pro řadu různých operací při frézování drážek stále častěji používají stopkové frézy nebo frézy s dlouhými břity. [6]

Frézování kotoučovými frézami

Výhody:

- Otevřené a hluboké drážky,
- nastavitelná šířka drážky/ tolerance,
- frézování složeným nástrojem,
- lepší dělení materiálu,
- široký sortiment produktů pro různé šířky a hloubky drážek. [6]

Frézování stopkovými frézami

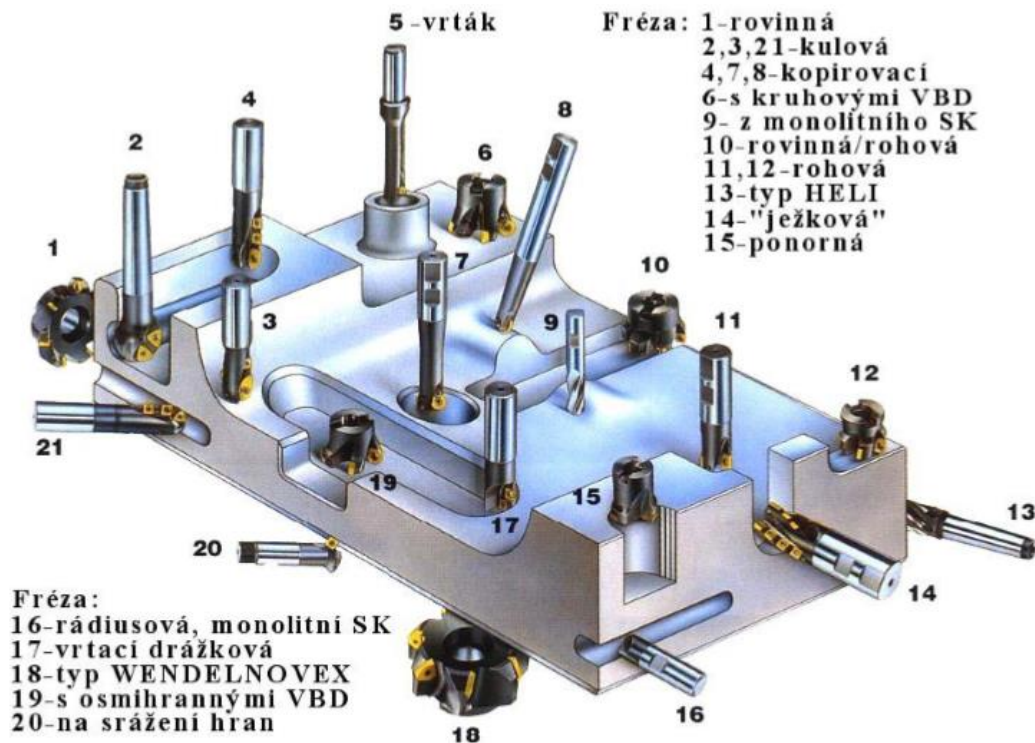
Výhody:

- Uzavřené a mělké drážky,
- nelineární drážky,
- univerzálnost – Trochoidální frézování drážek v těžce obrobitelných materiálech, ponorné frézování, jednodušší zařazení zvláštních polodokončovacích a dokončovacích operací, využití stopkových fréz pro jiné operace, než je tvorba drážek. [6]

3.2 Frézy

V této kapitole budeme popisovat rozdělení fréz podle ostatních parametrů, které ovlivňují vlastnosti nástroje:

- Podle druhu materiálu se rozlišují frézy z rychlořezné oceli (RO), slinutých karbidů (SK), cermetů, řezné keramiky, kubického nitridu boru (KNB) a polykrystalického diamantu (PKD). [1]
- Podle způsobu výroby zubů se dělí na frézy se zuby frézovanými nebo podsoustruženými. [1]
- Podle směru zubů vzhledem k ose rotace dělíme frézy se zuby přímými a se zuby ve šroubovici, pravé nebo levé. Výhodou šroubovitého rozmístění zubů je klidnější a plynulý řezný proces. [1]
- Podle počtu zubů vzhledem k ose existují frézy jemnozubé, polohrubozubé a hrubozubé. Pro zajištění klidného chodu obrábění má být počet zubů takový, aby se v záběru nacházely minimálně dva zuby. [1]
- Podle konstrukčního uspořádání máme frézy celistvé (zuby a tělo nástroje jsou vyrobeny ze stejného materiálu), s vyloženými zuby a frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami, které jsou mechanicky upevněny v těle frézy. [1]
- Podle geometrického tvaru funkční části se dělí na válcové, kotoučové, úhlové, drážkovací, kopírovací, radiusové, na výrobu ozubení atd. [1]
- Podle způsobu upnutí fréz ve stroji je rozdělujeme na nástrčné (upínání do centrálního otvoru) a stopkové (upínání za válcovou nebo kuželovou stopku). [1]
- Podle smyslu otáčení z pohledu od vřetena frézky existují pravořezné a levořezné frézy. [1]



Obrázek 1: Přehled frézovacích nástrojů [1]

3.3 Sousedné a nesousedné frézování

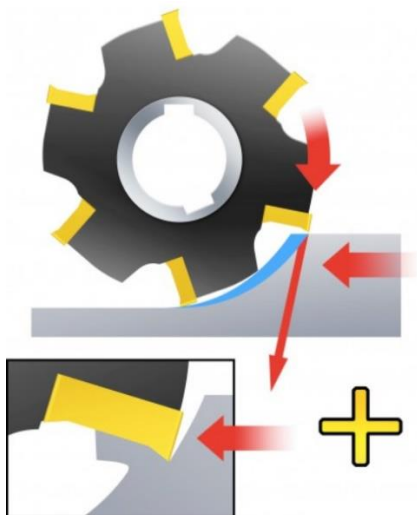
3.3.1 Úvod

Vždy, když břit nástroje vstupuje do záběru, je vystaven rázovému namáhání. Je naprosto nezbytné nezapomínat na správný typ kontaktu mezi obráběným materiálem a ostřím ve chvíli zahájení a ukončení řezu. Obrobek se nám buď posouvá ve směru nebo v protisměru otáčení frézy, a to má vliv na zahájení a ukončení záběru břitu a zároveň tím rozdělujeme frézování na sousledné a nesousledné.

Zlaté pravidlo frézování nám říká – od největší tloušťky třísky k nejmenší. Pro stabilitu obráběcího procesu je nutné volit, jaké třísky se budou tvořit. Je třeba vždy usilovat o to, aby tloušťka třísek na vstupu byla větší a na výstupu ze záběru malá. [3]

3.3.2 Sousedné frézování

Při sousledném neboli sousměrném frézování se nám obrobek posouvá shodně se směrem obráběcího nástroje. Pokud nám to dovoluje obráběcí stroj, upínací přípravek a samotný obrobek, je dobré vždy preferovat sousledné frézování oproti nesouslednému. Tloušťka třísky se nám od zahájení řezu snižuje až nakonec dosáhne nulové hodnoty. Břit je tedy chráněn před odíráním o obráběný materiál ještě před zahájením řezu. Velká tloušťka třísky je příznivá a řezné síly působí tak, že přitahují obrobek směrem k fréze a udržují břit v řezu. Stroj však musí umožňovat kompenzaci vůle pohybového šroubu stolu, která eliminuje vznik zpětných pohybů. Při vtahování nástroje do obrobku může dojít ke tvorbě nepřiměřeně velké tloušťky třísky, kvůli které může dojít až k lomu břitu. [3]



Obrázek 2: Sousedné frézování [3]

Výhody sousledného frézování:

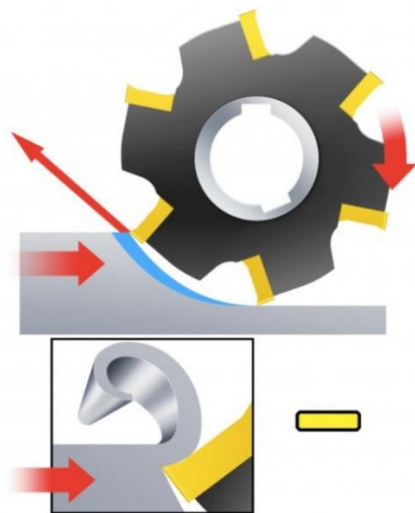
- Vyšší trvanlivost nástrojů,
- použití vyšších řezných rychlostí a posuvů,
- potřebný nižší řezný výkon pro obrábění,
- jednodušší upínání (obrobek je přitlačován nástrojem ke stolu),
- menší pravděpodobnost vzniku kmitání,
- obrobená plocha dosahuje vyšší jakosti. [1, str.22]

Nevýhody sousledného frézování:

- Nevhodné pro obrábění polotovarů s tvrdým a znečištěným povrchem,
- silová zátěž zubů. [1, str.22]

3.3.3 Nesousledné frézování

Při nesousledném neboli nesousměrném frézování se nám obrobek posouvá proti směru otáčení obráběcího nástroje. Řezné síly mají tendenci tlačit frézu a obrobek směrem od sebe a radiální síly zvedají obrobek od stolu. Tloušťka třísky nám začíná na nulové hodnotě a směrem ke konci řezu se postupně zvyšuje. Při vstupu do řezu působí na břit značně velké síly, což způsobuje obrušování a odírání v důsledku tření, prudkého zvýšení teplot a kontaktu s mechanicky zpevněným povrchem, který je vytvářen předchozím břitem. Velká tloušťka třísky a vyšší teploty na výstupu řezu mají za následek vznik velkých tahových pnutí a může zde docházet k ulpívání nebo navařování třísek na břit. Tyto částičky navařených třísek jsou na břitu do dalšího záběru, kdy se buď oddělí od břitu nebo způsobí jeho okamžité vylomení. To vše má nepříznivý vliv na trvanlivost našeho nástroje. [3]



Obrázek 3: Nesousledné frézování [3]

Výhody nesousledného frézování

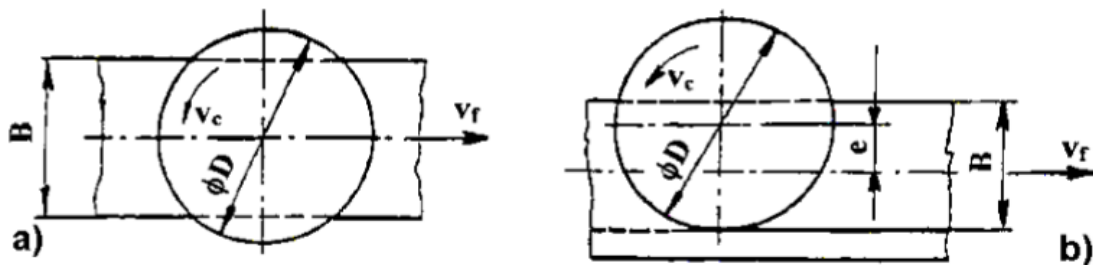
- Menší opotřebení stroje (šroubu a matice),
- počáteční záběr nástroje nezávisí na hloubce řezu,
- na trvanlivost nástroje nemá až tak významný vliv povrch obrobku. [1, str.22]

Nevýhody nesousledného frézování:

- Zhoršená jakost obrobeneé plochy,
- směr síly frézování s ohledem na upnutí. [1, str.22]

3.4 Symetrické a nesymetrické frézování

U čelního frézování, kde se břity na nástroji nachází na obvodu i na čele nástroje, rozlišujeme symetrické a nesymetrické frézování, a to vzhledem k poloze osy nástroje a osy obrobku. Z obrázku 4. je patrné, že při čelním frézování probíhá sousledné a nesousledné frézování současně. [1, str.23]



Obrázek 4: Symetrické a nesymetrické frézování [1]

4 Utváření třísek

Dráha nástroje a tvorba třísek jsou při frézování velmi důležité faktory, které ovlivňují životnost nástroje, zejména pak jeho řeznou hranu, řezné síly, teplotu při frézování a odvod třísek. Tloušťka třísky je definována jako tloušťka nedeformované třísky měřená kolmo k zabírajícímu ostří. Velké tloušťky třísek mají za následek vylomení ostří kvůli velkému zatížení. Naopak malé tloušťky třísek rapidně snižují životnost nástroje, protože vzniká velké tření doprovázené vysokým nárůstem tepla. Vhodné nastavení třísky je tedy pro frézování naprosto zásadní. [4;5]

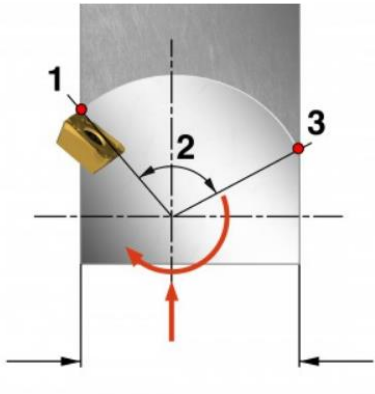
Avšak i za užití určitého posuvu na zub se nám tloušťka třísky neustále mění. To má za následek, že nastavení posuvu a tím i správné tloušťky třísky, je pro různé případy velmi rozdílné. Řešení tohoto problému nám nabízí střední tloušťka třísky, kterou lze definovat jako tloušťku teoretické třísky obdélníkového průřezu, jejíž objem je stejný jako objem materiálu skutečné třísky za stejné řezné síly. [4]

V provozu nás ale zajímá, jakou rychlost posuvu (v_f) zvolit pro frézovací nástroj. Rychlost posuvu je posuv na zub vynásobený počtem efektivních zubů a počtem otáček

nástroje za časovou jednotku. Z technologického hlediska musí fréza dobře odebírat materiál se správnou střední tloušťkou třísky, z čehož vyplývá rychlost posuvu jako veličina, podle níž posléze programujeme samotný stroj. [4]

4.1 Fáze záběru nástroje

V radiálním směru dochází k přerušování záběrů jednotlivých břitů do materiálu obrobku. Každý záběr se skládá ze tří fází, které je třeba posoudit. [5]

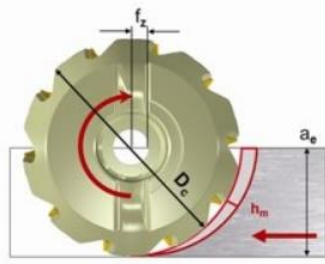


Obrázek 5: Fáze záběru nástroje [5]

