



# Využití nových nástrojů při frézování kovových materiálů

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

*Autor práce:*

*Vedoucí práce:*

B0715A270008 Strojírenství

**Kryštof Krejčík**

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Katedra obrábění a montáže





## Zadání bakalářské práce

# Využití nových nástrojů při frézování kovových materiálů

*Jméno a příjmení:* **Kryštof Krejčík**  
*Osobní číslo:* S19000057  
*Studijní program:* B0715A270008 Strojírenství  
*Zadávací katedra:* Katedra obrábění a montáže  
*Akademický rok:* **2021/2022**

### Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o frézování kovových materiálů. Analýza současného stavu nabídky řezných nástrojů pro frézování v porovnání se stávajícími běžně používanými nástroji.
2. Volba řezných nástrojů (nové a dlouhodobě využívané nástroje) a řezných podmínek.
3. Návrh metodiky experimentů při frézování kovových materiálů s využitím nových a dlouhodobě využívaných nástrojů, z hlediska opotřebení řezného nástroje, sil při obrábění a kvality obrobeného povrchu.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje, sil při obrábění a kvality obrobeného povrchu.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

Obrázky, tabulky a grafy – dle potřeby  
30 – 40 stran textu  
tištěná/elektronická  
Čeština



### Seznam odborné literatury:

1. KOČMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
2. BILÍK, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikální mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostava: Vysoká škola báňská – TU Ostava, 1994. 132 s. ISBN – 80-7078-228-5.
3. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s.r.o., 2008. 235 s. ISBN: 8025422505.
4. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. *Jakost obráběných povrchů*. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.
5. Firemní podklady.

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.  
Katedra obrábění a montáže

*Datum zadání práce:*

8. listopadu 2021

*Předpokládaný termín odevzdání:*

8. května 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

L.S.

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková,  
Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

10. května 2022

Kryštof Krejčík

## Poděkování

Tímto děkuji vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. a konzultantům panu Bc. Martinu Váňovi a Ing. Tomáši Knápkovi za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této bakalářské práce.

## **Anotace**

Obsahem bakalářské práce je porovnání stávajících a nových nástrojů při frézování kovových materiálů.

Teoretická část bakalářské práce obsahuje potřebné informace týkající se zkoumané problematiky. V této části práce jsou informace o technologii frézování, materiálech nástrojů a opotřebení nástrojů.

Experimentální část bakalářské práce obsahuje informace o použitých strojích a metodice měření. Na konci práce v diskuzi a závěru jsou vyhodnoceny naměřené hodnoty a zhodnocení experimentu.

Klíčová slova: frézování, drsnost povrchu, opotřebení břitu, slinutý karbid, rychlořezná ocel.

## **Annotation**

The content of the bachelor thesis is a comparison of existing and new tools in milling metal materials.

The theoretical part of the bachelor's thesis contains the necessary information about regarding the researched issues. This part of the work contains information about milling technology, tool materials and tool wear.

The experimental part of the bachelor thesis contains information about the used machines and measurement methodology. At the end of the work in the discussion and in the conclusion are described measured values and evaluation of the experiment are described and evaluated.

Keywords: milling, surface roughness, cutting edge wear, sintered carbide, high speed steel.

Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: **KOM 1320**

Jméno a příjmení: **Kryštof Krejčík**

Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.  
Konzultant: Ing. Tomáš Knápek  
Bc. Martin Váňa

Počet stran: 70  
Počet příloh: 1  
Počet tabulek: 25  
Počet obrázků: 32  
Počet diagramů: 35

## Obsah

1. Úvod.....	12
2. Teoretická část .....	13
2.1 Frézování .....	13
2.2 Druhy frézování.....	13
2.2.1 Sousedné .....	13
2.2.2 Nesousedné .....	14
2.3 Materiály řezných nástrojů.....	15
2.3.1 Současné materiály.....	15
2.3.2 Slinutý karbid.....	15
2.3.3 Povlakovaný slinutý karbid .....	16
2.3.4 Rychlořezná ocel.....	16
2.3.5 Řezná keramika .....	16
2.3.6 Cermety .....	17
2.3.7 Polykrystalický diamant.....	18
2.4 Frézy .....	18
2.4.1 Inovace u řezných nástrojů.....	18
2.4.2 Speciální frézy pro zdravotnictví.....	19
2.5 Formy opotřebení řezného nástroje .....	19
2.5.1 Otěrem .....	19
2.5.2 Plastickou deformací.....	20
2.5.3 Křehkým lomem .....	21
2.6 Síly při frézování .....	21
3. Metodika experimentu .....	23
3.1 Nástroj.....	23
3.2 Materiál .....	24
3.2.1 Výroba vzorků .....	24
3.3 Způsob obrábění.....	24
3.4 Použité stroje .....	26
3.4.1 Frézka FNG 32.....	26
3.4.2 Pásová pila.....	27
3.5 Měřené parametry .....	28
3.5.1 Řezné síly.....	28
3.5.2 Měření drsnosti povrchu .....	30
3.5.3 Měření opotřebení řezného nástroje .....	32
4. Realizace experimentu.....	33



4.1 Řezné síly v závislosti na čase při otáčkách $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ .....	33
4.2 Řezné síly v závislosti na čase při otáčkách $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ .....	36
4.3 Řezné síly v závislosti na čase při otáčkách $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ .....	38
4.4 Závislost sil na řezné rychlosti.....	41
4.5 Závislost řezné rychlosti na drsnosti povrchu .....	44
4.6 Závislost drsnosti povrchu na čase .....	47
4.7 Závislost opotřebení břítu nástroje na čase .....	53
4.8 Závislost opotřebení břítu na drsnosti povrchu .....	57
5. Ekonomicko-technologické zhodnocení experimentů .....	60
5.1 Technologické zhodnocení experimentů.....	60
5.2 Ekonomické zhodnocení experimentů .....	62
6. Diskuze .....	66
7. Závěr.....	69
Seznam použité literatury .....	70

## Seznam zkratk a symbolů

$D$	[mm]	průměr frézy
$f_o$	[mm]	posuv na otáčku
$f_z$	[mm]	posuv na zub
$h_i$	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
$k_{ci}$	[N.mm <sup>-2</sup> ]	měrná řezná síla
$n$	[ot.min <sup>-1</sup> ]	otáčky
$v_c$	[mm.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$v_f$	[mm.min <sup>-1</sup> ]	rychlost posuvu
$x$	[-]	exponent vlivu tloušťky třísky
$AD_i$	[mm <sup>2</sup> ]	průřez třísky
$CF_c$	[-]	konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu
$F_{ci}$	[N]	složka řezné síly
$F_{cNi}$	[N]	složka řezné síly
$F_i$	[N]	celková řezná síla
$F_{fi}$	[N]	složka řezné síly
$F_{fNi}$	[N]	složka řezné síly
$F_x$	[N]	síla v ose X
$F_y$	[N]	síla v ose y
$F_z$	[N]	síla v ose Z
$R_a$	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
$R_t$	[μm]	celková výška profilu
$R_z$	[μm]	nejvyšší výška profilu
$\varphi_i$	[°]	úhel pootočení břitu
$\psi$	[°]	úhel záběru ostří
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo
$\kappa_r$	[°]	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
$a_e$	[mm]	šířka záběru
$a_p$	[mm]	hloubka záběru
$t$	[min]	čas
$z$	[-]	počet zubů
HSS		High speed steel - rychlořezná ocel

SK

Slinutý karbid

PVD

physical vapour depozition – fyzikální napařování

CVD

chemical vapour depozition – chemické napařování

## 1. Úvod

Frézování kovových materiálů je jednou z nejdůležitějších třískových technologií. V posledních letech se kvůli vyšším nárokům na kvalitu výroby, zvyšujícím se požadavkům na řezné podmínky a menší drsnosti obráběného povrchu začaly vyvíjet nové inovativní metody frézování kovů. Kvůli zvyšujícím se řezným podmínkám se začalo hledět na opotřebení řezného nástroje. Díky tomu se začaly zdokonalovat i řezné nástroje.

Kovy v dnešní době jsou v průmyslu nahrazovány kompozitními materiály, ovšem kovové materiály mají své výhody, jako jsou dostupnost, pevnost a tvrdost, ale také mají své nevýhody, např. hmotnost, cena a možnost koroze.

Bakalářská práce se zabývá využitím nových nástrojů při frézování kovových materiálů.

Hlavním cílem předkládané práce bylo porovnání dvou zvolených řezných nástrojů. K dosažení cíle bylo potřeba vytvořit metodiku na měření řezných sil, drsnost povrchu obrobku a opotřebení řezného nástroje, včetně celkového vyhodnocení naměřených dat. Dále jsou porovnány řezné nástroje při optimálních řezných podmínkách na základě ekonomicko-technologického hlediska.

Pro dosažení cíle jsou potřebné teoretické znalosti dané problematiky, které se nacházejí v teoretické části této práce.

## 2. Teoretická část

Teoretická část obsahuje informace o frézování kovových materiálů a způsobech frézování. Dále se v práci nachází shrnutí poznatků o řezných materiálech, řezných nástrojích a opotřebení břitu nástroje.

### 2.1 Frézování

Frézování je obráběcí metoda, při které je materiál obrobku odebírán břity otáčejícího se nástroje. Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvné pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky.

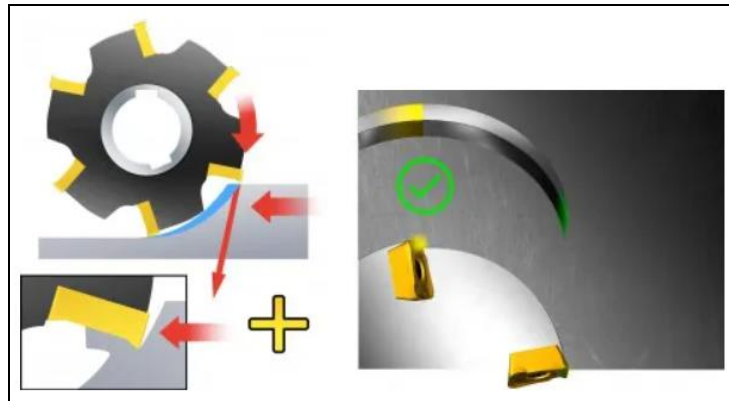
Frézování je obrábění rovinných nebo tvarových ploch, vnitřních nebo vnějších, vícebřitým nástrojem. Nástroj – fréza – je většinou vícebřítý. Z hlediska chvění je výhodné, je-li v záběru s obrobkem více břitů současně. Při frézování koná hlavní řezný pohyb (rotační) nástroj a obrobek koná pohyb posuvný obvykle přímočarý, někdy otáčivý, nebo obecný pohyb po prostorové křivce. [1] [2]

### 2.2 Druhy frézování

#### 2.2.1 Sousledné

Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku (viz obr. 2.1). Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí obvykle směrem dolů. Sousledné frézování může probíhat pouze na přizpůsobeném stroji při vymezené vůli a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. V opačném případě způsobuje vůle nestejný posuv, při němž může dojít k poškození nástroje, popř. i stroje.

Je-li nástroj vtahován do obrobku, posuv se nežádoucím způsobem zvyšuje, což může mít za následek nepřiměřeně velkou tloušťku třísky a vést až k lomu břitu. V takovém případě lze uvážit použití nesousledného frézování.

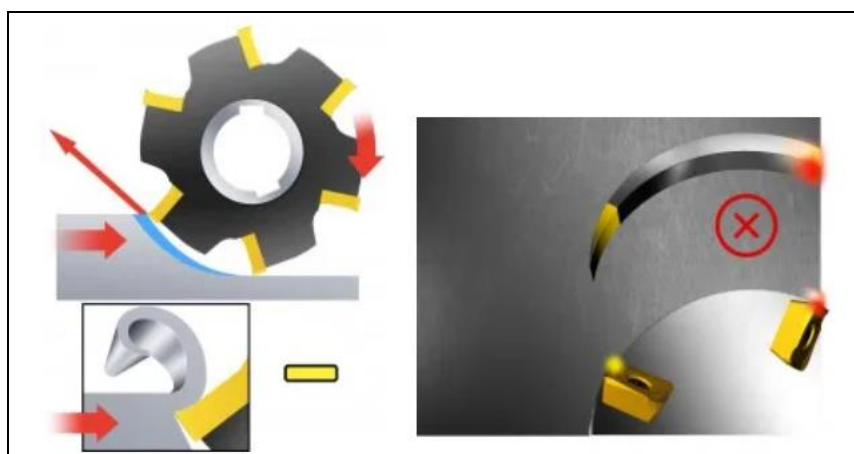


Obr. 2.1 Sousedné frézování [3]

### 2.2.2 Nesousledné

Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku (viz obr. 2.2). Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. K oddělování třísky nedochází v okamžiku její nulové tloušťky, ale po určitém skluzu bříty po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Při tom vznikají silové účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení bříty. Řezná síla při protisměrném frézování má složku, která působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu.

