

Stanovení vlivu hrubovacích operací na dokončovací pro technologii frézování

Bc. Tomáš Močička

Diplomová práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Močíčka**
Osobní číslo: **T19508**
Studijní program: **N0788A270002 Výrobní inženýrství**
Studijní obor: **Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Stanovení vlivu hrubovacích operací na dokončovací pro technologii frézování**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši na dané dané téma.
2. Provedte návrh experimentu
3. Realizujte experiment
4. Provedte zpracování a hodnocení naměřených dat

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

Seznam doporučené literatury:

- KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173s. ISBN 978-80-7454-471-2.
- ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění 1. díl. 2. vyd.* Praha: Scientia, 2005, 53-71s. ISBN 80-7183-337-1.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Řezníček, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA

DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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 užit své dílo – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne: 14.5.2021

Jméno a příjmení studenta: Tomáš Močička

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na popis obrábění technologií frézování, materiály pro nástroje a jejich opotřebení. Jsou zde také popsány povrchové vlastnosti jako je mikrotvrдость, zbytkové napětí a drsnost obrobeného povrchu.

Experimentální část je zaměřena na volbu řezných podmínek pro frézování nerezové oceli během hrubovacích operací. Byl zkoumán vliv řezné rychlosti (v_c), posuvu na zub (f_z) a hloubky řezu (a_p) na velikost řezných sil vznikajících během obrábění. Následně byla změřena drsnost obrobené plochy, mikrotvrдость a indentační hloubka. Po zpracování byly diskutovány zvolené řezné podmínky v souvislosti se zpevněním obrobeného povrchu při hrubování.

Klíčová slova: Frézování, frézovací nástroje, frézky, CNC frézování, hrubování, dokončování, zbytkové napětí

ABSTRACT

The theoretical part of the thesis focuses on the description of machining technologies milling, materials for tools and their wear. Surface properties such as microhardness, residual stress and roughness of the machined surface are also described.

The experimental part focuses on the choice of cutting conditions for milling stainless steel during rough milling. The effect of cutting speed (v_c), tooth displacement (f_z) and cutting depth (a_p) on the size of cutting forces generated during machining was investigated. Subsequently, the roughness of the machined area, the micro-hardness and the identification depth were measured. The data were processed and discussed on the selected cutting conditions in connection with the strengthening of the machined surface during roughing.

Keywords: Milling, milling tools, milling machine, CNC milling, roughing, finishing, residual stress

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Martinu Řezníčkovi, Ph.D. za pomoc při zpracování teoretické a praktické části této diplomové práce a rodině za podporu při studiu.

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

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 FRÉZOVÁNÍ.....	11
1.1 PRINCIP FRÉZOVÁNÍ.....	12
1.1.1 Pohyby při frézování.....	12
1.1.2 Směr pohybu	12
1.1.3 Rychlosti pohybu	12
1.2 ČELNÍ FRÉZOVÁNÍ	13
1.3 VÁLCOVÉ FRÉZOVÁNÍ	13
1.4 NESOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ.....	14
1.5 SOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ	15
2 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY A OPOTŘEBENÍ	16
2.1 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY	16
2.1.1 Nástrojové oceli	17
2.1.2 Slinuté karbidy	20
2.1.3 Stellity	20
2.1.4 Keramické řezné materiály	21
2.1.5 Supertvrdé řezné materiály	22
2.2 OPOTŘEBENÍ BŘITŮ NÁSTROJŮ	23
2.2.1 Mechanismus opotřebení	23
2.2.2 Trvanlivost břítu nástroje	25
2.2.3 Druhy opotřebení břitů fréz.....	25
3 UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ PŘI FRÉZOVÁNÍ	28
3.1.1 Upnutí nástroje.....	28
4 PĚTIOSÉ CNC OBRÁBĚCÍ STROJE	30
4.1 KONSTRUKCE PĚTIOSÝCH OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	30
4.1.1 Nosná soustava obráběcího stroje	31
4.1.2 Soustava vřetena.....	32
4.2 SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM	32
4.3 PRINCIP PĚTIOSÉHO FRÉZOVÁNÍ.....	33
5 OPERACE PŘI FRÉZOVÁNÍ.....	34
5.1 ŘEZNÉ PODMÍNKY	34
5.2 HRUBOVACÍ OPERACE	35
5.3 DOKONČOVACÍ OPERACE	36
6 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI	39
6.1 MIKROTVRDOST	39

6.1.1	Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	40
6.1.2	Zkouška tvrdosti podle Knoopu	41
6.1.3	Zbytkové napětí.....	43
6.2	DRSNOST POVRCHU	44
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	45
7	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	46
8	OBRÁBĚNÝ MATERIÁL 1.4541 (X6CRNITI18-10).....	47
9	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A NÁSTROJE.....	48
9.1	UNIVERZÁLNÍ FRÉZKA DMU 50.....	48
9.2	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	49
9.2.1	Dynamometr Kistler Type 9129AA.....	49
9.2.2	Drsnoměr Mitutoyo SJ – 410	50
9.2.3	Instrumentovaná zkouška tvrdosti.....	50
9.3	POUŽITÉ NÁSTROJE.....	51
9.3.1	Cermetová destička (LPHT060310TR-M06 MS2050).....	51
9.3.2	Frézovací hlava (R217.21-1020.RE-LP06.3A).....	52
9.3.3	Upínací trn (E347658201060).....	52
10	PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	53
10.1	PŘÍPRAVA POLOTOVARU	53
10.2	UPNUTÍ VZORKU DO DYNAMOMETRU KISTLER.....	54
11	EXPERIMENT.....	55
11.1	POSTUP MĚŘENÍ.....	56
11.2	ZPRACOVÁNÍ DAT.....	57
12	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....	59
12.1	ŘEZNÉ SÍLY – F_x , F_x , F_z	59
12.2	TVRDOST DLE VICKERSE – HVIT	63
12.3	DRSNOST – R_A	67
13	DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	69
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	79
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	80
	SEZNAM TABULEK.....	82
	SEZNAM PŘÍLOH.....	83

ÚVOD

Třískové obrábění prošlo podstatnou částí vývoje ve stejném čase jako průmyslová revoluce, tedy v 18. a 19. století. Od té doby řada metod obrábění, nástrojových materiálů, obráběných materiálů a výrobních strojů zaznamenala znatelný vývoj.

V dnešní době jsou kladeny vyšší požadavky na rozměrovou a tvarovou přesnost a kvalitu povrchu při vysoké produktivitě výroby. S vyššími požadavky dochází k rozvoji nových metod obrábění, s čímž souvisí další inovace nástrojových materiálů a nástrojů, upínacích systémů a výrobních zařízení. Ekologické hledisko je v současnosti taktéž často diskutovaným tématem. Dochází ke snaze snížit využití procesních kapalin ve výrobním procesu, jelikož jejich ekologická likvidace je ekonomicky nákladná. Proto se některé novodobé metody obrábění dokážou obejít bez procesních kapalin, tedy bez negativního vlivu na obrobený materiál. Správně zvolené řezné parametry mohou snížit zpevnění materiálu v obrobeném povrchu, zlepšit drsnost a stálost povrchu.

Taktéž se novodobé technologie obrábění snaží snížit počet dokončovacích operací. Klade se důraz na hrubovací operace a využití různých druhů řezných materiálů, případně povlaků, jelikož dochází k velkému opotřebení řezných nástrojů. Ty mají poté negativní vliv na výsledné zpevnění povrchu po hrubování, a tím může u dokončování docházet k velkému opotřebení nástrojů, zvýšení ceny za výrobu, případně stabilitu procesu obrábění.

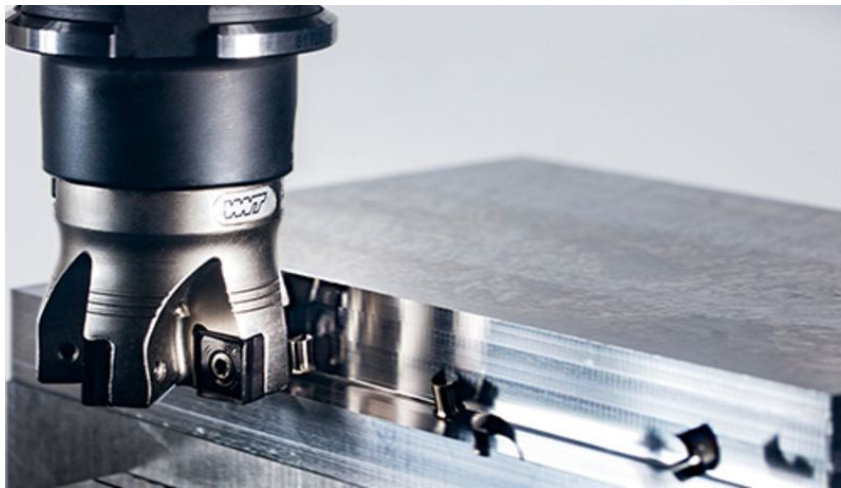
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je jedna z nejpoužívanějších metod obrábění, při které břit otáčejícího se nástroje odebírá z obrobku materiál ve formě třísky. Nástrojem je vícezubý rotační nástroj – fréza. Zuby frézy jsou umístěny od sebe, díky tomu každý zub odebere třísku o stejné tloušťce. Některé frézy se vyrábí s nepravidelnou roztečí zubů nebo se zuby ve šroubovici kvůli snížení náchylnosti ke vzniku chvění. V dnešní době lze obrábět nejen kovy, ale také plasty a kompozitní materiály. [1, 2, 3]

Hlavní řezný pohyb tedy vykonává fréza, která rotuje kolem své osy. Obrobek, který je připevněn k pracovnímu stolu, koná nejčastěji posuv, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. Celý proces frézování se skládá z rotačního pohybu nástroje a přímočarého pohybu obrobku. [1, 2, 3]

Frézováním se obrábějí rovinné plochy, tvarové plochy kolmé k jedné rovině, plochy otáčející se, ozubeného kola nebo zcela obecné plochy obrobku (Obr. 1). Za pomoci nejrůznějších nástrojů lze také frézovat složité tvary, drážky na rotačních plochách apod. [1, 2, 3]



Obr. 1. Frézování [4]

Ze způsobu záběru frézy lze rozeznat frézování válcové (frézování obvodem) a čelní (frézování čelem), z kterých se dále odvozují další způsoby, jako např. frézování okružní a planetové. Podle smyslu posuvu obrobku a otáčení nástroje se frézování dělí na sousledné a nesousledné. [1, 2, 3, 5]

Na výslednou tvarovou přesnost, drsnost a vzhled má vliv nejenom geometrie nástroje ale také i vhodná volba řezných podmínek pro daný typ materiálu, ostrost a opotřebení

nástroje, správné upnutí obrobku, seřízení stroje atd. Faktory ovlivňující drsnost povrchu jsou zvolené řezné podmínky, jako jsou řezná rychlost a posuv na zub, v praxi také často posuvová rychlost. Řezné podmínky se volí dle požadované jakosti, typu práce a druhu použité frézy. [1, 2, 3]

1.1 Princip frézování

Princip frézování popisuje kinematika pohybu mezi nástrojem a obrobkem. Dílčí pohyby, rychlost a směr nástroje vzhledem k obrobku a opačně lze rozdělit do více kategorií. [1]

1.1.1 Pohyby při frézování

Pohyby jsou rozděleny na hlavní, posuvné a řezné. [1]

Hlavní pohyb je realizován mezi obrobkem a samotným nástrojem. Hlavní rotační pohyb vykonává vřeteno obráběcího stroje. U frézování koná rotační pohyb nástroj – fréza. [1]

Posuvný pohyb je další relativní pohyb mezi obrobkem a nástrojem. Tento pohyb realizuje obráběcí stroj – vřeteno stroje. Společně posuvný a hlavní pohyb umožňují přerušované nebo plynulé odřezávání třísky z obráběného povrchu. Posuvný pohyb lze vykonávat jako postupný nebo plynulý. [1]

Řezný pohyb kombinace pohybu hlavního a posuvného. [1]

1.1.2 Směr pohybu

Směry pohybu se skládají z hlavního a posuvového pohybu. [1]

Směr hlavního pohybu je určen hlavním pohybem okamžitého bodu ostří vůči obrobku v daném okamžiku. [1]

Směr posuvného pohybu je definován posuvným pohybem okamžitého bodu ostří vůči obrobku v daném okamžiku. [1]

1.1.3 Rychlosti pohybu

Řezná rychlost je definování hlavního pohybu bodu ostří nástroje vůči obrobku v daném okamžiku. [1]

Posuvová rychlost vyjadřuje okamžitou rychlost posuvového pohybu bodu ostří nástroje vůči obrobku v daném okamžiku. Pokud je posuv přerušovaný, jeho rychlost není definována. [1]

1.2 Čelní frézování

Pro čelní frézování, Obr. 2, se používají čelní frézy, kde břity jsou umístěny na čele i obvodu frézy. Při frézování je osa frézy kolmá k frézované ploše, z které se odděluje tříška břity umístěné na čele. Břity u stopkové frézy mohou oddělovat třísku pouze na obvodu. V takovém případě je obráběná plocha rovnoběžná s osou frézy. [1, 2, 5]

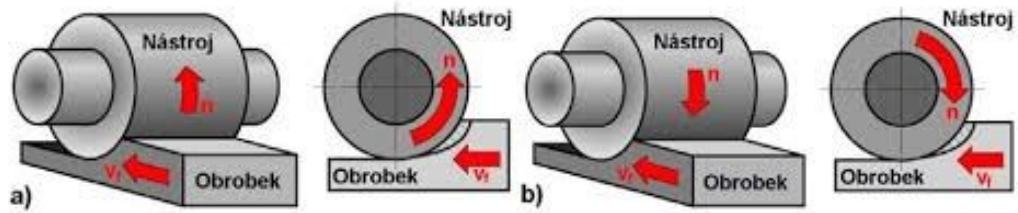
Vysoko výkonné čelní frézy (frézy, u kterých dochází k úběru velkého množství materiálu), se do průměru 25 mm vyrábí jako monolitní frézy ze stelitů nebo ze slinutých karbidů pomocí metody práškové metalurgie. [5]



Obr. 2. Čelní frézování [6]

1.3 Válcové frézování

Princip válcového frézování (viz. Obr. 3) spočívá oddělování materiálu břity, které jsou umístěny na obvodu frézy. Osa frézy je tedy kolmá ke směru posuvu. Výsledná dráha břitu nástroje je prodloužená cykloida, která je tvořena otáčivým pohybem břitu nástroje a podélným, přímočarým pohybem obrobku. Směr posuvu obrobku vůči otáčivému směru frézy určuje, zda se jedná o frézování nesousledné nebo sousledné. [1, 2, 3]

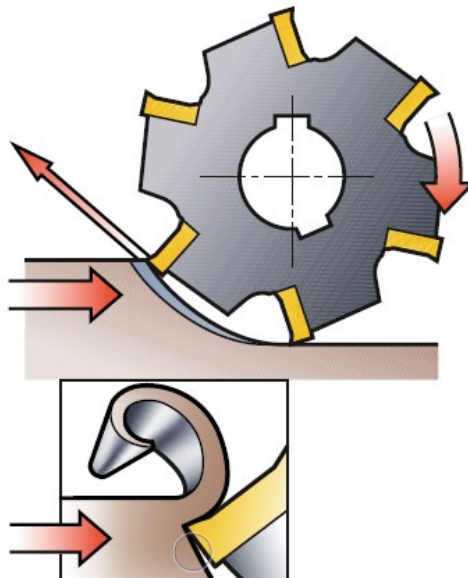


Obr. 3. Válcové frézování [7]

a) *nesousledné* b) *sousedné*

1.4 Nesousledné frézování

Princip nesousledné frézování, Obr. 4, spočívá ve smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Při tomto typu frézování se hodnota tloušťky třísky postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. Oddělení třísky od obrobku nedochází v nulové hodnotě třísky, ale až po určitém skluzu břitu po ploše (dochází k opotřebení hřbetu nástroje), která byla vytvořena předchozím zubem. Při protisměrném frézování vznikají účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení břitu (zaoblení ostří). Vzniklá řezná síla má složku (radiální), která působí směrem nahoru a tím odtahuje obrobek od stolu. Kvůli tomu se klade velký důraz na upnutí obrobku. [1, 3, 4]



Obr. 4. Nesousledné frézování [8]

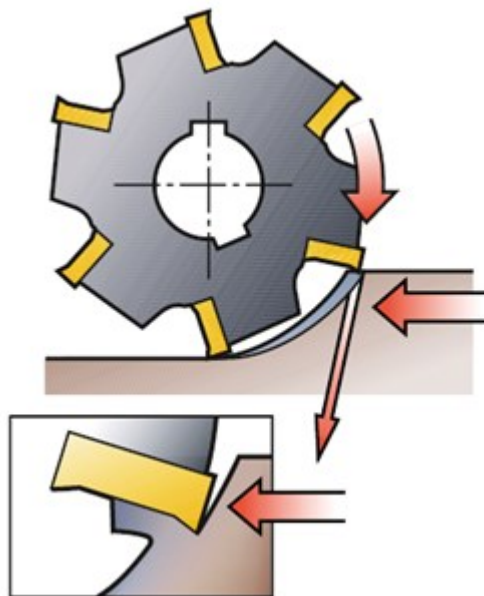
Oproti souslednému frézování zde není potřeba vymezovat vůle mezi maticí stolu stroje a posuvným šroubem, tím zde dochází k menšímu opotřebení šroubu a matice. [1]

Nesousledné frézování je vhodné při obrábění nerovnoměrného přídavku a při použití keramických břitových destiček.

1.5 Sousedné frézování

Při sousledném frézování, na Obr. 5, je posuv obrobku ve směru rotace nástroje. Břit tak začíná řez nárazem do materiálu. Maximální hodnota tloušťky třísky je tedy při vniknutí zubu frézy do obrobku. Tloušťka třísky během frézování klesá, taktéž klesá i řezná síla (fréza je od obrobku odtlačována). Kvalita obrobeného povrchu (menší drsnost obrobeného povrchu), s porovnáním s nesousledným frézováním, je lepší. Taktéž je zde vyšší trvanlivost břitů, což dovoluje obrábět ve vyšších řezných rychlostech a posuvech. Zároveň je zde potřebný menší výkon. [1, 3]

Sousedné frézování může být prováděno jen na přizpůsobeném stroji, u kterého jsou vymezené vůle a přepětí mezi maticí stolu frézky a posuvovým šroubem. Pokud bude mít posuvový mechanismus vůli, může dojít k poškození nástroje i stroje. Souměrným frézováním nelze obrábět odlitky a válcové polotovary. [1, 3]

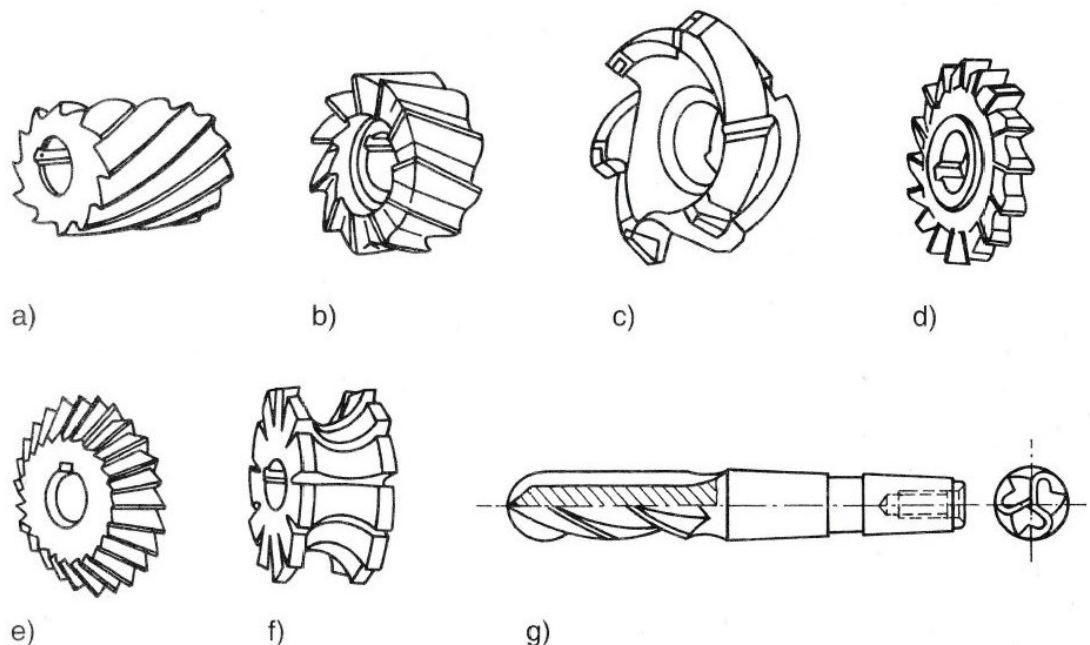


Obr. 5. Sousedné frézování [8]

2 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY A OPOTŘEBENÍ

Nástroje pro frézování (tzv. frézy) lze dělit z různých hledisek – podle umístění břitů, průběhu ostří, tvarů zubů, upínání a konstrukce (Obr. 6).

- a) Podle umístění břitů fréz: válcové, čelní, kotoučové, kuželové a tvarové
- b) Podle tvaru zubů: s frézovanými zuby a s podsoustruženými zuby
- c) Podle průběhu ostří zubů frézy: s přímými zuby (zuby rovnoběžné s osou), stopkové, se zuby do šroubovice (pravotočivé nebo levotočivé) a nástrčné
- d) Podle konstrukce frézy: celistvé (monolitní), s vyměnitelnými břitovými destičkami a skládané [5]



Obr. 6. Některé druhy fréz [5]

- a) válcová, b) čelní, c) frézovací hlava, d) kotoučová, e) kuželová, f) tvarová, g) stopková s kulovým čelem [5]

2.1 Nástrojové materiály

Na vlastnostech řezné části nástroje závisí průběh a výstupy řezného procesu, proto musí být nástroje vyrobeny z příslušných materiálů. Jejich hlavními vlastnostmi je houževnatost, tvrdost, tepelná vodivost, odolnost proti opotřebení a pevnost v ohybu. Tvrdost nástroje musí převyšovat tvrdost obrobku o 5 až 6 HRC. Uvedené vlastnosti by materiály měly splňovat při vyšších a vysokých teplotách po dostatečně dlouhou dobu. Další požadavky na

nástrojové materiály jsou také vysoká řezivost, vysoký řezný výkon, který je kvantifikovaný velkým minutovým úběrem obráběného materiálu a odolnost proti teplotním a mechanickým rázům. [1,2]

Z rychlořezné oceli se vyrábějí celistvé frézy, a to buď přesným litím nebo obráběním. Rozměrově malé frézy se vyrábí taktéž celistvé, ovšem ze slinutých karbidů. Vyměnitelné břitové destičky (VBD) u fréz mají zuby vyrobené z keramiky, rychlořezné oceli, slinutého karbidu nebo polykrystalického kubického nitridu boru. Břitové destičky se mohou k tělesu připájet nebo mechanicky upnout. Tělesa fréz jsou vyrobena z konstrukčních ocelí vyšší pevnosti. [5]

Kalené oceli lze obrábět frézou s destičkami z polykrystalického kubického nitridu boru. Pro obrábění litiny se pak používá keramická břitová destička, která je mechanicky upnuta k tělesu frézy. [5]

V poslední době se některé typy fréz z rychlořezných ocelí, zejména válcové a čelní frézy většího průměru, téměř nepoužívají. Byly nahrazeny frézovacími hlavy s vyměnitelnými břitovými destičkami. [5]

2.1.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli se zařazují do oceli třídy 19. U těchto ocelí je požadavek na vysokou pevnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení, dostatečná houževnatost, leštitelnost a vhodná tepelná prokalitelnost. Vlastnosti nástrojových ocelí lze měnit za pomoci chemického složení a vhodného tepleného zpracování.