Vstup do záběru je za použití slinutých karbidů nejméně choulostivým úsekem ze všech tří fází. Karbidy dobře snášejí účinky sdružených napětí vznikajících v důsledku rázů při vniknutí nástroje do materiálu. [5]

Výstup ze záběru je naopak nejchoulostivějším úsekem. Při frézování se vždy musíme snažit, aby při výstupu ze záběru docházelo k tvorbě co nejtenčích třísek. Při použití karbidových břitových destiček, často v důsledku velké tloušťky třísky na výstupu z řezu, dochází k prudkému poklesu životnosti nástroje. Na konci záběru tříska ztrácí oporu a pokouší se ohnout, karbidový břit je tak namáhaný tahovými silami a může dojít k jeho lomu. [5]

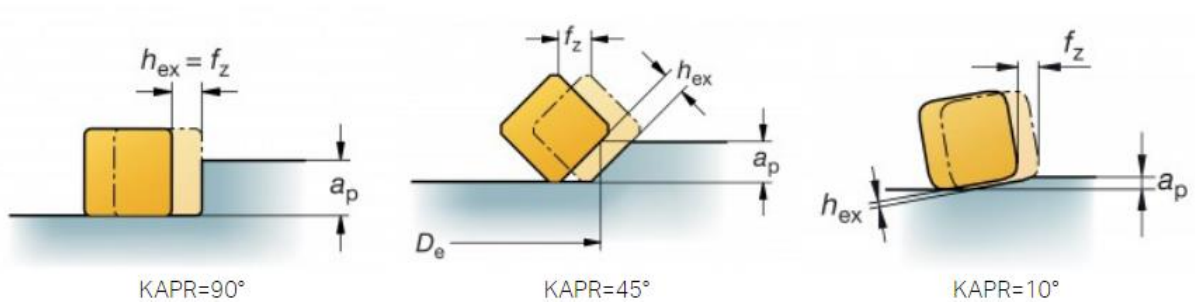
Oblouk záběru břitu. Největší možný oblouk záběru břitu je 180° a to při frézování drážky do plného materiálu. Naopak nejmenší oblouk záběru se vyskytuje u dokončovacího frézování. V závislosti na procentuálním podílu šířky záběru a_e/DC se kladou rozdílné nároky na třídu VBD. Při velkém oblouku záběru přestupuje do břitu větší množství tepla, proto používáme destičky s CVD povlakem, které mají nejúčinnější ochranu před účinky tepla. Pro menší oblouky záběru naopak používáme destičky s PVD povlakem, které disponují ostřejšími břity, a tak vznikají menší řezné síly a menší množství tepla. [5]



Obrázek 6: Radiální hloubka řezu — průměr nástroje (poměr a_e/DC) [4]

4.2 Úhel nastavení

Úhel nastavení (KAPR) je úhel, který se nachází mezi hlavním (primárním) ostřím a povrchem obrobku. Na úhlu nastavení posléze závisí tloušťka třísky, velikost řezných sil a životnost nástroje. Mezi nejčastěji používanými úhly nastavení jsou úhly 90° , 45° , 10° a pak takové, které vyplývají z použití kruhových břitových destiček. Při použití přímého břitu a zmenšení úhlu nastavení dojde k zmenšení tloušťky třísky h_{ex} při stejném posuvu na zub f_z . Toto zmenšení tloušťky třísky má příznivý vliv na rozložení celkových účinků odřezávaného materiálu na větší délku břitu. Další výhody zmenšení úhlu nastavení jsou plynulejší zahájení řezu, menší radiální tlak, a tak dochází k větší ochraně ostří. Naopak nám ale roste axiální síla, která zvyšuje tlak na obrobek. [7]



Obrázek 7: Úhel nastavení ostří [7]

Ve vlastní praktické části budeme používat úhel nastavení 90° .

4.2.1 Frézování s úhlem nastavení 90°

Hlavní oblastí použití fréz s úhlem nastavení 90° představuje rohové frézování. Jak již bylo uvedeno, při použití tohoto úhlu vznikají převážně radiální síly působící ve směru posuvu. To znamená, že obrobek není vystaven vysokému axiálnímu tlaku, což je výhodné pro obrábění tenkostěnných nebo málo tuhých součástí a v případě nestabilního

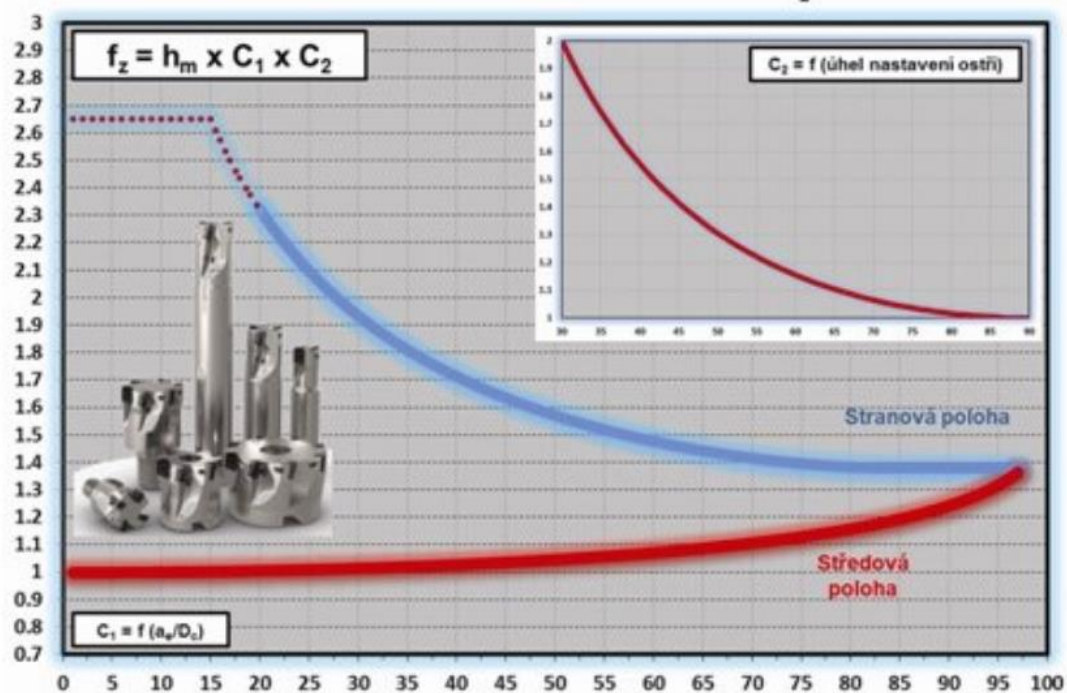
upnutí. Maximální tloušťka třísky se nám v tomto případě rovná posuvu na zub. Pokud chceme zmenšit úhel nastavení, a přitom zanechat stejnou tloušťku třísky, musíme zvýšit posuv na zub. [7]

Výpočet tloušťky třísky nám uvádí vzorec:

$$h_{ex} = f_z * \sin KAPR \quad (1)$$

Tabulka 1: Určení posuvu z poměru (a_e/DC) [4]

ae/DC(%)	fz=hex (posuv na zub=střední tloušťka třísky)												Faktor rychlosti
	0,03	0,04	0,08	0,1	0,15	0,2	0,25	0,4	0,5	0,6	0,8	1	
	Šířka řezu až do DC/2												
2					0,02	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07	0,08	0,11	1,8
3				0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09	0,1	0,14	1,7
5			0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,18	1,6
10		0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12	0,16	0,19	0,25	1,5
15	0,011	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,09	0,11	0,15	0,19	0,23	0,3	1,4
20	0,013	0,03	0,03	0,04	0,06	0,09	0,11	0,13	0,17	0,22	0,26		1,35
30	0,016	0,03	0,04	0,05	0,08	0,1	0,13	0,16	0,21	0,26	0,31		1,3
40	0,018	0,04	0,05	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,23	0,29			1,25
50	0,02	0,04	0,05	0,06	0,1	0,13	0,16	0,19	0,25	0,32			1,2
	Plný záběr (Šířka řezu=DC)												
100	0,02	0,04	0,05	0,06	0,1	0,13	0,16	0,19	0,25	0,32			1



Obrázek 8: Střední tloušťka třísky [4]

5 Řezné síly a řezné podmínky

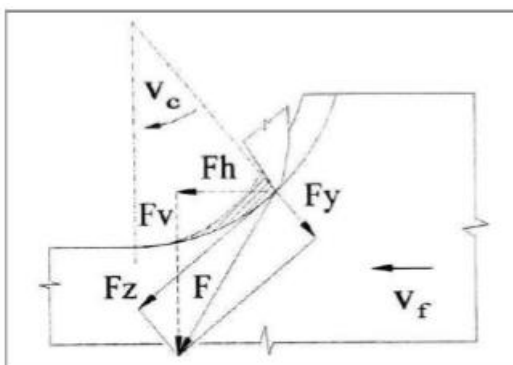
Velký vliv na jakost má opotřebení břitu nástroje, které se projeví v silových poměrech obrábění. Při zvýšení řezných sil roste potřebný výkon vřetene. Opotřebovaný nástroj má pak za následek výrobu nekvalitních výrobků. S řeznými silami úzce souvisí řezné podmínky, jejichž správná volba je základem pro kvalitně obrobený povrch obrobku. Při frézování závisí volba ideálních řezných podmínek na obrobitelnosti materiálu a řezivosti materiálu, ze kterého je vyroben nástroj. Dále ve značné míře závisí na druhu nástroje, na řezném prostředí a na způsobu frézování. Kromě těchto podmínek je často nutné korigovat řezné podmínky se zřetelem na tuhost obrobku a také při vzniku chvění soustavy stroj-nástroj-obrobek. Řezné parametry (řezná rychlost, posuv na zub, hloubka řezu) nám pro určitý nástroj a konkrétní materiál ve většině případů udává výrobce. Nesprávná volba těchto parametrů má v lepším případě za následek nevyužití parametrů stroje a v horších případech destrukci nástroje nebo znehodnocení povrchu obrobku. [8]

Výpočet řezné síly závisí na průřezu třísky, proto je možné řeznou sílu korigovat zvětšením, či zmenšením průřezu třísky.

$$F_z = h * b * k_t * p \quad (2)$$

Kroutící moment se posléze vypočítá z obvodové řezné síly a poloviny průměru frézy

$$M_k = F_z * \frac{D}{2} \quad (3)$$



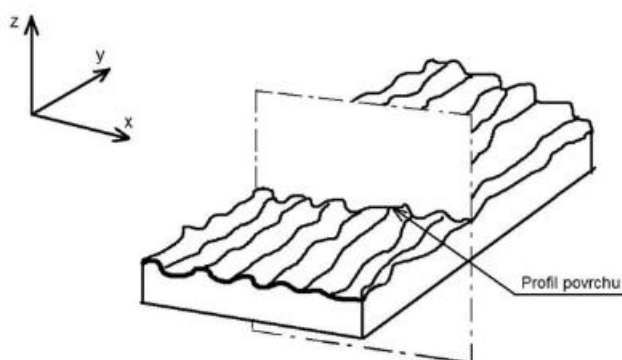
Obrázek 9: Řezné síly [8]

6 Měření drsnosti

V technické praxi je tento pojem nezastupitelný, avšak vyhodnocování bývá často redukováno pouze na nalezení parametrů Ra nebo Rz. Základní definice podle ČSN EN ISO 4287 (popis termínů, definic a parametrů povrchu) udává, že drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Na povrchu můžeme nalézt mikronerovnosti, což jsou stopy, které nám na obrobku zanechal řezný nástroj (drsnost povrchu). Dále pak makronerovnosti, za které můžou vibrace soustavy a jsou nazývány vlnitostí povrchu. U obrobených ploch se nám tyto nerovnosti překrývají a je nutné, je od sebe odlišit. [9]

6.1 Profil povrchu

Profil povrchu získáme jako průsečnici nerovností skutečného povrchu s rovinou vedenou kolmo k tomuto povrchu a je základním zdrojem pro posuzování drsnosti povrchu. [9]



Obrázek 10: Profil povrchu [9]

Parametry profilu povrchu

Základní rozdělení těchto parametrů je do tří skupin, a to na parametry výškové, délkové a hybridní. V praxi jsou nejpoužívanější parametry výškové, které budou i pro naše porovnávání nejdůležitější. [9]

- R-parametr získaný výpočtem z profilu drsnosti,
- W-parametr získaný výpočtem z profilu vlnitosti,
- P-parametr získaný výpočtem ze základního profilu. [9]

Výškové parametry profilu povrchu

Dle normy ČSN EN ISO 25178-2 je definováno celkem sedm výškových parametrů, které vznikly překladem z evropské normy EN ISO 25178-2:2012. [10]

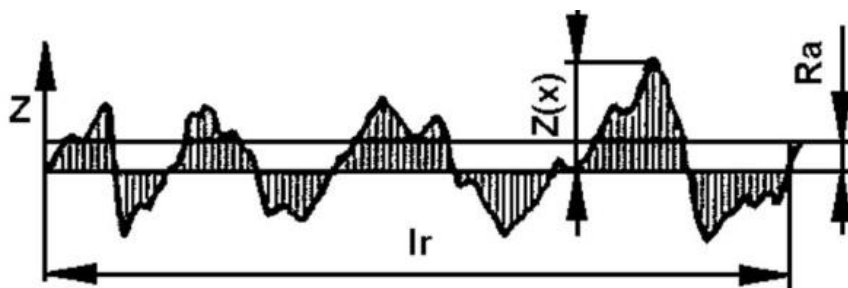
- Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a (ČSN EN ISO 4287, čl.4.2.1),
- průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu R_q (ČSN EN ISO 4287, čl.4.2.2),
- šikmost posuzovaného profilu R_{sk} (ČSN EN ISO 4287, čl.4.2.3),
- špičatost posuzovaného profilu R_{ku} (ČSN EN ISO 4287, čl.4.2.4),
- největší výška výstupku profilu R_p (ČSN EN ISO 4287, čl.4.1.1),
- největší hloubka prohlubně profilu R_v (ČSN EN ISO 4287, čl.4.1.2),
- největší výška profilu R_z (ČSN EN ISO 4287, čl.4.1.3). [10]