Nesousledné frézování může být výhodné v případě, že se značně liší velikosti přídavek na obrábění. Nesousledné frézování je rovněž doporučeno v případě použití keramických břitových destiček pro obrábění žárovzdušných slitin, protože řezná keramika je citlivá na rázy při vstupu do řezu. [2] [3]



Obr. 2.2 Nesousledné frézování [3]

## **2.3 Materiály řezných nástrojů**

### **2.3.1 Současné materiály**

Existují různé typy řezných materiálů: slinutý karbid, polykrystalický diamant, rychlořezná ocel, řezná keramika atd. V různých fázích historie obrábění kovů vedlo zavedení každého řezného materiálu a jeho používání k významné změně řezných rychlostí a následně s tím spojenému zvýšení produktivity. Ačkoliv se předchozí století, zejména jeho druhá polovina, vyznačovalo rychlým vývojem v oblasti řezných materiálů, dnes v této oblasti nenacházíme žádná významná nová řešení. Znamená to snad, že vývoj dalších nových materiálů již dosáhl svého technického vrcholu a nachází se ve fázi své stagnace? Samozřejmě že ne. Vývoj nových materiálů se zaměřil spíše na jejich strukturu, nelze jej proto pozorovat pouhým okem, ale např. pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM), rentgenové difrakce (XRD), metodou difrakce zpět odražených elektronů (EBSD) a dalšími sofistikovanými metodami.

### **2.3.2 Slinutý karbid**

V dnešní době je nejběžnějším dostupným řezným materiálem povlakovaný slinutý karbid. Z hlediska výkonu představuje tento řezný materiál ideální poměr mezi účinností, životností a ekonomickými náklady. Slinutý karbid je také znám pod pojmy „tvrdokov“, „karbid wolframu“ nebo jednoduše „karbid“. Kombinace slinutého karbidu, povlaku a následné speciální postpovlakovací úpravy tvoří jakost karbidu neboli třídu karbidu. Pouze jedna z těchto složek – slinutý karbid – je základním a nezbytným prvkem této třídy. Ostatní jsou volitelné.

Slinutý karbid je kompozitní materiál obsahující jemná zrna tvrdého karbidu, kde pojivem těchto částic je kov (zejména kobalt). Většina karbidů používaných k výrobě řezných nástrojů používá povlaky, které činí materiál odolným proti opotřebení. Provádějí se také různé způsoby následných úprav povrchů, které se aplikují na již povlakovaný karbid (například na čelo vyměnitelné destičky). Nový vývoj slinutého karbidu jakožto nástrojového materiálu je zaměřen na tři oblasti: technologii výroby karbidů, pokročilé metody povlakování a inovativní techniky finálního postpovlakování. V každém z těchto směrů byl dosažen značný úspěch. To se

pozitivně projevuje v rozmanitosti nových produktů uváděných na trh předními výrobci řezných nástrojů.

### **2.3.3 Povlakovaný slinutý karbid**

V současnosti povlakované slinuté karbidy představují 80–90 % veškerých břitových destiček používaných pro obráběcí nástroje. Jejich úspěch jakožto nástrojového materiálu je dán jejich unikátní kombinací odolnosti proti opotřebení a houževnatosti, ale také jejich předpoklady pro formování do složitých tvarů.

Povlakované slinuté karbidy představují kombinaci slinutého karbidu a povlaku. Společně tvoří nástrojovou třídu, která je přizpůsobena pro daný způsob aplikace.

Třídy povlakovaných slinutých karbidů představují první volbu pro široké spektrum nástrojů a aplikací.

### **2.3.4 Rychlořezná ocel**

Rychlořezná ocel (anglicky *High speed steel* zkracované na označení HSS) je druh oceli určený pro výrobu obráběcích nástrojů namáhaných vysokou teplotou vznikající při vysoké točivé rychlosti při obrábění. Rychlořezná ocel se používá na netvrzenou (nekalenou) ocel a další kovy.

Mezi její významné vlastnosti patří vysoká tvrdost a žárupevnost. Používá se k výrobě nástrojů jako například pil, pilových pásů, pilových listů, soustružnických nebo hoblovacích nožů, fréz, vrtáků a dalších. Ocel HSS vydrží v místě řezu až 600 °C. Pro výrobu se používá ocel třídy 19 (podle ČSN), která se dále kalí a popouští. Nevýhodou HSS je nízká životnost, rychlé opotřebení a v neposlední řadě i fakt, že při velkém zahřátí v místě řezu se změní struktura kovu, ocel se začne drolit a je dále nepoužitelná.

### **2.3.5 Řezná keramika**

Moderní definicí je keramika obecně charakterizována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny. Tato definice zahrnuje nejen tradiční keramiku (porcelán, cermety, cihly), ale i brousicí materiály a řadu tzv. „nových“ (speciálních, konstrukčních, strojírenských, průmyslových, pokrokových,



příp. jinak zvaných) keramických látek, jako je oxidová keramika ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{UO}_2$ ), ferity, feroelektrika, nitridy (na bázi Si, B, Al), karbidy (na bázi Si, B), boridy (na bázi Ti) a další. Pro novou keramiku je charakteristické to, že je vyráběna z velmi čistých surovin a často z čistých výchozích chemikálií jako keramika syntetická.

Charakteristické vlastnosti pro řeznou keramiku:

Tepelné aplikace, mechanické aplikace, elektrotechnika, elektronika, fyzikální a chemické vlastnosti, medicína a stavebnictví.

Keramické třídy je možné použít pro široký okruh aplikací a materiálů; nejčastěji jsou využívány pro vysokorychlostní soustružnické operace, ale také pro zapichování a frézování. Při jejich správném použití umožňují specifické vlastnosti jednotlivých keramických tříd dosažení vysoké produktivity. Pro dosažení úspěšných výsledků jsou velice důležité znalosti o tom, kdy a jak keramické třídy používat.

Hlavními nedostatky řezné keramiky jsou její nízká odolnost proti tepelným trhlinám a malá lomová houževnatost.

### **2.3.6 Cermety**

Cermet je slinutý karbid tvořený tvrdými částicemi na bázi titanu. Název cermet je kombinací slov keramika (ceramic) a kov (metal). Původně se cermety skládaly z TiC a niklu. Moderní cermety nikl neobsahují a jejich předepsané složení se skládá z částic karbonitridů titanu Ti (C, N), které jsou jejich základním stavebním prvkem, částic sekundárních tvrdých fází (Ti, Nb, W, C, N) a kobaltového pojiva obohaceného o W.

Ti (C, N) poskytuje příslušné třídě vyšší odolnost proti otěru, sekundární tvrdé fáze zvyšují odolnost proti plastické deformaci, podíl kobaltu má rozhodující vliv na houževnatost.

Ve srovnání s běžnými slinutými karbidy má cermet vyšší odolnost vůči otěru a menší tendence k ulpívání materiálu obrobku na břítu. Na druhou stranu má cermet také nižší úroveň vnitřních tlakových pnutí, a z toho důvodu i nižší odolnost proti vzniku tepelných trhlin. Za účelem zvýšení jejich odolnosti proti otěru lze rovněž cermety opatřit PVD povlakem.

Použití cermetových tříd je vhodné pro aplikace, kde dochází k ulpívání materiálu obrobku na břitu a kde činí problémy tvorba nárůstku. Jejich typický mechanismus opotřebení se samoostřicí schopností umožňuje udržení nízké úrovně řezných sil, dokonce i po velmi dlouhé době v řezu.

### **2.3.7 Polykrystalický diamant**

Polykrystalický diamant (PCD) je kompozitní materiál, který se skládá z diamantových částic slinutých dohromady pomocí kovového pojiva. Diamant je nejtvrdší ze všech materiálů, a tudíž i nejodolnější proti otěru. Jako nástrojový materiál má velmi dobrou odolnost proti otěru, ale postrádá chemickou stabilitu za zvýšených teplot a má vysokou afinitu k železu. [4] [5] [6] [9]

## **2.4 Frézy**

### **2.4.1 Inovace u řezných nástrojů**

Pro spokojenost zákazníků a úspěch na trhu obrábění je třeba výrobu zrychlovat, ale současně i snižovat náklady na dílce. Přitom je třeba zajistit co nejvyšší spolehlivost a dosahovat lepší kvality obrobení, kterou současné průmyslové prostředí vyžaduje. Kratších cyklových časů a vyšší produktivity lze dosáhnout zvýšením úběru materiálu v obráběcích operacích.

Rozšiřující se spektrum nároků na funkčnost mechanických součástek a stále širší škála pokročilých materiálů vyžadují na jedné straně nástroje co nejuniverzálnější, neboť všestrannost umožňuje zredukovat nástrojové vybavení a dosahovat prvotřídní kvality s menším počtem nástrojů či destiček. Často je však na místě použít úzce specializované nástroje.

Nestabilní či nevhodně konstruované nástroje nezajistí dosažení potřebné kvality dílců a mají nižší životnost. To se týká i fréz se zuby ve šroubovici, osazených velkým počtem břitových destiček. Tyto frézy slouží nejen k základnímu vyhrubování obrobků, ale stále častěji se využívají i pro přesnější obrábění náročných dílců s vysokými stěnami a velkými přechodovými rádiusy. Použití fréz se zuby ve šroubovici s sebou v těchto případech nese riziko záměny čelních (s příslušně větším rádiusem) a obvodových (s rádiusem  $RE = 0,8$  mm) destiček, hlavně u méně zkušených operátorů. Systém pro prevenci nesprávné velikosti rohových rádiusů (REPS) problémy s pomícháním destiček odstraňuje. Univerzální

optimalizovaná geometrie fréz přispívá k hladkému a výkonnému obrábění a velmi vysoké životnosti v široké škále materiálů od těch méně náročných až po titan a superslitiny.

#### 2.4.2 Speciální frézy pro zdravotnictví

Protipólem univerzálních nástrojů se širokými aplikačními oblastmi jsou nástroje úzce specializované na konkrétní materiály, strategie obrábění či typy obráběných součástí. Velmi rychle se rozvíjí výroba zdravotnických implantátů a dalších technických pomůcek pro nejrůznější lékařské obory. Největšími obráběnými díly jsou sestavy pro náhrady kloubů dolních končetin, na druhé straně velmi žádaný sortiment drobných rozměrů představují prvky pro zubní lékařství. Pro oba zmíněné obory jsou v rámci novinek uváděny na trh velmi specifické řady monolitních karbidových fréz. [11]

### 2.5 Formy opotřebení řezného nástroje

#### 2.5.1 Otěrem

- **Abrazní otěr** – Jedná se o nejčastější a preferovaný způsob opotřebení, jelikož umožňuje dosažení předvídatelné a stabilní životnosti nástroje. Opotřebení hřbetu vzniká v důsledku abraze a způsobují ho tvrdé částice v obráběném materiálu (viz obr. 2.3).



Obr. 2.3 Abrazní opotřebení bříty [8]

- **Adhezní otěr** – Tento typ opotřebení je způsobován tlakovým navařováním částí třísky na břitovou destičku (viz obr. 2.4). Nejčastěji k němu dochází při obrábění materiálů snadno ulpívajících na břitu, jako jsou nízkouhlíkové oceli, korozivzdorné oceli nebo hliníkové slitiny. Při nízkých řezných rychlostech se sklon ke vzniku nárůstku na břitu zvyšuje.



Obr. 2.4 Adhezní opotřebení břitu [8]

- **Difuzní otěr** – Dochází k němu při dosažení teploty, při které se struktura kovů rozpadá na atomy. Pak dochází k následné migraci atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak. Difundující atomy vnikají do mřížky kovu nástroje a vytvářejí nové tuhé roztoky nebo chemické vazby a z toho plyne vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje.
- **Chemický otěr** – Opotřebení ve tvaru žlábků vzniká na čelní ploše břitové destičky (viz obr. 2.5). Dochází k němu v důsledku chemické reakce mezi materiálem obrobku a obráběcím nástrojem a jeho účinek se zesiluje s rostoucí řeznou rychlostí.



Obr. 2.5 Chemické opotřebení břitu [8]

### 2.5.2 Plastickou deformací

- Plastická deformace se projevuje v okamžiku, kdy dochází ke změknutí nástrojového materiálu (viz obr. 2.6). Takový případ nastává, když je teplota v místě řezu pro danou nástrojovou třídu příliš vysoká. Obecně platí, že ke zvýšení odolnosti proti plastické deformaci vede použití tvrdší třídy a tenčího povlaku.