Nástrojové oceli jsou technicky významné, proto jim byla vyhrazena samostatná třída, která obsahuje na 70 značek ocelí. Označení je uvedeno v Tab. 1. [9]

Oceli třídy 19 lze rozdělit do několika skupin:

- Nelegované nástrojové oceli
- Legované nástrojové oceli
- Rychlořezné nástrojové oceli

Tab. 1. Nástrojové oceli [9]

Číselná značka		Význam třetí číslice v značce oceli
19 0xx 19 1xx 19 2xx	Nástrojové oceli nelegované	dvojčíslí ze 3. a 4. číslice vyjadřuje střední obsah uhlíku
19 3xx	Nástrojové oceli legované	oceli křemíkové, manganové, vanadové
19 4xx		oceli chromové
19 5xx		oceli chrommolybdenové
19 6xx		oceli niklové
19 7xx		oceli wolframové
19 8xx		oceli rychlořezné
19 9xx		volné

Nelegované nástrojové oceli

Vlastnosti nelegovaných nástrojových ocelí jsou nejvíce ovlivněny obsahem uhlíku. Většina nelegovaných ocelí má obsah uhlíku od 0,7 do 1,5 %. Maximální tvrdost oceli, cca 67 HRC, je dosažena při obsahu 1 % C. Se vzrůstajícím obsahem uhlíku se tvrdost oceli zásadně nemění, dochází k zvyšování obsahu cementitu, který má za následek zvýšení rezivosti a odolnosti proti otěru. Avšak do určité míry klesá houževnatost.

Podle obsahu uhlíku lze rozdělit nelegované oceli do skupin:

- od 0,7 % C – oceli velmi houževnaté
- 0,8 – 0,9 %C – oceli houževnaté
- 0,95 – 1,2 % C – oceli houževnaté tvrdé
- 1,25 – 1,35 % C – oceli tvrdé
- nad 1,4 % C – oceli velmi tvrdé [9]

Legované nástrojové oceli

V dnešní době se stále zvyšují požadavky na vlastnosti nástrojových materiálů. Tam kde nestačí nelegované oceli, jsou nahrazeny kvalitnějšími legovanými oceli. Mezi legovací prvky patří hlavně dvě skupiny prvků, a to karbidotvorné (Cr, Mo, V, W) a nekarbidotvorné (Si, Ni, Co). Karbidotvorné prvky vytváří tvrdé, do vysoké teploty stále karbidy.

U legovaných ocelí je značný požadavek na výkon a životnost nástroje. Vyrábí se z nich tvářecí, řezací, stříhací a jiné druhy nástrojů. Jedná se velikostně o nástroje členité, malé, střední a velké.

Legované oceli jsou oproti nelegovaným ocelím typické zvýšenou odolností proti popouštění a větší prokalitelností, jsou ovšem náročnější na tepelné zpracování. [9]

Dle provozních podmínek lze nástrojové legované oceli rozdělit do skupin:

Legované nástrojové oceli pro práci za studena

- požadavky: vysoká tvrdost, odolnost proti otěru, dobrá řezivost při vyhovující prokalitelnosti a houževnatosti
- hlavní legující prvek chróm, podle požadovaných vlastností ještě V, Ni, W a Mo v různých kombinacích

Legované nástrojové oceli pro práci za tepla

- požadavky: vysoká houževnatost při značné prokalitelnosti a pevnosti, velká odolnost proti popouštění
- chemické složení: menší obsah C, než oceli pro práci za studena, vyšší obsah W (až 15 %) [9]

Legující prvky, které se používají k dosažení požadovaných vlastností jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2. Vlastnosti legujících prvků [9]

Titan (Ti)	používá se jako povlak pro zvýšení kluzných vlastností
Chrom (Cr)	zvyšuje mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi
Molybden (Mo)	zvyšuje tvrdost, houževnatost a odolnost proti kyselinám
Wolfram (W)	zlepšuje prokalitelnost, odolnost proti ztrátě pevnosti při popouštění, odolnost proti opotřebení, vyvolává vytvrzení
Kobalt (Co)	zvyšuje tvrdost, odolnost proti otěru, zvýšeným teplotám
Vanadium (V)	zvětšuje se prokalitelnost, odolnost proti ztrátě pevnosti při popouštění, vyvolává vytvrzení

Rychlořezné nástrojové oceli

Rychlořezné nástrojové oceli tvoří samostatnou skupinu. Jedná se o vysokolegované nástrojové oceli, z kterých se vyrábí výkonné a vysoce výkonné řezné nástroje, taktéž nástroje pro tváření za studena. Od legovaných nástrojových ocelí se liší jak obsahem

legur, tak podmínkami tepelného zpracování. V zakaleném a popuštěném stavu mají vysokou tvrdost, velkou odolnost proti otěru, řezivost, a především odolnost proti popouštění oproti legovaným a nelegovaným nástrojovým ocelím. I při teplotě okolo 600 °C si zachovávají vysokou tvrdost. Mezi hlavní legující prvky patří Cr, Mo, W, Co, V (Tab. 2). Pro oceli, z kterých se vyrábí nejvíce namáhané nástroje se používá ještě legující prvek kobalt. [9]

2.1.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy se vyrábí metodou práškové metalurgie spékáním karbidů titanu (TiC), wolframu (WC), Cr, Ta a dalších kovů. Pro pojivo karbidů při spékání se používá kobalt. Slinuté karbidy mají stejnou tvrdost jako stellity. Díky tomu se neprovádí tepelné zpracování ke zvýšení tvrdosti. Břity ze slinutých karbidů snášejí zahřátí až na teplotu 900°C. [1]

Otěruvzdornost slinutých karbidů je lepší než u rychlořezných ocelí, ovšem jsou křehké. Jsou těžko obrobitelné a mají sklon k vydrolování břitů. [1]

Slinuté karbidy lze rozdělit do dvou základních skupin:

- a) Nepovlakové slinuté karbidy
- b) Povlakové slinuté karbidy

Nepovlakové slinuté karbidy

Z hlediska řezného procesu, dle ISO, se rozdělují do tří skupin:

- P – slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající plynulou třísku
- M – slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající krátkou i plynulou třísku
- K – slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající krátkou třísku [1]

Povlakové slinuté karbidy

Povlaky se dají rozdělit do dvou hlavních skupin:

- Jednovrstvé (TiCN, TiC, TiN, tloušťka až 13 μm)
- Vícevrstvé (složeny z dvou, tří i více vrstev) [10]

2.1.3 Stellity

Tvrdost a řezivost stelitů je dána přítomností velkého množství karbidů wolframu a chromu. Řezné slitiny stelitů obsahují 20 až 40 % Cr, 10 až 30 % W, 2 až 4 % C a 30 až 55 % Co. Dále obsahují menší množství molybdenu, niklu a dalších prvků. Ve stellitech je

také obsaženo železo, které je ve slitině bráno jako nečistota. Proto by ho nemělo být víc než 10 %. Jelikož jsou stělitelny křehké a běžnými nástroji neobrobitelné, vyrábí se odléváním, a to buď jako břitové destičky nebo vcelku. Po odlití dochází pouze k přebroušení. Tepelné zpracování se u těchto materiálů neprovádí. [1]

2.1.4 Keramické řezné materiály

Keramický materiál je převážně charakterizován jako krystalický materiál, u kterého hlavní složku tvoří anorganické sloučeniny nekovového charakteru. V definici jsou zahrnuty tradiční keramiky (cement, cihly, porcelán), brousící materiály ale i řada „nových“ keramických látek (oxidová keramika, nitridy, ferity, feroelektrika a další). [10]

Neexistuje konkrétní norma, která dělí a značí keramické řezné materiály, ovšem všeobecně je lze rozdělit podle vlastností, chemického složení a použití na:

A) Oxidová keramika

Oxidovou keramiku lze dále rozdělit na čistou (symbol CA), polo směšnou (symbol CA) a směšnou keramiku (symbol CM).

B) Nitridová keramika

Nitridová keramika nese symbol CN. [10]

U keramických materiálů se kombinací látek dosahuje vyžadovaných vlastností pro daný typ použití. Proto se materiály mimo jiné používají pro výrobu řezných nástrojů, kde se používají díky svým vlastnostem:

- Vysoká tvrdost
- Odolnost proti vlivu vysokých teplot (u některých materiálů i odolnost proti náhlé změně teploty)
- Odolnost vůči mechanickému namáhání (především tlak)
- Odolnost proti chemickým vlivům a korozi
- Odolnosti proti opotřebení (vysoká trvanlivost a řezivost)
- Dostupnost základních surovin
- Nízká měrná hmotnost [10]

Kromě výroby řezných nástrojů, se keramické materiály používají zejména v konstrukčních aplikacích (stavebnictví, elektrotechnika, medicína, fyzikální a chemické aplikace, tepelné aplikace, a další). [10]

2.1.5 Supertvrdé řezné materiály

Ve skupině supertvrdých řezných materiálů, které se v současnosti ve světě používají, se nachází kromě řezné keramiky také dva další syntetické řezné materiály.

- Polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB)
- Polykrystalický diamant (PD)

Jejich rozsah využití se ukáže v nejbližší budoucnosti, jelikož je jejich hlavní nevýhodou jejich vysoká pořizovací cena. V současné době patří kubický nitrid bóru a diamant mezi nejtvrdší materiály. Do skupiny supertvrdých řezných materiálů lze uvést i diamantové brousící pasty, diamantové prášky, prášky kubického nitridu bóru, brousící kotouče obsahující tyto tvrdé částice a kompozitní materiál. [1]

Polykrystalický diamant (PD)

Využívá se k obrábění všech neželezných kovů a nekovových materiálů (měď, mosaz, bronz, hliník a jeho slitiny, kaučuky, sklolamináty, apod...). Jsou to materiály, u kterých teplota tání leží pod 700 °C, protože diamant má nízkou teplotu stálosti, při dosažení teplot nad 650 °C dochází k jeho přeměně na grafit. Při takových teplotách by tedy docházelo k velmi rychlému opotřebení v důsledku chemické reakce (hlavně na čele nástroje), která by vznikala mezi nástrojem a obráběným materiálem. PD se vyrábí technologií slinování jemných krystalů diamantů, za pomoci tlaků a vysokých teplot. Uspořádání krystalů je zcela náhodné a nevytváří místa, kde by později mohl vzniknout lom. Z polykrystalického diamantu se vyrábí břitové destičky. Ty jsou upevněny na vyměnitelné destičky (nejčastěji ze slinutých karbidů). Tímto je zaručena odolnost proti tepelným a rázovým šokům. [1, 10]

Polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB)

PKNB se využívá pro obrábění (soustružení, frézování) kalených ocelí i tvrzených litin, kobaltových a niklových slitin. Výhodně nahrazuje operaci broušení při dokončování obrábění. Jedná se o tvrdý řezný materiál, který se svou tvrdostí blíží k tvrdosti diamantu. Při výrobě dochází ke spojení kubického nitridu bóru s kovovým nebo keramickým pojivem, za pomoci tlaků a vysokých teplot. Výsledkem je neuspořádaná struktura s velmi hustou polykrystalickou strukturou. Svou strukturou se velmi podobá syntetickému

diamantu. PKNB je dostupný jako řezný segment vyměnitelné břitové destičky vyrobené ze slinutých karbidů, nebo také jako monolitická vyměnitelná destička z polykrystalického kubického nitridu bóru. [1, 10]

2.2 Opotřebení břitů nástrojů

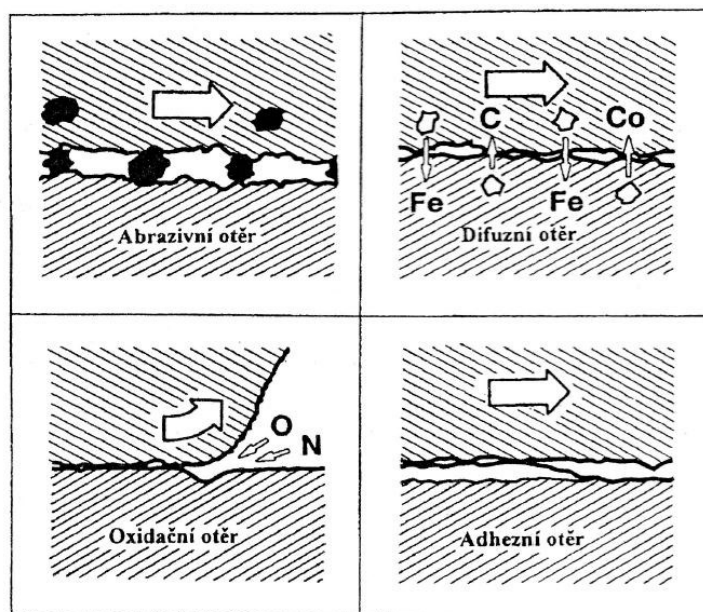
Během obrábění dochází ke vzniku velkého množství tepla, které se vytváří na ploše hřbetu a čela nástroje. Vlivem tepla dochází k značnému namáhání materiálu břitu nástroje. Při frézování se mohou vytvářet také dynamické faktory v okamžiku, kdy břit nástroje vystupuje z materiálu a opět do něj vniká.

Proces formování třísek nepřetržitě vytváří čistý kovový povrch za vysokého tlaku a vysoké teploty, což je náchylné k chemickým reakcím nebo difuzním procesům. Většina obráběných materiálů obsahuje různé tvrdé částice a jejich tvrdost se neliší od tvrdosti materiálu břitu nástroje. Tyto částice mají brousící, případně abrazivní efekt.

Kombinace tepelných, mechanických, chemických a abrazivních faktorů vytváří složité zatížení břitu nástroje, toto zatížení se projevuje jako opotřebení nástroje. [1]

2.2.1 Mechanismus opotřebení

Na základě analýzy faktoru zatížení břitů nástroje lze určit základní mechanismus opotřebení – difuzní, abrazivní, oxidační a adhezni otěr, jejich schéma jsou vyobrazena na Obr. 7. [1]



Obr. 7. Základní mechanismy opotřebení břitu nástroje [1]

- **Abrazivní otěr** vzniká vlivem tvrdých částic v materiálu obrobku. V podstatě je to podobné jako u broušení, kdy se tvrdé částice dostávají mezi povrch nástroje a obrobku. Zásadní vliv má abrazivní otěr při nízkých řezných rychlostech, kdy dochází ke styku materiálu na vrcholcích mikronerovností.

Odolnost proti brusnému otěru je z velké části závislá na tvrdosti materiálu. Pokud řezný materiál obsahuje hustou strukturu tvrdých částic, bude otěru odolávat dobře. To ovšem není záruka, bude sice odolávat brusnému otěru, ale nemusí stejně dobře odolávat jiným opotřebením. Abrazivní otěr se vyskytuje při obrábění nástroji, které jsou vyrobeny z rychlořezných a nástrojových ocelí. [1]

- **Difuzní otěr** vzniká při obrábění vlivem působení chemických vlivů. Rozhodujícím činitelem pro vznik a průběh difuzního opotřebením jsou chemické vlastnosti řezného materiálu a afinita vzhledem k materiálu obrobku. Tvrdost nemá takový vliv na tento proces, oproti abrazivnímu otěru. Podíl difuzního opotřebením na celkovém opotřebením je určen chemickým složením materiálu obrobku a materiálu řezného nástroje.

Stupně afinity se mohou lišit. Některé řezné materiály s materiálem obrobkem reagují, některé zase naopak téměř vůbec. Difuzní otěr se vytvoří za vysokých řezných rychlostí a vysokých teplot, v tu chvíli dochází ke vzniku největších žlábků na čele břitu břitových destiček. [1]

- **Oxidační otěr** je oxidační opotřebením, které vzniká na řezném nástroji. Opotřebením je spojeno s vysokými teplotami řezného procesu a okolním vzduchem, který oxidaci podporuje. Oxidy, které vznikají na povrchu, mají rozdílné působení. U kobaltu a wolframu se tvoří porézní filmy oxidu, které se snadno odstraňují za pomoci třísky. Na druhou stranu oxidy (např. hlinitý), jsou výrazně tvrdší a pevnější. Vzduch má speciálně přístup v místě kontaktu břitu (kde končí šířka třísky) do řezného procesu, v tomto místě vzniká oxidační žlabky, které jsou v současné výrobě relativně vzácným fenoménem. [1]
- **Adhezní otěr** vzniká důsledkem adhezivních spojů mezi obrobkem a nástrojem, kde dochází k vytrhávání částic břitu. Otěr se nachází na čele břitu nástroje, při nízkých obráběcích teplotách. Může se vyskytovat jak u materiálů s krátkou třískou, tak u ocelí tvořící dlouhou třísku. Adhezivní spojení vzniká při nižších řezných rychlostech, kdy vznikne bodový styk mezi nástrojem a třískou. Jedná se o

dynamický průběh s narůstáním vrstev, kdy částice z třísky jsou navařovány a vytvrzovány na břit. Nárůstky mohou tvořit základ pro další nárůstky nebo mohou poškodit břit výlomem nebo vydrolováním. Adhezivní otěr vzniká především u obrábění nástroji z rychlořezných a nástrojových ocelí. [1]

2.2.2 Trvanlivost břitu nástroje

Trvanlivostí břitu nástroje se označuje doba trvání řezného procesu, který je spojen s provozuschopným stavem břitu. Je to tedy pracovní čas, při kterém je nástroj schopný efektivně plnit svoji funkci za předem stanovených parametrů. Trvanlivost je tedy znázorněna intervalem mezi začátkem používání nástroje až do vzniku poruchy, Do vzniku poruchy, tím dojde ke konci provozuschopnosti nástroje.

Dle různých hledisek, lze rozdělit poruchy nástroje. Z technologického hlediska se rozlišují poruchy postupné a náhlé. Postupná porucha je zaviněna postupným opotřebením nástroje a náhlá vzniká za náhlých změn parametrů, kde může dojít např. k vylámaní břitu. Poruchy postupné lze z časového hlediska predikovat. Zatímco náhlé poruchy předpovídat prakticky nelze.

Mezi kritéria, která ovlivňují vznik poruchy, případně ukončení provozuschopnosti nástroje, lze zařadit řezné podmínky, úchytky rozměrů obráběné plochy, drsnost obráběné plochy apod.

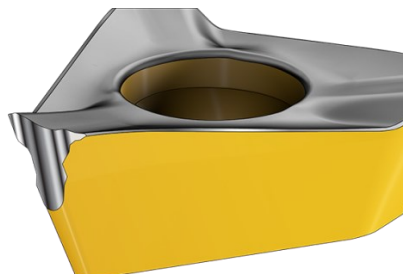
Řezné nástroje se z hlediska spolehlivosti rozdělují na neobnovitelné a obnovitelné nástroje. U neobnovitelných se po vzniku poruchy neobnovuje jeho provozuschopný stav (přebroušení apod.). Tím je tedy trvanlivost nástroje identická s jeho životností. Obnovitelné nástroje lze po vzniku poruchy upravit, aby mohly být navráceny do provozuschopnosti (např. přeastření šroubovitého vrtáku, přebroušení řezných hran apod.). Trvanlivost (případně životnost) nástroje se vyjadřuje v řezném čase [min] nebo jako dráha řezu [m, km]. [1]

2.2.3 Druhy opotřebení břitů fréz

Při obrábění se opotřebovává řezný nástroj, s jehož rostoucím opotřebením se zhoršuje kvalita obroběného povrchu. Opotřebením hřbetu nástroje se mění rozměry obráběného dílu, jelikož se mění rozměry nástroje. Do opotřebení břitu fréz můžeme zařadit:

a) Zlomení břitové destičky

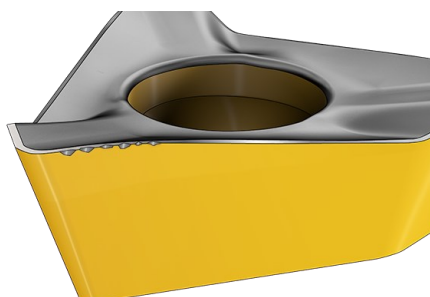
Pokud dojde ke zlomení břitové destičky, Obr. 8, musí se frézování okamžitě zastavit a destička vyměnit. Příčina může být v přetížení při velkém posuvu nebo špatném upevnění destičky na tělese frézy.



Obr. 8. Zlomení břitové destičky [11]

b) Vylamování hran

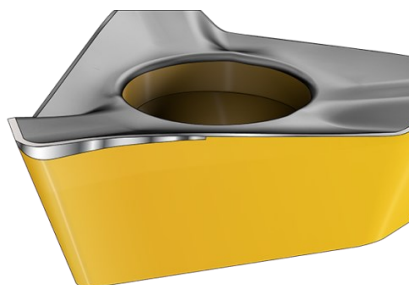
Příčina vylámání hran (viz. Obr. 9) může být kolísání teploty, velká řezná síla, nevýhodná poloha frézy vzhledem k obrobku nebo malý úhel břitu. K vylámání dochází u křehkých a tvrdých destiček.



Obr. 9. Vylámání hran břitu [11]

c) Opotřebení hřbetu

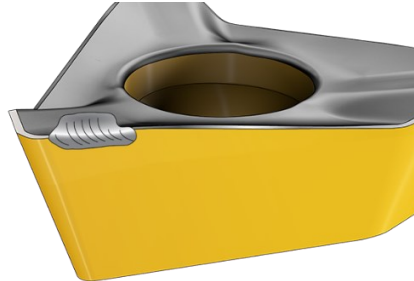
Obzvláště veliké opotřebení hřbetu Obr. 10 bývá při podobnosti materiálu obrobku a materiálu břitu (např. nástroj z rychlořezné oceli a ocelový díl).



Obr. 10. Opotřebení hřbetu destičky [11]

d) Vymílání

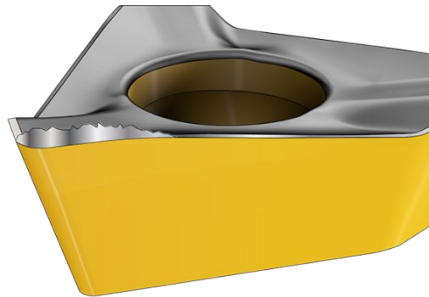
Důsledkem vymílání může dojít k vylomení hran. Povrchu nástroje může být vymílán při obrábění odlitků nebo výkovků. Vymílání je znázorněno na Obr. 11.



Obr. 11. Vymílání destičky [11]

e) Nárůstek

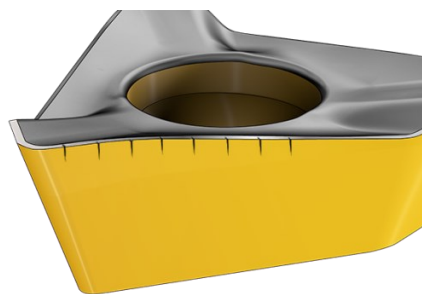
Nárůstek (viz. Obr. 12) vzniká při navařování drobných třísek na ostří. Nejčastěji se tvoří při zpracování ocelí nástroji ze slinutých karbidů nebo rychlořezných ocelí. Tento problém lze vyřešit použitím povlakovaných nástrojů.