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a

Průměrná aritmetická úchylka je definována jako průměrná hodnota drsnosti na základní délce, které byl potlačen vliv výrazných a netypických výstupků nebo prohlubní. Je doporučeno provádět toto měření na pěti po sobě jdoucích základních délkách a následně ze získaných dat stanovit aritmetický průměr. [11]

Měření by mělo proběhnout v kolmém směru na stopy po obrábění. R_a nám nedává žádné údaje o tvaru nerovností povrchu. Dokonce stejné hodnoty R_a pro dva měřené díly nedávají jistotu, že se oba díly neliší tvarem, dokonce i maximální výškou mezi výstupky a prohlubněmi. [11]

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (4)$$



Obrázek 11: Parametr Ra [11]

6.2 Hodnoty parametrů drsnosti

Na výkresech součástí se nejčastěji setkáme s předepisováním hodnoty drsnosti Ra. Dle níže uvedené tabulky se dozvídáme, že je to číslo udávající drsnost povrchu v mikrometrech[μm]. Předepsaná čísla udávají nejvýše dovolenou drsnost povrchu příslušné plochy. [12]

Tabulka 2: Základní řada parametrů drsnosti

Střední aritmetická úchylka R_a [μm]		Výška nerovností R_z [μm]		Střední aritmetická úchylka R_a [μm]		Výška nerovností R_z [μm]	
Základní řada	Praktická řada	Základní řada	Praktická řada	Základní řada	praktická řada	Základní řada	Praktická řada
0,008		0,032		1,00		4,0	
0,010		0,040		1,25		5,0	
0,012	0,012	0,050	0,050	1,60	1,6	6,3	6,3
0,016		0,063		2,0		8,0	
0,020		0,080		2,5		10,0	
0,025	0,025	0,100	0,1	3,2	3,2	12,5	12,5
0,032		0,125		4,0		16	
0,040		0,160		5,0		20	
0,050	0,05	0,20	0,20	6,3	6,3	25	25
0,063		0,25		8,0		32	
0,080		0,32		10,0		40	
0,100	0,1	0,40	0,4	12,5	12,5	50	60
0,125		0,50		16		63	
0,160		0,63		20		80	
0,20	0,2	0,80	0,8	25	25	100	100
0,25		1,00		32		125	
0,32		1,25		40		160	
0,40	0,4	1,60	1,6	50	50	200	200
0,50		2,0		63		250	
0,63		2,5		80		320	
0,80	0,8	3,2	3,2	100	100	400	400

Při volbě stupně drsnosti se zamýšlíme nad funkcí obrobenej plochy a nad závislostí na tvarové a rozměrové toleranci. Stupeň drsnosti tedy závisí na tom, zda se jedná o plochy dosedající na sebe ve spojení posuvném, pevném, otáčivém nebo jsou-li to plochy se speciálními požadavky (např. na těsnost) nebo plochy volné. [12]

Tabulka 3: Vztah mezi Ra a stupněm lícování

Rozsah rozměrů (mm)	Stupeň přesnosti							
	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT 10	IT 11	IT 12
	Drsnost R _a [μm]							
1-3	0,2	0,4	0,4	0,8	1,6	3,2	3,2	6,3
3-6	0,2	0,4	0,8	0,8	1,6	3,2	6,3	6,3
6-10	0,4	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5
10-18	0,4	0,8	0,8	1,6	3,2	3,2	6,3	12,5
18-30	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	6,3	12,5
30-50	0,8	0,8	1,6	3,2	3,2	6,3	12,5	12,5
50-80	0,8	1,6	1,6	3,2	3,2	6,3	12,5	12,5
80-120	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	6,3	12,5	25
120-180	1,6	1,6	3,2	3,2	6,3	12,5	12,5	25
180-250	1,6	1,6	3,2	3,2	6,3	12,5	12,5	25

Pro nás jsou informativně nejužitečnější, z hlediska dosahované drsnosti povrchu, následující tabulky.

Tabulka 4: Optimální drsnost povrchu se zřetelem na stupeň lícování

Způsob obrábění	Stupeň přesnosti IT								
	4	5	6	7	S	9	10	11	12
Frézování čelní a vřlcovou frézou					(1,6)	(3,2)	3,2	3,2	6,3
Frézování drážek					(1,6)	3,2	6,3	12,5	
V závorkách uvedených stupňů drsnosti pro příslušné stupně přesnosti lze dosáhnout jen za zvláštních podmínek									

Tabulka 5: Drsnost povrchu z hlediska způsobu obrábění

Obrábění		Drsnost povrchu	
Druh	Způsob	R_a	$[\mu\text{m}]$
Frézování	čelní jemné	3,2	(1,6)
	čelní velmi jemné	1.6	
	válcovou frézou — jemné	3,2	(1,6)
Stupně drsnosti uvedené v závorkách lze dosáhnout jen za zvlášť příznivých podmínek obrábění			

6.3 Metody měření drsnosti povrchu

Při měření drsnosti povrchu rozeznáváme dvě základní metody a těmi jsou metody kvalitativní a metody kvantitativní.

Metoda kvalitativní je poměrně zastaralá metoda, založená na individuálních schopnostech pracovníka, který posuzuje daný povrch. Metoda je založená na porovnávání vzorkovnice s reálným povrchem, k čemuž slouží dodnes používané vzorkovnice povrchů, či moderní komparační mikroskopy. [9]

Metody kvantitativní neboli parametrické využívají k vyhodnocení drsnosti matematický popis parametrů povrchu. Měřicí přístroj se nazývá profilometr, který bývá v podnikové mluvě často označován jako drsnoměr, což není zcela správně. Tyto přístroje dokáží mimo drsnost měřit i vlnitost, mnohdy i tvar. [9]

6.4 Měřicí přístroje

Měřicí přístroje kontaktní využívají speciálně upravený hrot, který snímá souřadnice vyhodnocovaného povrchu a ty jsou posléze počítačově zpracovány. Jedná se o jednu z nejstarších metod hodnocení povrchu, která se využívá od 20. let minulého století. Kontaktní přístroj se skládá z části mechanické a elektronické. [9]

- **Mechanická** část se skládá ze stolku, na kterém je umístěný snímaný vzorek a ramena se snímacím hrotem. Hrot se pohybuje konstantní rychlostí po povrchu vzorku a snímá jeho nerovnosti. Pohyb snímacího hrotu musí být velmi přesný a jeho rychlost musí být volena s ohledem na dynamické vlastnosti snímaného systému. [9]

- **Elektronická** část slouží k transformaci mechanického signálu získaného snímacím hrotem na elektrický signál, který se dále zpracovává. Tento elektrický signál se získává indukčním měřidlem při vertikálním pohybu hrotu. Jako výsledek získáváme naměřenou hodnotu drsnosti nebo grafický záznam nerovnosti povrchu. [9]

Měřicí přístroje bezkontaktní jsou přístroje nejčastěji používané v laboratorní a vědecké praxi. Využívají bezkontaktních snímačů, z nichž se nejčastěji využívají CLA snímače a snímače laserové. [9]

CLA snímače rozkládají bílé světlo a optikou jej směřují na kontrolovaný povrch. Optika rozloží světlo podle vlnových délek a v každém bodě povrchu je zaostřena pouze jedna vlnová délka. Odražené světlo z povrchu putuje otvorem, který propustí jen světlo zaostřené vlnové délky. Spektrometr dále vychýlí světlo na maticový senzor, kde je každému bodu připravena prostorová poloha, která je následně počítačově zpracována a vyhodnocena. Laserové snímače jsou oproti CLA snímačům méně přesné. Snímané prostorové polohy jsou zpracovávány speciálními programy, které vytvoří 3D zpracování dat a jejich 3D vizualizaci. [9]

6.5 Vyhodnocení měření drsnosti

Vyhodnocované vertikální parametry R_t , R_z , R_{z1max} a R_a se pohybují v rozmezí od -20% do +30%. Proto jedna samotná naměřená hodnota nemůže podávat žádnou komplexní výpověď o respektování tolerovaných parametrů. Norma ČSN EN ISO 4288 nám tuto skutečnost upřesňuje.

- **Pravidlo maxima.** Povrch odpovídá požadavku maxima, jestliže žádná z naměřených hodnot parametru na celém kontrolovaném povrchu nepřesáhne ani v jenom případě předepsanou hodnotu horní meze.
- **Pravidlo 16%.** Povrch je považován za přijatelný, jestliže ne více než 16 % všech naměřených hodnot na vyhodnocované délce přesahuje předepsanou hodnotu této horní meze.

7 CNC stroje a programování CNC strojů

Pojem CNC (Computer Numerical Control) v překladu znamená počítačem číslicově řízený stroj. Vyznačují se značnou „pružností“ (relativně rychlým přizpůsobením k výrobě jiného výrobku) a přesností. Tyto stroje jsou charakteristické tím, že pracovní funkce jsou ovládány řídicím systémem stroje pomocí vytvořeného programu a umožňují nám vytvářet složitější tvary drah. V našem případě nám CNC stroj umožní vytvořit trochoidu. [13]

Obrábění na CNC strojích probíhá na základě NC kódu, který je možný napsat ručně, dílenským dialogovým programováním přímo na stroji nebo NC programem pomocí CAD/CAM softwaru na externím počítači. NC kód obsahuje všechny geometrické, technologické i pomocné informace. V praktické části bude NC kód vytvořený pomocí CAM softwaru v programu Autodesk PowerMill 2018. [14;15]

7.1 CAD/CAM systémy

Neustále se zvyšující nároky na přesnost a výkonost obrábění na CNC strojích nás nutí hledat nové metody ke splnění těchto požadavků. Možnost výroby složitých tvarových ploch přišla s příchodem moderních CAD systémů. Dosahovaná geometrická a rozměrová přesnost těchto ploch hraje velkou roli v celkové kvalitě výrobku. [16]

CAD (Computer Aided Design), v překladu počítačem podporovaný návrh. Pod tímto pojmem si můžeme představit konstrukční řešení dané součásti. Geometrie výrobku je modelována a zobrazována v CAD programu. Jedná se tedy o souhrn prostředků k vytvoření geometrického modelu. [17]

CAM (Computer Aided Manufacturing), v překladu počítačem podporovaná výroba. CAM označuje systém, který shromažďuje data a programy pro řízení samotného NC nebo CNC stroje. Geometrické a další informace, které tento systém využívá, získává z předem vytvořeného modelu v systému CAD. Je možné simulovat práci jednotlivých nástrojů a poté prověřit a odzkoušet bezpečný chod výroby součásti. Posléze je vygenerován finální program pro řízení NC a CNC stroje. [17]

Mezi nejvíce rozšířené CAD systémy na českém a celosvětovém trhu patří systémy Cadkey a SolidWorks. Mezi CAM systémy je nejrozšířenější Surfcam od americké firmy

Surfware. Tvorba drah v praktické části této práce bude tvořena pomocí PowerMILL nebo NX CAM systému. Finální volba systému bude záviset nejvíce na schopnosti systému vytvořit trochoidu. [18]

8 Experimentální část

Experimentální část této bakalářské práce je zaměřena na porovnávání vlastností 3 metod frézování drážek. S praktickou částí je spojen návrh materiálu zkušebního tělesa, velikosti polotovaru, volba nástroje, stroje a měřících přístrojů, volba programů k tvorbě NC kódů a tvorba drah. Cílem experimentu je porovnávání zaměřující se na strojní čas obrábění, řezné síly a drsnost obrobeneho povrchu. Podmínkou pro uskutečnění experimentu a následného měření je použití materiálně stejných nástrojů a stejných měřících zařízení.

8.1 Předpoklady

V této kapitole byl pro teoretické předpoklady experimentu použit výzkum firmy Sandvik Coromant. Na stránkách firmy se nachází porovnání tří metod frézování drážek a těmi jsou konvenční frézování, trochoidální frézování a frézování ponorné.

Ponorné frézování řeší problém při aplikacích citlivých na vibrace. Těmi jsou například tvorba hlubokých drážek, dlouhé vyložení nástroje nebo malá tuhost stroje a nástrojové sestavy. Ponorné frézování má však spoustu záporů, mezi které patří nutnost použití dokončovacího frézování, kvůli kterému je tato metoda pro experimentální část nevhodná. [6]

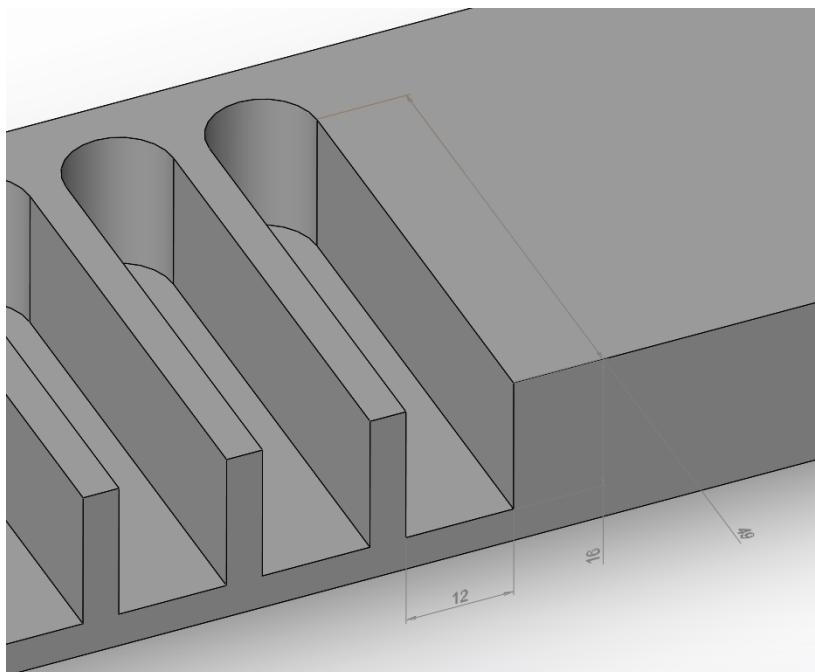
Konvenční frézování disponuje vysokou rychlostí úběru materiálu za stabilních podmínek a jednoduchým programováním. Při tvorbě hlubších drážek je zapotřebí opakovaného průchodu řezného nástroje, a to má za následek delší strojní časy. Při frézování vznikají velké radiální řezné síly a je tedy citlivé na vibrace. [6]

Trochoidální frézování odstraňuje problém vzniku velkých radiálních sil a jedná se o velmi produktivní metodu. Dalšími klady jsou dobré odvádění třísek za vzniku malého množství tepla. Jedním z hlavních problémů je však náročnost programování. [6]

Pro lepší porovnání metod byla pro experimentální část navržena třetí metoda frézování. Jedná se o konvenční frézování menším nástrojem s cyklickým dokončením po obvodu, u kterého se dá předpokládat lepší kvalita povrchu na bocích drážky a poměrně jednoduché programování.