Obr. 2.6 Chemické opotřebení břitu [8]

### 2.5.3 Křehkým lomem

- Vylamování břitu nebo celkový lom jsou důsledkem přetížení břitu mechanickým tahovým namáháním (viz obr. 2.7). Tato namáhání mohou vznikat z řady důvodů jako např. zasekávání třísek, příliš vysoká hodnota posuvu nebo hloubky řezu, vměstků písku obsažených v materiálu obrobku, tvorby nárůstku, vibrací, nadměrného opotřebení břitové destičky. [7] [8]



Obr. 2.7 Opotřebení břitu křehkým lomem [8]

### 2.6 Síly při frézování

Při specifikaci řezných sil při frézování se vyjde ze silových poměrů na jednom břitu, který se nachází v poloze určené úhlem  $\varphi_i$ . Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu  $F_i$  rozkládá na složky  $F_{ci}$  a  $F_{cNi}$ , resp. na složky  $F_{fi}$  a  $F_{fNi}$ . a

Řezná síla  $F_{ci}$  se vyjádří na základě měrné řezné síly  $k_{ci}$  a průřezu třísky  $A_{Di}$ :

$$F_{ci} = k_{ci} * A_{Di} = k_{ci} * a_p * f_z * \sin\varphi_i \quad (1)$$

Měrná řezná síla  $k_{ci}$  se vyjádří pomocí vztahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_j^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z * \sin\varphi_i)^{1-x}} \quad (2)$$

Po dosazení a úpravě:

$$F_{ci} = C_{Fc} * a_p * f_z^x * \sin^x \varphi_i \quad (3)$$

Při čelním frézování se řezná síla  $F_{ci}$  vyjádří obdobným způsobem:

$$F_{ci} = k_{ci} * A_{Di} = k_{ci} * a_p * f_z * \sin \varphi_i \quad (4)$$

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_j^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z * \sin \kappa_r * \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (5)$$

$$F_{ci} = C_{Fc} * a_p * f_z^x * \sin \kappa_r^{x-1} * \sin^x \varphi_i \quad (6)$$

Při frézování je však v záběru několik zubů současně. Výsledné síly pak závisí na počtu zubů v záběru a na okamžité poloze zubů frézy vzhledem k obrobku. Z hlediska potřebného kroutícího momentu a výkonu na vřetenu frézky je důležitá celková řezná síla  $F_c$ , která pro válcové frézování nabývá velikosti:

$$F_{ci} = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} * a_p * f_z^x * \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad (7)$$

$$F_{ci} = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} * a_p * f_z^x * \sin^{x-1} \kappa \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad (8)$$

Počet zubů v záběru se pro válcové frézování vypočítá podle vztahu:

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} * Z \quad (9)$$

Pro čelní frézování:

$$n_z = \frac{\psi}{360} * Z \quad (10)$$

[2]

### 3. Metodika experimentu



Metodika měření je část bakalářské práce, která pojednává o vybraných a provedených měřeních. Tato část obsahuje přípravu vzorků, popis obráběných materiálů, postupy obrábění a měření zkoumaných veličin.

Experimentální vzorky byly zkoumány v rámci řezných sil vzniklých při obrábění, drsnosti trvanlivosti řezného nástroje při použití procesní kapaliny a bez ní.

Obrábění vzorků bylo prováděno na univerzální konzolové frézce FNG 32 v laboratoři třískových technologií a procesů katedry obrábění a montáže v budově L – Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace Technické univerzity v Liberci. Zařízení potřebné k měření zmíněných veličin se nacházelo na stejném místě. [1]

#### 3.1 Nástroj

Nástroje byly dvoubřité válcové frézy o průměru 8 mm (frézy měly 2 břity z důvodu přesnějšího měření sil). Nástroje typu A (viz obr. 3.8) byly vyrobeny z rychlořezné oceli (HSS). Počet použitých nástrojů daného typu A byl 5 ks. Nástroje typu B (viz obr. 3.9) byly vyrobeny ze slinutých karbidů. Počet použitých nástrojů daného typu B byl 5 ks. Parametry obou typů řezných nástrojů se nachází v tabulce 3.1.

Nástroje	Parametry frézy	Nástroj A	Nástroj B
 Obr. 3.8 HSS fréza	Průměr frézy mm	8	8
 Obr. 3.9 SK fréza	Celková délka frézy mm	53	63
	Délka řezné části mm	15	16
	Počet břitů [-]	2	2
	Materiál [-]	ocel HSS Co8	VHM-TiAlN
	Úhel šroubovice [°]	30	30
	Norma výroby [-]	DIN 327-B K	DIN 6527
	Cena [Kč]	170–340	431
	Výrobce [-]	Firma frézovací nástroje A.S.	Firma Precitool

Tab. 3.1: Parametry nástrojů

### 3.2 Materiál

Obráběným materiálem byla uhlíková ocel ČSN 12 050.

Chemické složení oceli ČSN 12 050 je v procentech vypsáno v tabulce 3.2.

Chemické složení oceli ČSN 12 050 [%]								
	C	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si
Min.	0,42			0,5				0,17
Max.	0,5	0,25	0,3	0,8	0,3	0,04	0,04	0,37

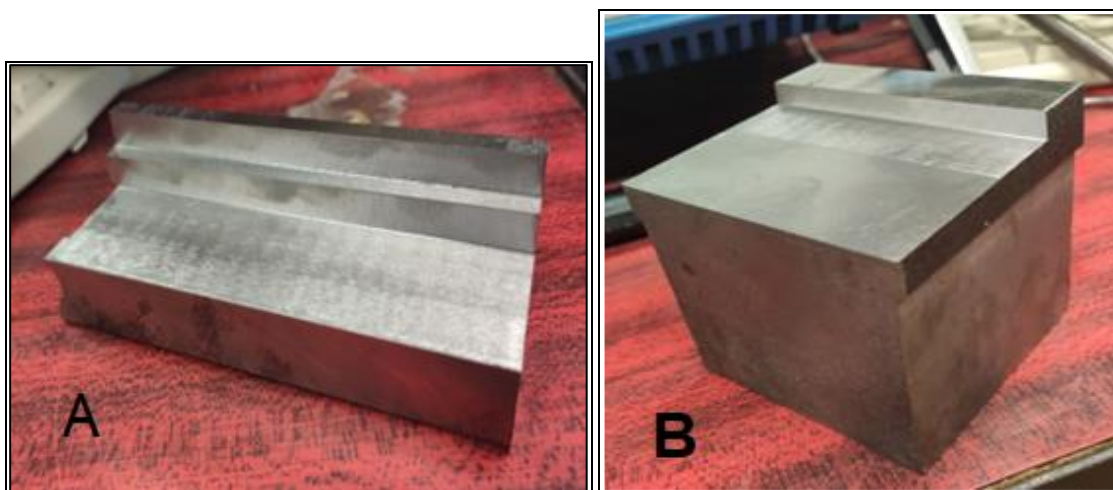
Tab. 3.2: Chemické složení materiálu

#### 3.2.1 Výroba vzorků

Při výrobě vzorků nebylo potřeba speciálních postupů. Materiál byl dělen na pásové pile zn. PILOUS z většího kusu materiálu na menší vzorky materiálu (viz obr. 3.10). Rozměry obráběných vzorků jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Tabulka rozměrů vzorků		
Nástroj	A	B
Délka [mm]	112,5	79
Výška [mm]	60	90
Šířka [mm]	60	70

Tab. 3.3: Rozměr vzorku



Obr. 3.10 Obráběný materiál ČSN 12 050

### 3.3 Způsob obrábění

Jako způsob obrábění bylo zvoleno sousledné frézování (viz obr. 3.11). Řezné podmínky při realizovaném experimentu jsou uvedeny v tabulce 3.4.



Tabulka řezných podmínek							
Otáčky $n$ [ot.min <sup>-1</sup> ]	Posuv na zub $f_z$ [mm.zub <sup>-1</sup> ]	Průměr frézy $D$ [mm]	Posuv $f$ [mm.min <sup>-1</sup> ]	Řezná rychlost $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	Posuv na otáčku $f_n$ [mm.ot <sup>-1</sup> ]	Hloubka řezu $a_p$ [mm]	Šířka řezu $a_e$ [mm]
1000	0,07	8	140	25	0,14	8	0,4
1500	0,07	8	210	38	0,14	8	0,4
2000	0,07	8	280	50	0,14	8	0,4

Tab. 3.4: Řezné podmínky při frézování

Pro vyhodnocení technologicko-ekonomického hlediska byly voleny řezné rychlosti z tabulky 3.5.

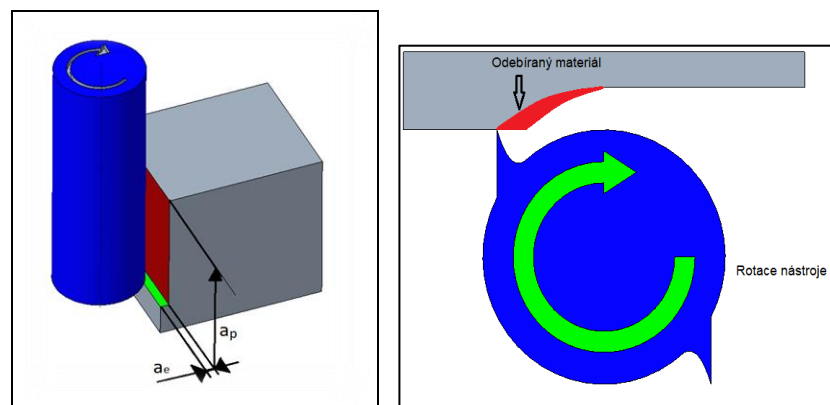
Tabulka optimálních řezných podmínek pro technologicko-ekonomické zhodnocení		
Materiál nástroje	HSS	SK
Otáčky [ot.min <sup>-1</sup> ]	1194	3980
Řezná rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	30	100
Lineární posuv [mm.min <sup>-1</sup> ]	238	796
Posuv na zub [mm]	0,1	0,1
Průměr frézy [mm]	8	8
Šířka záběru [mm]	0,4	0,4
Hloubka záběru [mm]	8	8

Tab. 3.5: Řezné podmínky pro technologicko-ekonomické zhodnocení

Důvody pro aplikaci sousledného frézování byly:

- Obrobená plocha má lepší kvalitu,
- Menší tepelné namáhání obráběného materiálu
- Snižuje se opotřebení materiálu
- Nižší hlučnost při obrábění
- Vyšší životnost nástroje

Obrábění bylo realizováno bez použití procesní kapaliny (obrábění na sucho).

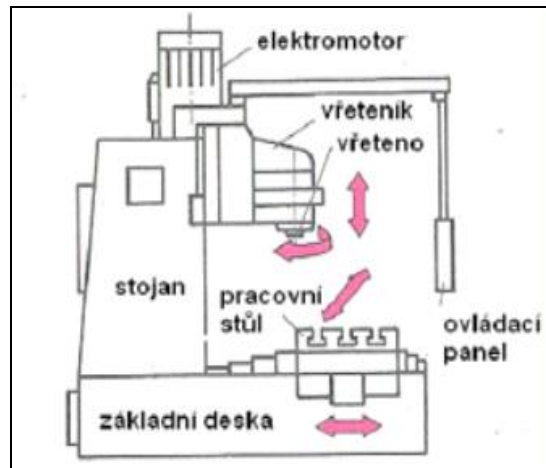


Obr. 3.11 Schéma sousledného frézování

### 3.4 Použité stroje

#### 3.4.1 Frézka FNG 32

Frézovací operace byly prováděny na konzolové frézce FNG 32 (viz obr. 3.13). Výrobce frézky TOS Olomouc. Parametry frézky jsou uvedeny v tabulce 3.6. [10]



Obr. 3.12 Schéma univerzální konzolové frézky [10]



Obr. 3.13 Univerzální konzolová frézky FNG 32

Univerzální konzolová frézka FNG 32		
Charakteristika stroje	Hodnota	Jednotky
Rozměr pracovní plochy	800 × 400	[mm]
Maximální zatížení stolu	350	[kg]
Pracovní zdvih podélný	600	[mm]
Pracovní zdvih příčný a svislý	400	[mm]
Posuv v osách X, Y	15–1000	[mm.min <sup>-1</sup> ]
Posuv v ose Z	6–400	[mm. min <sup>-1</sup> ]
Rychloposuv v osách X, Y	2000	[mm. min <sup>-1</sup> ]
Rychloposuv v ose Z	800	[mm. min <sup>-1</sup> ]
Rozsah otáček vřetena	50–4000	[ot.min <sup>-1</sup> ]
Počet rychlostních stupňů vřetena	2	[°]
Natočení vertikálního vřetena	±90	[°]
Výkon hlavního motoru vertikálního vřetena	4	[kW]
Výkon posuvného motoru vertikálního vřetena	1,1	[kW]
Celkový příkon stroje	22	[kVA]

Tab. 3.6: Parametry univerzální konzolové frézky FNG 32

### 3.4.2 Pásová pila

Materiál byl řezán na pásové pile ARG 300 Plus H.F (viz obr. 3.14) od firmy Pilous. Parametry pily se nachází v tabulce 3.7.