Obr. 12. Tvorba nárůstku na destičce [11]

f) Hřebenové trhliny

Hřebenové (tepelné) trhliny jsou způsobeny kolísáním teploty. Teplota způsobuje smršťování a roztahování materiálu. Trhlinky se nachází kolmo k hraně ostří. Znázornění trhlín je na Obr. 13. [3]



Obr. 13. Hřebenové trhliny na destičce [11]

3 UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ PŘI FRÉZOVÁNÍ

Pro dosažení kvalitního frézování je nutné minimalizovat axiální a radiální házení frézy. To znamená, že je u ostřených fréz je nutno dbát na házení trnu a nepřesnosti upnutí. U fréz s vyměnitelnými břitovými destičkami je potřeba hlídat nejen nepřesnosti při upnutí, ale také kontrolovat samotnou výrobní toleranci destičky a těla frézy. Jak radiální či axiální házení by se mělo nacházet v setinách milimetru. [5]

Upínací systém musí splňovat následující požadavky:

- Zaručit minimální radiální a axiální házení nástroje (souosost vřetena a frézy) [5]
- Opakovatelnost upnutí nástroje, bez změny přesnosti
- Pevnost proti protočení a axiálním silám
- Upnutí musí být vhodné pro výrobu ve vysokých otáčkách [3]

3.1.1 Upnutí nástroje

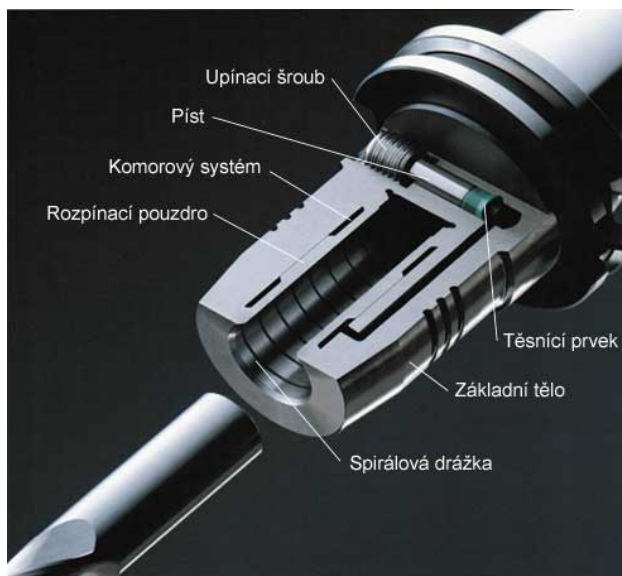
Na upínání válcových nástrčných fréz se používají frézovací trny, které se vyrábí buď metricky s kuželovitostí 1:20, strmý 1:3,5 nebo Morse 1:19 ÷ 1:20. Jelikož jsou Morse a metrický kužel samosvorné, přenáší se kroutící moment z trnu na vřeteno. Na konci frézovacího trnu je zploštěný nákrůžek, který zapadá do obdélníkového vybrání na konci vřetene, díky kterému dochází k dokonalému přenosu kroutícího momentu. Kroutící moment u strmého kuželu se přenáší dvěma kameny upevněnými na čele vřetena. Kužel zapadá přímo do nákrůžku frézovacího trnu. Strmý kužel pouze vystředí trn ve vřetenu. Pro zajištění polohy frézy je volně navlečen rozpěrný kroužek. Na trnu se také nachází vodící pouzdro. [5, 7]

Krátké upínací trny letmo upnuté do vřetena se používají pro upnutí frézovacích hlav a čelních nástrčných fréz. Pro frézy s kuželovou stopkou se využívají redukční pouzdra, ta jsou umístěna přímo ve vřetení frézky. Pouzdra se používají tehdy, pokud se kužel vřetene neshoduje s kuzelem frézovacího trnu. [7]

Frézy s válcovou stopkou se upínají za pomoci sklíčidla s upínacím pouzdem. Pro průměry 3–50 mm se hojně využívají speciální tepelné nebo hydraulické upínače. [7]

Hydraulický rozpínací upínač

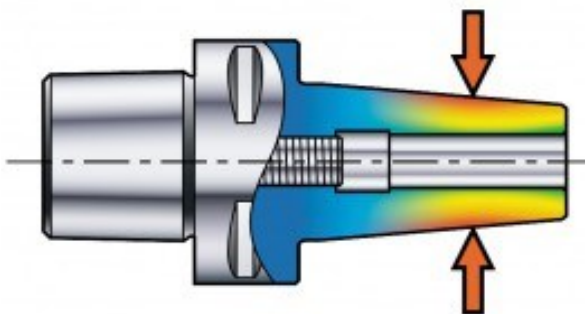
Při utahování upínacího šroubu dochází k pohybu pístu s těsnícím prvkem, a tím narůstá tlak kapaliny v komorovém systému. Za pomoci tohoto tlaku se deformuje rozpínací pouzdro, čímž dojde k upnutí stopky nástroje. Spirálová drážka má za úkol stírat nečistoty na stopce, tím se zvyšuje přesnost upnutí a přenos krouťícího momentu. Popis hydraulického rozpínacího upínače je na Obr. 14. [11]



Obr. 14. Hydraulický rozpínací upínač [12]

Tepelný upínač

Tepelný upínač, na Obr. 15, pracuje na principu smrštění materiálu. Ve sklíčidle se nachází díra, která je o něco menší, než je průměr stopky nástroje. Při výměně nástroje je nutné sklíčidlo zahřát, aby došlo k jeho roztažení. Časově je tento proces tak rychlý, že dojde ke zvýšení teploty nástroje vlivem vedení tepla jen minimálně. Následně se již upnutý nástroj ochladí proudem vzduchu. Opětovným ohřevem ve stejném zařízení, dojde k uvolnění nástroje. [7]



Obr. 15. Tepelný upínač [13]

4 PĚTIOSÉ CNC OBRÁBĚCÍ STROJE

Obráběcí stroje lze rozdělit na konvenční a číslicově řízené obráběcí stroje. Mezi konvenční stroje se řadí „klasické“ stroje jako je soustruh, fréza, bruska apod. Dělíme je tedy podle technologie, na kterou jsou určeny.

U mnoha konvenčních strojů je nutné zadat nastavení ručně, případně pomocí strojních pohybů → je potřeba obsluha. Proto se řezný čas na těchto typech strojích odhaduje na 35 až 45 % z celkového času, ve zbylém času dochází k upnutí nástroje a obrobku, výměně obrobku, nástroje apod.

Číslicově řízené obráběcí stroje nebo také CNC stroje (centra) se řadí do univerzálních strojů. Na jednom stroji je možné použít více výrobních technologií (soustružení, frézování, vrtání apod.).

CNC stroje mají vlastní operační paměť, software a operační systém. Každá osa má svůj vlastní pohybový pohon a umožňuje nám dokonale řídit proces paralelního obrábění na osách. Proces je digitálně řízen pomocí příkazů ze strojového kódu vytvořených programátorem v počítači. Stroj musí být uveden do provozu pouze pro změnu polotovaru nebo pro výběr programu součásti. U automatických linek s automatickou výměnou nástroje a obrobku není třeba pracovat se samotným CNC strojem a celý proces probíhá automaticky pomocí robotů.

Mezi hlavní výhody pětiosého obrábění nebo pětiosých strojů patří schopnost obrábění součásti z několika stran bez nutnosti měnit upnutí. Tyto stroje nám umožňují zpracovávat složité cesty (dráhy) a obrobit tak většinu tvarů. Díky výhodám CNC strojů dosahuje čas řezání 80 až 90 % z celkové času. [2, 14]

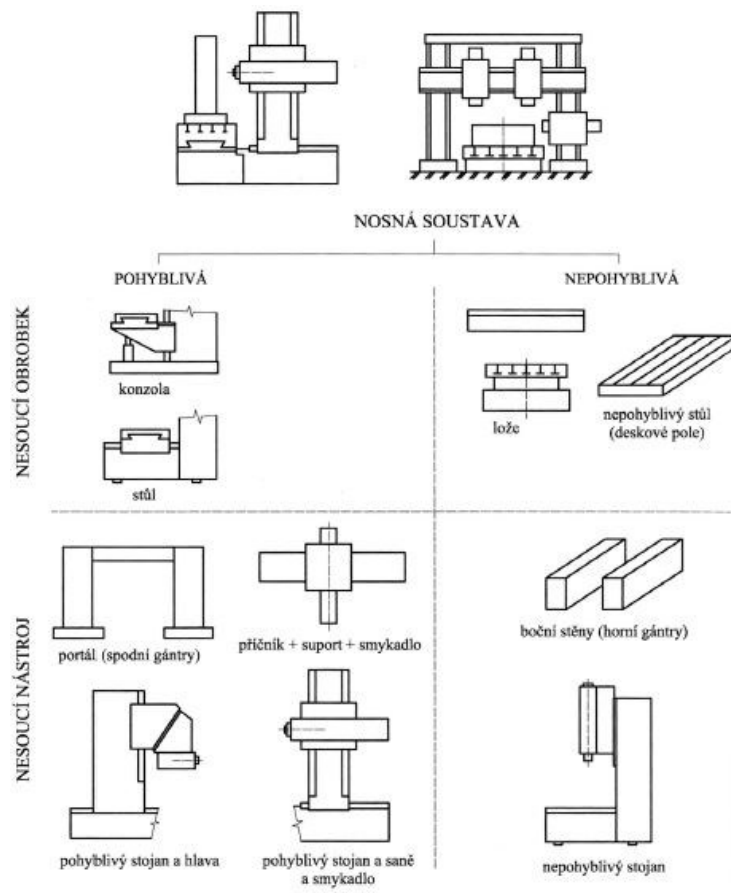
4.1 KONSTRUKCE PĚTIOSÝCH OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

U obráběcích strojů se především kladou požadavky na přesnost a produktivitu výroby. Na požadovanou přesnost výrobku má ve velké míře vliv tuhost soustavy výrobek-nástroj-stroj. Produktivita stroje je řešena zajištěním optimálních řezných podmínek. Úpravou obráběcí strategie, a tedy může dojít ke zkrácení strojního a vedlejšího času → zefektivnění produktivity nebo naopak zhoršení produktivity.

Konstrukce CNC stroje lze rozdělit na nosnou soustavu obráběcího stroje (rám) a na soustavu vřetene. [15]

4.1.1 Nosná soustava obráběcího stroje

Na Obr. 16 je rozdělena nosná soustava. Dělí se na pohyblivou a nepohyblivou soustavu, zároveň také na soustavu nesoucí obrobek a nesoucí nástroj. Konstruktor při navrhování nosné soustavy musí dbát na řadu požadavků, které by soustava měla splňovat. Mezi požadavky lze zařadit použití kvalitního materiálu pro výrobu rámu, efektivnost a jednoduchost výroby rámu, snadnou manipulovatelnost, dobrou statickou tuhost, dobrý odvod třísky, vyhovující tepelnou a dynamickou stabilitu, nízkou hmotnost rámu a další. [15]



Obr. 16. Nosná soustava [15]

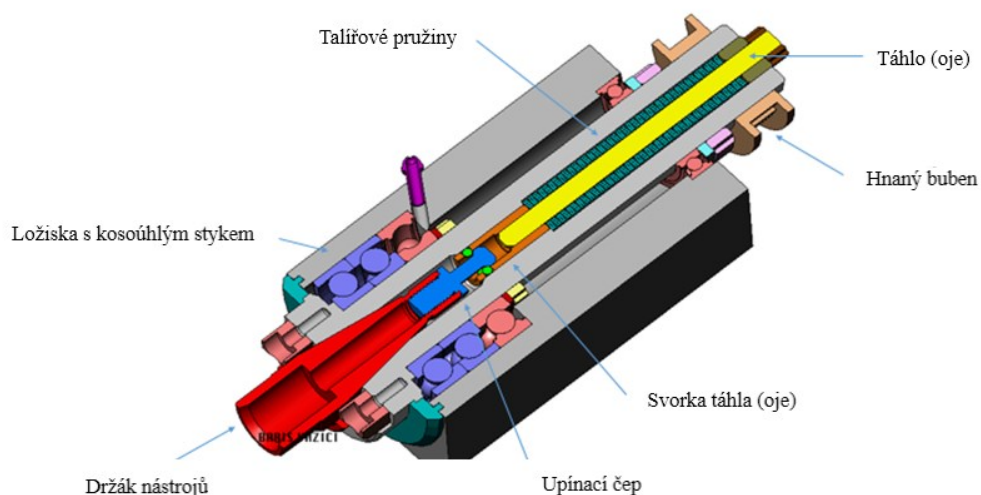
Materiál, ze kterého je nosná soustava vyrobená, musí splňovat základní vlastnosti, jako je vysoká tuhost a pevnost, vysoký útlum chvění, nízké vnitřní pnutí, nízká hmotnost, nízká tepelná roztažnost a vodivost, a co nejvýhodnější cena. Z uvedených vlastností je patrné, že požadavky na nosnou soustavu jsou protichůdné. Proto musí konstruktor volit kompromis mezi uvedenými vlastnostmi, tak aby vyrobený stroj dosahoval požadovaných vlastností (požadavků). Pro výrobu nosné soustavy se využívají různé typy materiálů, nejčastěji šedá litina, oceli i ocelolitiny. Pro dnešní dobu jsou typické i neželezné materiály, jako je beton

a polymer-beton. Nekonvenční materiály se využívají jen zřídka, výrobci sází na osvědčené materiály. Soustava může být zhotovena (odlita) z jednoho kusu nebo svařena z více částí (např. z plechů). [15]

4.1.2 Soustava vřetena

Soustava vřetena (vřeteno), Obr. 17, je přímo spojené se strojním čase, pokud dojde ke zvýšení otáček (frekvence vřetene), dochází ke zvýšení řezné rychlosti a tím dochází ke snižování doby obrábění. Produktivitu stroje ovlivňuje šířka řezu, stabilita, a dokonce i vibrace. Jednotlivé konstrukční uzly a jejich vzájemná interakce limitují přesnost výroby. Vřeteno v tomto bodě hraje důležitou roli, jelikož limituje a ovlivňuje celkovou tuhost stroje a tím ovlivňuje v průběhu obráběcího procesu výslednou rozměrovou stálost a kvalitu výrobku.

Hlavním úkolem vřetene je zajistit přesný rotační pohyb vřetene. Jelikož nelze dosáhnout maximálních otáček vřetene a zároveň maximální tuhosti, musí se volit kompromis mezi těmito požadavky. Podle požadavků obráběcího stroje se navrhuje a vyrábí konkrétní vřeteno. [15]

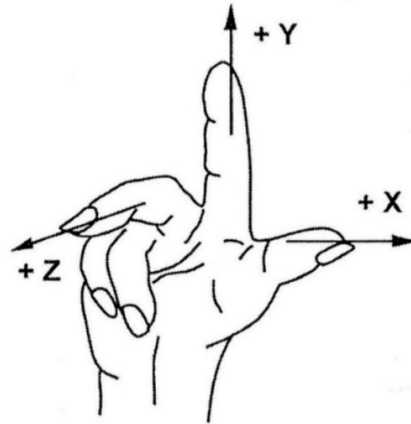


Obr. 17. CNC ATC kazetové vřeteno [16]

4.2 SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM

Stroje využívají kartézského souřadnicového systému. Definice tohoto systému je dána normou ISO. Jedná se o pravotočivý, pravoúhlý systém se základními osami X, Y, Z. Tyto osy jsou doplněny o doplňkové osy např. osy A, B, C, které udávají otáčivý pohyb kolem hlavních os. Dle Obr. 18 je vidět, že ukazováček ukazuje kladný směr osy Y, prostředníček znázorňuje kladnou osu Z a palec kladnou osu X.

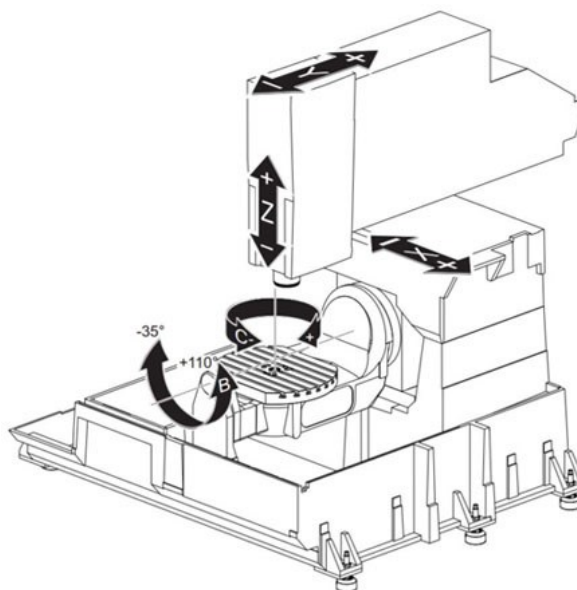
Kartézský souřadnicový systém je využit k řízení stroje a vytváření programu obrábění. Podle potřeby se souřadnicový systém může posouvat, případně naklápět. Pro měření nástrojů (korekce) se umístí souřadnicový systém na špičku nástroje nebo do bodu výměny nástroje. [17,18]



Obr. 18. Definice kartézských souřadnic – pravidlo pravé ruky [17]

4.3 PRINCIP PĚTIOSÉHO FRÉZOVÁNÍ

Princip pětiosého frézování spočívá v obrábění ve všech pěti osách, které jsou vzájemně nezávislé. Je možné se současně pohybovat v lineárních osách X, Y a Z, a souběžně rotovat kolem osy B a C. Stroje obsahují kombinaci obráběcí hlavy a pohyblivého stolu. U většiny případů vřeteno vykonává lineární pohyb v osách X, Y a Z, a pohyblivý stůl s obrobkem provádí rotaci kolem os B a C (viz Obr. 19). [15,17]



Obr. 19. Schéma pohybů stroje v jednotlivých osách frézovacího centra UMC-750 [19]

5 OPERACE PŘI FRÉZOVÁNÍ

U obrábění, při kterém není tvarově náročná kontura nebo není požadována vyšší jakost obráběné plochy, častokrát postačí použít jeden nástroj, případně se upraví řezné podmínky. Pro obrábění náročných kontur je dobré se zamyslet nad strategií obrábění, tedy možnostmi využití více nástrojů. S tím jsou spojeny operace, které mohou být využity na obrábění (předhrubování, hrubování, předdokončování, dokončování, hlazení apod.). [17,20,21]

5.1 Řezné podmínky

Řezné podmínky se specificky volí dle typu práce a také dle použité frézy, obráběného materiálu a prostředí, ve kterém samotné obrábění probíhá. Důležitým faktorem je výsledná kvalita (rozměrová přesnost, drsnost) obráběné plochy, kterou chceme frézováním dosáhnout. Běžně se jedná o řeznou rychlost v_c , posuv na zub f_z a hloubku řezu apod. Doporučené řezné podmínky lze nalézt v odborné literatuře, případně je uvádějí výrobci nástrojů ve svých materiálových listech. [1,20,21]

Vztahy pro výpočet řezných podmínek

Podle typu frézy a obráběného materiálu můžeme volit některé veličiny, jako jsou rychlost posuvu a otáčky vřetene. Ostatní veličiny se poté dopočítají.

- Výpočet velikosti řezné rychlosti v_c frézy:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

D – průměr frézy [mm]

n – otáčky vřetena [min^{-1}]

- Výpočet rychlosti posuvu v_f :

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z [mm \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2)$$

z – počet zubů frézy [-]

f_z – posuv na jeden zub [mm]

- Výpočet posuvu na jeden zub f_z :

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} [mm] [8] \quad (3)$$

5.2 Hrubovací operace

Podstatou hrubování je v co nejkratším čase odebrat co největší objem materiálu a tím docílit požadované kontury pro následné dokončování (předdokončování). Při vhodném nastavení hrubování lze dosáhnout takového tvaru, že se může upustit od předdokončování a následuje pouze dokončování. Hrubování se provádí nejčastěji frézovací hlavou s VBD (vyměnitelné břitové destičky), ale není to podmínkou. Dle tvaru VBD můžeme využít kruhové, čtvercové, popř. kosočtvercové destičky. U kruhových je výhoda plynulého záběru do materiálu. Výhodně se využívají u víceosého obrábění tvarových ploch, kde lze s jejich pomocí kombinovat torické a klasické frézování. U čtvercových (kosočtvercových) destiček je nevýhoda v poměrně velkých radiálních silách, které mají negativní vliv na obrobený povrch. Proces hrubování je znázorněn na Obr. 20.

Při frézování ocelí se stal nezbytným předpokladem sousledný kontinuální záběr břitu frézy. Dráhy frézy se musí volit tak, aby nedocházelo ke krátkým a prudkým klesáním či stoupáním. Proto se u vysokorychlostního frézování osvědčilo kapsovací frézování (tzv. kapsování). Při kapsování se kontura zhotovuje ve spirálové dráze, ve které lze dodržet rovnoměrné záběrové podmínky, při dodržení daných doporučení a omezení. Kromě kapsování lze využívat také frézování lineární, Z-řezy, řádkování apod. Při hrubování se dosahuje nejnižší hranice drsnosti $R_a 6,3 \mu\text{m}$. [22, 23, 24]



Obr. 20. Frézování – hrubování [25]

Vysokoposuvové obrábění

Tato metoda třískové obrábění je také známá pod anglickým názvem High feed cutting (HFC), u frézování je označena jako High feed milling (HFM). Jedná se o metodu obrábění s vysokými posuvovými rychlostmi, díky kterým je umožněno odstranění velkého množství materiálu v krátkém čase. Mnohdy se udává, že je tato metoda až třikrát rychlejší, než při obrábění konvenčními metodami. Metoda HFM je spíše zařazena do hrubovacích metod obrábění, ovšem za určitých podmínek (správné rezné nástroje) lze dosáhnout obráběním téměř „čistého“ tvaru. Díky tomu se často vylučují z obrábění polodokončovací operace.

Principem HFM je úběr materiálu s malou hloubkou řezu (do cca $a_p = 2$ mm) s vysokým posuvem na zub frézy (až cca $f = 3$ mm). Nejčastěji se pro obrábění touto technologií používají vyměnitelné břitové destičky (VBD), které mají malý úhel nastavení hlavního ostří. Spolu se správnými reznými podmínkami umožňují odebrání velkého množství materiálu za jednotku času, taktéž zlepšenou stabilitu a spolehlivost tím, že dojde ke změně směru výsledných rezných silových zatížení rezného nástroje. Vlivem malého úhlu ostří převážně vznikají axiální síly, ty směřují proti vřetenu, dochází k minimalizaci vibrací a ke stabilizaci.

Kromě těchto parametrů je nutné využívat správné strojní zařízení a vybavení. Je nezbytné brát ohled na maximální možné otáčky vřetene. Stroj musí také vyhovovat maximální aplikované posuvové rychlosti a tloušťka třísky. [26, 27, 28, 29]

5.3 Dokončovací operace

Po hrubovacích operacích následují operace předdokončovací a dokončovací, kterých může být hned několik. Vše záleží na složitosti tvaru obrobku. U dokončovacích operací je cílem přiblížit se požadovanému tvaru (obrysu) s nulovým přírůstkem, tedy odstranit přírůstek po hrubování a docílit přesně daného tvaru obrobku (Obr. 21).