8.2 Návrh drážky

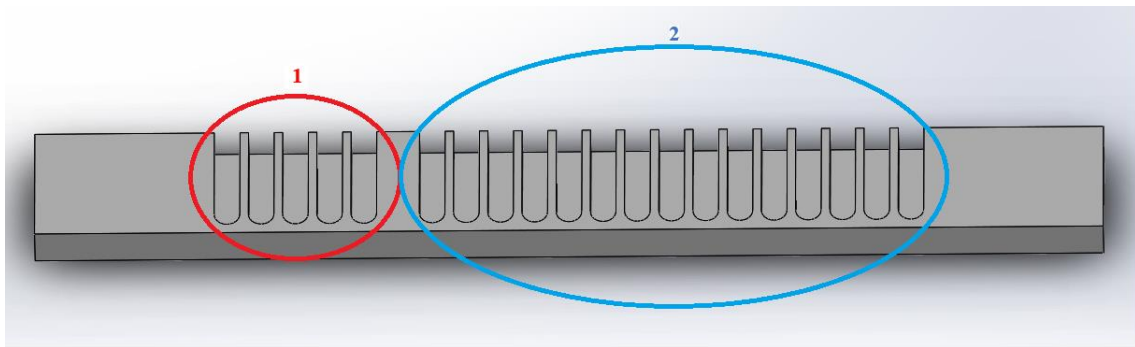
Drážka byla navržena v ohledu na dostupnost nástrojů a materiálu a v ohledu na obráběcí metody. Při zohlednění všech faktorů byla navržena drážka šířky 12 mm, hloubky 16 mm a délky 49 mm. Šířku drážky nejvíce ovlivnily dostupné nástroje šířky 12 a 8 mm. Hloubka byla zvolena větší s ohledem na možnost pozdější úpravy v CAM systému. Délka drážky byla zvolena s ohledem na tloušťku stěny na konci drážky, která neměla být menší než 5 mm.



Obrázek 12: Návrh drážky

8.3 Návrh zkušebního tělesa

K tvorbě zkušebního tělesa byl použit 3D CAD software Solidworks 2017. Byl vytvořen jeden model, na kterém jsou viditelné dvě oblasti pro obrábění. První oblast slouží jako zkušební oblast, ve které byly zkoušeny řezné podmínky pro jednotlivé nástroje a metody frézování. Druhá oblast je experimentální a byl na ní proveden samotný experiment, který se skládá ze tří metod frézování drážek. Každá metoda měla k dispozici pět testovacích drážek, což se při následném provádění experimentu ukázalo jako zbytečné a byly použity pouze dvě.

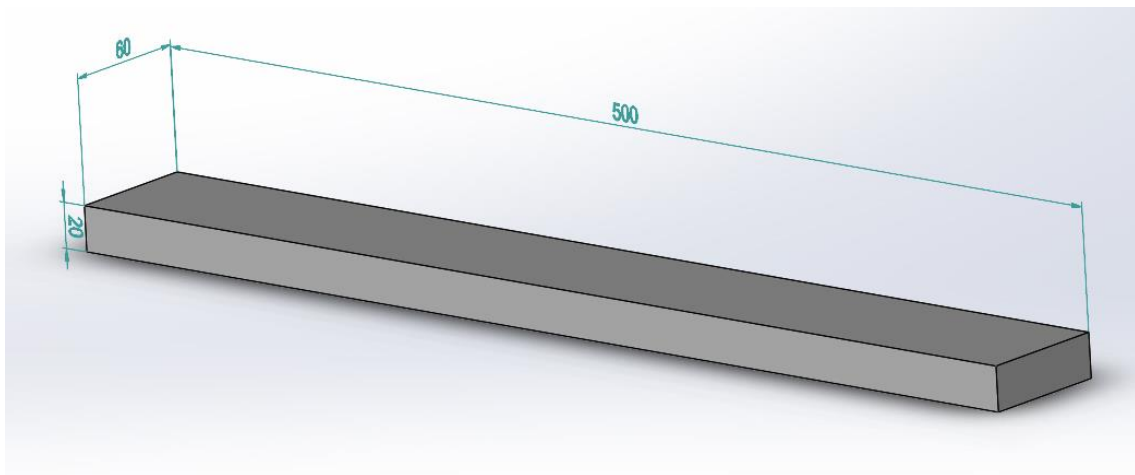


Obrázek 13: Oblasti zkušební a experimentální

Na výše zobrazeném modelu jsou patrné tyto oblasti:

1. Zkušební oblast
2. Experimentální oblast obsahující 3 oblasti (oblast trochoidálního frézování, oblast konvenčního frézování, oblast konvenčního frézování menším nástrojem s cyklickým dokončením po obvodu)

Rozměry zkušebního tělesa (polotovaru) byly voleny tak, aby bylo možné provést všechny zkoušky frézování a zároveň byla zajištěna dostatečná plocha k upnutí do obráběcího stroje. Výsledný rozměr polotovaru byl tedy zvolen 60x20x500mm.



Obrázek 14: Polotovar: tyč plochá válcovaná za tepla, ČSN 42 5310, PLO60x20-500

8.4 Technologické podmínky

Mezi podmínky, které ovlivňují experiment, řadíme materiál obráběného polotovaru, druh frézovacího nástroje a jeho geometrie, obráběcí stroj, měřicí přístroje, tvorba drah a

řezné podmínky. Řezné podmínky jsou definovány řeznou rychlostí, posuvem na zub, smyslem otáčení a hloubkou řezu.

8.4.1 Materiál obrobku

Jako materiál použitý v experimentální části práce byla zvolena nelegovaná konstrukční ocel válcovaná za tepla S355J2+N (J2 značí jakostní stupeň a +N značí normalizační žíhání). Jedná se o často používaný materiál, který je ve většině případů ekonomicky výhodnější, zvláště tehdy, kdy o návrhu nerozhodují stabilní jevy, jako jsou vzpěr, boulení, klopení apod. Normalizační žíhání (+N) je požadováno u prvků, které jsou při výrobě tvářené za tepla a mají splňovat materiálové vlastnosti (mez kluzu, vrubovou houževnatost) i po tvářeni. [19]

Materiál S355J2+N byl zvolen zejména pro jeho dostupnost v OK LOMA s.r.o. a poměrně lehkou obrobiteľnost.

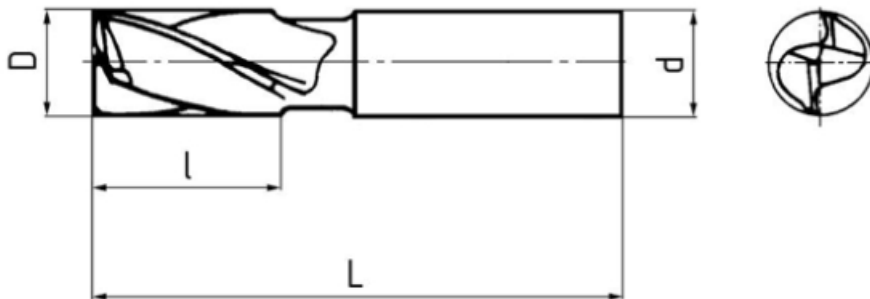
Přehled vlastností oceli S355J2							1.0577	
Druh oceli	Nelegovaná jakostní konstrukční ocel							
TDP	ČSN EN 10025-2: 2005							
Dřívější označení	S355J2G4 podle EN 10025: 1990 +A1: 1993; St 52-3 N podle DIN 17100; 11 503 podle ČSN							
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C max. pro tloušťku v mm			Mn	Si	P	S	N
	≤ 16	>16≤40	>40 ¹⁾	max.	max.	max.	max.	max.
Složení hotového výrobku	0,20 ²⁾	0,20 ³⁾	0,22	1,60	0,55	0,025	0,025	-
	0,23 ⁵⁾	0,23 ⁴⁾	0,24	1,70	0,60	0,035	0,035	-
Mechanické vlastnosti pro zkoušky v podélném směru	Minimální mez kluzu R _{eh} MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :							
	≤16	>16≤40	>40≤63	>63≤80	>80≤100	>100≤150	>150≤200	>200≤250
	355	345	335	325	315	295	285	275
	Pevnost v tahu R _m MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :							
	≥3 ≤ 100		> 100 ≤ 150			> 150 ≤ 250		
	470-630		450-600			450-600		
	Minimální tažnost v % (L ₀ = 5.65√S ₀) pro výrobky jmenovité tloušťky v mm v ⁸⁾ :							
	≥ 3 ≤ 40		> 40 ≤ 63		> 63 ≤ 100		> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250
	22		21		20		18	17
	Minimální nárazová práce KV (J) při - 20° C pro výrobky jmenovité tloušťky v mm ^{4), 5)} :							
≤ 150				>150 ≤ 250				
27 ⁶⁾				27 ⁶⁾				
Maximální hodnota CEV ³⁾	Pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:							
	≤ 30	> 30 ≤ 40		> 40 ≤ 150		> 150 ≤ 250		
	0,45	0,47		0,47		0,49 ⁷⁾		
Technologické vlastnosti								
Svařitelnost	Vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. S rostoucí tloušťkou výrobku a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti sváru. Je účelné dbát doporučení, stanovující podmínky pro svařování, jak je ku příkladu uvádí ECSC IC 2 (EN 1011).							
Tváření za tepla	Jsou-li dodané výrobky dále tvářené za tepla, splňují uvedené mechanické hodnoty pouze po následném normalizačním žíhání.							
Tvařitelnost za studena	Ocel určená pro tvářeni za studena musí být označena písmenem C (S355JOC). To se týká i tažení za studena.							
¹⁾ pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm se obsah C stanoví po dohodě. ²⁾ pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm je hodnoty nutno dohodnout ³⁾ hodnota uhlíkového ekvivalentu CEV, stanovená z rozboru tavby se vypočte podle vzorce : CEV = C + Mn : 6 + (Cr+Mo+V) : 5 + (Ni+Cu) : 15 CEV je volitelný požadavek. ⁴⁾ pro jmenovitou tloušťku nad 30 mm a pro tvářeni za studena je obsah C max. 0,22 % resp. 0,24% v hotovém výrobku. ⁵⁾ je-li ocel určena k válcování za studena je obsah C max. 0,22% resp. 0,24% pro hotový výrobek. ⁶⁾ průměrná hodnota vypočtená výsledků tří stanovení musí splňovat předepsané požadavky. Jedna hodnota může být nižší, než předepsaná minimální hodnota za předpokladu, že nebude nižší než 70% této hodnoty. V opačném případě se odebrávají ze zkušebního vzorku další 3 zkušební tělesa. Průměrná hodnota ze 6 zkoušek pak nesmí být nižší než předepsaná minimální hodnota, přičemž 2 výsledky mohou být nižší, ale pouze jeden s hodnotou nižší, než 70% předepsané minimální hodnoty. ⁷⁾ pro dlouhé výrobky má maximální hodnotu CEV 0,54 ⁸⁾ pro podélný směr zkoušení								

Obrázek 15: Materiálové vlastnosti oceli S355J2 [20]

8.4.2 Řezný nástroj

Pro frézování byly použity stopkové frézy drážkovací s dvěma břity do středu a s válcovou stopkou dle normy ISO 1641. Materiál nástroje je HSSCo8, který obsahuje 8% kobaltu. Nástroje je možné najít v katalogu firmy ZPS – Frézovací nástroje, pod kódem produktu: 273618.120 a 273618.080. Oblast použití pro konstrukční oceli do 600 MPa plně vyhovuje našemu experimentu. [21]

Tyto stopkové frézy byly zvoleny pro jejich dostupnost v OK LOMA s.r.o. a pro dostačující vlastnosti pro provedení experimentu.



Obrázek 16: Zkušební nástroj [21]

Tabulka 6: Parametry zkušebního nástroje [21]

	Fréza 1	Fréza 2
Průměr D [mm]	12	8
Délka břitu l [mm]	15	3,6
Průměr d [mm]	12	8
Celková délka L [mm]	65	50
Úhel šroubovice [°]	40	40
Úhel čela [°]	20	20

8.4.3 Obráběcí stroj

Pro zhotovení experimentu bylo použito vertikální frézovací centrum VMC 500 s řídicím systémem Acramatic 2100. Tento frézovací stroj disponuje pevným vřeteníkem a svislým vřetenem opatřeným číslicově řízeným posuvem. Stroj je opatřený také číslicově řízeným stolem s posuvem v podélném a příčném směru.