Obr. 3.14 Pásová pila ARG 300 Plus H.F

Pásová pila ARG 300 PLUS H.F.		
Charakteristika stroje	Hodnota	Jednotky
Maximální rozměr řezu čtvercového průřezu	300/230/150	[mm]
Maximální rozměr řezu kruhového průřezu	300/240/155	[mm]
Výkon motoru 400 V	2,3	[kW]
Rychlost pilového pásu	15–90	[m.min <sup>-1</sup> ]
Rozměry stroje	1600 × 950 × 1600	[mm]
Hmotnost stroje	570	[kg]
Rozměr pilového pásu	3110 × 27 × 0,9	[mm]

Tab. 3.7: Parametry Pásové pily ARG 300 PLUS H.F

### 3.5 Měřené parametry

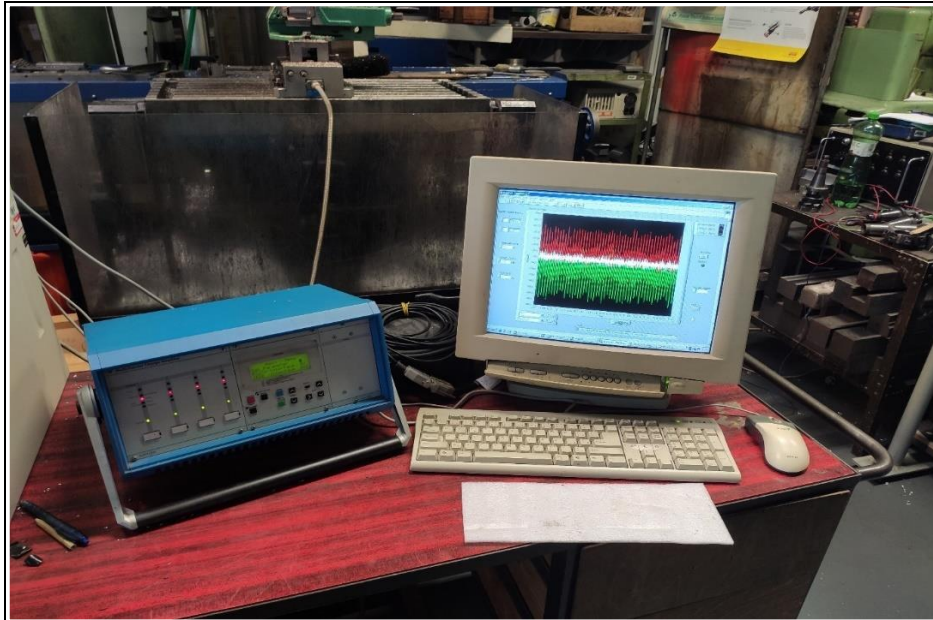
Měřenými parametry byly:

- Opotřebení řezného nástroje
- Trvanlivost řezného nástroje
- Řezné síly
- Drsnost povrchu obrobeneho materiálu

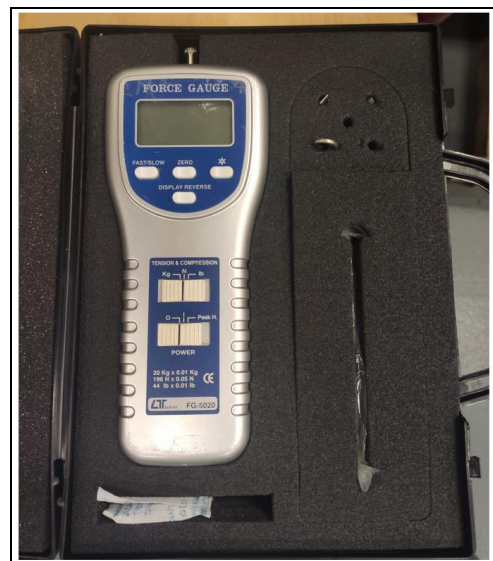
#### 3.5.1 Řezné síly

Na měření řezných sil byl použit tříložkový piezoelektrický dynamometr KISTLER (viz obr. 3.16). Před započítím měření bylo nutno dynamometr ustavit na stole frézky a následně zkalibrovat. Kalibrace proběhla za pomoci siloměru (viz obr. 3.16). Siloměrem bylo tlačeno na svěrák v osách frézky (x, y, z) a pomocí softwaru byly dopočítány konstanty potřebné k přesnému měření (viz obr. 3.17 a 3.18).

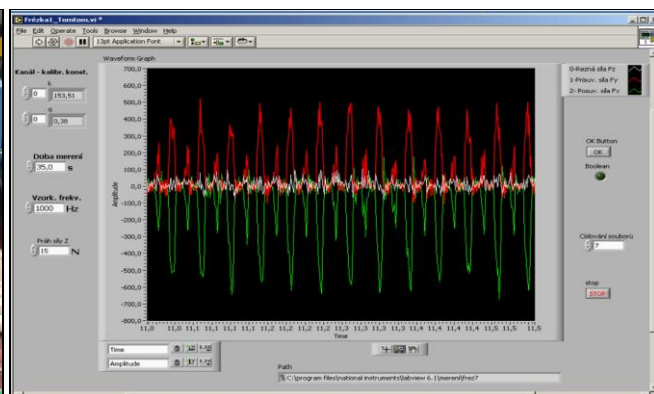




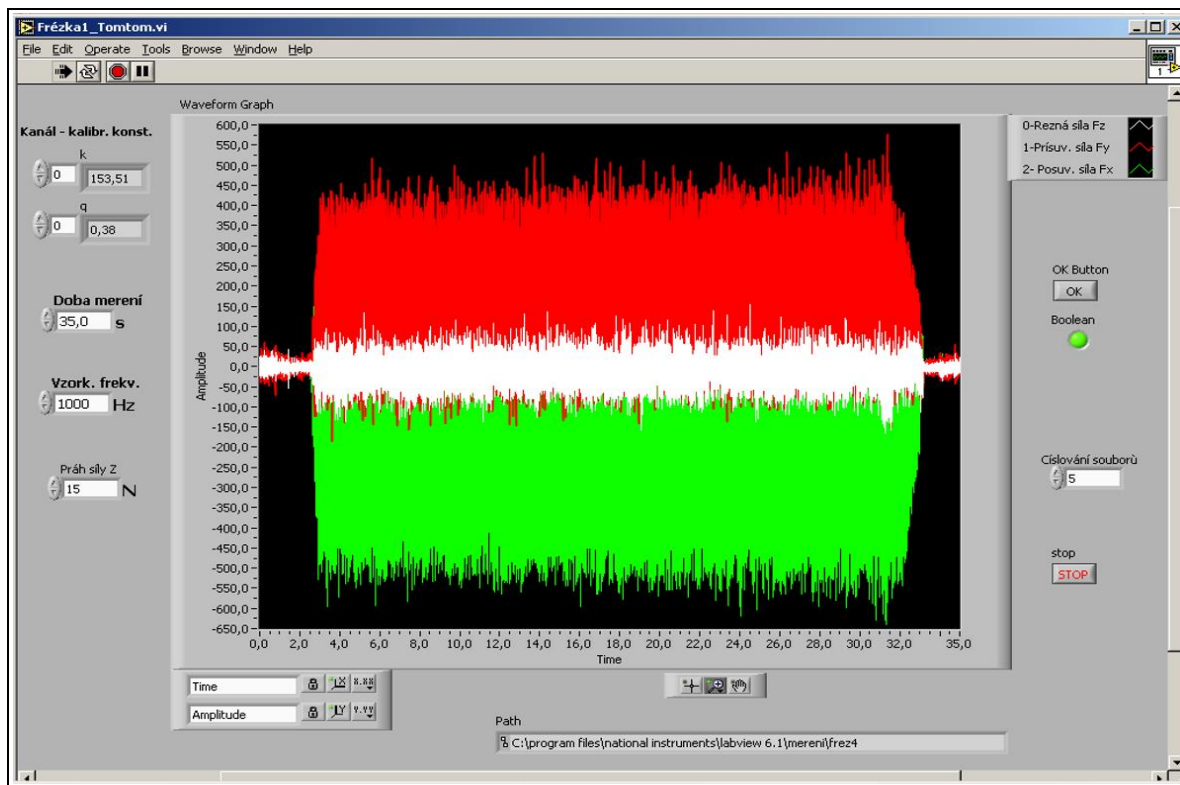
Obr. 3.15 Aparatura k měření sil



Obr. 3.16 Dynamometr KYSTLER a siloměr



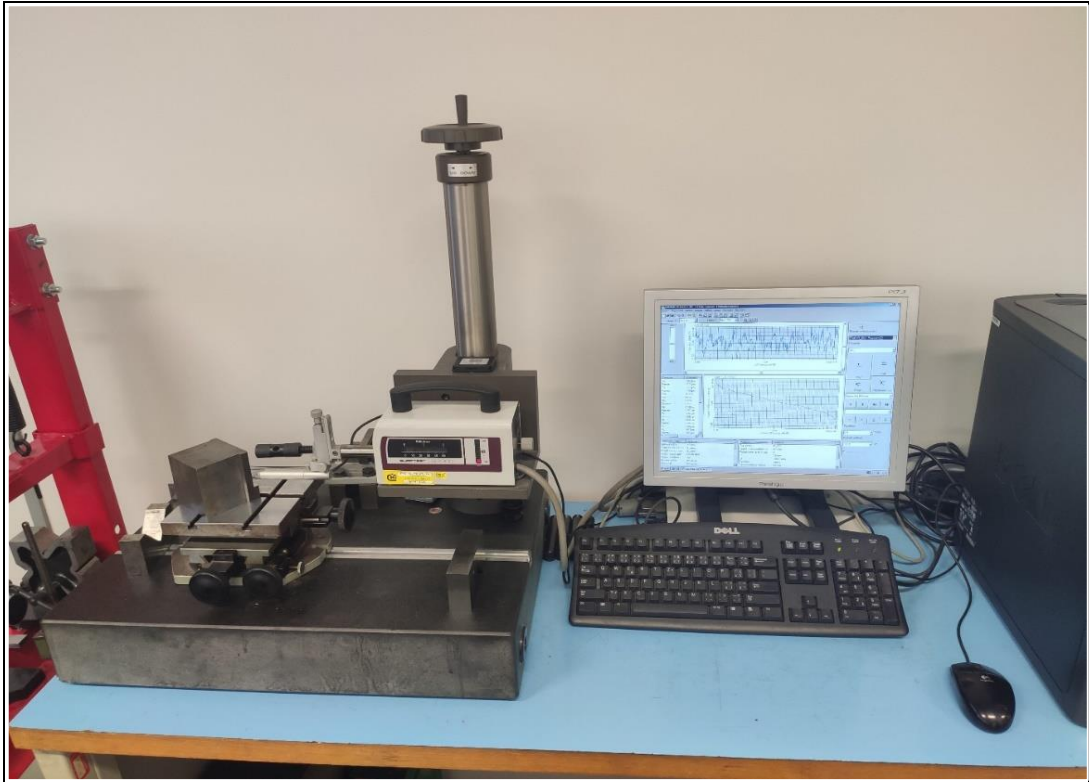
Obr. 3.17 Nábojový zesilovač a detail působení sil