K dokončování ploch bylo vyvinuto velké množství frézovacích strategií. Ty se volí v závislosti na typu obráběné plochy. Přechodové plochy a plochy navazující od nich směrem nahoru, případně samotné plochy či soubor ploch které mají minimální nebo nulový sklon se obrábí vrstevnicovým nebo spirálovým způsobem. U těchto způsobů lze zachovat stejné záběrové podmínky, ovšem je třeba dbát, aby nedocházelo k prudkým změnám záběrových podmínek a směru pohybu nástroje, jak je to u hrubování.

Obtížnější dokončování nastává u problematických oblastí (lopatky, vnitřní rohy, úzké a hluboké dutiny apod.), tyto se obrábí pomocí speciálních NC funkcí, které mají ze zadaných vstupních parametrů a zvolené strategie obrábění, vypočítat dráhu pohybu nástroje. Zde je také nutno dodržovat požadavky na žádné skokové změny směru a na plynulou návaznost drah. Pro obrábění složitějších tvarů se využívají i 4 – 5osé obráběcí centra. Díky nim může docházet k obrábění obrobku až v 5 osách, bez nutnosti změny upnutí. Případně může docházet k naklápění obrobku pro obrábění šikmých ploch. Za pomoci těchto technik se výrazně sníží nebo dokonce úplně eliminuje ruční dokončování výrobku, což by přineslo další výrobní čas navíc. [23,30]



Obr. 21. Obrábění načisto [30]

Na Obr. 22 jsou porovnány některé frézovací nástroje pro daný typ operace (hrubování a dokončování), jejich univerzálnost, produktivita a požadavky na stabilitu.

				
	S kruhovými VBD	S kulovým čelem, s VBD	S kulovým čelem, s výměnnými hlavicemi	S kulovým čelem, celokarbidové
Velikost stroje/ vřetena	ISO 40, 50	ISO 40, 50	ISO 30, 40	ISO 30, 40
Požadavky na stabilitu	Vysoké	Střední	Střední	Nízké
Hrubování	Velmi dobré	Dobré	Přijatelné	Přijatelné
Dokončování	Přijatelné	Přijatelné	Velmi dobré	Velmi dobré
Hloubka řezu a_p	Střední	Střední	Malé	Malé
Univerzálnost	Velmi dobré	Velmi dobré	Velmi dobré	Velmi dobré
Produktivita	Velmi dobré	Dobré	Dobré	Dobré

Obr. 22. Porovnání tvarových fréz [30]

V Tab. 3 jsou porovnány základní parametry hrubování a dokončování při frézování. Jsou zde popsány strategie obrábění, velikosti posuvu a hloubky řezu, integrita povrchu a rozměrová přesnost.

Tab. 3. Srovnání základních parametrů hrubování a dokončování [31]

Hrubování	Dokončování
Cílem hrubování je odstranit velké množství materiálu z obrobku za co nejkratší čas	Cílem dokončování je zlepšit povrchovou integritu, rozměrovou přesnost a toleranci
Vyšší rychlost posuvu, vyšší hloubka řezu	Velmi nízký posuv, nízká hloubka řezu
Vysoká rychlost úběru materiálu	Poměrně nízký úběr materiálu
Drsnost povrchu po hrubování je špatná	Dobrá povrchová úprava (drsnost)
Špatná rozměrová přesnost	Dosahuje se vysoké rozměrové přesnosti a úzké toleranci
Hrubování je zařazeno před dokončováním	Dokončování se provádí až po hrubování

6 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI

V dnešní době se klade důraz na velkou produktivitu výroby, při které je snaha vyrábět co nejvíce kusů za co nejkratší čas. Nesmí se však zapomenout na přesnost výroby, tedy jak rozměrové, tak povrchové rozměry (tolerance, drsnost a jakost povrchu).

Vzhledem k plnému využití řezivosti nových nástrojových materiálů a příkonů strojů (několikanásobně výkonnější než klasické stroje) je na místě otázka, zda toto množství energie, které je převedeno na břit nástroje, výrazně neovlivní vlastnosti obrobeného povrchu, jeho drsnost, jakost apod.

Tato kapitola se zabývá mikrotvrdostí, měření mikrotvrdosti, integritou povrchu a zbytkovým napětím. [32]

6.1 Mikrotvrdost

Pro realizaci měření mikrotvrdosti se využívají diamantová tělesa tvaru Vickerse nebo Knoopův jehlan. Zatímco běžné zkoušky tvrdosti se provádějí při zatížení mezi 10 až 1200 N, u mikrotvrdosti se zatěžující síla pohybuje v rozmezí 1 g (0,09807 N) až 1000 g (9,807 N). [33]

Důvodem k využívání nízké zatěžující síly je, aby došlo k měření samotné vrstvy bez vlivu materiálu, na kterém je vrstva nanесena. Zmenšováním zatěžujících síly dochází ke zmenšení velikosti vtisku, čímž dochází k poklesu přesnosti měření. [34]

Jelikož při zkoušení mikrotvrdosti jsou vtisky malé, je použití této metody vhodné pro:

- hodnocení vrstev po chemicko – tepelném zpracování
- hodnocení svarových spojů
- měření křehkých materiálů
- malé nebo tenké součásti
- měření tvrdosti strukturních složek
- měření vybraných oblastí zkušebního vzorku
- měření anorganických povlaků a velmi tenkých vrstev [33]

6.1.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

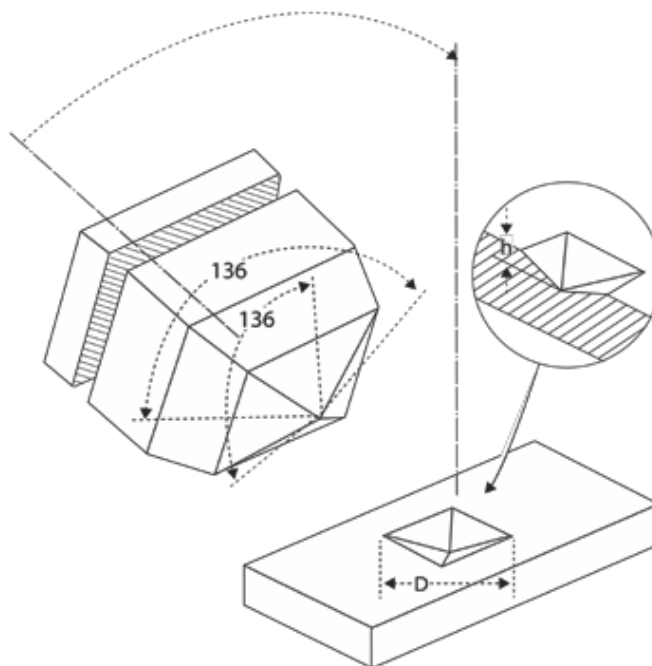
Zkouška tvrdosti podle Vickerse je předepsaná evropskou normou ČSN EN ISO 6507-1. V normě je tato zkouška rozdělena na 3 rozdílné oblasti zkušebního zatížení (viz. Tab. 4). Zkouška tvrdosti a mikrotvrdosti dle Vickerse se principiálně neliší, hlavním rozdílem je velikost konečného zatížení. Evropská norma udává hodnoty zatížení v kilogramech. Je to dáno z historického hlediska, jelikož jednotka tvrdosti byla stanovena před přijetím mezinárodní soustavy jednotek. [33, 35]

Tab. 4. Oblasti zkušebních zatížení pro kovové materiály u tvrdosti dle Vickerse [33,35]

Oblast zkušebního zatížení F [N]	Označení tvrdosti	Rozdělení zkoušek dle ISO 6507-01
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až $< HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až $< HV 0,2$	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

U měření tvrdosti se zatížení volí v kilogramech, ovšem zatěžující síla je uváděna v newtonech (tedy tvrdost HV 5 znamená, že je využito zatížení 5 kg, ale maximální dosažená síla během zkoušky, která působí na indentor, je 49,035 N). [33, 35]

- **Podstata zkoušky**



Obr. 23. Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [36]

Podstatou zkoušky dle Vickerse je do měřeného vzorku vtlačit pravidelný čtyřboký jehlan z diamantu s vrcholovým úhlem 136° (Obr. 23). Podstavu jehlanu tvoří čtverec, tím pádem se velikost tvrdosti rovná podílu použité síly F a velikosti plochy vtisku A_s (plocha stěn). K vypočítání tvrdosti se používá úhlopříčka vtisku d . [33, 35]

- **Zkušební těleso**

Při realizaci měření se musí dodržovat určitá pravidla. Zkušební těleso (respektive vrstvy) musí být velké minimálně 1,5 násobek délky úhlopříčky vtisku. Mezi další pravidla patří vzdálenost středů vtisků od okraje zkušebního tělesa. Minimální vzdálenost je 2,5 násobek průměrné hodnoty úhlopříčky vtisku. U lehkých kovů (olovo, cín a jejich slitiny) je minimální vzdálenost 3 násobek úhlopříčky vtisku. Při měření se také musí dodržovat vzdálenost středů dvou sousedních vtisků. V případě oceli, mědi a slitin mědi se jedná o 3 násobek průměrné hodnoty úhlopříčky vtisku. Nejméně 6 násobek je pak nutný v případě lehkých kovů (cín a jeho slitiny, olovo). Po zkoušce nesmí být na protilehlé straně zkušebního tělesa viditelné stopy deformace. Po celou dobu zkoušky musí být přístroj chráněn, nesmí docházet ke chvění a otřesům. [33, 35]

- **Provedení zkoušky**

Během zkoušky musí být těleso uloženo na podložce tak, aby nedocházelo k jeho pohybu. Indentor (vnikající těleso) se zatlačuje zkušebním zatížením kolmo na povrch zkušebního tělesa. Doba zatěžování, od začátku až do plné hodnoty zatížení, musí být v intervalu 2 až 8 sekund. U zkoušky mikrotvrdosti při nízkém zatížení nesmí tato doba překročit 10 sekund a zároveň nesmí zatěžování překročit rychlost 0,2 mm/s. Doba, kterou je zkušební těleso zatěžováno plným zatížením, musí být v intervalu 10 až 15 sekund. [33, 35]

6.1.2 Zkouška tvrdosti podle Knoop

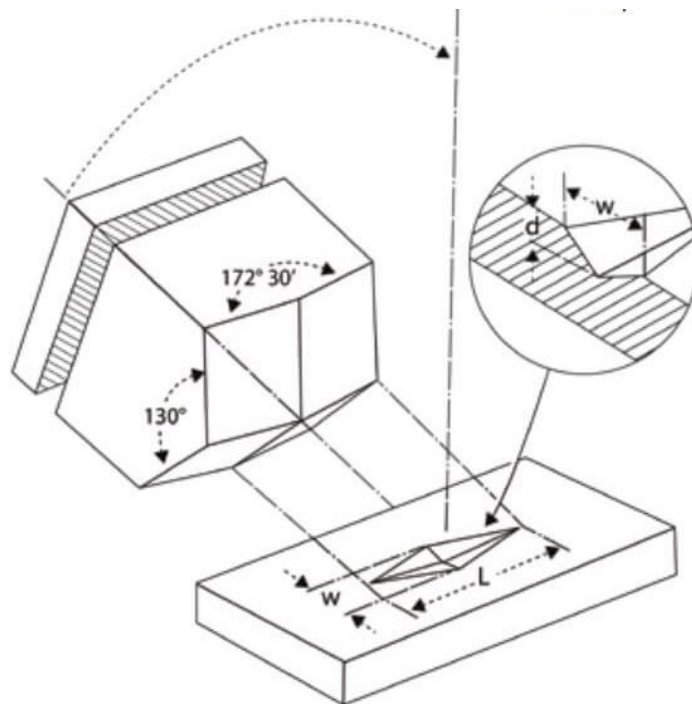
Zkouška tvrdosti dle Knoop je předepsaná mezinárodní normou ČSN ISO 4545-2 (nebo ČSN ISO 4545-3), velikosti zatížení je vypsáno v Tab. 5. Zkouška se využívá pro hodnocení mikrotvrdosti tenkých plechů, tenkých vrstev (povlaky) a křehkých materiálů. Proto byl speciálně pro tento typ zkoušky vyvinut Knoopův indentor. [33, 35, 37]

Tab. 5. Zkouška tvrdosti podle Knoop – zkušební zatížení [33, 35]

Symbol tvrdosti HK	Normální hodnota zkušebního zatížení F [N]
0,01	0,09807
0,02	0,1961
0,025	0,2452
0,05	0,4903
0,1	0,9807
0,2	1,961
0,3	2,942
0,5	4,903
1	9,807

- **Podstata zkoušky**

Indentor, který se při zkoušce využívá, má tvar čtyřstěnného diamantového jehlanu, jehož vtisk má tvar kosodélníku (viz Obr. 24). Vrcholové úhly indentoru jsou $172,5^\circ$ a 130° . Další parametry se uvádí v poměrech, tedy poměr mezi délkou hlavní uhlopříčky a hloubky vtisku je 30:1 a poměr délky hlavní a vedlejší je 7,11:1. [33, 35, 37]



Obr. 24. Schéma zkoušky tvrdosti podle Knoop [38]

- **Zkušební těleso**

Zkouška Knoopem se s výhodou využívá pro měření tvrdosti velmi tvrdých a křehkých materiálů, jelikož oproti Vickersovu indentoru se délka hlavní uhlopříčky dá snadněji změřit. [33, 35]

Zkušební těleso se připravuje jako metalografický výbrus, tedy nesmí u něho dojít k deformačnímu nebo tepelnému ovlivnění povrchu. Hodnocený povrch musí být rovný a hladký, bez okují nebo cizích tělísek, taktéž nesmí být pokryt mazadly. Běžně se tyto povrchy zkušebních těles připravují broušením za mokra a leštěním na diamantových pastách, případně je možné taky využít elektroleštění. [33, 35]

- **Provedení zkoušky**

Jak u Vickerse, tak i u Knoopu musí být zkušební těleso uchyceno na podložce tak, aby nedošlo k jeho pohybu během zkoušky. Za působení zkušebního zatížení se indentor zatlačuje kolmo na povrch zkušebního tělesa. Od začátku zatěžování až do maximální hodnoty nesmí uplynout více než 10 sekund, přitom se rychlost přibližování indentoru musí pohybovat v rozmezí od 15 $\mu\text{m/s}$ do 70 $\mu\text{m/s}$. Plné zatížení musí působit na zkušební těleso v intervalu 10 až 15 sekund. [33, 35]

6.1.3 Zbytkové napětí

Zbytková napětí lze definovat jako napětí, která se vyskytují v materiálu bez působení vnějšího zatížení. Tento druh napětí vznikají při úpravě materiálu a při jeho obrábění. Význam zbytkového napětí může na výsledný obrobek působit jak škodlivě, tak prospěšně. Prospěšný vliv má tlakové napětí, které zlepšuje únavové vlastnosti materiálu a omezuje vznik povrchových trhlin. Jako škodlivý vliv lze označit tahové napětí.

Vznik zbytkového napětí hraje u moderních technologií jako je HSC (vysokorychlostní frézování) nezanedbatelnou roli, jelikož jeho vznik závisí na typu nástroje, rezné rychlosti, posuvu a dalších parametrech, proto je důležitá optimalizace procesu obrábění u těchto typů technologií. [39, 40]

Vznik zbytkového napětí:

- nerovnoměrné tepelné vlivy
- nerovnoměrné plastické deformace
- nerovnoměrné fázové transformace

Druhy zbytkového napětí:

- zbytkové napětí I. druhu
- zbytkové napětí II. druhu
- zbytkové napětí III. druhu [40, 41]

6.2 Drsnost povrchu

Drsnost lze definovat jako miniaturní odchylky (nepravidelnosti) od ideálního povrchu (přesně hladký, rovný a lesklý povrch). Drsnost na povrchu obrobku vzniká vlivem řezného nástroje, volného brusiva apod. Do drsnosti povrchu nepatří náhodné poškození (otřepy, naraženiny, staženiny, vyboulení...) a původní vady materiálu (trhliny, póry).

Předepsání požadované drsnosti dle normy umožňuje porovnání a kontrolu povrchu, případně vyměnitelnost součástky.

Velká změna drsnosti povrchu je ovlivněna tím, zda se jedná o hrubovací nebo dokončovací operace. Při hrubování se odebrává velké množství materiálu, tím vznikají velké řezné síly, proto je nutné brát na zřetel tuhost funkčního celku stroje obrobek – nástroj – stroj. U dokončování už není takový úbytek materiálu, vznikají relativně malé řezné síly, není potřeba brát v potaz na tuhost soustavy. [8, 39, 42]

Integrita povrchu

Integrita povrchu je závislá na řadě faktorů, ať už na vybraném polotovaru budoucího výrobku, tak na technologii, kterou se bude vyrábět, až po použitou dokončovací operaci. Všechny tyto faktory se odráží na finální mechanické a fyzikální vlastnosti hotového výrobku, na jeho funkčnosti a životnosti. [39, 41, 42]

Přední ukazatele jakosti povrchu jsou:

- změna tvrdosti povrchu, zpevnění
- zbytkové napětí
- strukturní a chemické změny
- mikrogeometrie – drsnost
- makrogeometrie – odchylka tvaru [41]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je stanovit vliv hrubovacích operací na dokončovací pro technologii frézování u nerezové oceli 1.4541(X6CrNiTi18-10). Pro hrubovací operaci byla využita technologie vysokoposuvového frézování, u kterého byly použity výměnné cermetové destičky.

Cílem experimentu je zkoumat vliv dynamického zatížení obrobku (velikosti řezných síly F_x , F_y , F_z) na zpevnění obrobeného povrchu (mikrotvrdości povrchu) v závislosti na řezných podmínkách, tedy změně řezné rychlosti (v_c), hloubce řezu (a_p) a posuvu na zub (f_z). Během experimentu budou také stanoveny veličiny jako je Vickersova tvrdost, indentační hloubka a drsnost povrchu.

Proměnné parametry:

- Řezná rychlost v_c [m/min]
- Hloubka záběru a_p [mm]
- Posuv na zub f_z [mm]

Měřené veličiny:

- Řezné síly F_x , F_y , F_z [N]
- Drsnost R_a [μm]
- Tvrdost podle Vickerse $HVIT$
- Indentační hloubka hm [nm]

8 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL 1.4541 (X6CRNITI18-10)

Jedná se o austenitickou chromoniklovou ocel třídy 17 (dle ČSN), která je stabilizovaná titanem s teplotní odolností do 900 °C. Nerezová ocel obsahuje řadu legujících prvků jako je mangan, titan, křemík a fosfor (viz. Tab. 6). Mezi její kladné vlastnosti patří dobrá odolnost proti korozi, i odolnost proti mezikrystalické korozi po zahřátí v rozmezí 425–850 °C, taktéž dobrá houževnatost za nízkých teplot. Dále mezi kladné vlastnosti patří velmi dobrá svařitelnost.

V důsledku obsahu titanu (titan se špatně přenáší přes vysokoteplotní oblouk) má ocel špatné vlastnosti jako přídavný materiál při svařování. Dále nelze slitinu kalit tepelným zpracováním, pouze zpracováním zastudena. Slitinu lze snadno zpracovávat standárními způsoby výroby. Je zde také špatná leštitelnost (nedoporučuje se pro dekorativní aplikace).

Využívá se ve všech odvětvích leteckého, chemického a potravinářského průmyslu. Slouží k výrobě výfukových potrubí letadel, hadic topných těles, tepelných výměníků a dílů pece. [43, 44, 45]

Pro experiment byl zakoupen polotovar o rozměrech 80x80x80 mm od firmy 3Q Metal. Chemické složení viz Tab. 6 je ověřeno certifikátem od této firmy.

Tab. 6. Procentuální chemické složení materiálu 1.4541 [43, 44, 45]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	N
max 0,08	max 1	max 2	max 0,045	max 0,015	17-19	9-12	max 0,7	max 0,1

9 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A NÁSTROJE

Obrábění probíhalo na univerzální frézce DMU 50 od firmy DMG Mori. Jako nástroj byly zvoleny výměnné cermetové destičky, které byly upnuty do frézovací hlavy. Při obrábění byly, za pomoci Dynamometru Kistler Type 9129AA od firmy Kistler, měřeny řezné síly F_x , F_y , F_z , které působí na obrobek během frézování. Po obrobení testovacích drah dle zvolených řezných podmínek byly změřeny parametry drsnosti R_a , R_z , R_t za pomoci Drsnoměru Mitutoyo SJ – 410. Nakonec byly obrobené dráhy podrobeny měření mikrotvrdomosti na přístroji Micro Combi Tester od firmy CSM.

9.1 Univerzální frézka DMU 50

Univerzální CNC frézka od firmy DMG Mori umožňuje obrábět v pěti na sobě nezávislých osách. Vřeteno stroje zajišťuje pohyb v osách X , Y , Z . Stůl stroje poskytuje rotaci v osách B a C , kde rozsah v ose B je $-35/+110^\circ$. Maximální otáčky vřetene stroje jsou 15 000 ot/min a rychloposuv o rychlosti 30 m/min. [37]



Obr. 25. Pětiosé CNC obráběcí centrum DMU 50 [46]

Tab. 7. Vlastnosti DMU 50 [46]

Maximální pojezd v ose X	500 mm
Maximální pojezd v ose Y	450 mm
Maximální pojezd v ose Z	400 mm
Maximální zatížení stolu	300 kg
Průměr stolu	630 mm
Maximální výška obrobku	300 mm

Obráběcí centrum obsahuje zásobník pro 30 nástrojů s maximálním průměrem 130 mm a maximální délkou 300 mm. Stroj obsahuje konzoli pro ruční programování (řídící a operační systém CELOS) přímo na místě u CNC stroje.

9.2 Měřicí přístroje

Během experimentu byl využit Dynamometr Kistler Type 9129AA od firmy Kistler pro měření řezných sil během frézování. Poté byla měřena drsnost na Drsnoměru Mitutoyo SJ – 410. Nakonec byla měřena mikrotvrdost na Micro Combi Tester od firmy CSM Instruments.

9.2.1 Dynamometr Kistler Type 9129AA

Dynamometr je měřicí zařízení, které slouží k měření řezných sil (dynamického zatížení) v průběhu obrábění. Rozsah Dynamometru Kistler Type 9129AA se pohybuje od -10 000 N do 10 000 N a rozlišitelnost je 0,1 N. Funkční rozměry Dynamometru jsou 90x105x32 mm (délka x šířka x výška), celková délka 150 mm. [47, 48]



Obr. 26. Dynamometr Kistler 9129AA [47]

9.2.2 Drsnoměr Mitutoyo SJ – 410

Mitutoyo SJ 410 je přenosný kontaktní drsnoměr se standardizovaným hrotem (poloměr 5 μm), který umožňuje jednoduché a přesné měření drsnosti povrchu. U drsnoměru lze zaznamenat až 46 parametrů jakosti povrchu, které odpovídají normám DIN, ISO, JIS a ANSI.

Výhodou kontaktního drsnoměru je, že nemůže dojít k lomení a odražení paprsku (jako při bezkontaktním měření) a tím znehodnocení měření. Přístroj je jednoduše ovládán pomocí LCD barevného displeje o velikosti 145 mm. Rozsah měření (osa X) je 25 mm. [49, 50, 51]



Obr. 27. Drsnoměr Mitutoyo SJ – 410 [52]

9.2.3 Instrumentovaná zkouška tvrdosti

Zkouška mikrotvrdosti byla provedena na přístroji Micro Combi Tester od firmy CSM Instruments (Obr. 28) podle normy ČSN EN ISO 6507-1.