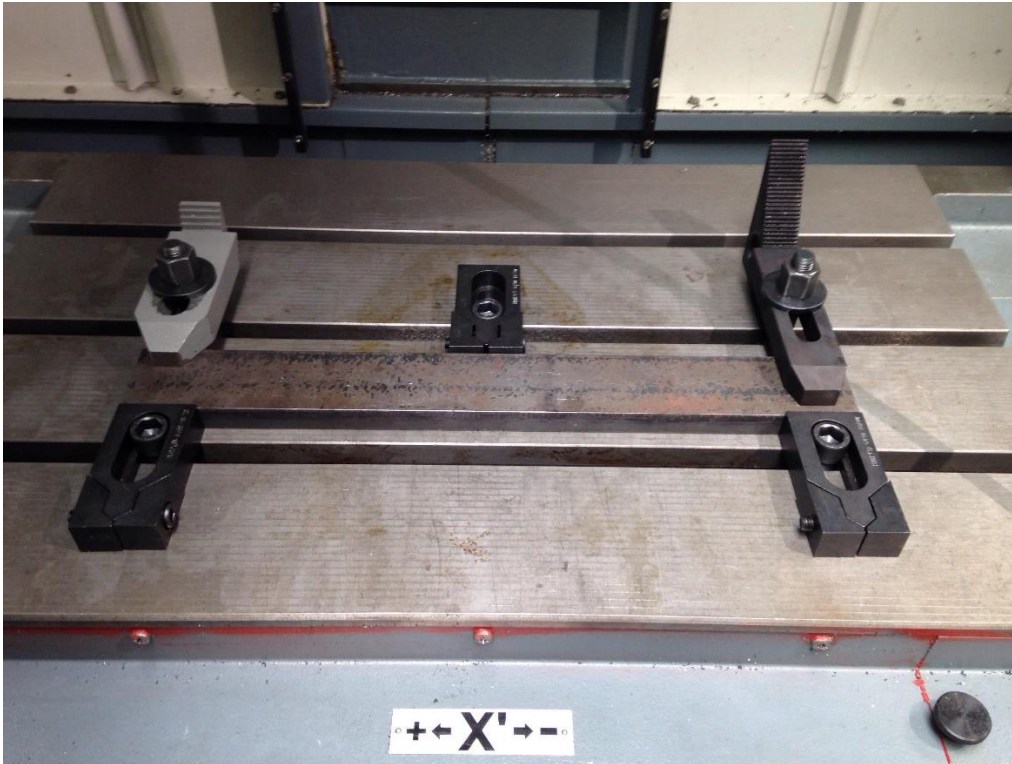
Tabulka 7: Parametry obráběcího stroje

Výkon [kW]		7,5
Maximální otáčky [min^{-1}]		10000
Jmenovitý moment [Nm]		102
Max. zatížení stolu [kg]		300
Rozpětí posuvu [mm]	Osa x	500
	Osa y	500
	Osa z	500
Rozměry upínací polohy stroje [mm]	Délka (směr x)	800
	Šířka (směr y)	500



Obrázek 17: Obráběcí stroj

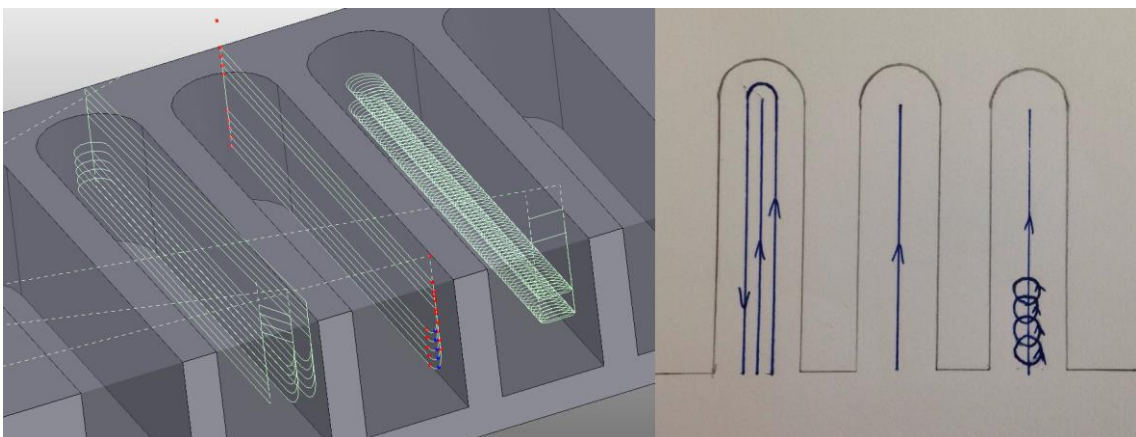
Polotovar byl upnut ve stroji přímo k pracovnímu stolu a byl pečlivě vyrovnán podle základního souřadnicového systému stroje.



Obrázek 18: Upnutí obrobku ve stroji

8.4.4 Tvorba drah nástroje

Z připraveného CAD modelu byl v programu Autodesk PowerMill 2018 vytvořen testovací dílec. V testovacím dílci byly vygenerovány dráhy pohybu nástroje dle zadaných metod a následně byly transportovány ke zpracování do CNC stroje.



Obrázek 19: Dráhy nástroje (zleva: konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu, konvenční frézování, trochoidální frézování)

Dráhy nástroje byly vytvořeny k tvorbě drážek, které se navzájem tepelně neovlivňovaly a zároveň nebyly příliš daleko od sebe, což vedlo k úspoře místa pro případné další

měření. Výsledná hloubka drážky byla naprogramována na hloubku 6 mm, což zcela dostačovalo k následnému měření drsnosti i k porovnání strojních časů všech metod. Z časového hlediska byla na programování nejdelší metoda trochoidálního frézování, která byla současně i datově nejnáročnější.

8.4.5 Obrábění

Řezné podmínky obrábění byly voleny s ohledem na možnosti stroje a s ohledem na doporučené pracovní hodnoty nástroje, uváděné výrobcem.

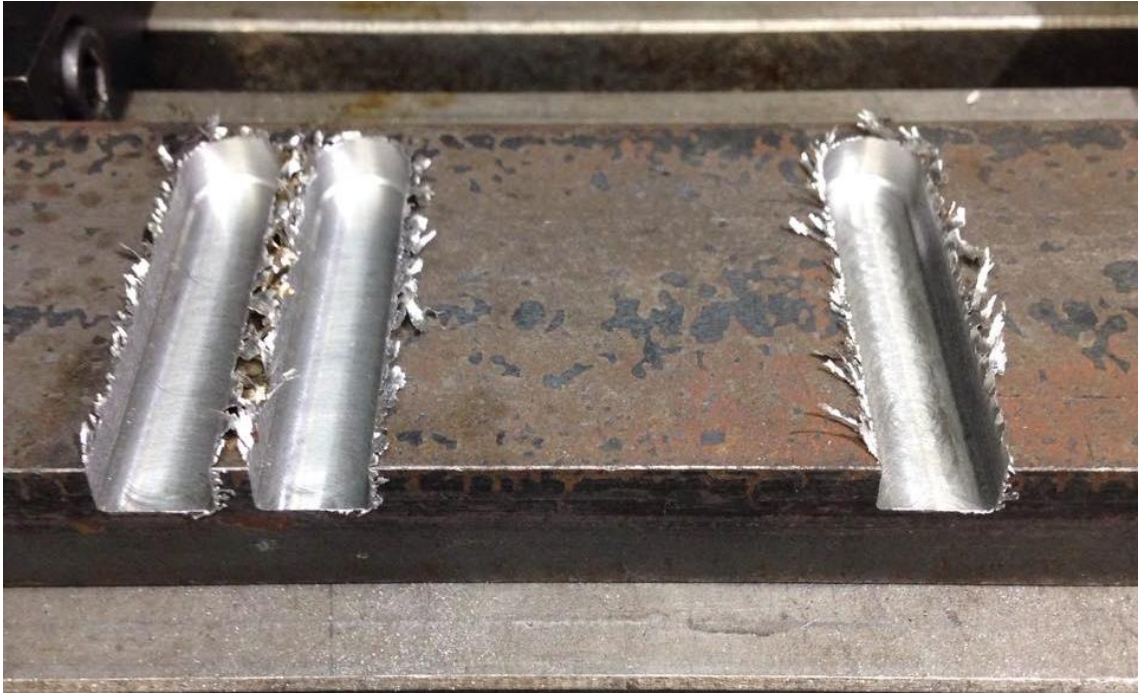
Tabulka 8: Řezné podmínky

	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3
Nástroj D [mm]	12	8	8
v_c [m/min]	45	45	45
f [mm]	0,04	0,025	0,025
a_p [mm]	1,2	1,2	3
a_e [mm]	12	8	2
n [ot/min]	1194	1790	1790
v_f [mm/min]	96	90	90

- Metoda 1- Konvenční frézování
- Metoda 2- Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu
- Metoda 3- Trochoidální frézování

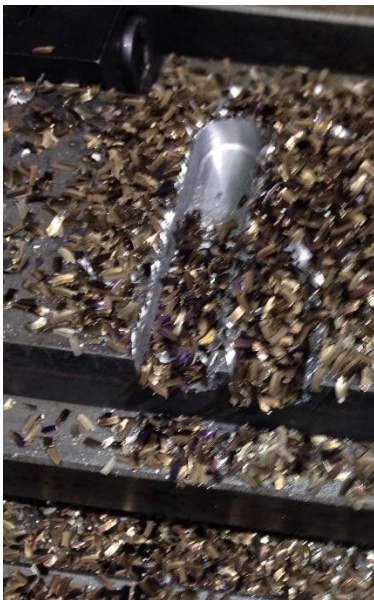
Jako první se obráběla metoda konvenčního frézování nástrojem o průměru 12 mm. K dosažení hloubky drážky 6 mm byla použita hloubka řezu 1,2 mm. CAM software z neznámých důvodů vygeneroval hloubku řezu a_p o několik setin menší, a to mělo za následek nedosažení určené hloubky drážky.

Nejprve byla provedena testovací drážka, jejíž průběh nezaznamenal žádný problém, a tak mohl být použit pro porovnání. Následovalo frézování zbylých dvou drážek.



Obrázek 20: Konvenční frézování (vpravo testovací drážka, vlevo drážky experimentální)

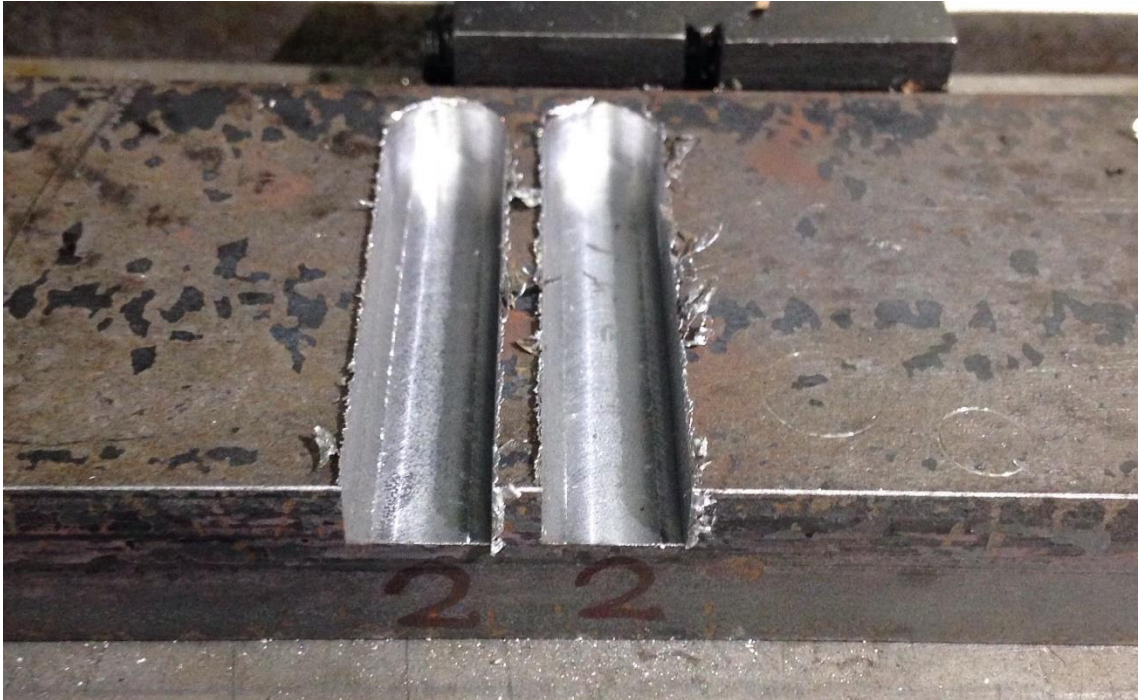
Z obrázku 21. je patrné, že při experimentu vznikaly velké otřepy, které mohou být způsobeny opotřebením nástroje nebo snahou udržovat experiment v jeho pracovních mezích. Jako důkaz, že experiment probíhá v mezích nástroje, byl výskyt tmavě zbarvených třísek viz. obrázek 21.



Obrázek 21: Třísky

Druhou metodou byla metoda konvenčního frézování za použití nástroje o průměru 8 mm s cyklickým dokončením po obvodu. K dosažení hloubky drážky 6 mm byla použita

hloubka řezu 1,2 mm. Stejně jako v předchozím experimentu se však vytvořila hloubka řezu menší, a tak opět nebyla dosažena požadovaná hloubka drážky. Tvorba testovací i experimentálních drážek proběhla bez vykazání jiných problémů.



Obrázek 22: Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu

Tvorba otřepů dle obrázku 23. není tak výrazná, nejspíše díky cyklickému oběhu nástroje po obvodu, který se při této operaci nenacházel ve svých pracovních mezích.

Jako poslední byla obráběna metoda trochoidálního frézování za použití frézy o průměru 8 mm. Fréza byla z důvodu přesnějšího měření obměněna za novou. Hloubky drážky 6 mm bylo dosaženo hloubkou řezu 3 mm a dvěma průjezdy nástroje po obrobku. Při frézování nevznikaly tmavě zbarvené třísky. To znamená, že se nepovedlo nástroj udržet v jeho pracovních mezích.

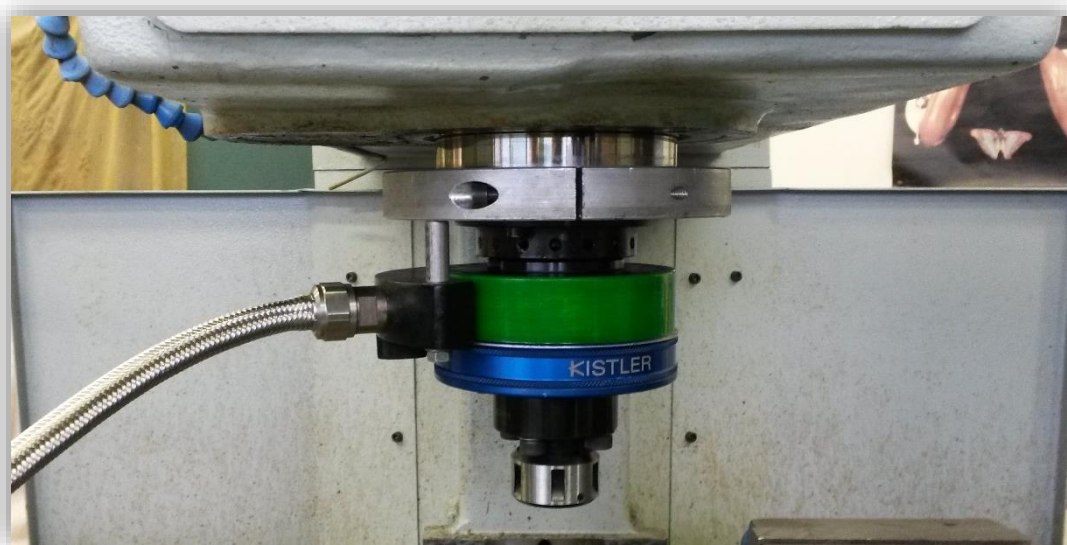


Obrázek 23: Trochoidální frézování

Na obrázku 24. je patrný velký výskyt otřepů, což bylo nejspíše způsobeno opotřebením nástroje.