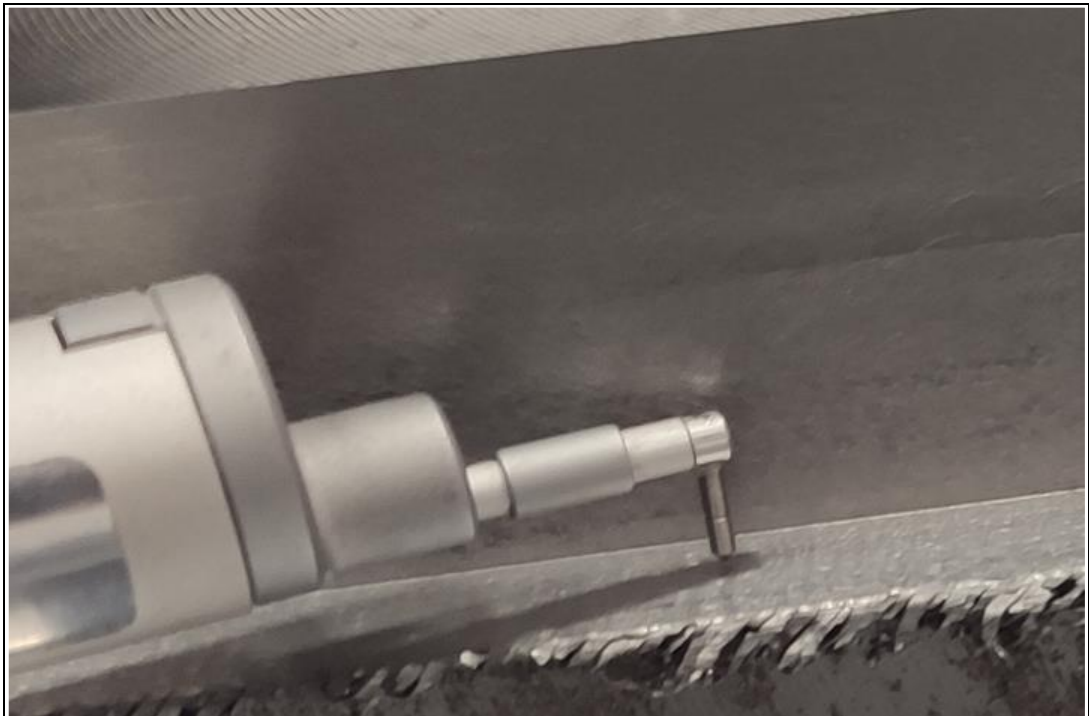
Obr. 3.18 Výstup hodnot ze softwaru LabView

### 3.5.2 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu bylo realizováno na dotykovém profilometru MITUTOYO SV-2000N2 SURFTEST (viz obr. 3.19), který operuje na dotykovém principu snímání povrchu pomocí diamantového hrotu (viz obr. 3.20), jenž snímá nerovnosti na povrchu měřeného obrobku. Nasnímaná data jsou následně vyhodnocena počítačem v softwarovém programu Surfpak-SV Verze 1.100. Na povrchu obráběného materiálu byly zkoumány hodnoty  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_t$ .



Obr. 3.19 Profilometr MITUTOYO SV-2000N2

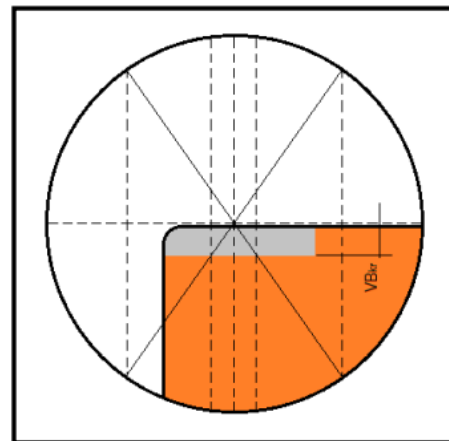


Obr. 3.20 Detail měření drsnosti povrchu diamantovým hrotem

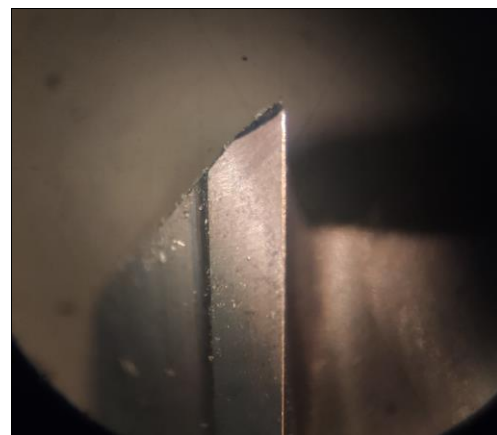
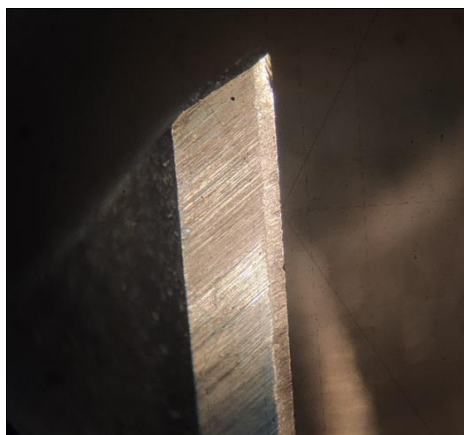


### 3.5.3 Měření opotřebení řezného nástroje

Pro zjištění opotřebení čelní frézy (viz obr. 3.22) byl použit dílenský mikroskop ZEISS (viz obr. 3.21). Posuv v osách X a Y je zajištěn pomocí mikrometrických šroubů na vodících lištách. Odečítání opotřebení nástroje bylo prováděno pomocí nitkového kříže v okuláru (viz obr. 3.21).



Obr. 3.21 Mikroskop ZEISS a nitkový kříž v okuláru



Obr. 3.22 Opotřebení na fréze HSS a opotřebení na fréze SK



## 4. Realizace experimentu

V této kapitole bakalářské práce je popsán způsob měření a shrnutí naměřených výsledků. Hlavní zkoumané hodnoty byly hodnoty sil při frézování drsností povrchu a opotřebení nástroje.

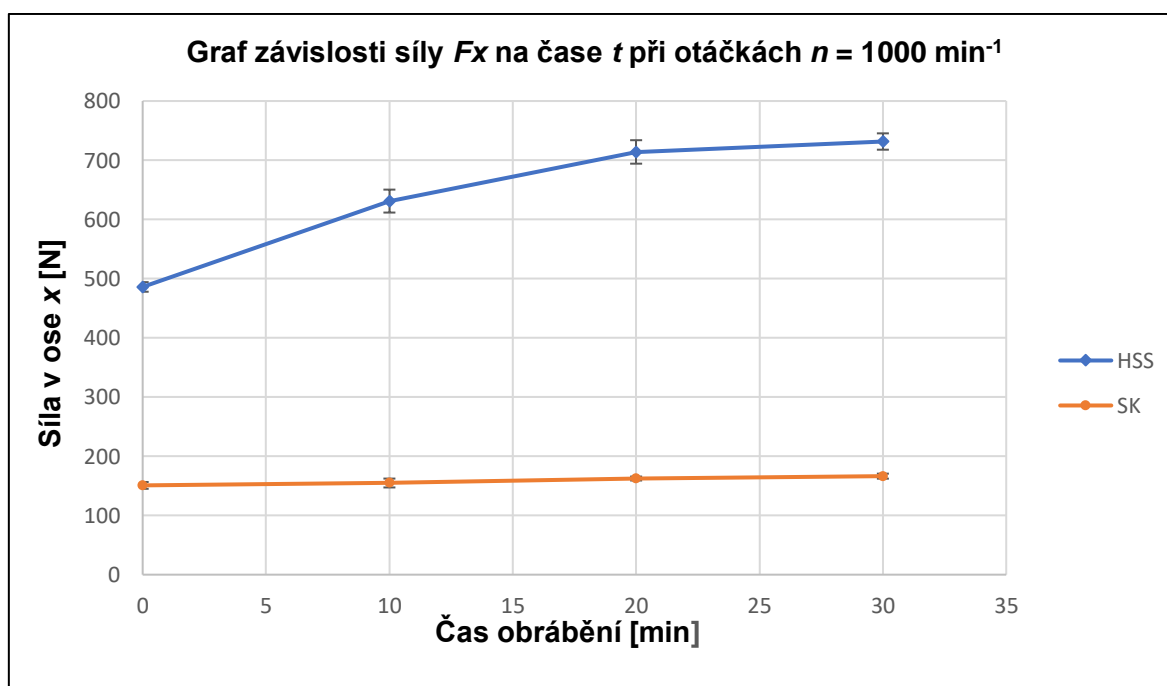
Uvedené hodnoty jsou průměrné hodnoty (aritmetický průměr) s uvedeným intervalem spolehlivosti.

### 4.1 Řezné síly v závislosti na čase při otáčkách $n = 1000 \text{ min}^{-1}$

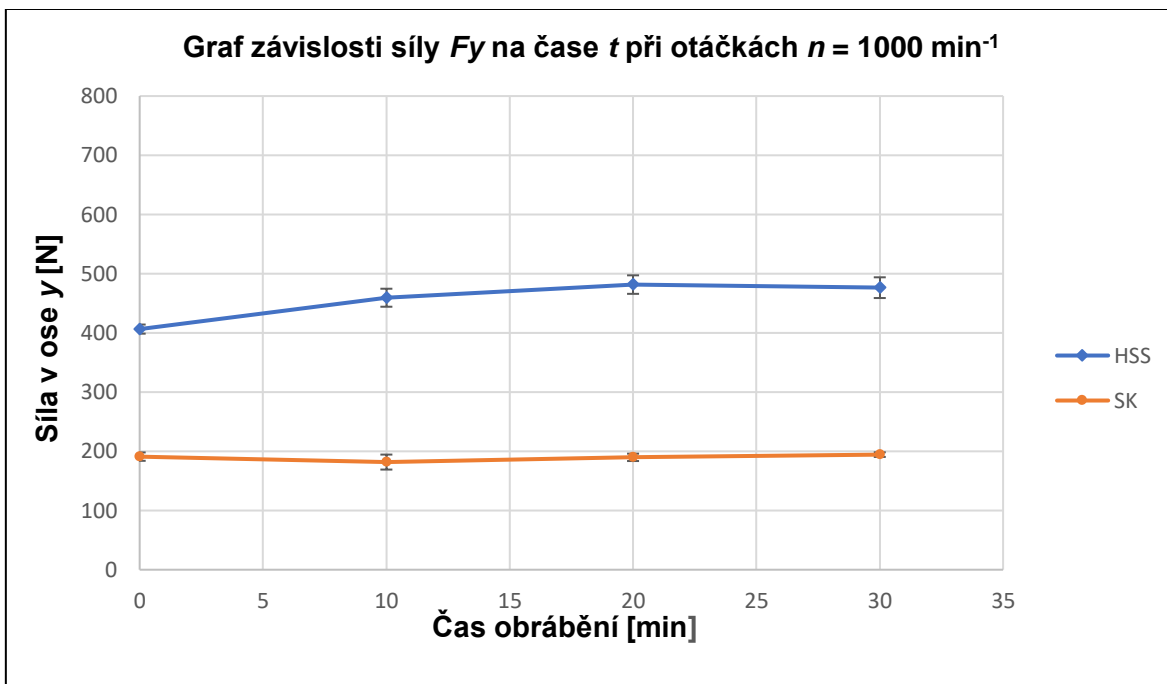
Řezné síly u nástrojů z HSS a SK byly zkoumány na začátku obráběcího procesu a dále po každých 10 minutách. Pro první sadu řezných podmínek byly zvoleny otáčky  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ . Řezné podmínky byly voleny podle tabulky 3.4.