Parametry zvolené pro realizaci zkoušky:

- vnikací tělísko – Vickersův indentor
- aplikované zatížení – 10N,
- doba maximálního zatížení – 12 s,
- vzdálenost vpichů 1 mm. [53]



Obr. 28. Micro Combi Tester od firmy CSM Instruments [53]

9.3 Použité nástroje

Pro experiment byly využity cermetové břitové destičky od firmy SECO pod označením LPHT060310TR-M06 MS2050, které byly upnuty do frézovací hlavy s označením R217.21-1020.RE-LP06.3A. Tato frézovací hlava byla za pomoci závitu upevněna do trnu s označením E347658201060.

9.3.1 Cermetová destička (LPHT060310TR-M06 MS2050)

Cermetové destičky od firmy SECO (Obr. 29) mají šířku 6,4 mm a tloušťku 3,18 mm. Na každé destičce se nachází dva břity s úhlem čela 11° . Destičky jsou ošetřeny speciálním PVD povlakem třídy MS2050. Díky povlaku je zvýšená odolnost destičky proti opotřebení a eliminována reakce s materiálem obrobku. Tyto destičky jsou vhodné pro frézování s vysokým posuvem. Tato technologie byla při experimentu využita. [54, 55]



Obr. 29. Cermetové břitová destička LPHT060310TR-M06 MS2050 [54]

9.3.2 Frézovací hlava (R217.21-1020.RE-LP06.3A)

Frézovací hlava (Obr. 30) od firmy SECO umožňuje upnutí tří destiček. Obráběcí průměr frézovací hlavy je 20 mm a maximální hloubka řezu je 0,8 mm. Funkční délka hlavy je 28 mm. Frézovací hlava se upíná do Upínacího trnu (E347658201060) pomocí závitu M10. [56]



Obr. 30. Frézovací hlava R217.21-1020.RE-LP06.3A [56]

9.3.3 Upínací trn (E347658201060)

Upínací trn (Obr. 31) je možné rozdělit na dvě části: pracovní a upínací část. Pracovní část (strana obrobku) obsahuje vnitřní závit M10, do kterého lze upnout frézovací hlavy, které splňují rozměrové požadavky a upínání za pomoci závitu M10. Délka tělesa je 41 mm.

Upínací část (strana stroje) slouží k upnutí trnu do vřetene obráběcího stroje. Upínací kužel se vyrábí dle normy DIN40 ADB/ CAT40. Střední část trnu zaručuje správné zajištění nástroje v zásobníku stroje, popřípadě zajištění v držáku během výměny destiček ve frézovací hlavě. Celková délka upínacího trnu je 128,4 mm. [57]



Obr. 31. Upínací trn

10 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

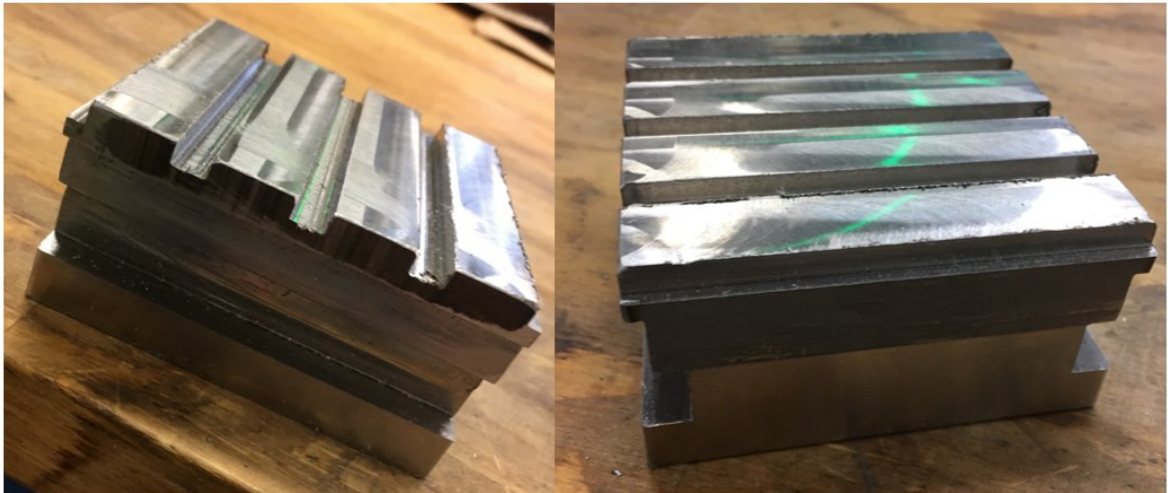
Polotovar nerezové oceli o rozměrech 80x80x80 mm musel být před samotným měřením připraven na experiment. Dodaný polotovar, zobrazený na Obr. 32, musel být rozdělen na dva vzorky a obroben, aby mohlo dojít za pomoci upínek k upnutí do dynamometru. Upínky pro upnutí vzorků zajišťují požadovanou tuhost a pevnost, aby nedošlo během experimentu k pohybu vzorků a mohlo docházet k rychlé výměně vzorků.



Obr. 32. Polotovar nerezové oceli 1.4541

10.1 Příprava polotovaru

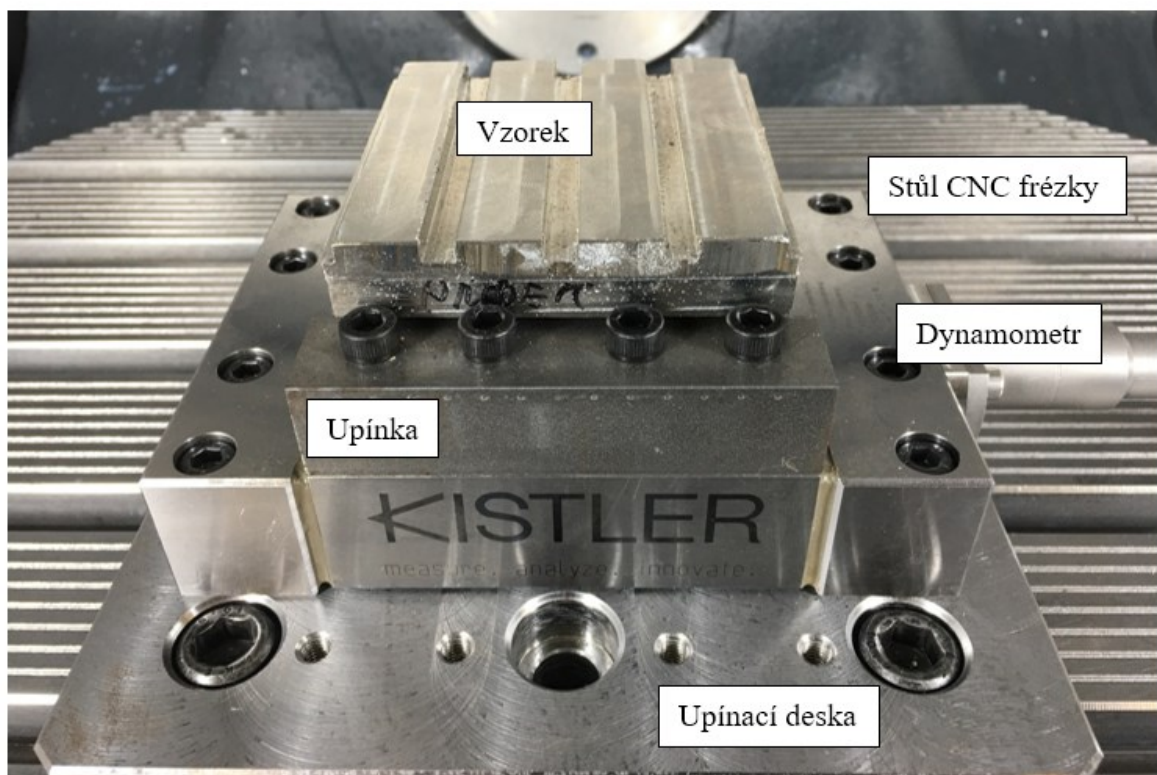
Polotovar musel být obroben, aby mohlo dojít k upnutí do dynamometru za pomoci upínek. V prvním kroku byl polotovar rozřezán na dva vzorky o rozměrech 80x80x40 mm. Poté byly na obou vzorcích zarovnány základny. V dalším kroku byly na bocích vzorků vyfrézovány drážky pro možné upnutí za pomoci upínek. Následně bylo vyfrézováno pět drážek pro rozdělení testovací plochy, aby byly vytvořeny čtyři dráhy pro měření. Obrobené a nachystané vzorky na experiment jsou vyobrazeny na Obr. 33.



Obr. 33. Příprava vzorků pro uchycení na dynamometru

10.2 Upnutí vzorku do dynamometru Kistler

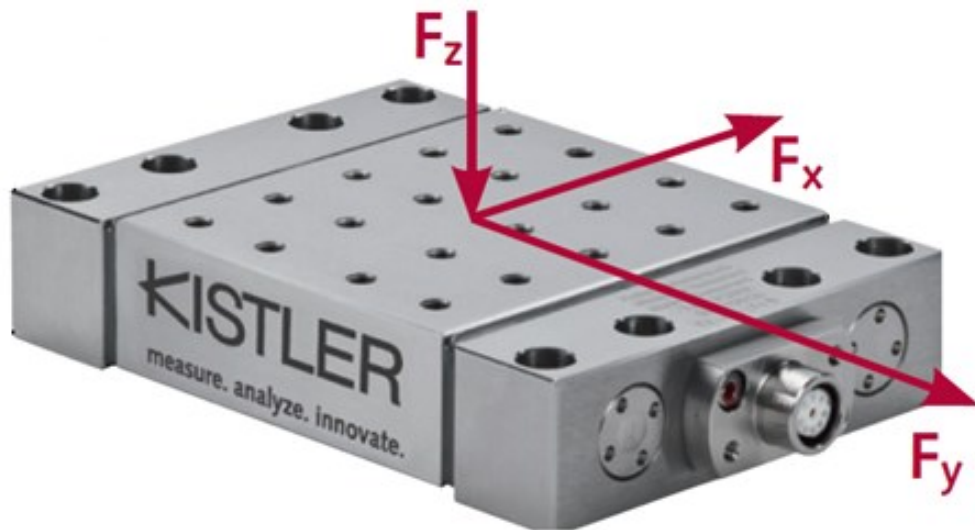
Na Obr. 34 je vyobrazeno uchycení vzorku na dynamometru za pomoci upínek a imbusových šroubů. Samotný dynamometr je uchycen do upínací desky, která je za pomoci imbusových šroubů přichycena ke stolu CNC frézky.



Obr. 34. Uchycení dynamometru a vzorku ke stolu stroje

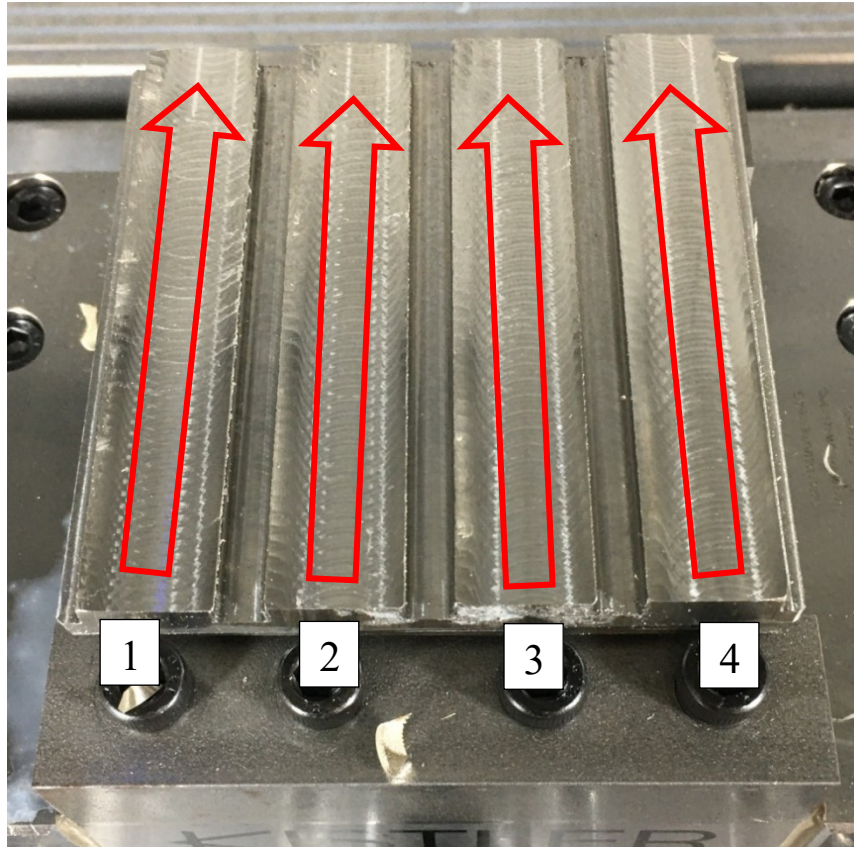
11 EXPERIMENT

Pro experiment bylo zvoleno rovinné frézování, kde vždy v jedné sérii byly obrobny čtyři plochy (viz. Obr. 33). Šířka obráběné plochy je 14 mm. Při frézování docházelo ke změnám řezných podmínek. Měnila se řezná rychlost (v_c), hloubka řezu (a_p) a posuv na zub (f_z). Obrobek byl během frézování upnut na dynamometru, aby bylo možné změřit síly F_x , F_y a F_z , které působí na obrobek. Po odfrézování daných ploch, byl obrobek odepnut z dynamometru a byly změřeny parametry jakosti povrchu, tedy R_a , R_z , R_t , které byly zapsány do tabulek. Poté byly vzorky podrobeny zkoušce mikrotvrdomosti. Na Obr. 35 je znázorněna orientace řezných sil na dynamometru Kistler 9129AA.



Obr. 35. Rozložení řezných sil u dynamometru Kistler 9129AA [58]

Na Obr. 36 jsou znázorněny řezy při rovinném frézování, které byly provedeny během experimentu. Červené šipky označují směr pohybů nástroje při obrábění při zvolených parametrech. Každé číslo značí jiné řezné podmínky.



Obr. 36. Směr řezu nástroje

Tab. 8. Zvolené řezné parametry pro frézování nerezové oceli

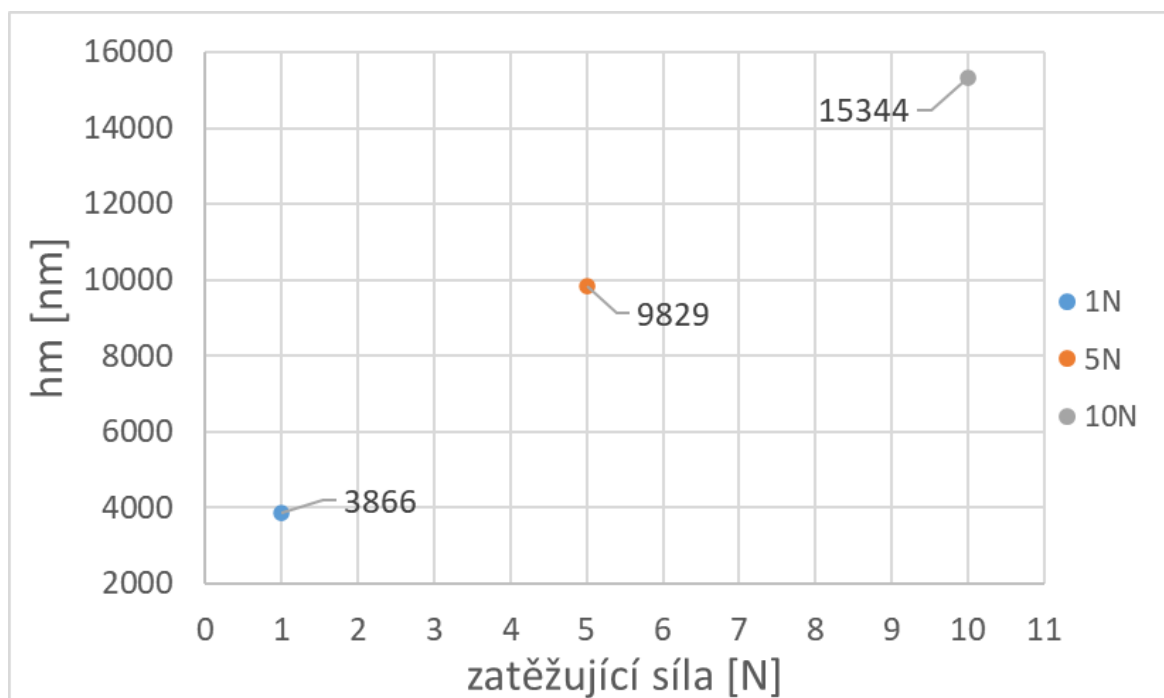
a_e 14 [mm]			
v_c [m/min]			
160	180	200	
a_p [mm]			
0,5	0,6	0,7	0,8
f_z [mm]			
0,5	0,6	0,7	0,8

11.1 Postup měření

První měřené veličiny byly řezné síly F_x , F_y a F_z , které působí na obrobek během frézování. Tyto síly byly změřeny pomocí dynamometru. U prvního měření byla řezná rychlost nastavena na 160 m/min, hloubka záběru 0,5 mm a posuv na zub se měnil v intervalu 0,5 – 0,8. Následně byla změněna hloubka záběru na 0,6 mm a měření se opakovalo. Všechny zvolené parametry jsou uvedeny v tabulce Tab. 8.

Naměřené průběhy sil byly zaznamenány v softwaru DynoWare, který dodává firma Kistler ke svým zařízením. Následně po obrobení ploch byl polotovar odepnut a umístěn do drsnoměru, kde byly změřeny parametry drsnosti (R_a , R_z , R_t) u každé dráhy. Hodnoty byly zapsány do programu Excel, kde byly následně zpracovány. Třetí měření proběhlo na přístroji Micro combi tester. Kde podle zadaných parametrů (viz. kapitola 9.2.3) byly naměřeny veličiny jako je Vickersova tvrdost, indentační hloubka a vtiskový modul.

U měření tvrdosti bylo provedeno zkušební měření indentační hloubky u náhodných řezných parametrů. U těchto parametrů se měnila zatěžující síla (1N, 5N a 10N). Výsledky měření jsou znázorněny na Obr. 37. Ze zkušebního měření byla zvolena zatěžující síla 10 N, která byla použita pro měření v celém experimentu. Jelikož díky tomuto zatížení lze měřit indentační hloubku nad 10 μm , což je relevantní hodnota pro následné dokončovací operace.



Obr. 37. Zkušební měření indentační hloubky

11.2 Zpracování dat

Pro zpracování dat byl využit program Excel. Zde byly vytvořeny tabulky, do kterých se zapsaly průměrné nebo maximální hodnoty. Z těchto hodnot byly posléze vytvořeny grafy, které jsou uvedeny v diplomové práci.

První naměřené veličiny byly řezné síly. Ty byly zaznamenány v programu DynoWare jako průběh síly v čase. Z tohoto průběhu se vytvořilo 10 nepřekrývajících se intervalů,

z kterých byly vybrány maximální hodnoty F_x , F_y a F_z a zapsány do tabulek. Z těchto hodnot byl vypočítán aritmetický průměr.

Následovalo měření drsnosti obrobeného povrchu. Taktéž bylo provedeno 10 měření a tyto hodnoty byly zapsány do tabulek. A z nich byl vypočítán aritmetický průměr.

Poslední měření bylo měření mikrotvrdomosti. Zde byla naměřena Vickersova tvrdost a indentační hloubka. Tyto veličiny byly zapsány do tabulek a z nich vypočítán aritmetický průměr.

Ke všem aritmetickým průměrům byly vypočítány směrodatné odchylky. Ty byly zkontrolovány, zda nemají vliv na predikce (trendy). Odchylky neměly žádný podstatný vliv a pro jednoduchost a přehlednost grafů byly z hodnocení výsledků vyjmuty.

12 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

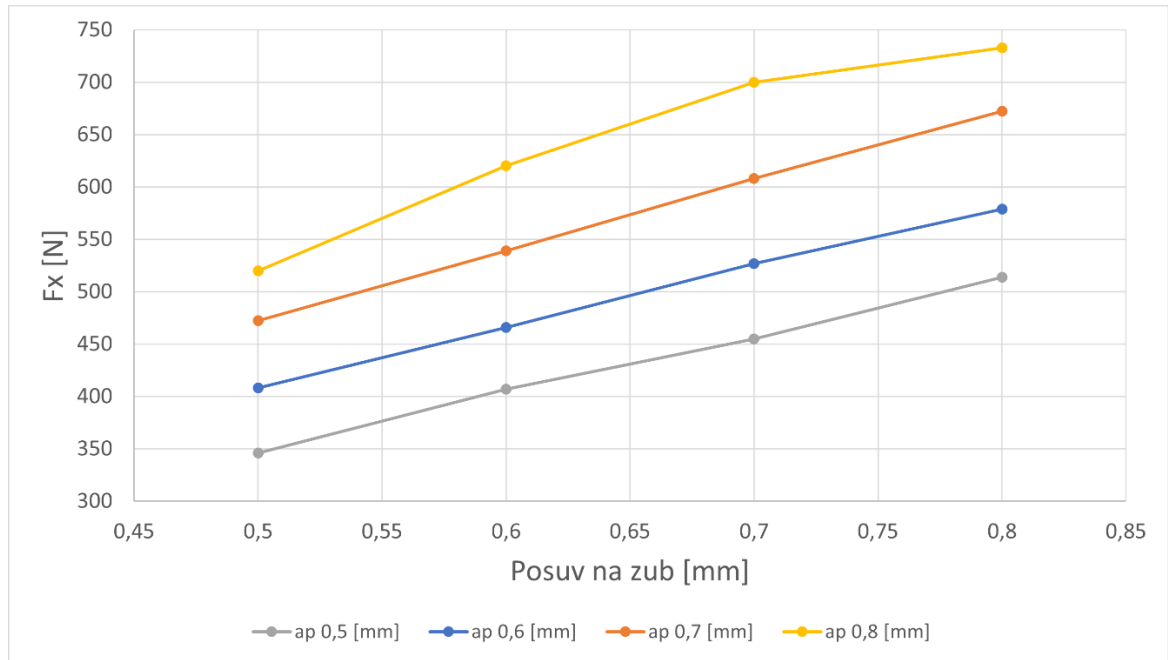
V praktické části diplomové práce byl realizován experiment, při kterém bylo provedeno rovinné frézování plochy obrobku za pomoci cermetových destiček LPHT060310TR-M06 MS2050 při měnících se řezných parametrech (řezná rychlost, hloubka řezu a posuv na zub). Jako obráběný materiál byla zvolena nerezová ocel 1.4541.

V průběhu experimentu byly změřeny řezné síly F_x , F_y a F_z , které působí ve směrech x , y , a z , poté následovalo měření parametrů jakosti povrchu R_a , R_z , R_t . Jako poslední měření bylo provedeno měření mikrotvrdomosti podle Vickerse. Z tohoto měření byla zaznamenána Vickersova tvrdost a indentační hloubka. Všechna naměřená data byla rozdělena dle vstupních řezných parametrů a byla provedena analýza dat, a jejich korelace mezi sebou, v programu Excel.