8.4.6 Měření řezných sil

K měření řezných sil a kroutícího momentu byl použit piezoelektrický rotační dynamometr Kistler 9123C1111. Na tomto dynamometru jsou umístěny 4 senzory snímající signál zatížení, který vzniká při kontaktu obrobku a nástroje. Signál je následně veden do zesilovače a A/D převodníku. Data získaná měřením se poté zpracovávají v připojeném počítači v softwaru DynoWare. Tímto softwarem byly vyhodnoceny složky zatížení ve třech základních osách souřadnicového systému dynamometru (F_x , F_y , F_z) a poté byl vyhodnocen kroutící moment (M_z).



Obrázek 24: Piezoelektrický rotační dynamometr Kistler 9123C1111

Tabulka 9: Parametry dynamometru [22]

Měřicí rozsah dynamometru	
F_x, F_y [kN]	± 5
F_z [kN]	± 20
M_z [Nm]	± 200
Přesnost dynamometru	
F_x, F_y [mV/N]	≈ 2
F_z [mV/N]	$\approx 0,5$
M_z [mV/N]	≈ 50
Rozsah provozní teploty t [°C]	0-60

8.4.7 Měření drsnosti povrchu

Měření drsností povrchu bylo provedeno dílenským drsnoměrem Marsurf PS 10 značky Mahr. Jedná se o dotykový snímač k měření profilu s možností pozdější kontroly přes kalibrační funkce.



Obrázek 25: Mahr-MarSurf PS 10

Tabulka 10: Parametry drsnoměru

Měřicí rozsah [μm]	-200 až +150
Maximální snímaná délka [mm]	17,5
Provozní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	+10 až +45

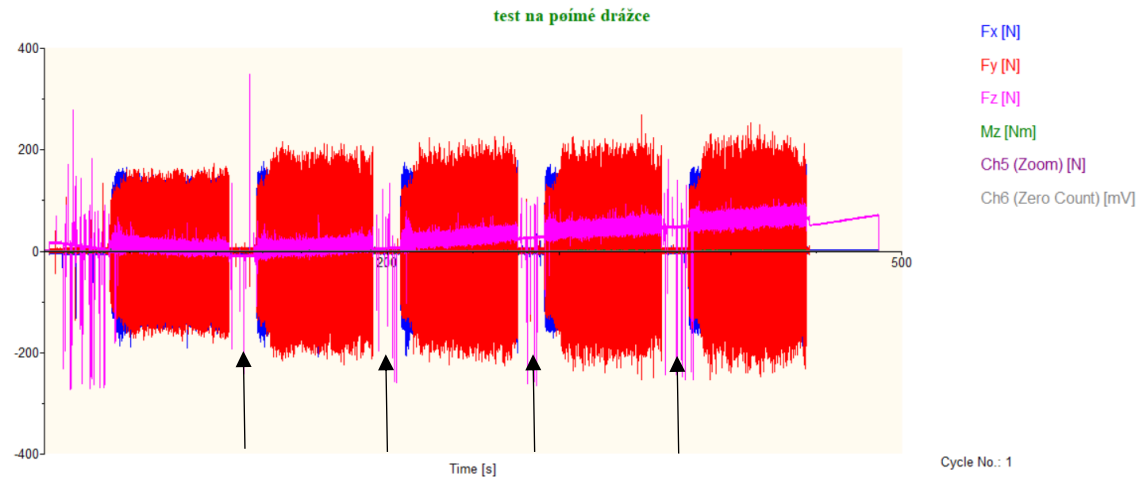
8.5 Výsledky měření řezných sil

Cílem měření řezných sil bylo porovnání grafických záznamů obrábění všech tří metod. Proto byla zvolena pro všechny tři metody identická hloubka, šířka i délka drážky. V porovnání se budou hodnotit průběhy řezných sil a průběhy kroutících momentů všech metod. Hodnotit se budou také maximální hodnoty, výchyly a jednotlivé fáze záběru nástroje.

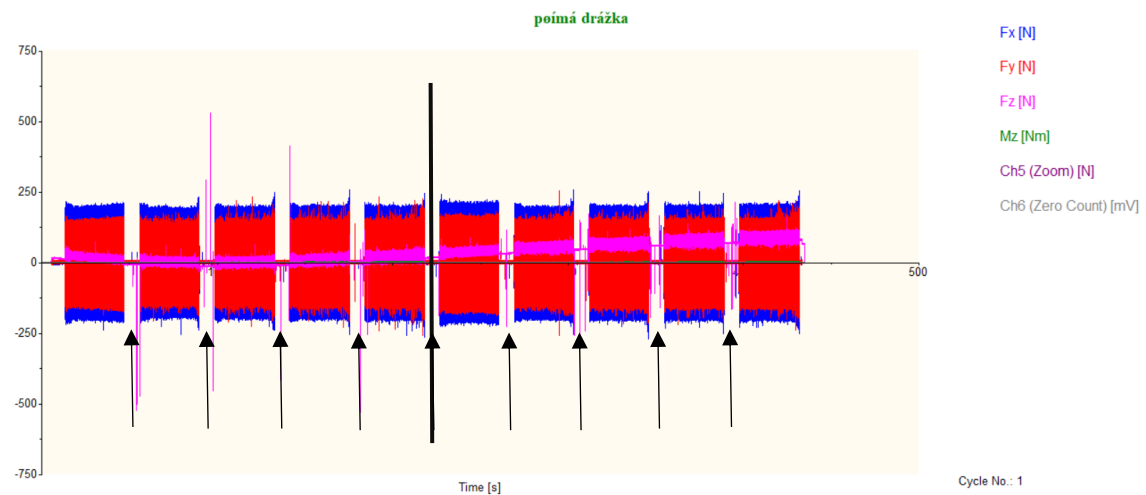
Záznam síly F_z je u všech měření ovlivněn kontinuálním načítáním zbytkového náboje snímače A/D převodníku. Díky tomu při nulovém zatížení F_z průběh stále narůstá.

Na níže zobrazených grafech jsou záznamy průběhů řezných sil a kroutících momentů vytvořené programem DynoWare. Svislé osy zobrazují zatížení [N] a kroutící momenty [Nm] a vodorovné osy zobrazují čas [s].

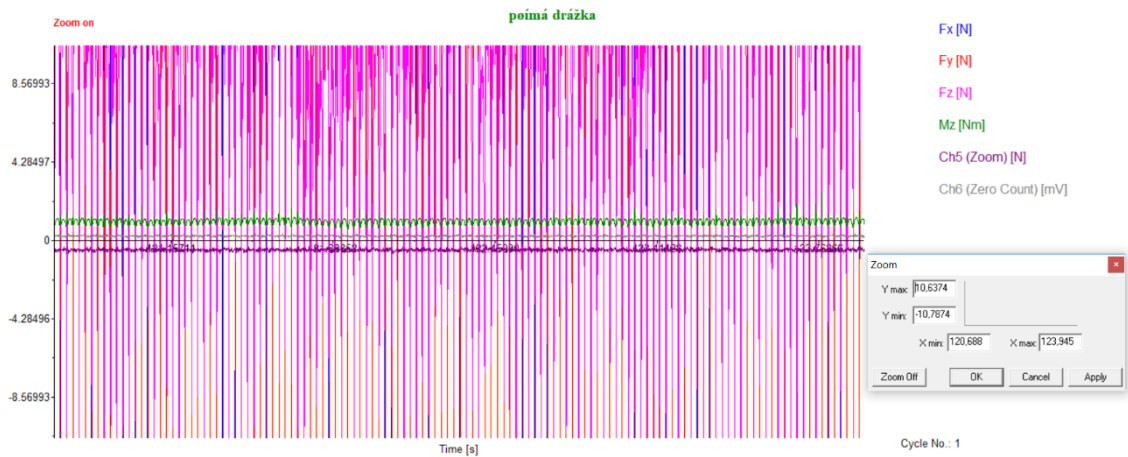
8.5.1 Konvenční frézování



Obrázek 26: průběh — Konvenční frézování, testovací drážka



Obrázek 27: Průběh — Konvenční frézování, experimentální drážky



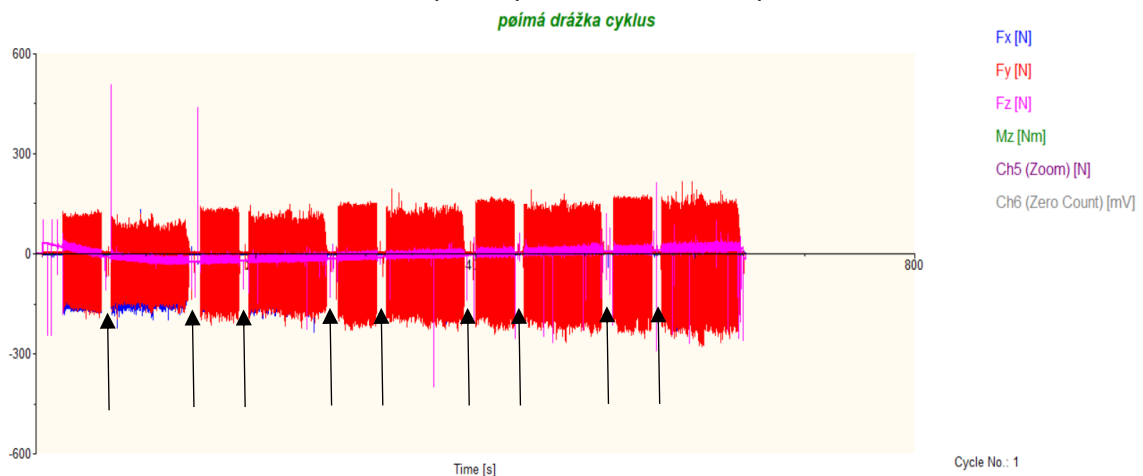
Obrázek 28: Konvenční frézování — Průběh momentu

Na obrázcích 26. a 27. jsou záznamy záběrů nástroje a jsou zde vyznačena místa s nulovým působením řezných sil, kdy se nástroj pohyboval mimo řez a přejížděl do nového záběru na začátek drážky. Je zde patrný nárůst síly F_y , který byl vyvolán stále se zvětšující hloubkou řezu, a tedy větším zásahem boku drážky do obráběcího procesu. Síla F_x a krouticí moment M_z byly během celého experimentu konstantní, jak ukazují obrázek 28.

Tabulka 11: Konvenční frézování — Maximální hodnoty

	Y(t1)
F_x [N]	-223,3575
F_y [N]	-183,3174
F_z [N]	102,7329
M_z [Nm]	1,5825

8.5.2 Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu



Obrázek 29: Průběh — Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu, testovací drážka



Obrázek 30: Průběh — Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu, experimentální drážky



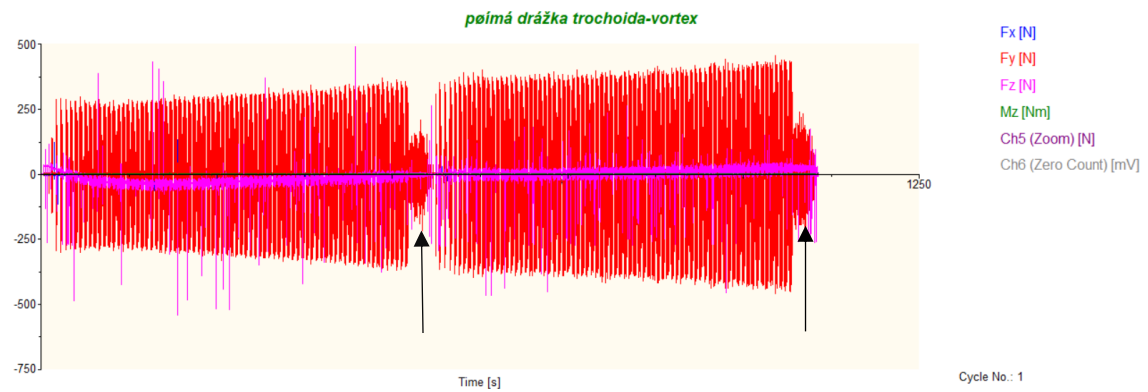
Obrázek 31: Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu — Průběh momentu

Na obrázcích 29. a 30. jsou záznamy dvou druhů záběru, a to klasického konvenčního a poté cyklického dokončovacího. Jako v předchozím případě se zde nacházejí místa s nulovým zatížením (vyznačené na obrázku 29.), kdy se nástroj pohyboval mimo řez a přejížděl do nového záběru. Síly F_x a F_y během provádění experimentu narůstaly, kvůli zvyšujícímu se opotřebením nástroje. Na obrázku 30. je patrné, že síla F_y při cyklickém dokončení prvního průtahu druhé experimentální drážky nepatrně klesla. Za tento pokles může menší vliv boku drážky do obráběcího procesu. Kroutící moment byl během experimentu konstantní viz. obrázek 31.