Tabulka závislosti síly na čase $t$ při otáčkách $n = 1000 \text{ min}^{-1}$						
Materiál nástroje	HSS			SK		
Síly [N]	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$
Čas $t = 1 \text{ min}$	$486 \pm 8,10$	$406,4 \pm 7,70$	$47,6 \pm 4,12$	$150,8 \pm 5,76$	$191 \pm 7,08$	$48,4 \pm 7,25$
Čas $t = 10 \text{ min}$	$631 \pm 19,38$	$459,4 \pm 15,19$	$49,2 \pm 6,39$	$154,8 \pm 7,50$	$181,8 \pm 12,66$	$49,2 \pm 5,76$
Čas $t = 20 \text{ min}$	$714 \pm 19,83$	$481,6 \pm 15,63$	$54,4 \pm 10,65$	$162,4 \pm 3,34$	$189,8 \pm 6,24$	$49,4 \pm 5,34$
Čas $t = 30 \text{ min}$	$731,6 \pm 13,80$	$476,4 \pm 17,49$	$53,2 \pm 8,00$	$166,4 \pm 4,23$	$194,4 \pm 3,88$	$54,2 \pm 5,76$

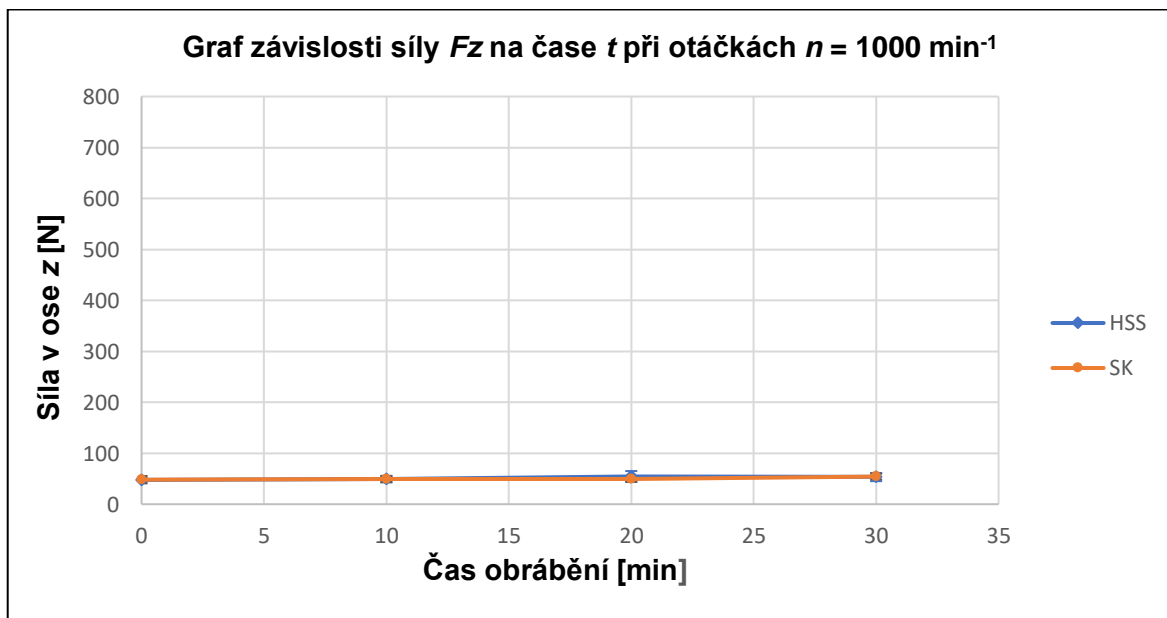
Tab. 4.8: Závislosti sil na čase při otáčkách  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$



Graf 1: Graf závislosti síly  $F_x$  na čase  $t$  při otáčkách  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$



*Graf 2: Graf závislosti síly  $F_y$  na čase  $t$  při otáčkách  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$*



*Graf 3: Graf závislosti síly  $F_z$  na čase  $t$  při otáčkách  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$*

V grafu 1 a grafu 2 je vidět, že fréza z HSS vykazuje s narůstajícím časem zvyšování řezné síly. Nárůst řezných sil byl způsoben narůstajícím opotřebením břitů, zhoršující se geometrií a zvyšováním tlaku působícího na materiál.

Nástroj z SK nevykazuje téměř žádné změny sil s působením času.

Nejvyšší naměřená síla v ose  $x$ , při otáčkách  $n = 1000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_x = 731,6 \pm 13,80 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_x = 166,4 \pm 4,23 \text{ N}$ .

Nejnižší naměřená síla v ose  $x$ , při otáčkách  $n = 1000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 1 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_x = 486 \pm 8,10 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_x = 150,8 \pm 5,76 \text{ N}$ .

Nejvyšší naměřená síla v ose  $y$ , při otáčkách  $n = 1000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 20 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_y = 481,6 \pm 15,63 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_y = 194,4 \pm 3,88 \text{ N}$  v čase  $t = 30 \text{ min}$ .

Nejnižší naměřená síla v ose  $y$ , při otáčkách  $n = 1000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 10 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_y = 406,4 \pm 7,70 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_y = 181,8 \pm 12,66 \text{ N}$  v čase  $t = 1 \text{ min}$ .

Nejvyšší naměřená síla v ose  $z$ , při otáčkách  $n = 1000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 20 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_z = 54,4 \pm 10,65 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_z = 54,2 \pm 5,76 \text{ N}$  v čase  $t = 30 \text{ min}$ .

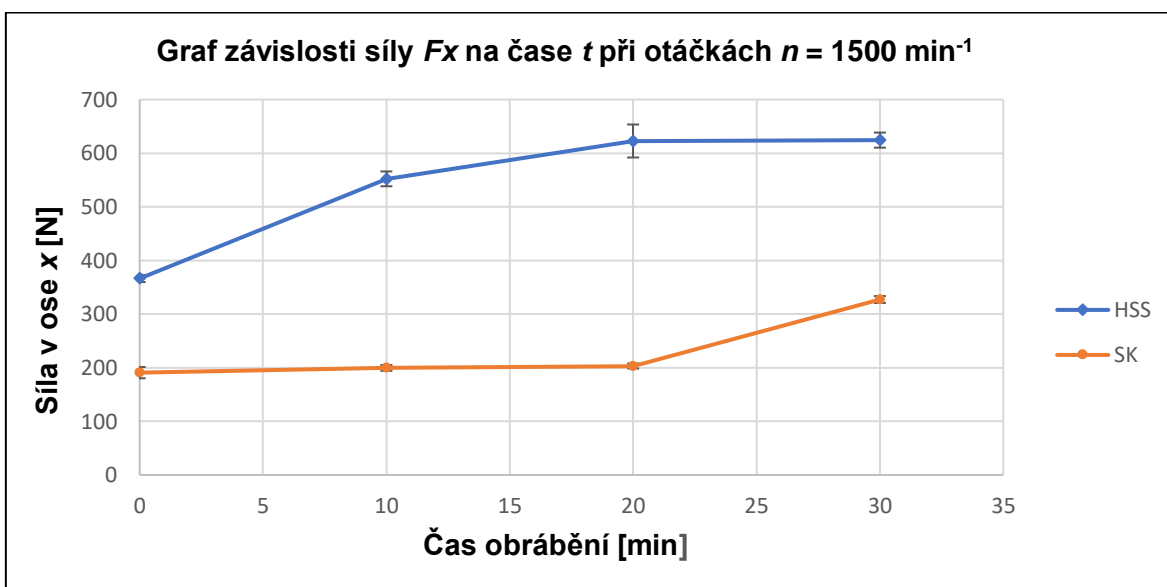
Nejnižší naměřená síla v ose  $z$ , při otáčkách  $n = 1000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 1 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_z = 47,6 \pm 4,12 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla  $F_z = 48,4 \pm 7,25 \text{ N}$ .

## 4.2 Řezné síly v závislosti na čase při otáčkách $n = 1500 \text{ min}^{-1}$

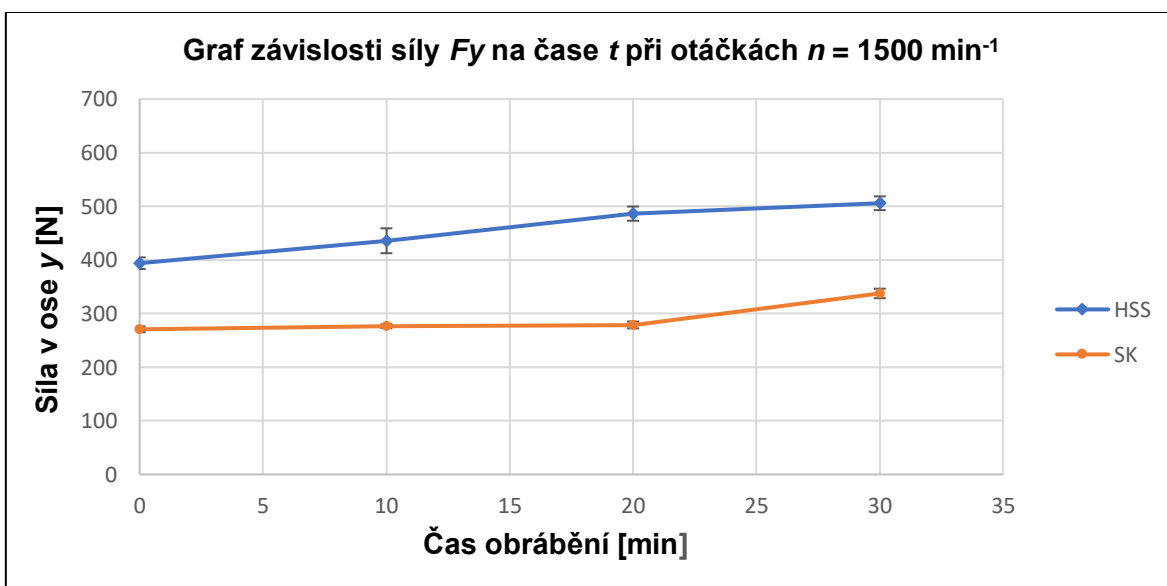
Druhá sada řezných podmínek byla volena z tabulky 3.4.

Tabulka závislosti síly na čase $t$ při otáčkách $n = 1500 \text{ min}^{-1}$						
Materiál nástroje	HSS			SK		
Síly [N]	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$
Čas $t = 1 \text{ min}$	$366,4 \pm 6,63$	$394 \pm 10,82$	$70 \pm 4,39$	$190,8 \pm 10,5$	$270,6 \pm 5,34$	$63,6 \pm 5,34$
Čas $t = 10 \text{ min}$	$552,2 \pm 13,83$	$435,8 \pm 23,2$	$75 \pm 11,86$	$199,6 \pm 5,34$	$276,6 \pm 3,34$	$70,4 \pm 4,56$
Čas $t = 20 \text{ min}$	$622,8 \pm 30,77$	$486,4 \pm 13,23$	$91,6 \pm 7,7$	$203,2 \pm 4,65$	$278,8 \pm 6,39$	$73,6 \pm 6,63$
Čas $t = 30 \text{ min}$	$624,4 \pm 14,08$	$505,8 \pm 12,81$	$104,8 \pm 6,69$	$327,2 \pm 6,39$	$337,6 \pm 8,87$	$78,4 \pm 6,63$

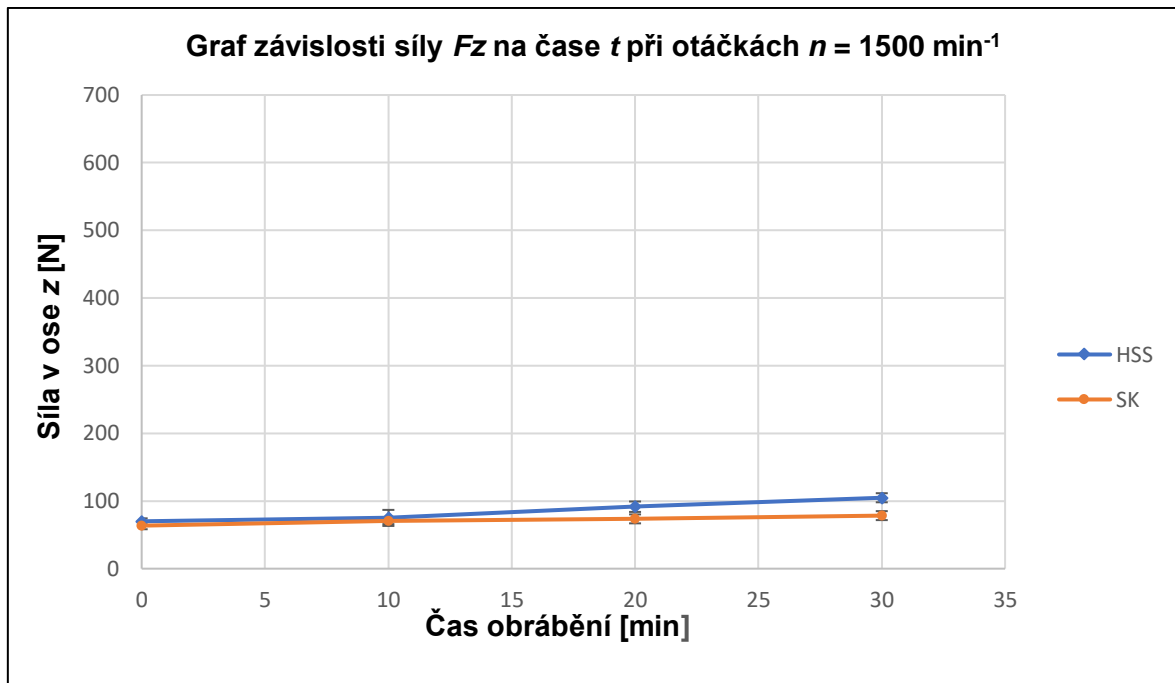
Tab. 4.9: Závislosti sil na čase při otáčkách  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$



Graf 4: Graf závislosti síly  $F_x$  na čase  $t$  při otáčkách  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$



Graf 5: Graf závislosti síly  $F_y$  na čase  $t$  při otáčkách  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$



Graf 6: Graf závislosti síly  $F_z$  na čase  $t$  při otáčkách  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$

Z grafu 4 a 5 je patrné, že došlo k odchýlení lineární křivky u frézy z SK mezi dvacátou a třicátou minutou frézování. Při experimentu došlo opakovaně k poškození frézy. Při prvním pokusu došlo k lomu nástroje ve 14. minutě experimentu a výsledky byly nepoužitelné. I při druhém pokusu se fréza z SK vyštípla, a to ve 28. minutě. Experiment byl doměřen a výsledky měření byly vyhodnoceny.