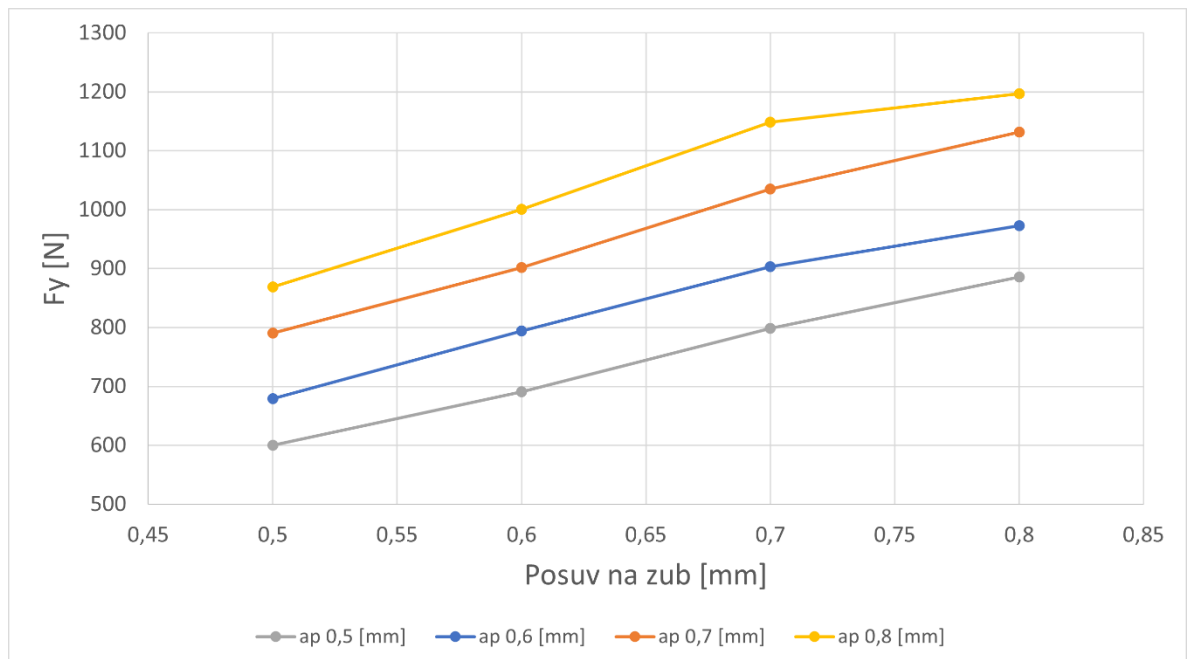
Jako první měřené veličiny byly řezné síly během obrábění. Z teoretického hlediska by měly mít řezné síly změnou řezných parametrů (řezná rychlost, hloubka řezu a posuv na zub) rostoucí trend. Pro názornost tohoto trendu byly zvoleny bodové grafy, kde jsou body spojeny přímkami. Nejde ovšem o predikci dalšího vývoje, pouze o přehlednost. Tento trend se potvrdil u řezné rychlosti 160 m/min a 200 m/min. U řezné rychlosti 180 m/min se tento vývoj projevil jen u některých řezných parametrů.

12.1 Řezné síly – F_x , F_x , F_z

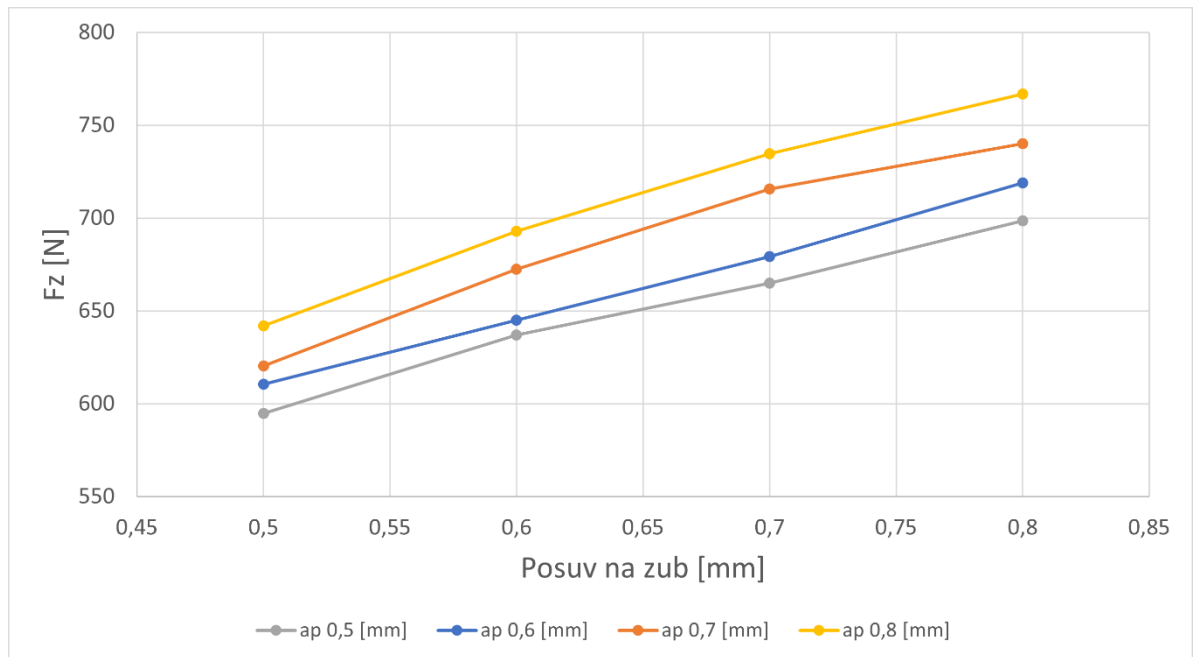
Na Obr. 38 lze vidět závislost hloubky řezu a posuvu na zub na řezné síle F_x u řezné rychlosti 160 m/min. Při prvním pohledu lze pozorovat, že řezná síla má rostoucí trend – téměř lineární růst. Maximální hodnota F_x nastává při hloubce řezu 0,8 mm a posuvu na zub 0,8 mm. Tato hodnota je 733,06 N.

Obr. 38. Srovnání F_x u řezné rychlosti 160 m/min

Na Obr. 39 je zobrazen vliv hloubky řezu a posuvu na zub na velikosti řezné síly F_y při konstantní řezné rychlosti a radiálním záběru. Tato síla působí ve směru řezu. Z obrázku vyplývá, že řezná síla F_y roste se zvyšujícími se řeznými parametry. Maximální hodnota byla naměřena při hloubce řezu 0,8 mm a posuvu na zub 0,8 mm. Její hodnota je 1 197,2 N.

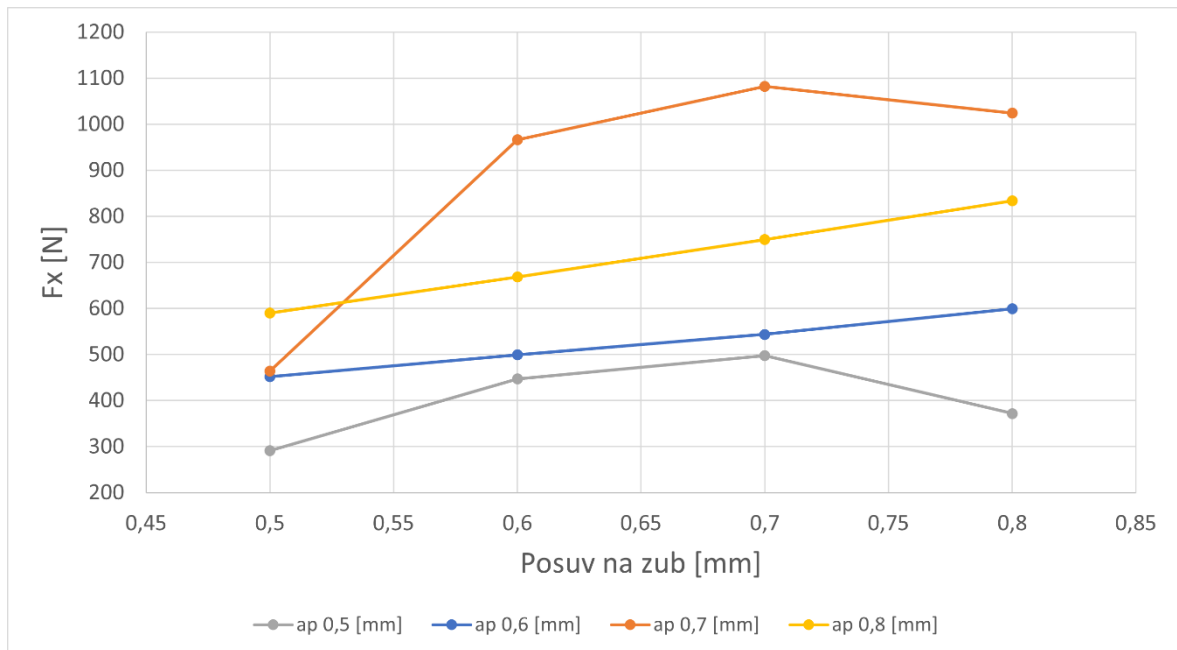
Obr. 39. Srovnání F_y u řezné rychlosti 160 m/min

Na Obr. 40 je zobrazen vliv hloubky řezu a posuvu na zub na velikost řezné síly F_z . Tato síla je orientovaná směrem z vřetene. Je patrné, že se zvyšujícími se řeznými parametry se zvyšuje zatížení, které působí na obrobek, a tím se zvyšuje požadavek na pevnost a upnutí nástroje a obrobku. Maximální hodnota F_z 766,74 N byla naměřena při hloubce řezu 0,8 mm a posuvu na zub 0,8 mm.

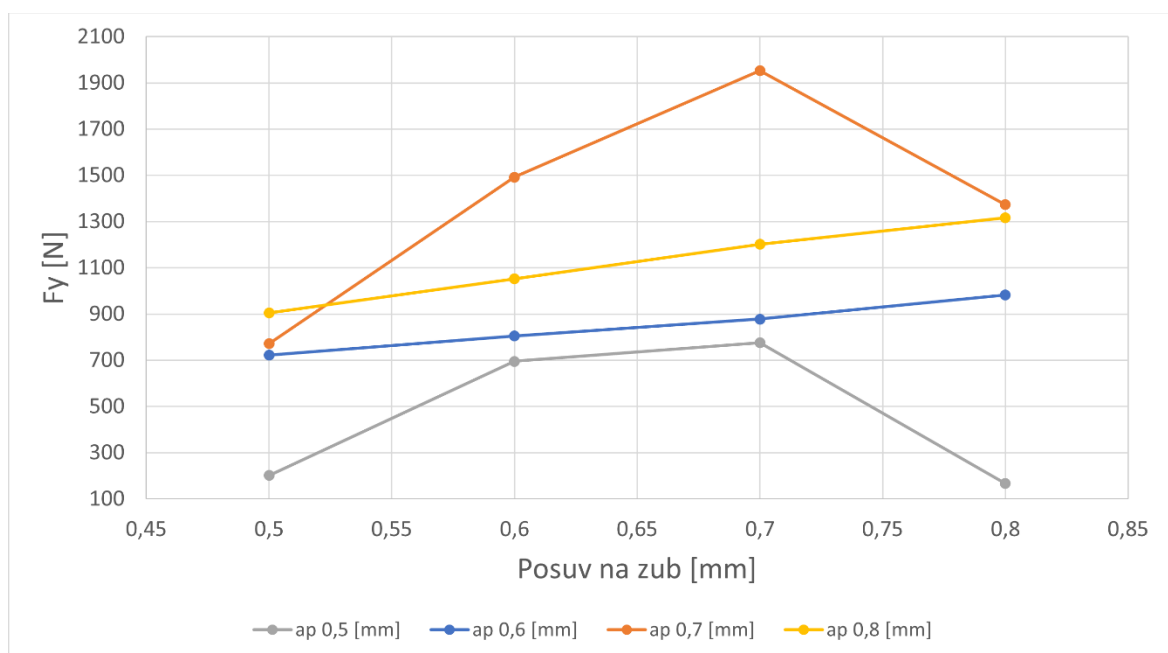


Obr. 40. Srovnání F_z u řezné rychlosti 160 m/min

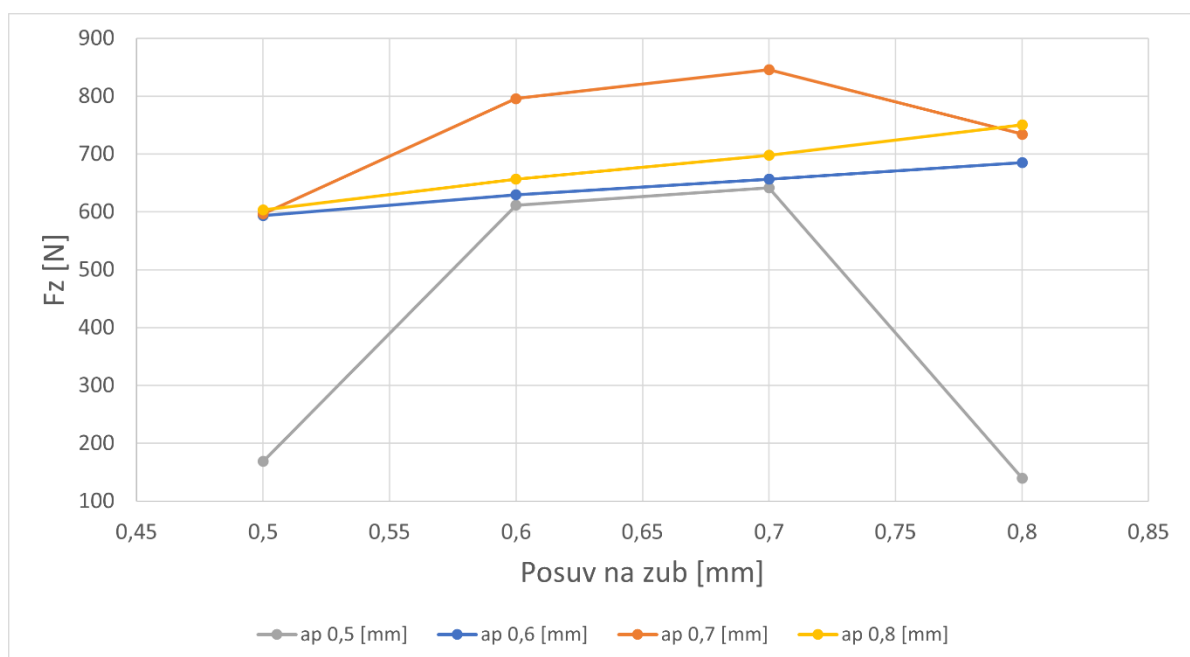
U řezné rychlosti 180 m/min dochází ke kolísání řezných sil u hloubky řezu 0,5 a 0,7 mm. Na Obr. 41 je vyobrazen vliv řezné hloubky a posuvu na zub na velikost řezné síly F_x při konstantním radiálním záběru. Z obrázku lze vyčíst, že při hloubce řezu 0,5 mm dochází mezi $f_z = 0,5 - 0,6$ mm ke strmějšímu nárůstu řezné síly, poté je tendence mírně stoupající k $f_z = 0,7$ mm, kde byla naměřena maximální hodnota síly $F_x = 497,34$ N. Následně dojde k poklesu řezné síly, kde u $f_z = 0,8$ mm byla naměřena řezná síla $F_x = 372,01$ N. Podobný trend sil byl také naměřen u hloubky řezu 0,7 mm. Mezi $f_z = 0,5 - 0,6$ mm je strmý nárůst sil z hodnoty 464,19 na 966,25 N. Poté dojde mezi intervalem $f_z = 0,6 - 0,7$ mm k nárůstu na maximální hodnotu řezné síly $F_x = 1\,082,7$ N (při $f_z = 0,7$ mm). Nakonec dojde k mírnému poklesu řezné síly při $f_z = 0,8$ mm je hodnota síly $F_x = 1\,023,9$ N.

Obr. 41. Srovnání F_x u řezné rychlosti 180 m/min

Na Obr. 42 je vyobrazen vliv hloubky řezu a posuvu na zub na velikost řezné síly F_y při konstantním radiálním záběru. I u této složky síly F_y jsou stejné průběhy a tendence jako u řezné síly F_x . Maximální hodnota řezné síly, $F_y = 1\,952,8\text{ N}$, byla změřena u hloubky řezu 0,7 mm a posuvu na zub 0,7 mm. U této hloubky řezu je patrné, že řezná síla se zvyšuje až do $f_z = 0,7\text{ mm}$. Poté opět dojde k poklesu síly, u $f_z = 0,8\text{ mm}$ je řezná síla $F_y = 1\,373,8\text{ N}$. Maximální řezná síla F_y u $a_p = 0,5\text{ mm}$ byla opět změřena u $f_z = 0,7\text{ mm}$, její hodnota je 776,35 N.

Obr. 42. Srovnání F_y u řezné rychlosti 180 m/min

Na Obr. 43 je zobrazen vliv hloubky řezu a posuvu na zub na velikost řezné síly F_z při konstantním radiálním záběru. U složky F_z si lze opět všimnout stejných průběhů u hloubky záběru 0,5 a 0,7 mm. Zde je možné zaznamenat, že u hloubky řezu 0,5 mm dochází u f_z 0,5 – 0,6 mm k velkému nárůstu síly. U $f_z = 0,6$ mm byla naměřena síla $F_z = 629,73$ N. Poté pokračoval pozvolný nárůst síly až k $f_z = 0,7$ mm, kde byla naměřena maximální hodnota řezné síly $F_z = 656,39$ N. Ovšem při zvolených řezných parametrech $a_p = 0,5$ mm a $f_z = 0,8$ mm poklesla síla F_z na hodnotu 139,59 N. U hloubky záběru 0,5 mm dochází od $f_z = 0,5 – 0,7$ mm pozvolnému nárůstu síly na její maximální hodnotu 845,72 N, poté dojde k poklesu síly. Při $f_z = 0,8$ mm je řezná síla 734,23 N.



Obr. 43. Srovnání F_z u řezné rychlosti 180 m/min

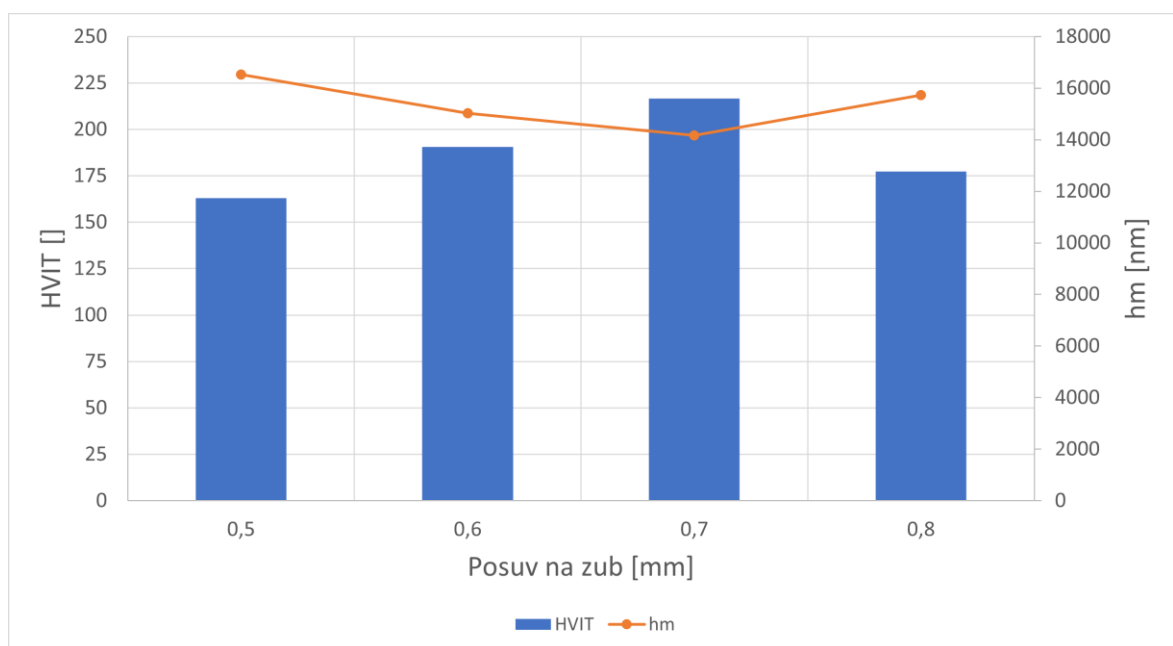
Mezi dalšími naměřenými parametry byly Vickersova tvrdost a indentační hloubka. U těchto veličin se hledala korelace se vstupními parametry (řezná rychlost, hloubka záběru a posuv na zub).

12.2 Tvrdost dle Vickerse – HVIT

Na Obr. 44 je zobrazena závislost Vickersovy tvrdosti na indentační hloubce. Tedy znázorňuje nám, do jaké míry je indentační hloubka závislá na vytvořené zpevněné vrstvě, která vznikla během obrábění. Na první pohled jde zpozorovat, že se zvyšující se Vickersovou tvrdostí klesá indentační hloubka (hloubka, v které bylo provedené měření mikrotvrdosti podle kapitoly 9.2.3). Čím menší Vickersova tvrdost, tím větší indentační hloubka, tím menší zpevněná vrstva po obrábění.

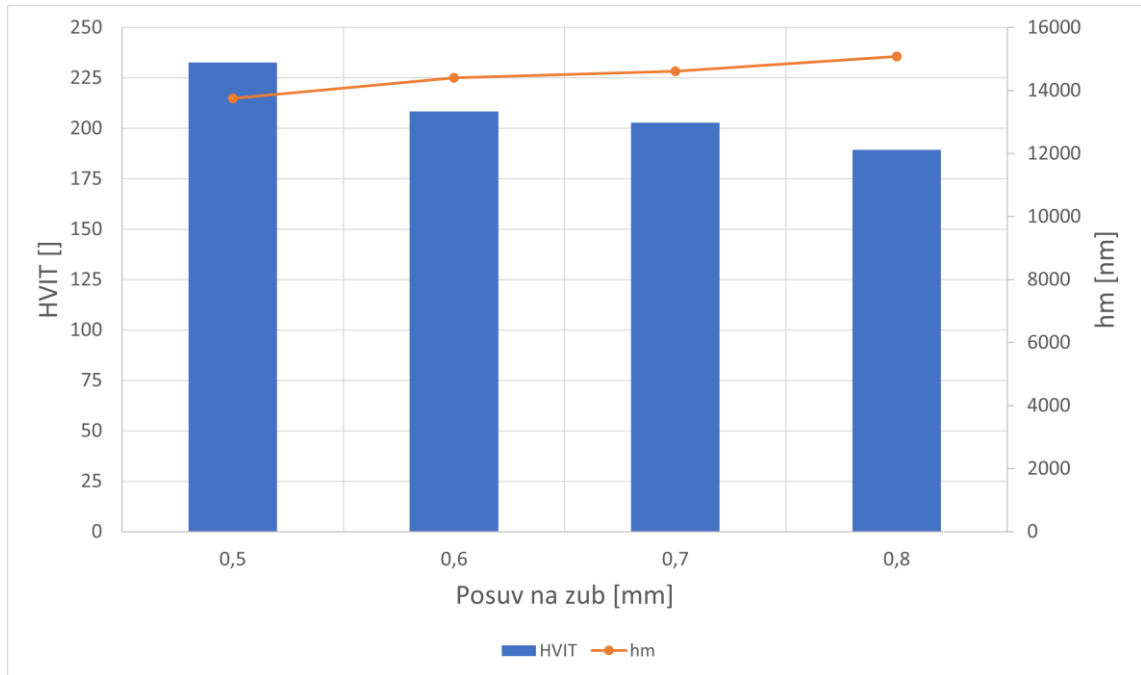
Obr. 44 znázorňuje, že největší hodnota Vickersovy tvrdosti je u $f_z = 0,7$ mm, kde byla naměřena hodnota 216,66 N. U tohoto posuvu na zub je indentační hloubka 14 161 nm. Nejmenší hodnota Vickersovy tvrdosti byla naměřena u $f_z = 0,5$ mm. Zde byla tvrdost 163,06 a indentační hloubka 16 526 nm.