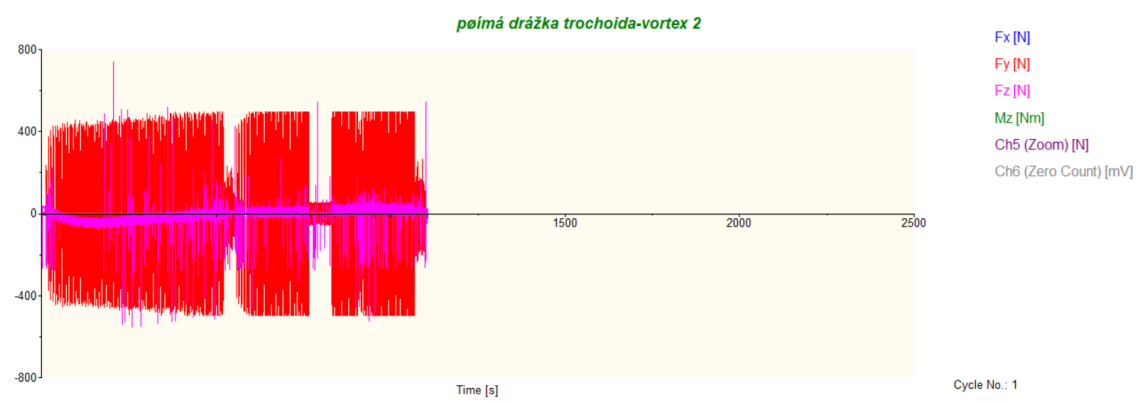
Tabulka 12: Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu — Maximální hodnoty

	Y(t1)
F_x [N]	-151,8926
F_y [N]	-270,5774
F_z [N]	76,0567
M_z [Nm]	1,0946

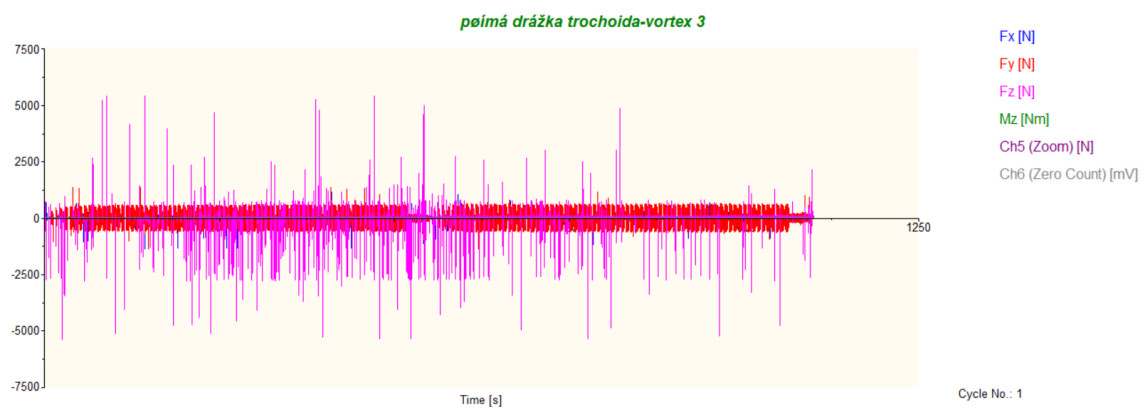
8.5.3 Trochoidální frézování



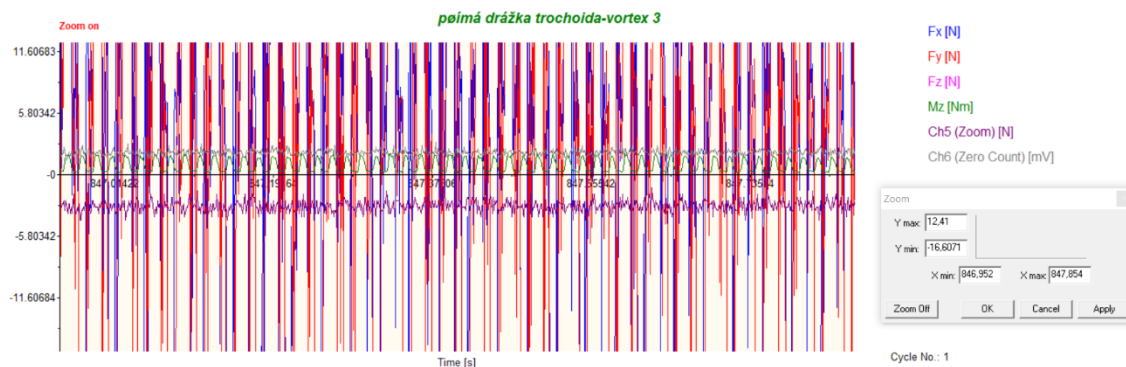
Obrázek 32: Průběh — Trochoidální frézování, testovací drážka



Obrázek 33: Průběh — Trochoidální frézování, experimentální drážka 1



Obrázek 34: Průběh — Trochoidální frézování, experimentální drážka 2



Obrázek 35: Trochoidální frézování – Průběh momentu

Na obrázcích 32., 33. a 34. je zachycen průběh řezných sil trochoidálního frézování. Na rozdíl od předchozích případů se zde nachází oblast se sníženým zatížením (vyznačená na obrázku 32.), která byla způsobena vracejícím se nástrojem po dokončení předchozího průtahu. Nástroj se při zpětném pohybu pohyboval ve stejné hloubce jako při frézování, a to mělo za následek vznik třecích sil. Při tvorbě první experimentální drážky bylo dosaženo maximálního nastavení rozsahu dynamometru, jak je možné sledovat z průběhu síly F_y na obrázku 33. Následně byl tento rozsah zvětšen a bylo možno dokončit experiment. Síly F_y a F_x se v průběhu experimentu zvětšovaly v důsledku zvyšujícího se opotřebení nástroje. Průběh momentu M_z byl v průběhu experimentu konstantní viz. obrázek 35.

Tabulka 13: Trochoidální frézování – Maximální hodnoty

	Y(t1)
F_x [N]	227,9236
F_y [N]	598,6958
F_z [N]	108,0583
M_z [Nm]	1,9676

Pro lepší názornost a orientaci byly výsledné maximální hodnoty zatížení a momentů zaokrouhleny na dvě desetinná místa a zapsány do následující tabulky.

	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3
F_x [N]	-223,36	-151,89	227,92
F_y [N]	-183,32	-270,58	598,70
F_z [N]	102,73	76,06	108,06
M_z [Nm]	1,58	1,09	1,97

8.6 Výsledky měření strojních časů

Dalším důležitým aspektem každého obrábění je jeho strojní čas. Cílem je vždy zvolit takovou strategii, která společně se strojním časem vytvoří neekonomičtější kombinaci. Za účelem přesného změření strojních časů bylo měření prováděno v programu Dynoware, kde je přesně znázorněn náběh a výběh nástroje z řezu.

Tabulka 14: Strojní časy

	Testovací drážka	Experimentální drážka 1	Experimentální drážka 2
Konvenční frézování	405 s	205 s	205 s
Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu	617 s	617 s	617 s
Trochoidální frézování	1060 s	1059 s	1058 s

Strojní časy jednotlivých metod jsou víceméně totožné až na strojní čas testovací drážky konvenčního frézování, u které došlo k chybě při volbě počtu břitů nástroje a místo dvou byl zadán jeden. To mělo za následek snížení posuvu na polovinu, a tak je strojní čas oproti experimentálním drážkám dvakrát zvětšený.

8.7 Výsledky měření drsnosti povrchů

Neméně důležitým faktorem, který ovlivňuje volbu nejvhodnější metody, je kvalita výsledného povrchu. Hodnoty drsnosti byly měřeny dílenským drsnoměrem Mahr-Marsurf PS 10. Výsledné hodnoty byly zprůměrovány a zaokrouhleny na dvě desetinná místa a posléze byla z těchto hodnot vytvořena následující tabulka. Zaokrouhlení na dvě desetinná místa bylo zvoleno s ohledem na fakt, že se jedná o vypočítanou hodnotu. Hodnoty běžně používané pro hodnocení se zaokrouhlují na jedno desetinné místo.

Tabulka 15: Drsnosti povrchů drážek

		Konvenční frézování	Konvenční fr. s cyklickým dokončením po obvodu	Trochoidální frézování
Testovací drážka	Levá strana	2,19	1,10	1,38
	Pravá strana	1,51	0,96	1,22
	Dno	1,97	1,48	2,17
Experimentální drážka 1	Levá strana	2,83	1,67	1,63
	Pravá strana	1,02	1,04	0,76
	Dno	2,04	2,30	2,62
Experimentální drážka 2	Levá strana	2,05	1,58	1,54
	Pravá strana	0,94	1,20	0,98
	Dno	2,32	2,08	2,97

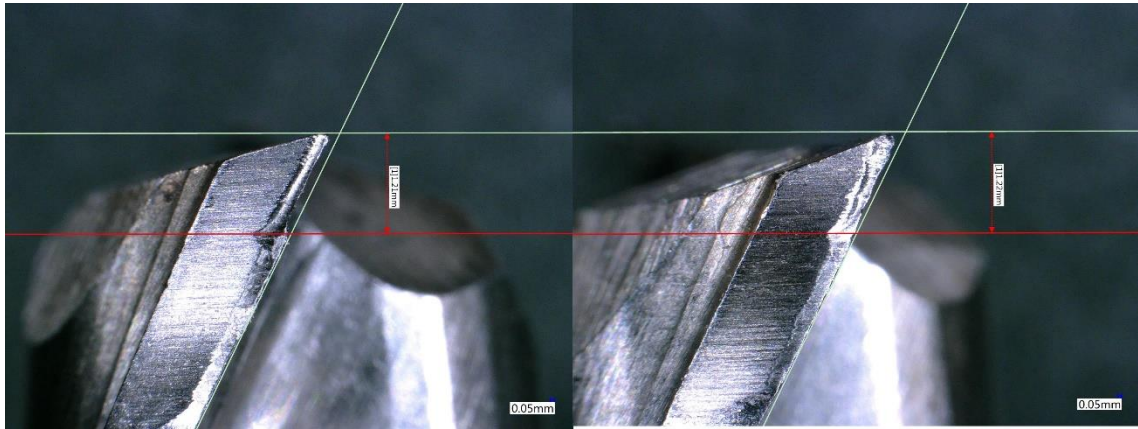
Z tabulky 15. je patrné, že největší hodnoty drsnosti levé strany drážky nabývá metoda konvenčního frézování. Byl tedy ověřen předpoklad, že při nesousledném frézování dochází ke vzniku horší kvality obrobeneho povrchu. Hodnoty měření boků drážek mohou být nepřesné z důvodu malé vyhodnocované délky, která byla takto zvolena kvůli špatnému přístupu do vnitřního prostoru drážky. Hodnoty drsnosti pravých stran a hodnoty naměřené na dnu jednotlivých drážek nezaznamenávají zásadní rozdíly.



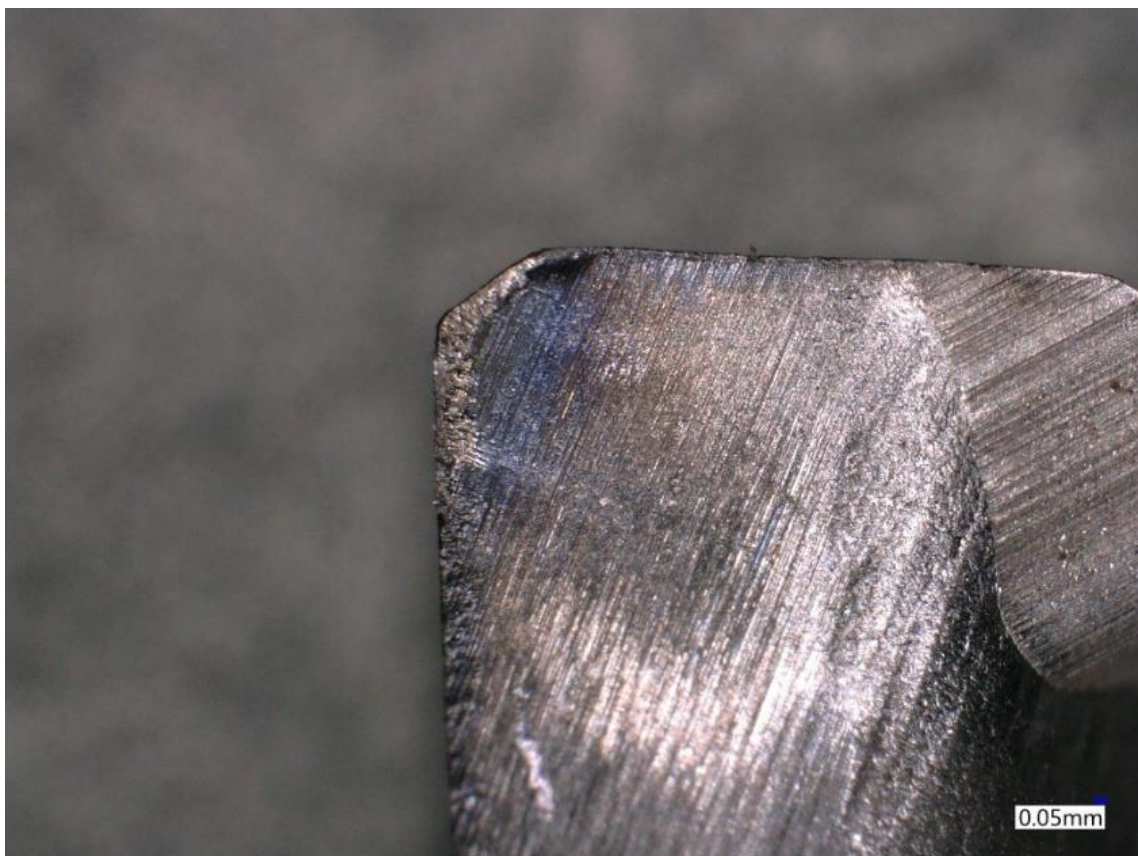
Obrázek 36: Textura povrchu dna drážky (z leva: Trochoidální frézování, konvenční frézování, konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu)

8.8 Opotřebení řezných nástrojů

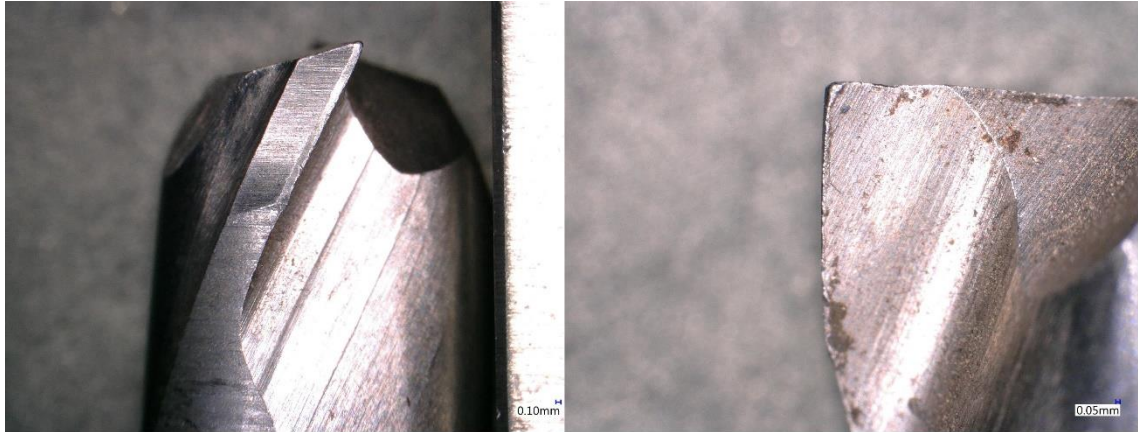
Opotřebení řezných nástrojů použitých během experimentu bylo zkoumáno pod mikroskopem. Na níže zobrazených obrázcích je možné pozorovat jednotlivé druhy opotřebení nástrojů, které zhoršovaly přesnost naměřených hodnot.