V grafech 4 a 5 je vidět, že i při vyštípnuté fréze z SK jsou síly  $F_x$  a  $F_y$  o poznání menší než při frézování frézou z HSS.

U frézy z HSS je vidět, že vykazuje nárůst řezných sil se zvyšující se dobou obrábění. U frézy z SK se průběh sil neměnil a zůstával téměř stejný, dokud nedošlo k vylomení kusu nástroje. Kvůli změněné geometrii byl pak zaznamenán nárůst řezných sil.

Síla  $F_z$  zůstala lineární i po odštípnutí frézy a je stále menší než síla  $F_z$  způsobená frézou z HSS.

Nejvyšší naměřená síla v ose  $x$ , při otáčkách  $n = 1500 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_x = 624,4 \pm 14,08 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_x = 327,2 \pm 6,39 \text{ N}$ .

Nejnižší naměřená síla v ose  $x$ , při otáčkách  $n = 1500 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 1 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_x = 366,4 \pm 6,63 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_x = 190,8 \pm 10,5 \text{ N}$ .

Nejvyšší naměřená síla v ose  $y$ , při otáčkách  $n = 1500 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_y = 505,8 \pm 12,81 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_y = 337,6 \pm 8,87 \text{ N}$ .

Nejnižší naměřená síla v ose  $y$ , při otáčkách  $n = 1500 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 10 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_y = 394 \pm 10,82 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_y = 270,6 \pm 5,34 \text{ N}$  v čase  $t = 1 \text{ min}$ .

Nejvyšší naměřená síla v ose  $z$ , při otáčkách  $n = 1500 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_z = 104,8 \pm 6,69 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_z = 78,4 \pm 6,63 \text{ N}$ .

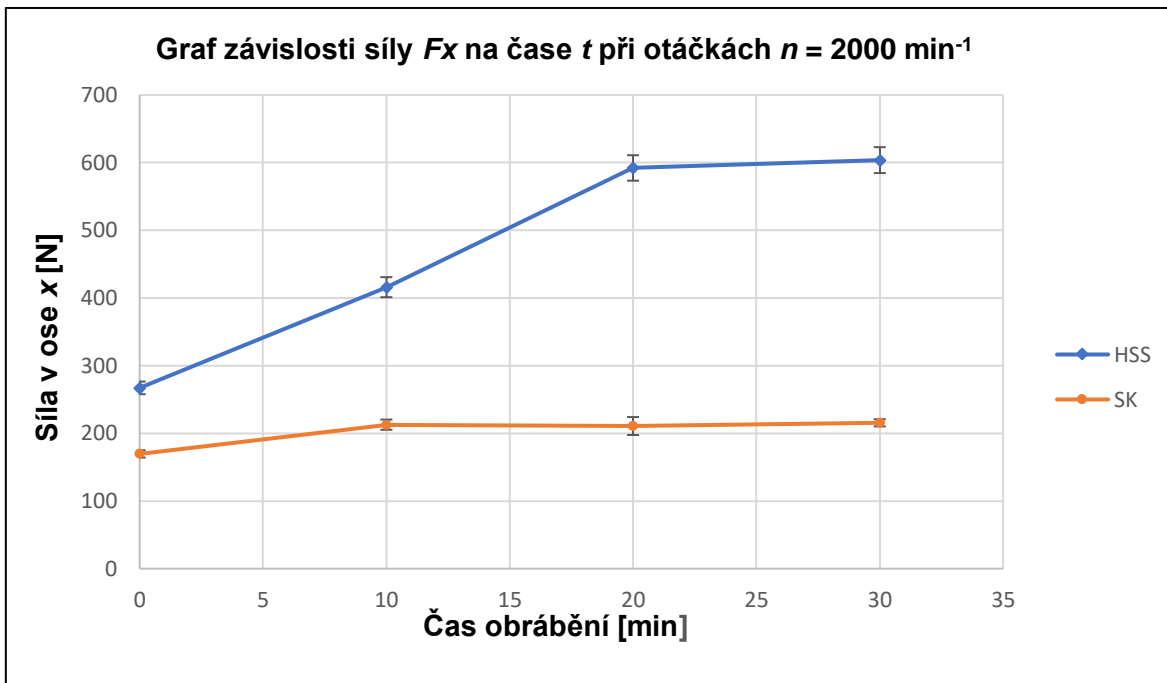
Nejnižší naměřená síla v ose  $z$ , při otáčkách  $n = 1500 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 1 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_z = 70 \pm 4,39 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_z = 63,6 \pm 5,34 \text{ N}$ .

#### 4.3 Řezné síly v závislosti na čase při otáčkách $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

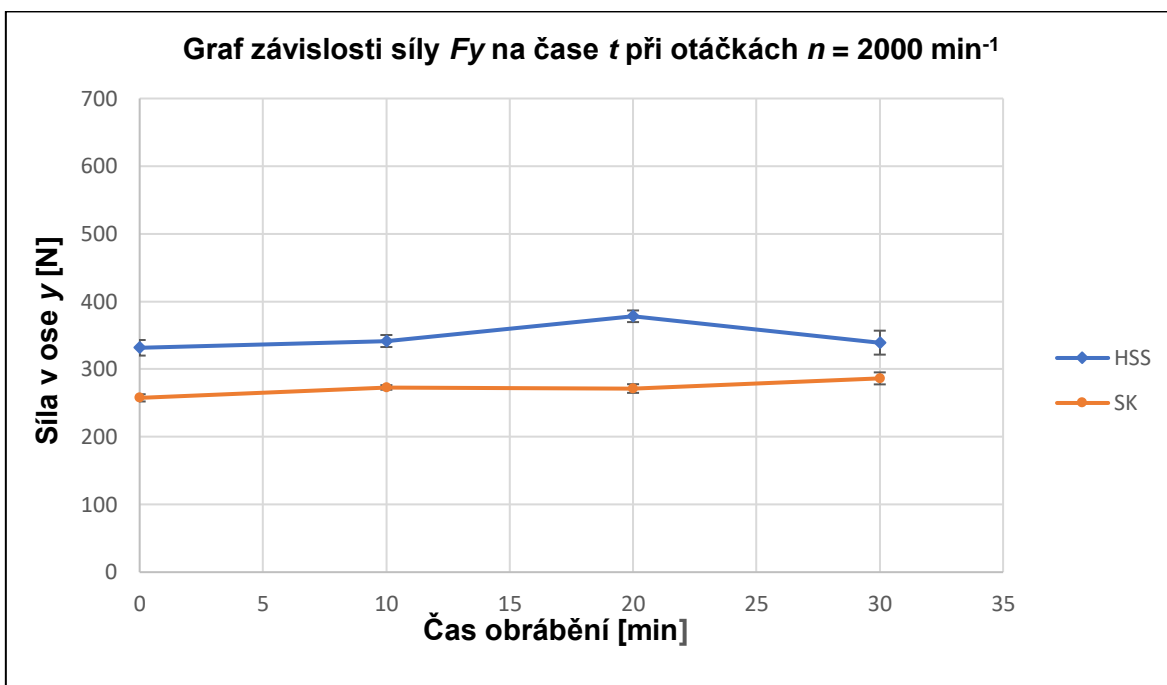
Podmínky pro tuto část experimentu byly vybrány z tabulky 3.4.

Tabulka závislosti síly na čase $t$ při otáčkách $n = 2000 \text{ min}^{-1}$						
Materiál nástroje	HSS			SK		
Síly [N]	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$
Čas $t = 1 \text{ min}$	$267,2 \pm 9,33$	$331,6 \pm 11,52$	$68,4 \pm 4,12$	$169,6 \pm 5,34$	$257,6 \pm 7,7$	$68,4 \pm 5,34$
Čas $t = 10 \text{ min}$	$416 \pm 14,82$	$341,6 \pm 8,87$	$74,8 \pm 4,21$	$212,8 \pm 7,5$	$273 \pm 5,55$	$70 \pm 4,39$
Čas $t = 20 \text{ min}$	$592,2 \pm 18,8$	$378,2 \pm 8,58$	$70,4 \pm 9,5$	$210,8 \pm 13,26$	$271,4 \pm 6,91$	$71,2 \pm 5,76$
Čas $t = 30 \text{ min}$	$603,8 \pm 19,15$	$339,2 \pm 17,7$	$69,2 \pm 12,2$	$215,6 \pm 5,34$	$286,4 \pm 7,95$	$74 \pm 4,05$

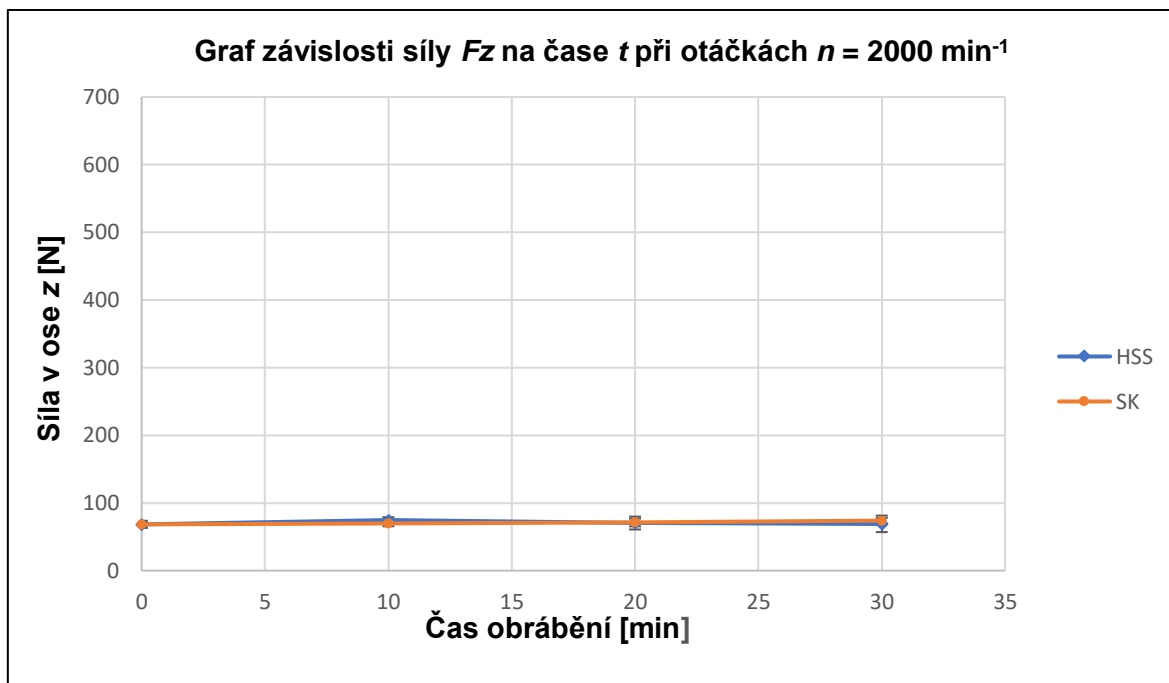
Tab. 4.10: Závislosti sil na čase při otáčkách  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$



Graf 7: Graf závislosti síly  $F_x$  na čase  $t$  při otáčkách  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$



Graf 8: Graf závislosti síly  $F_y$  na čase  $t$  při otáčkách  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$



Graf 9: Graf závislosti síly  $F_z$  na čase  $t$  při otáčkách  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

V grafu 7 je zřetelné, že u nástroje z HSS se řezná síla po celou dobu obrábění zvyšovala. Z grafu 8 můžeme vypočítat, že se síly u obou nástrojů nezvyšovaly v průběhu obrábění. Graf 9 ukazuje, že jsou řezné síly téměř identické a nemění se.

Nejvyšší naměřená síla v ose  $x$ , při otáčkách  $n = 2000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_x = 603,8 \pm 19,15 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_x = 215,6 \pm 5,34 \text{ N}$ .

Nejnižší naměřená síla v ose  $x$ , při otáčkách  $n = 2000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 1 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_x = 267,2 \pm 9,33 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_x = 169,6 \pm 5,34 \text{ N}$ .