Pro řeznou rychlost 160 m/min a konstantní radiální záběr 14 mm jsou nejvhodnější řezné parametry $a_p = 0,8$ mm a $f_z = 0,5$ mm. Zde je nejmenší naměřená hodnota Vickerse 159,17 a indentační hloubka 16 638 nm. Tím dojde k nejmenšímu zpevnění vrstvy pro následné obrábění (dokončování). Oproti původní tvrdosti HV 150, došlo ke zpevnění povrchu o 5,76 %.



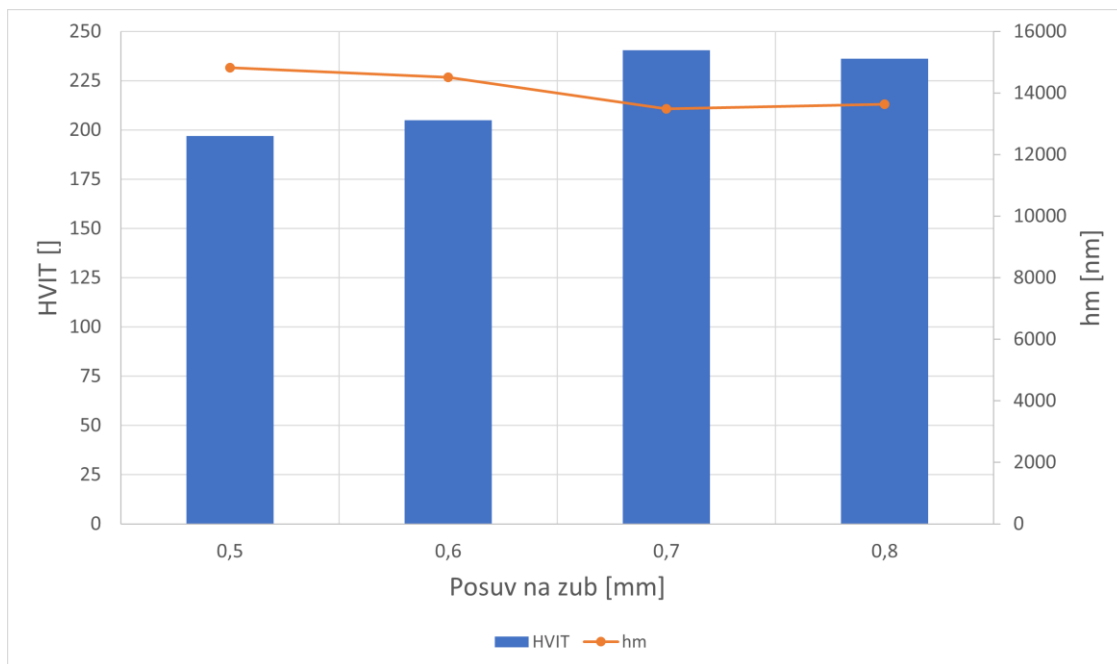
Obr. 44. Vickersova tvrdost a indentační hloubka u $a_p = 0,7$ mm a $v_c = 160$ m/min
 Na Obr. 45 je znázorněna závislost Vickersovy tvrdosti na indentační hloubce u řezné rychlosti 200 m/min, hloubce řezu 0,7 mm a konstantním radiálním záběru 14 mm. Největší Vickersova tvrdost byla naměřena u $f_z = 0,5$ mm, její hodnota je 232,64. Indentační hloubka je zde 13 756 nm. Nejmenší tvrdost 189,39 je u $f_z = 0,8$ mm. Indentační hloubka je 15 080 nm.

Pro řeznou rychlost 200 m/min a konstantní radiální záběr 14 mm jsou nejvhodnější řezné parametry $a_p = 0,6$ mm a $f_z = 0,5$ mm. Zde je nejmenší naměřená hodnota Vickerse 159,31 a indentační hloubka 16 675 nm. Tím dojde k nejmenšímu zpevnění vrstvy pro následné obrábění (dokončování).

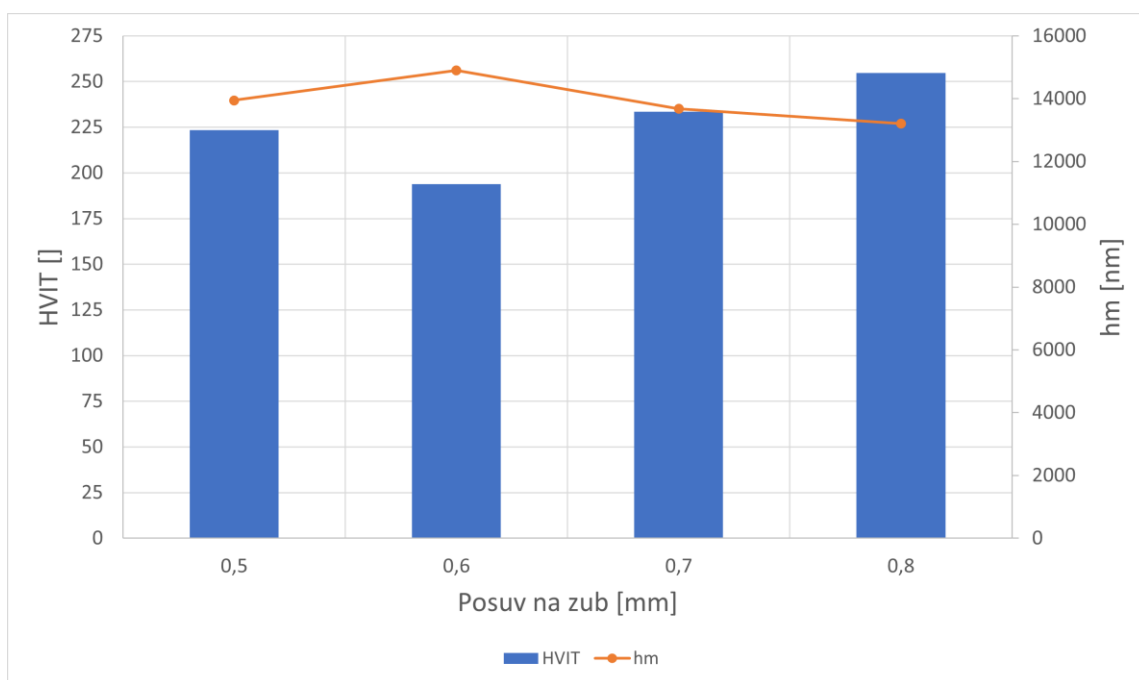


Obr. 45. Vickersova tvrdost a indentační hloubka u $a_p = 0,7$ mm a $v_c = 200$ m/min

Na dalších obrázcích je znázorněna závislost Vickersovy tvrdosti na indentační hloubce pro řeznou rychlost 180 m/min a konstantní radiální záběr 14 mm. Z předešlých obrázků (Obr. 41, Obr. 42 a Obr. 43) vyplývá, že řezné síly mají kolísavou (odlišnou) tendenci u $a_p = 0,5$ a $0,7$ mm. Pro tyto hloubky řezu byly vytvořeny grafy k podrobnému zkoumání. Na Obr. 46 je vyobrazena závislost Vickersovy tvrdosti na indentační hloubce při hloubce zářezu 0,5 mm a řezné rychlosti 180 m/min. Největší naměřená Vickersova tvrdost 240,58, je u $f_z = 0,7$ mm, indentační hloubka je potom 13 483 nm.



Obr. 46. Vickersova tvrdost a indentační hloubka u $a_p = 0,5$ mm a $v_c = 180$ m/min
 Na Obr. 47 je znázorněna závislost Vickersovy tvrdosti na indentační hloubce pro řeznou rychlost 180 m/min, hloubku řezu 0,7 mm a konstantní radiální záběr 14 mm. Největší Vickersova tvrdost je u $f_z = 0,8$ mm. Zde byla naměřena hodnota 254,77. Indentační hloubka má hodnotu 13 205 nm. Jedná se o největší hodnotu Vickerse, u řezné rychlosti 180 m/min, a zároveň nejmenší hodnotu indentační hloubky. S porovnáním s původní tvrdostí materiálu, se tvrdost (zpevnění) zvětšila o 41,12 %.



Obr. 47. Vickersova tvrdost a indentační hloubka u $a_p = 0,7$ mm a $v_c = 180$ m/min

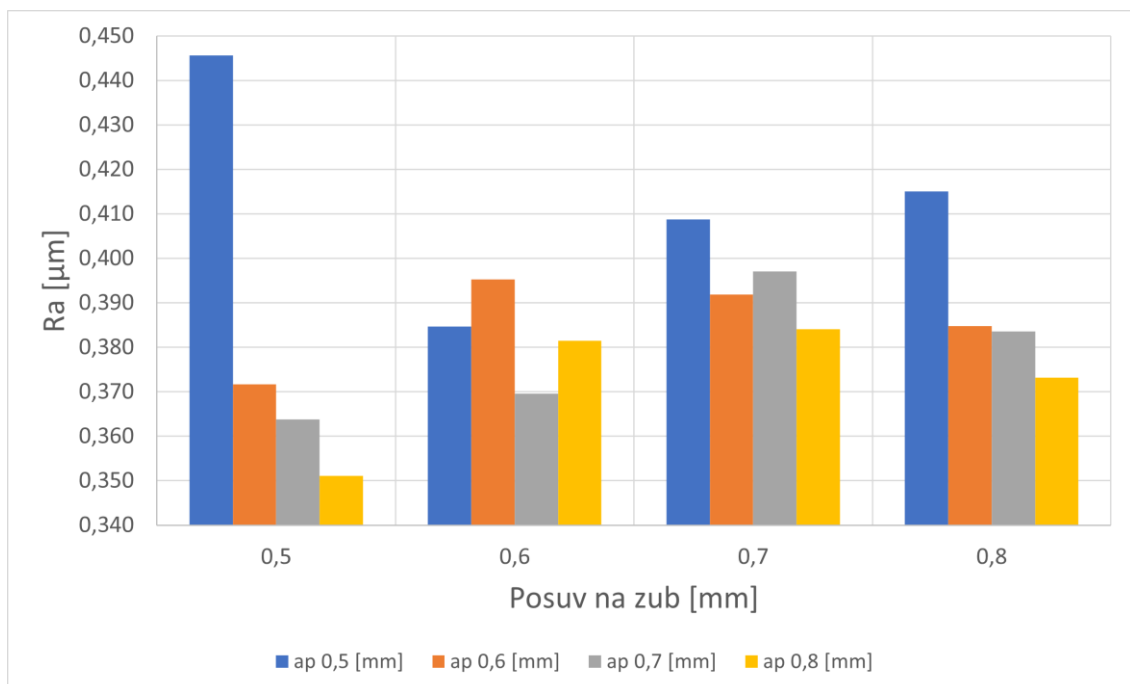
Pokud by se hledaly nejlepší podmínky pro obrábění, tedy parametry, při kterých došlo k nejmenšímu zpevnění, byla by to hloubka řezu 0,8 mm a posuv na zub 0,5 mm. U těchto parametrů byla neměřena nejmenší hodnota Vickersovy tvrdosti, 195,5, a zároveň největší hodnota indentační hloubky 14 920 nm.

12.3 Drsnost – R_a

I když se v praktické části využívala hrubovací operace za pomoci vysokoposuvového frézování, měřila se během experimentu drsnost obrobené plochy. Smyslem hrubování je odebrat co nejvíce materiálu za co nejkratší dobu bez požadavku na rozměrovou nebo povrchovou toleranci. Ovšem při správně nastavených řezných podmínkách u vysokoposuvového frézování lze při hrubování dosáhnout drsnosti povrchu jako u dokončování (jemného obrábění).

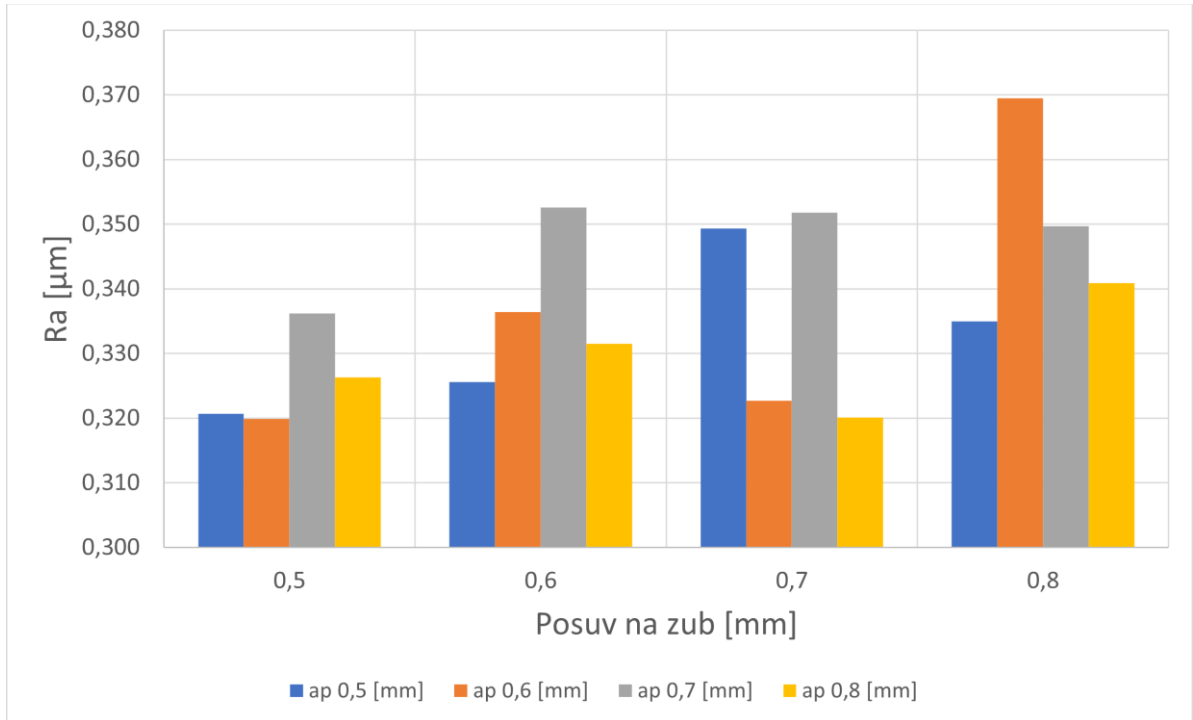
Výše popsáný experiment byl v této souvislosti úspěšný. Změnou řezných podmínek se docílilo dosáhnout maximální drsnosti (nejhorší povrch) $R_a = 0,4456 \mu\text{m}$. Nejmenší a tím pádem nejlepší drsnost byla naměřena $R_a = 0,319 \mu\text{m}$. Obě krajní hodnoty spadají do intervalu, ve kterém se nachází jemné obrábění ($0,2 - 1,6 \mu\text{m}$).

Na Obr. 48 je znázorněna drsnost povrchu u řezné rychlosti 200 m/min. Při nastavení hloubky záběru 0,5 mm a posuvu na zub 0,5 byla naměřena největší hodnota drsnosti povrchu $R_a = 0,4456 \mu\text{m}$.



Obr. 48. Drsnost u řezné rychlosti 200 m/min

Na Obr. 49 je vyobrazena drsnost obrobenej plochy při řezné rychlosti 180 m/min. U této rychlosti se naměřila nejmenší hodnota drsnosti povrchu. Při hloubce záběru 0,6 mm a posuvu na zub 0,5 mm to byla hodnota $R_a = 0,3199 \mu\text{m}$.



Obr. 49. Drsnost u řezné rychlosti 180 m/min

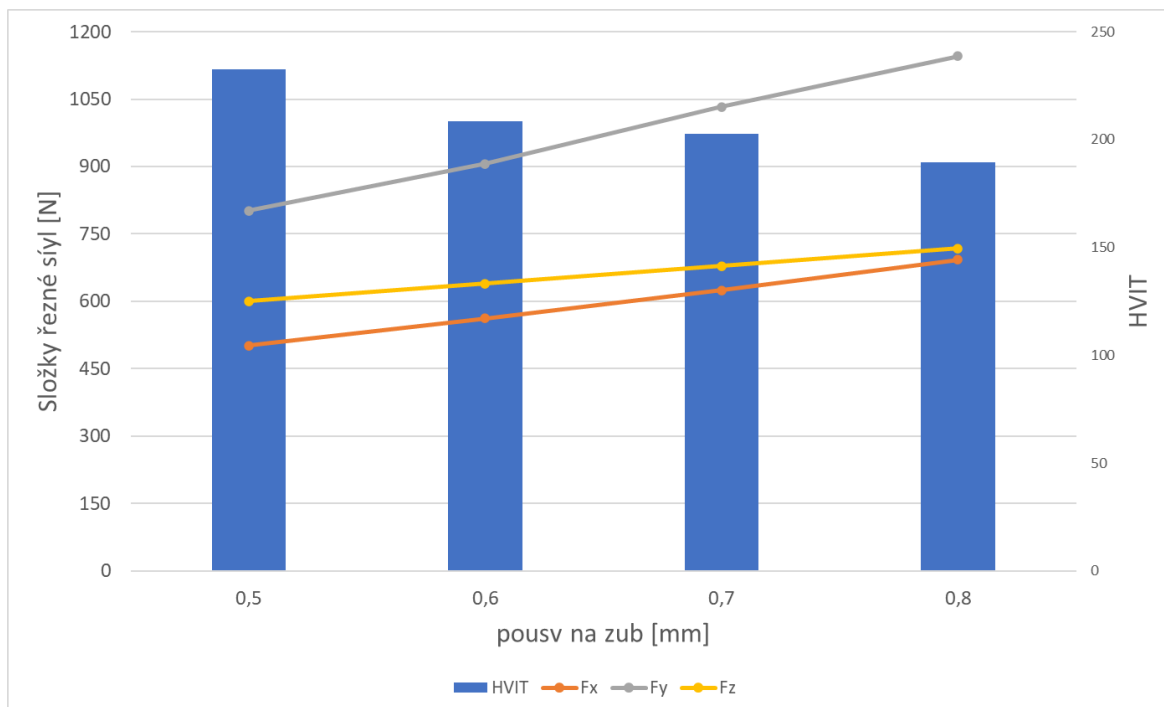
Pro vyhodnocení výsledků byly využity pouze některé grafy a naměřené hodnoty, které znázorňují průběhy, respektive trendy měření. Všechny grafy včetně výsledných hodnot měření jsou součástí přílohy elektronické podoby práce.

13 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Cílem praktické části bylo stanovit vliv hrubovací operace při vysokoposuvovém frézování pro následné dokončování. Byl zkoumán vliv řezných parametrů (řezná rychlost, hloubka záběru a posuv na zub) na zpevnění obrobenej plochy. Pro experiment byla využita nerezová ocel, která byla obráběna cermetovými břitovými destičkami s titanovým povlakem.

V diskusi výsledků budou porovnány jednotlivé výsledky řezných sil – F_x , F_y a F_z , drsnosti – R_a , tvrdosti podle Vickerse – $HVIT$ a indentační hloubky – hm a jejich korelace mezi sebou.

V závislosti řezné síly na tvrdosti povrchu (zpevnění povrchu) se projeví tři trendy. Prvním trendem byla klesající Vickersova tvrdost v závislosti na rostoucím průběhu řezných sil, při zvyšujícím se posuvu na zub a při konstantní hloubce řezu a řezné rychlosti. Tento průběh se projevil pouze u jedné kombinace řezných parametrů. Tyto parametry jsou uvedeny v Tab. 9. Samotný trend je poté vyobrazen na Obr. 50 pro řeznou rychlost 200 m/min a hloubku řezu 0,7 mm.



Obr. 50. Vliv řezných sil na zpevnění povrchu

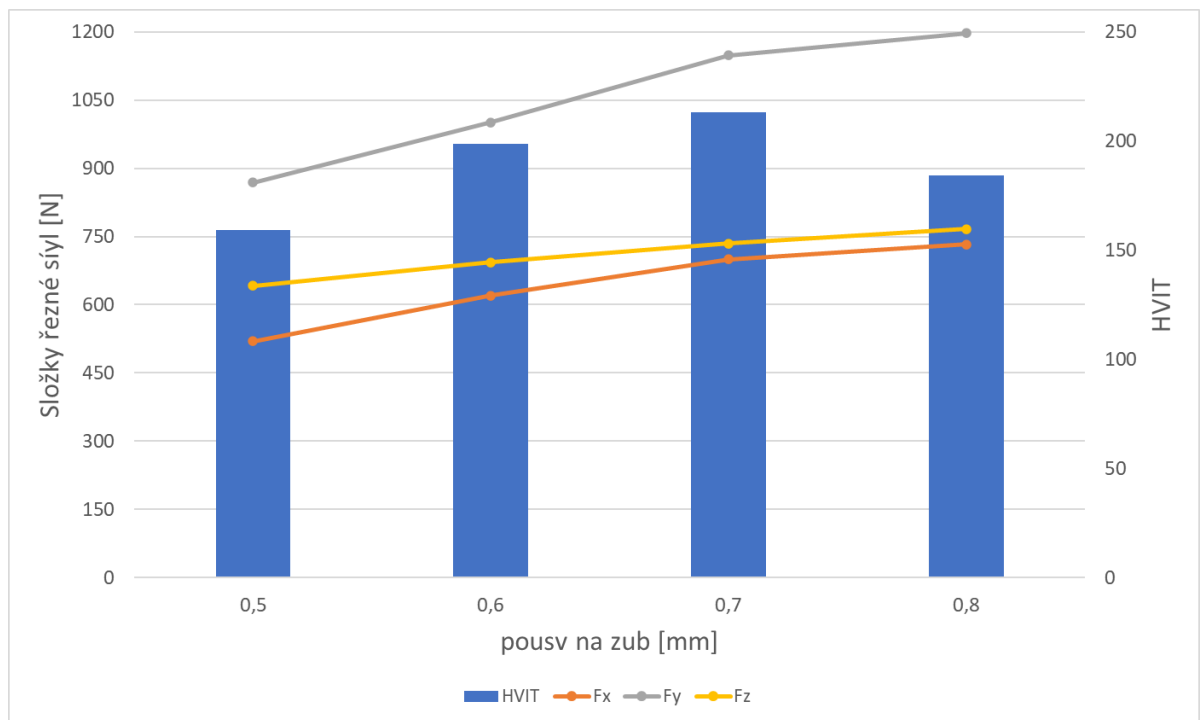
Tento trend je významný pro hrubovací operace, kde je vhodné, aby nedocházelo k velkému zpevnění obrobenej plochy pro následné dokončovací operace. Při velkém

zpevnění by při dokončování mohlo docházet k nárůstu opotřebení nástroje během procesu obrábění.