Obrázek 37: Opotřebení nástroje D8 při konvenčním frézování s cyklickým dokončením po obvodu



Obrázek 38: Opotřebení nástroje D12 při konvenčním frézování



Obrázek 39: Opotřebení nástroje D8 při trochoidálním frézování

Experiment dokazuje, že při absenci chladicí kapaliny se životnost nástroje zásadně snižuje. Z obrázků je patrné, že opotřebení nástrojů mohlo mít velký vliv na měření ostatních parametrů. Zároveň však dokazuje, že nástroj pracoval ve svých pracovních mezích, což bylo cílem experimentu.

8.9 Vyhodnocení měření

Z naměřených průběhů řezných sil a kroutících momentů je možné dojít k závěru, že nejvíce byl nástroj zatížen při trochoidálním frézování, což se neshoduje s tvrzením výrobce, který tvrdí, že při trochoidálním frézování vznikají nejmenší radiální síly. Měření ukázalo, že síly závisí na ploše třísky, což je v souladu s teorií. Tvrzení o snížení sil patrně odkazuje na snížení sil, ke kterému dojde v důsledku snížení tloušťky řezu a_e , což ovšem nejde ověřit, neboť neznáme podmínky experimentu. Výsledné hodnoty řezných sil při konvenčním frézování vyšly menší než u trochoidálního a zároveň nepatrně větší než u konvenčního frézování s cyklickým dokončením po obvodu. Z těchto výsledků se dá tedy usoudit, že největší podíl na neshodě naměřených hodnot s předpokladem (tvrzením výrobce) má míra opotřebení nástroje.

Opotřebení nástroje a jeho vliv jsou nejzřetelněji patrné na trvale rostoucích silách při trochoidálním obrábění, kdy se průřez třísky nemění.

Výsledné strojní časy přesvědčují o tom, že z hlediska rychlosti výroby je nejefektivnější metoda konvenčního frézování. Naopak časově nejnáročnější byla metoda trochoidálního frézování. Zde se opět nepotvrdil teoretický předpoklad, který uvádí, že se jedná o velmi produktivní metodu. Nicméně lze konstatovat, že oproti konvenčnímu frézování má trochoidální metoda větší počet proměnných podmínek a můžou tedy existovat sestavení, u kterých bude výsledek lepší než klasický způsob.

Z naměřených hodnot drsností lze dospět k závěru, že nejmenších drsností na dně a na levé straně drážky dosahuje metoda konvenčního frézování s cyklickým dokončením po obvodu. Nejmenší drsnosti pravé strany drážky dosahuje metoda trochoidálního frézování.

Pro další experimenty je ovšem nutné upravit měřicí metodu pro použití řezné kapaliny i při měření řezných sil. Absence kapaliny a tedy vliv generovaného tepla je značný, což ukazuje rapidní opotřebení nástroje.

9 Závěr

Tato práce měla za úkol prozkoumat problematiku volby strategie obrábění drážek. V první části práce byla provedena rešerše, zabývající se teoretickým rozбором vlastností samotného frézování drážek. Jedná se o popis vlastností z hlediska utváření třísek, jakosti obrobeného povrchu, volby nástroje a geometrie nástroje, chování nástroje i stroje během frézovacího procesu a tvorby NC Kódu.

Důležitost drážek a jejich výroby ve strojním průmyslu s největší pravděpodobností nenahradí žádná jiná metoda. V případě spojení hřídele a náboje jsou drážky nenahraditelným druhem spoje, z čehož plyne, že výzkum by se měl spíše zaměřit na zdokonalování této metody, nikoliv na vývoj jiné, alternativní metody.

V rámci této práce byla provedena experimentální část zaměřená na porovnání tří metod frézování drážek. Jedná se o tvorbu drážky klasickým konvenčním frézováním, konvenčním frézováním s cyklickým dokončením po obvodu a trochoidálním frézováním.

Na drážkách vyráběných různými metodami byly měřeny řezné síly při obrábění a následně měřeny drsnosti vyrobených ploch a porovnány strojní časy jednotlivých metod. Výsledky měření byly v některých bodech poněkud nevyhovující a neshodovaly se s teoretickými předpoklady. Tyto odchylky byly ve vyhodnocení praktické části odůvodněny, a tak může být experiment považován za úspěšný.

Z výsledků provedeného měření se dá vyvodit, že časově nejefektivnější metodou je metoda konvenčního frézování. Řezné síly jsou nejpříjemnější u konvenčního frézování s cyklickým dokončením po obvodu. Dosažené hodnoty drsnosti jsou nejpříznivější u konvenčního frézování s cyklickým dokončením po obvodu a u trochoidálního frézování.

Lze vyslovit předpoklad, že pro jinou konfiguraci experimentu – např. hlubší drážka – se vhodnost metody změní, např. z důvodu omezení maximální řeznou silou, která u konvenčního způsobu roste, kdežto u zbylých ji lze regulovat. Stejně tak vhodná volba podmínek trochoidálního způsobu může ukázat příhodnost pro jiné sestavení.

10 Seznam použitých zdrojů

- [1] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘOVSKÁ. *Technologie II*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2019-04-04]. ISBN 9788024818221.
- [2] MÁDL, Jan, Jindřich KAFKA, Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ 3. díl*. 1. Praha: ČVUT – fakulta strojní, 2000. ISBN 9788001020913.
- [3] Sousedné frézování nebo nesousedné frézování. *Sandvik coromant* [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>
- [4] DE VOS, Patrick, Příručka pro technology: Kompenzační přístup při frézování – posuv. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2013 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-kompenzacni-pristup-pri-frezovani-posuv.html>
- [5] Dráha nástroje a utváření třísek při frézování. *Sandvik coromant* [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/cutter-path-and-chip-formation.aspx?Country=cz>
- [6] Frézování drážek kotoučovými nebo stopkovými frézami. *Sandvik coromant* [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/groove-or-slot-milling.aspx>
- [7] Úhel nastavení a tloušťka třísky při frézování. *Sandvik coromant* [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/entering-angle-and-chip-thickness.aspx>
- [8] KOVÁŘ, Jiří. Ovlivnění kvality a jakosti obrobene plochy při frézování. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 14.04.2004 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ovlivneni-kvality-a-jakosti-obrobene-plochy-pri-frezovani.html>

- [9] Měření drsnosti. *MaB Calibr* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.mbcalibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [10] BUMBÁLEK, Bohumil a Robert JANKOVÝCH. Výškové parametry textury povrchu. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 13.11.2014 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu.html>
- [11] NOVÁK, Zdeněk. Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 16.11.2004 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu.html>
- [12] Drsnost obrobeného povrchu. *Tumlikovo Metal Cutting Technologies* [online]. 24.3.2011 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>
- [13] ŠTULPA, Miloslav. *CNC programování obráběcích strojů*. Praha: GR, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [14] STANĚK, Vlastimil. Jak se připravuje NC program pro CNC obráběcí stroje?. *Technický týdeník* [online]. 9.10.2018 [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/prumyslovy-software/jak-se-pripravuje-nc-program-pro-cnc-obrabeci-stroje_45223.html
- [15] MÁDL, Jan, Jindřich KAFKA, Martin VRABEC a Rudolf DVORÁK. *Technologie obrábění 2.díl*. Praha: České vysoké učení technické, 2002. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [16] CAD systémy a hodnocení strategií obrábění. *CAD.cz* [online]. [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2385-cam-systemy-a-hodnoceni-strategii-obrabeni.html>
- [17] SADÍLEK, Marek a Zuzana SADÍLKOVÁ. *Počítačová podpora procesu obrábění* [online]. 1. Ostrava: Fakulta strojní VŠB-TUO, 2012 [cit. 2019-06-23]. ISBN 978-80-248-2770-4. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Pocitacova_podpora_procesu%20obrabeni.pdf

- [18] CAD a CAM systémy na českém trhu. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2003 [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/cad-a-cam-systemy-na-ceskem-trhu.html>
- [19] ROTTER, Tomáš. Ocel pro stavební ocelové konstrukce. *Tzbinfo* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/13744-ocel-pro-stavebni-ocelove-konstrukce>
- [20] Přehled vlastností oceli S355J2. *Bolzano*[online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s355j2drive-s355j2g3>
- [21] Frézy pro drážky per (drážkovací frézy) dlouhé, 2 zuby, 2 břity do středu, typ W. *ZPS- Frézovací nástroje* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: [https://www.zps-fn.cz/cz/frezy-valcove-celni-hss/detail/frezy-pro-drazky-per-\(drazkovaci-frezy\)-dlouhe,-2-zuby,-2-brity-do-stredu,-typ-w,-ploska-weldon,-din-8441,-rychlorezna-ocel-hss-co8/](https://www.zps-fn.cz/cz/frezy-valcove-celni-hss/detail/frezy-pro-drazky-per-(drazkovaci-frezy)-dlouhe,-2-zuby,-2-brity-do-stredu,-typ-w,-ploska-weldon,-din-8441,-rychlorezna-ocel-hss-co8/)
- [22] Rotační dynamometr Kistler 9123C1111. *Gebzelab* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://gebzelab.gtu.edu.tr/index.php/rotasyonel-dinamometre-kistler-9123c1111/>
- [23] Geometrie břitů fréz. *Tlumikovo* [online]. 2.11.2010 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/geometrie-britu-frez/>

11 Seznam obrázků a tabulek

11.1 Tabulky

Tabulka 1: Určení posuvu z poměru (a_e/DC) [4]	19
Tabulka 2: Základní řada parametrů drsnosti	23
Tabulka 3: Vztah mezi R_a a stupněm lícování	24
Tabulka 4: Optimální drsnost povrchu se zřetelem na stupeň lícování	24
Tabulka 5: Drsnost povrchu z hlediska způsobu obrábění	25
Tabulka 6: Parametry zkušebního nástroje [21]	32
Tabulka 7: Parametry obráběcího stroje	33
Tabulka 8: Řezné podmínky	35
Tabulka 9: Parametry dynamometru [22]	39
Tabulka 10: Parametry drsnoměru	40
Tabulka 11: Konvenční frézování – Maximální hodnoty	42
Tabulka 12: Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu – Maximální hodnoty	43
Tabulka 13: Trochoidální frézování – Maximální hodnoty	45
Tabulka 14: Strojní časy	46
Tabulka 15: Drsnosti povrchů drážek	47

11.2 Obrázky

Obrázek 1: Přehled frézovacích nástrojů [1]	13
Obrázek 2: Sousledné frézování [3]	14
Obrázek 3: Nesousledné frézování [3]	15
Obrázek 4: Symetrické a nesymetrické frézování [1]	16
Obrázek 5: Fáze záběru nástroje [5]	17
Obrázek 6: Radiální hloubka řezu – průměr nástroje (poměr a_e/DC) [4]	18
Obrázek 7: Úhel nastavení ostří [7]	18
Obrázek 8: Střední tloušťka třísky [4]	19
Obrázek 9: Řezné síly [8]	20
Obrázek 10: Profil povrchu [9]	21

Obrázek 11: Parametr Ra [11]	23
Obrázek 12: Návrh drážky	29
Obrázek 13: Oblasti zkušební a experimentální	30
Obrázek 14: Polotovary: tyč plochá válcovaná za tepla, ČSN 42 5310, PLO60x20-500	30
Obrázek 15: Materiálové vlastnosti oceli S355J2 [20]	31
Obrázek 16: Zkušební nástroj [21]	32
Obrázek 17: Obráběcí stroj	33
Obrázek 18: Upnutí obrobku ve stroji	34
Obrázek 19: Dráhy nástroje (zleva: konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu, konvenční frézování, trochoidální frézování)	34
Obrázek 20: Konvenční frézování (vpravo testovací drážka, vlevo drážky experimentální)	36
Obrázek 21: Třísky	36
Obrázek 22: Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu	37
Obrázek 23: Trochoidální frézování	38
Obrázek 24: Piezoelektrický rotační dynamometr Kistler 9123C1111	39
Obrázek 25: Mahr-MarSurf PS 10	40
Obrázek 26: průběh – Konvenční frézování, testovací drážka	41
Obrázek 27: Průběh – Konvenční frézování, experimentální drážky	41
Obrázek 28: Konvenční frézování – Průběh momentu	42
Obrázek 29: Průběh – Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu, testovací drážka	42
Obrázek 30: Průběh – Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu, experimentální drážky	43
Obrázek 31: Konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu – Průběh momentu	43
Obrázek 32: Průběh – Trochoidální frézování, testovací drážka	44
Obrázek 33: Průběh – Trochoidální frézování, experimentální drážka 1	44
Obrázek 34: Průběh – Trochoidální frézování, experimentální drážka 2	44
Obrázek 35: Trochoidální frézování – Průběh momentu	45
Obrázek 36: Textura povrchu dna drážky (zleva: Trochoidální frézování, konvenční frézování, konvenční frézování s cyklickým dokončením po obvodu)	47
Obrázek 37: Opatření nástroje D8 při konvenčním frézování s cyklickým dokončením po obvodu	48

Obrázek 38: Opotřebení nástroje D12 při konvenčním frézování	48
Obrázek 39: Opotřebení nástroje D8 při trochoidálním frézování	49

12 Příloha

- Naměřené hodnoty a NC kód (viz. CD)