Tab. 9. Řezné parametry pro klesající průběh zpevnění

Ap [mm]	vc [m/min]
0,7	200

Jako druhý trend se projevila stoupající tvrdost dle Vickerse v závislosti na řezných silách. U těchto řezných parametrů vždy došlo k nárůstu Vickerse do posuvu na zub 0,7 mm (hraniční maximum), poté došlo k poklesu tvrdosti (zpevnění) i když řezné síly stále rostly. Tento trend je vyobrazen na Obr. 51 pro řeznou rychlost 160 m/min a hloubku řezu 0,8 mm. Průměrné hodnoty a řezné parametry jsou uvedeny v Tab. 10.



Obr. 51. Trend Vickersovy tvrdosti v závislosti na řezné síle

Tab. 10. Řezné parametry pro kolísavé zpevnění povrchu

Ap [mm]	vc [m/min]
0,6	160
0,7	160
0,8	160
0,5	180
0,6	200
0,8	200

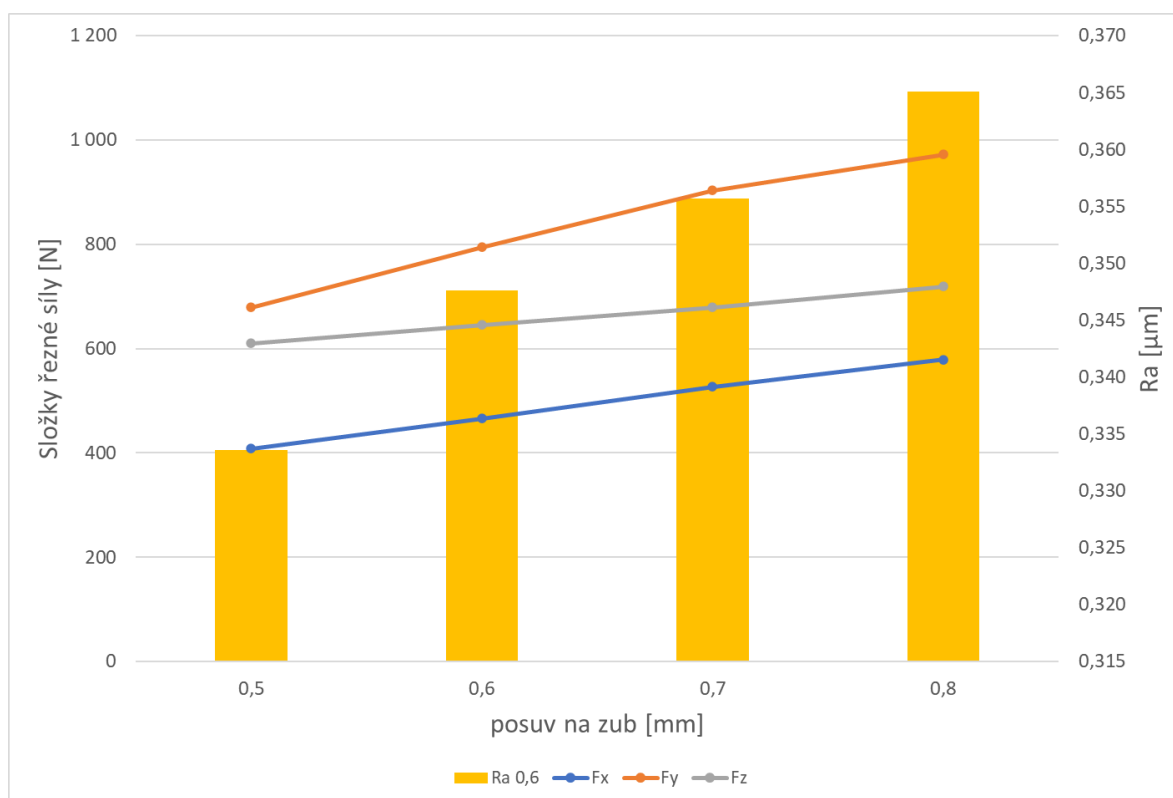
Třetí průběh je stoupajícího charakteru. Vlivem rostoucích řezných sil roste zpevnění obrobené plochy. Tento průběh se projevil u dvou kombinací řezných parametrů viz. Tab. 11.

Tab. 11. Řezné parametry pro rostoucí průběh zpevnění

A_p [mm]	v_c [m/min]
0,6	180
0,8	180

Indentační hloubka, která byla měřena, je závislá na tvrdosti podle Vickerse. Dle naměřených dat je možno pozorovat, že trendy indentační hloubky kopírují průběhy Vickersovy tvrdost. Ať už jde o rostoucí nebo klesající trend.

Na Obr. 52 je vyobrazena závislost drsnosti na řezných silách. Z obrázku vyplývá, že se zvyšujícími se řeznými silami roste drsnost obrobené plochy (zhoršuje se povrch). Tento trend je vhodný pro dokončovací operace, kde se klade důraz na jakost povrchu.



Obr. 52. Trend drsnosti v závislosti na řezné síle

Řezné parametry pro tento průběh jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12. Trend drsnosti v závislosti na řezné síle

A_p [mm]	v_c [m/min]
0,6	160

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce je stanovit vliv hrubovacích operací na dokončovací u technologie frézování. Teoretická část práce seznamuje čtenáře s aspekty kinematickými a fyzikálnímu při frézování. Popisuje možnosti využití materiálů pro nástroje a jejich opotřebení. Další část teorie se zabývá mikrotvrdostí, drsností a zbytkovým napětím (zpevněním).

V praktické části je popsán návrh experimentu rovinného frézování. Materiál, který byl pro experiment využit. Dále jsou popsány jednotlivé nástroje a stroje, které byly během měření využity. Následně je zde uvedena volba jednotlivých řezných parametrů (řezná rychlost, hloubka řezu a posuv na zub) a postup měření. Poslední část je zaměřena na zpracování výsledků a jejich vyhodnocení.

Měření poukazují, že s rostoucí velikostí řezných parametrů rostou řezné síly, které působí v procesu frézování. Ovšem tato prognóza se nepotvrdila u řezné rychlosti 180 m/min. Zde došlo k poklesu řezných sil (F_x , F_y a F_z) u hloubky řezu 0,5 a 0,7 mm při posuvu na zub 0,8 mm. U ostatních řezných rychlostí (160 a 200 m/min) je vzrůstající tendence řezných sil potvrzena. V praxi to tedy znamená, že pokud dochází ke zvyšování řezných sil při procesu obrábění, je nutné dbát na zvýšené požadavky na upínací soustavu stroje (upínací soustava stroje, upínací soustava obrobku). Mohou zde také vznikat vibrace, které mají negativní vliv na obrobenou plochu, případně může dojít k poškození nástroje (obrobku).

Z hlediska zpevnění povrchu, které má negativní vliv na další obrábění, byla měřena Vickersova tvrdost a indentační hloubka. Z těchto parametrů lze vyčíst, do jaké míry došlo ke zpevnění obrobeného povrchu při změně řezných parametrů. Nejmenší hodnoty Vickersovy tvrdosti byly naměřeny u řezné rychlosti 160 m/min, hloubce řezu 0,8 mm a posuvu na zub 0,5 mm. A dále také při řezné rychlosti 200 m/min, hloubce řezu 0,6 mm a posuvu na zub 0,5 mm. U rychlosti 160 m/min je to hodnota 159,17 a u 200 m/min jde o hodnotu 159,31. Naopak největší tvrdost (zpevnění povrchu) 254,77 byla naměřena u řezné rychlosti 180 m/min při hloubce řezu 0,7 mm a posuvu na zub 0,8 mm.

Během experimentu byly změřeny parametry jakosti povrchu (R_a , R_z , R_t). Nejlepší drsnost povrchu (nejmenší hodnota) $R_a = 0,3199 \mu\text{m}$ byla naměřena při řezné rychlosti 180 m/min, hloubce řezu 0,6 mm a posuvu na zub 0,5 mm. Největší hodnota drsnosti $R_a = 0,4456 \mu\text{m}$ byla naměřena u řezné rychlosti 200 m/min při hloubce řezu 0,5 mm a posuvu na zub 0,5 mm. Dle diskuse lze tedy konstatovat, že při těchto řezných podmínkách lze během hrubování dosáhnout jakosti povrchu jako při dokončování.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173s. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [3] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu v praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [4] Rohové frézování jako nikdy předtím. In: *WNT Ceratizit group* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.wnt.com/cz/zpravy/rohove-frezovani-jako-nikdy-predtim-842.html>
- [5] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění 1. díl*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 53-71s. ISBN 80-7183-337-1.
- [6] *Čelní frézování*: SANDVIK Coromant [online]. In: ©SandvikCoromant [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx>
- [7] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část*. Brno: 2003 [2020-12-03]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/DT3MK_STR3/um/TI_TO-1cast.pdf
- [8] *Technical Guide-turning-milling-drilling Boring-tool Holding*. Sandvik Coromant, 2010.
- [9] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. Díl 1, Nauka o materiálu. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 266 s. ISBN 8071832626.
- [10] HUMÁR, A., KOLOUCH J. *Materiály pro řezné nástroje*. 3., přeprac. vyd. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [11] Typy opotřebení. In: *ISCAR ČR s.r.o.* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/products.aspx/countryid/6/productid/12356>
- [12] *Hydraulický rozpínací upínač*: WINTER Servis [online]. In: . [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: http://www.winter-servis.cz/index.php?page=schunk/n_tendo

- [13] *Tepelný upínač*: SANDVIK Coromant [online]. In: [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/pages/chuck-selection.aspx>
- [14] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění 2. Díl*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. MM speciál. ISBN 80-718-3336-3.
- [15] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014, 162-332s. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [16] Cartidge Spindles. In: *CNC CookBook* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.cnccookbook.com/cnc-spindle-mill/>
- [17] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015, 240 s. ISBN 9788024752693.
- [18] SMID, Peter. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. 3rd ed. New York, NY: Industrial Press, c2008, xx, 540 s. ISBN 9780831133474. Dostupné také z: <http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip084/2007045901.html>
- [19] This diagram illustrates the 5 axes available on the UMC-750. In: *AC Manufacturing* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <http://www.acmanufacturing.com/5-axis-cnc-machining.htm>
- [20] RIBEIRO, João, Hernâni LOPES, Luis QUEIJO a Daniel FIGUEIREDO. Optimization of Cutting Parameters to Minimize the Surface Roughness in the End Milling Process Using the Taguchi Method. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* [online]. 2017, **61**(1), 30-35 [cit. 2020-12-05]. ISSN 03246051. Dostupné z: doi:10.3311/PPme.9114
- [21] WOJCIECHOWSKI, S., P. TWARDOWSKI, M. PELIC, R.W. MARUDA, S. BARRANS a G.M. KROLCZYK. Precision surface characterization for finish cylindrical milling with dynamic tool displacements model. *Precision Engineering* [online]. 2016, **46**, 158-165 [cit. 2020-12-05]. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2016.04.010

- [22] *Řezné podmínky při obrábění* [online]. In: TU v Liberci [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://pdf4pro.com/view/www-kom-tul-cz-2e3cfa.html>
- [23] SKOPEČEK, Tomáš a Petr HOFMANN. Frézovací strategie při výrobě forem a zápusťek. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 18.5.2005, 2005, 22 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-form-a-zapusťek.html>
- [24] GURYČA, Adam. *CAMservis.cz: Frézovací cykly* [online]. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <http://www.camservis.cz/frezovani/>
- [25] Iscar's indexable FFQ4 high-feed milling cutters to enhance rough milling of high-temperature alloy materials. In: *MetalWorkingNews* [online]. 2013 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <http://metalworkingnews.info/iscars-indexable-ffq4-high-feed-milling-cutters-to-enhance-rough-milling-of-high-temperature-alloy-materials/>
- [26] Akademie CNC obrábění (13) [online]. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-13_8548.html
- [27] 6 způsobů optimalizace frézování s vysokým posuvem [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/six-points-you-must-know-about-high-feed-milling->
- [28] Frézování s vysokým posuvem – klíč ke zvýšení produktivity [online]. [cit. 2020-12-03]. <https://www.aero-mag.com/high-feed-milling-key-increased-productivity/>
- [29] Frézování s vysokým posuvem [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianindustrialmachinery/article/management/shallow-doc-and-high-speed-toolpaths-combine-to-maximize-metal-removal>
- [30] Volba nástrojů. In: *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>
- [31] Difference Between Roughing and Finishing in Machining. *Differencebox* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z:

- <http://www.differencebox.com/engineering/difference-between-roughing-and-finishing-in-machining/>
- [32] BUMBÁLEK, Bohumil. *INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ VÝZNAM PRO POSOUZENÍ VHODNOSTI DANÉ PLOCHY PRO JEJÍ FUNKCI* [online]. 2005 [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [33] DOLEŽAL, Pavel; PACAL, Bohumil. *Hodnocení mikrotvrdomosti struktur materiálů*. Brno: VUT, 2006. 41 s.
- [34] ŠAŠINKA, R., Diplomová práce – Mikrotvrdomost kovů, Zlín: UTB 2012, 82 s
- [35] DUŠEK, J., Dizertační práce – Tvrdomost, mikrotvrdomost, nanotvrdomost – čisté kovy měřené metodou DSI, Brno: Masarykova univerzita v Brně, 171 s.
- [36] Vickers Hardness Testing. In: *Buehler* [online]. [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.buehler.com/vickers-hardness-testing.php>
- [37] PRATO, Andrea, Claudio ORIGLIA a Alessandro GERMAK. Verification of Knoop indenters with a Vickers-addressed optical system. *Measurement* [online]. 2020, **163** [cit. 2020-12-08]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2020.107928
- [38] Knoop Hardness Testing. In: *Buehler* [online]. [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.buehler.com/knoop-hardness-testing.php>
- [39] MA, Yuan, Pingfa FENG, Jianfu ZHANG, Zhijun WU, Dingwen YU a G.M. KROLCZYK. Prediction of surface residual stress after end milling based on cutting force and temperature. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2016, **235**, 41-48 [cit. 2020-12-08]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.04.002
- [40] SKOPEČEK, Tomáš, Petr HOFMANN a Michal ŠVANTNER. Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. TU v Liberci, 2007, 23.5.2007 [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani.html>

- [41] GORDEYKO, Diana. Integrita povrchu pro obrábění [online]. Praha, 2015 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/63543> Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Rázek, CSc
- [42] MASMIATI, Nik, Ahmed A.D. SARHAN, Mohsen Abdel Naeim HASSAN, Mohd HAMDI, Dingwen YU a G.M. KROLCZYK. Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel. *Measurement* [online]. 2016, **86**, 253-265 [cit. 2020-12-09]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2016.02.049
- [43] 321/321H Stainless steel. *Pennstainless* [online]. [cit. 2021-1-15]. Dostupné z: <https://www.pennstainless.com/resources/product-information/stainless-grades/300-series/321-321h-stainless-steel/>
- [44] 321 (1.4541) Stainless steel. *Bircelik* [online]. [cit. 2021-1-15]. Dostupné z: <https://bircelik.com/en/category/321-1-4541->
- [45] Stainless steel – grade 321 (UNS S32100). *Azom* [online]. [cit. 2021-1-15]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=967>
- [46] DMU 50: Univerzální frézka. *DMG MORI* [online]. [cit. 2021-1-15]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50-2nd-generation>
- [47] Compact Multi-Component Dynamometer up to 10 kN: Data sheets. In: *KISTLER* [online]. [cit. 2021-1-15]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-9129aa/>
- [48] Multicomponent Dynamometer up to 10 kN: Data sheets. In: *KISTLER* [online]. [cit. 2021-1-16]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/document/000-709e.pdf>
- [49] Přenosný přístroj na měření drsnosti povrchu Mitutoyo Sj 410. *Gamin* [online]. [cit. 2021-1-16]. Dostupné z: <https://www.gamin.cz/mitutoyo-sj-410/>
- [50] Drsnoměr surfctest SJ-411. *Stools* [online]. [cit. 2021-1-16]. Dostupné z: https://www.stools-shop.cz/drsnomer-surfctest-sj-411--mm--2/?gclid=Cj0KCQiAvbiBBhD-ARIsAGM48byNwfk0vCA6-eAA_AQY210cGFFyiQrxw7aITFxag44nPyP_qWtAsoaAi5vEALw_wcB

- [51] Surfrest SJ-410 Series 178 – Portable surface. *Mitutoyo* [online]. [cit. 2021-1-16]. Dostupné z: <https://ecatalog.mitutoyo.com/Surfrest-SJ-410-Series-178-Portable-Surface-C1822.aspx>
- [52] Mitutoyo: Surfrest SJ-410. *Mitutoyo: Přístroje na měření tvaru* [online]. [cit. 2021-1-16]. Dostupné z: <https://store.gaging.com/178-039-surfrest-sj-410-mitutoyo-simple-column-stand>
- [53] Micro Combi Tester od firmy CSM Instruments [online]. [cit. 2021-1-16]. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/vedaavyzkum/pristrojovevybavenimericikontrolniatestovacistroje/>
- [54] SECO: LPHT060310TR-M06 MS2050 [online]. [cit. 2021-1-17]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02899509
- [55] Nové frézovací třídy SECO MS2050 optimalizované pro obrábění titanu [online]. [cit. 2021-1-17]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/20874>
- [56] SECO: R217.21-1020.RE-LP06.3A [online]. [cit. 2021-1-17]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02789701
- [57] SECO: E347658201060 [online]. [cit. 2021-1-17]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02444588
- [58] Analyzing and optimizing cutting processes kistler [online]. [cit. 2021-1-17]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/download/960-002e.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

v_c	Řezná rychlost
f_z	Posuv na zub
a_p	Hloubka řezu
F_x	Síla působící na dynamometru v ose X
F_y	Síla působící na dynamometru v ose Y
F_z	Síla působící na dynamometru v ose Z
R_a	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R_z	Největší výška profilu
R_t	Celková výška prvků profilu
C	Uhlík
Cr	Chrom
Co	Cobalt
Mn	Mangan
Mo	Molybden
N	Dusík
Ni	Nikl
P	Síra
Si	Křemík
Ti	Titan
V	Vanad
W	Wolfram
HSC	Vysokorychlostní obrábění (High Speed Cutting)
HFC	Vysokoposuvové obrábění (High Feed Cutting)
HFM	Vysokoposuvové frézování (High Feed Milling)
a_e	Radiální záběr nástroje

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Frézování [4].....	11
Obr. 2. Čelní frézování [6].....	13
Obr. 3. Válcové frézování [7]	14
Obr. 4. Nesousledné frézování [8].....	14
Obr. 5. Sousledné frézování [8].....	15
Obr. 6. Některé druhy fréz [5]	16
Obr. 7. Základní mechanizmy opotřebení břitu nástroje [1].....	23
Obr. 8. Zlomení břitové destičky [11]	26
Obr. 9. Vylámání hran břitu [11]	26
Obr. 10. Opotřebení hřbetu destičky [11].....	26
Obr. 11. Vymílání destičky [11]	27
Obr. 12. Tvorba nárůstku na destičce [11].....	27
Obr. 13. Hřebenové trhliny na destičce [11].....	27
Obr. 14. Hydraulický rozpínací upínač [12].....	29
Obr. 15. Tepelný upínač [13].....	29
Obr. 16. Nosná soustava [15].....	31
Obr. 17. CNC ATC kazetové vřeteno [16]	32
Obr. 18. Definice kartézských souřadnic – pravidlo pravé ruky [17].....	33
Obr. 19. Schéma pohybů stroje v jednotlivých osách frézovacího centra UMC-750 [19]..	33
Obr. 20. Frézování – hrubování [25]	35
Obr. 21. Obrábění načisto [30]	37
Obr. 22. Porovnání tvarových fréz [30].....	38
Obr. 23. Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [36]	40
Obr. 24. Schéma zkoušky tvrdosti podle Knoopu [38].....	42
Obr. 25. Pětiosé CNC obráběcí centrum DMU 50 [46].....	48
Obr. 26. Dynamometr Kistler 9129AA [47].....	49
Obr. 27. Drsnoměr Mitutoyo SJ – 410 [52].....	50
Obr. 28. Micro Combi Tester od firmy CSM Instruments [53].....	51
Obr. 29. Cermetové břitová destička LPHT060310TR-M06 MS2050 [54].....	51
Obr. 30. Frézovací hlava R217.21-1020.RE-LP06.3A [56]	52
Obr. 31. Upínací trn	52
Obr. 32. Polotovár nerezové oceli 1.4541	53
Obr. 33. Příprava vzorků pro uchycení na dynamometru.....	54
Obr. 34. Uchycení dynamometru a vzorku ke stolu stroje	54

Obr. 35. Rozložení řezných sil u dynamometru Kistler 9129AA [58]	55
Obr. 36. Směr řezu nástroje	56
Obr. 37. Zkušební měření indentační hloubky	57
Obr. 38. Srovnání F_x u řezné rychlosti 160 m/min	60
Obr. 39. Srovnání F_y u řezné rychlosti 160 m/min	60
Obr. 40. Srovnání F_z u řezné rychlosti 160 m/min.....	61
Obr. 41. Srovnání F_x u řezné rychlosti 180 m/min	62
Obr. 42. Srovnání F_y u řezné rychlosti 180 m/min	62
Obr. 43. Srovnání F_z u řezné rychlosti 180 m/min.....	63
Obr. 44. Vickersova tvrdost a indentační hloubka u $a_p = 0,7$ mm a $v_c = 160$ m/min	64
Obr. 45. Vickersova tvrdost a indentační hloubka u $a_p = 0,7$ mm a $v_c = 200$ m/min	65
Obr. 46. Vickersova tvrdost a indentační hloubka u $a_p = 0,5$ mm a $v_c = 180$ m/min	66
Obr. 47. Vickersova tvrdost a indentační hloubka u $a_p = 0,7$ mm a $v_c = 180$ m/min	66
Obr. 48. Drsnost u řezné rychlosti 200 m/min.....	67
Obr. 49. Drsnost u řezné rychlosti 180 m/min.....	68
Obr. 50. Vliv řezných sil na zpevnění povrchu	69
Obr. 51. Trend Vickersovy tvrdosti v závislosti na řezné síle	70
Obr. 52. Trend drsnosti v závislosti na řezné síle	71

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Nástrojové oceli [9]	18
Tab. 2. Vlastnosti legujících prvků [9]	19
Tab. 3. Srovnání základních parametrů hrubování a dokončování [31]	38
Tab. 4. Oblasti zkušebních zatížení pro kovové materiály u tvrdosti dle Vickerse [33,35]	40
Tab. 5. Zkouška tvrdosti podle Knoop – zkušební zatížení [33, 35]	42
Tab. 6. Procentuální chemické složení materiálu 1.4541 [43, 44, 45].....	47
Tab. 7. Vlastnosti DMU 50 [46]	49
Tab. 8. Zvolené řezné parametry pro frézování nerezové oceli.....	56
Tab. 9. Řezné parametry pro klesající průběh zpevnění.....	70
Tab. 10. Řezné parametry pro kolísavé zpevnění povrchu.....	70
Tab. 11. Řezné parametry pro rostoucí průběh zpevnění	71
Tab. 12. Trend drsnosti v závislosti na řezné síle	71

SEZNAM PŘÍLOH

Elektronická příloha:

Excel soubor s výslednými hodnotami a grafy