Nejvyšší naměřená síla v ose  $y$ , při otáčkách  $n = 2000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 20 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_y = 378,2 \pm 8,58 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_y = 286,4 \pm 7,95 \text{ N}$  v čase  $t = 30 \text{ min}$ .

Nejnižší naměřená síla v ose  $y$ , při otáčkách  $n = 2000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 10 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_y = 331,6 \pm 11,52 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_y = 257,6 \pm 7,7 \text{ N}$  v čase  $t = 1 \text{ min}$ .



Nejvyšší naměřená síla v ose z, při otáčkách  $n = 2000 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 10 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_z = 74,8 \pm 4,21 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_z = 74 \pm 4,05 \text{ N}$  v čase  $t = 30 \text{ min}$ .

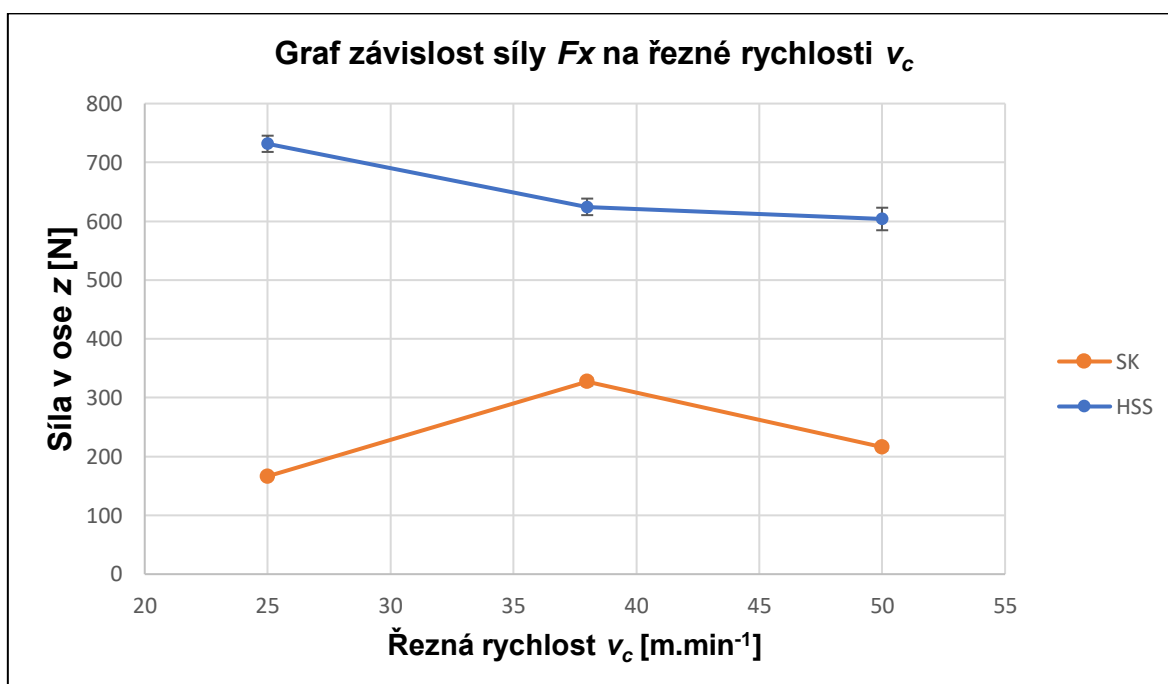
Nejnižší naměřená síla v ose z, při otáčkách  $n = 1500 \text{ ot.min}^{-1}$ , v čase  $t = 1 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_z = 68,4 \pm 4,12 \text{ N}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla  $F_z = 68,4 \pm 5,34 \text{ N}$ .

#### 4.4 Závislost sil na řezné rychlosti

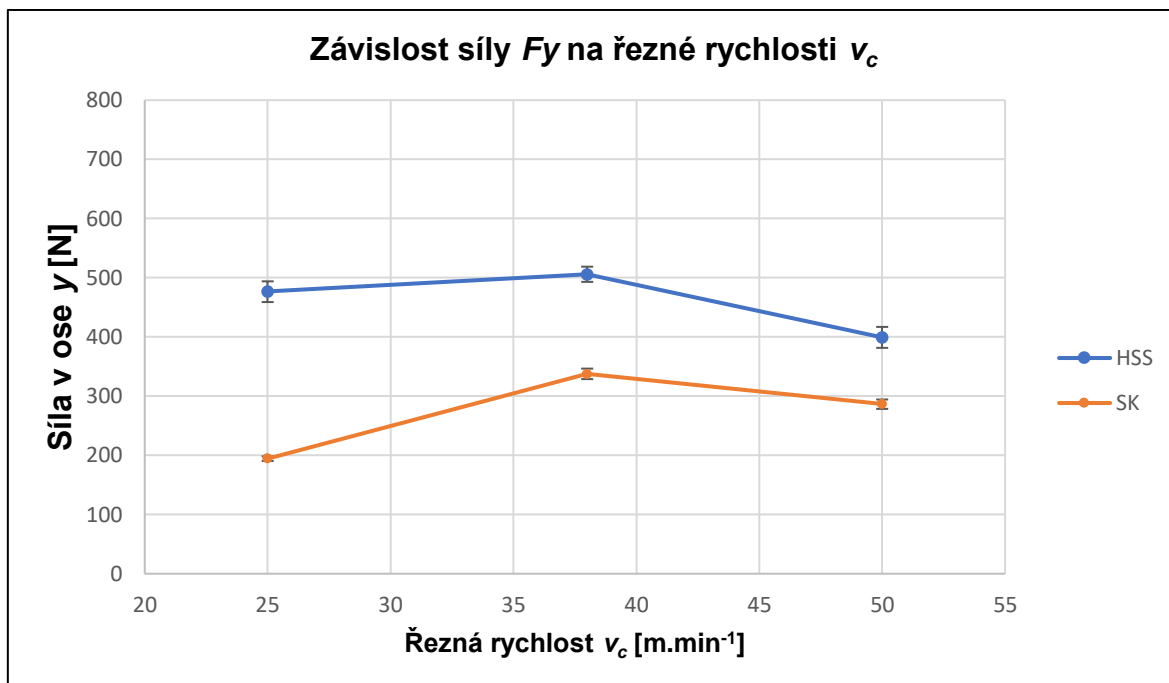
Řezné podmínky se nachází v tabulce 3.4.

Tabulka závislostí sil na řezné rychlosti $v_c$						
Materiál nástroje	HSS			SK		
Řezná rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
25	731,6 ± 13,8	476,4 ± 17,49	53,2 ± 8	166,4 ± 4,23	194,4 ± 3,88	54,2 ± 5,76
38	624,4 ± 14,08	505,8 ± 12,81	104,8 ± 6,69	327,2 ± 6,39	337,6 ± 8,87	78,4 ± 6,63
50	603,8 ± 19,15	399,2 ± 17,7	69,2 ± 12,2	215,6 ± 5,34	286,4 ± 7,95	74 ± 4,05

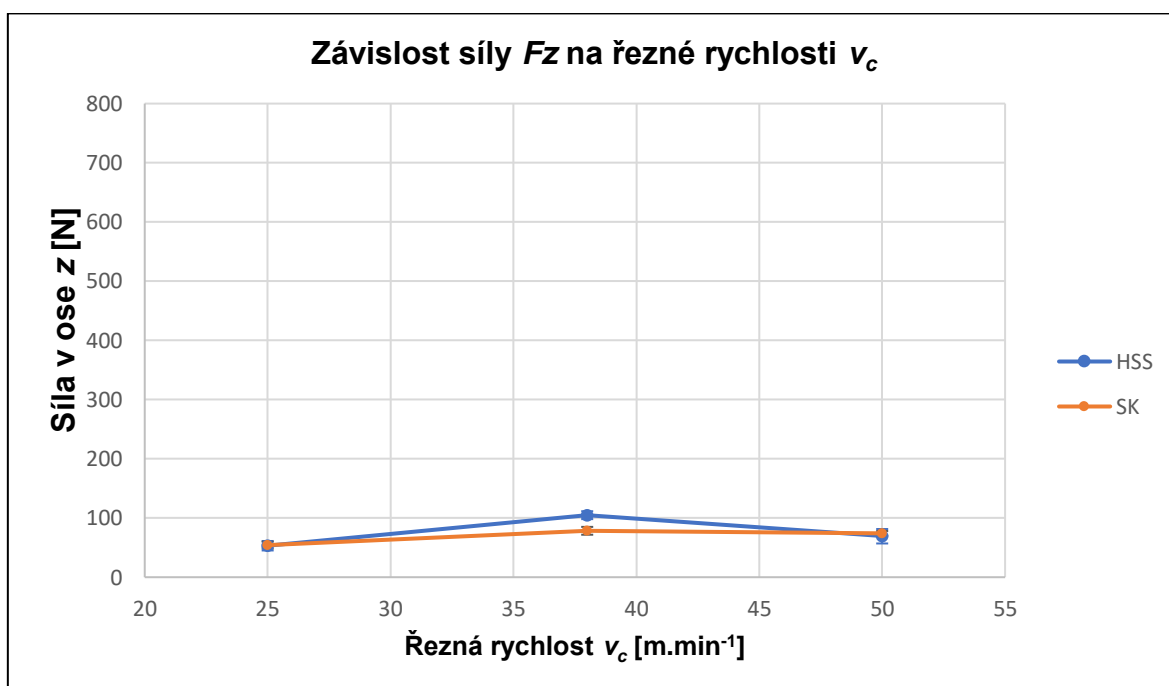
Tab. 4.11: Závislosti sil na řezné rychlosti



Graf 10: Graf závislosti síly  $F_x$  na řezné rychlosti  $v_c$



Graf 11: Graf závislost síly  $F_y$  na řezné rychlosti  $v_c$



Graf 12: Závislost síly  $F_z$  na řezné rychlosti  $v_c$

Nástroj z SK vykazoval největší řezné síly za řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ m.min}^{-1}$ . Z grafů 10, 11 a 12 lze vypožorovat, že fréza z HSS vykazovala nejvyšší řezné síly při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m.min}^{-1}$ .

Při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ m.min}^{-1}$  došlo opakovaně k lomu nástroje z SK. Experiment byl opakován dvakrát. Důvodem lomu nástroje byly nejspíše vibrace

obráběného materiálu. Hodnoty u sil  $F_x$  a  $F_y$  dosahují vyšších hodnot kvůli poškození frézy. Hodnota v ose z dosahuje normálních hodnot.

I přes poškození frézy z SK a změně řezných sil je z grafů patrné, že nejmenších řezných sil ve všech osách je dosahováno při řezné rychlosti  $v_c = 25$  m.min<sup>-1</sup>. Nejvyšší naměřené hodnoty sil ukázalo měření při používání frézy z SK při řezné rychlosti  $v_c = 38$  m.min<sup>-1</sup>.

Nejvyšší naměřená řezná síla v ose x, při řezné rychlosti  $v_c = 25$  m.min<sup>-1</sup>, pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_x = 731,6 \pm 13,8$  N, kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_x = 327,2 \pm 6,39$  N, při řezné rychlosti  $v_c = 38$  m.min<sup>-1</sup>.

Nejnižší naměřená řezná síla v ose x, při řezné rychlosti  $v_c = 50$  m.min<sup>-1</sup>, pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_x = 603,8 \pm 19,15$  N, kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_x = 166,4 \pm 4,23$  N, při řezné rychlosti  $v_c = 25$  m.min<sup>-1</sup>.

Nejvyšší naměřená řezná síla v ose y, při řezné rychlosti  $v_c = 38$  m.min<sup>-1</sup>, pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_y = 505,8 \pm 12,81$  N, kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_y = 337,6 \pm 8,87$  N.

Nejnižší naměřená řezná síla v ose y, při řezné rychlosti  $v_c = 50$  m.min<sup>-1</sup>, pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_y = 399,2 \pm 17,7$  N, kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_y = 194,4 \pm 3,88$  N, při řezné rychlosti  $v_c = 25$  m.min<sup>-1</sup>.

Nejvyšší naměřená řezná síla v ose z, při řezné rychlosti  $v_c = 38$  m.min<sup>-1</sup>, pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_z = 104,8 \pm 6,69$  N, kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla pouze  $F_z = 78,4 \pm 6,63$  N.

Nejnižší naměřená řezná síla v ose z, při řezné rychlosti  $v_c = 25$  m.min<sup>-1</sup>, pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $F_z = 53,2 \pm 8$  N, kdežto pro frézu z SK, dosahuje síla  $F_z = 54,2 \pm 5,76$  N.

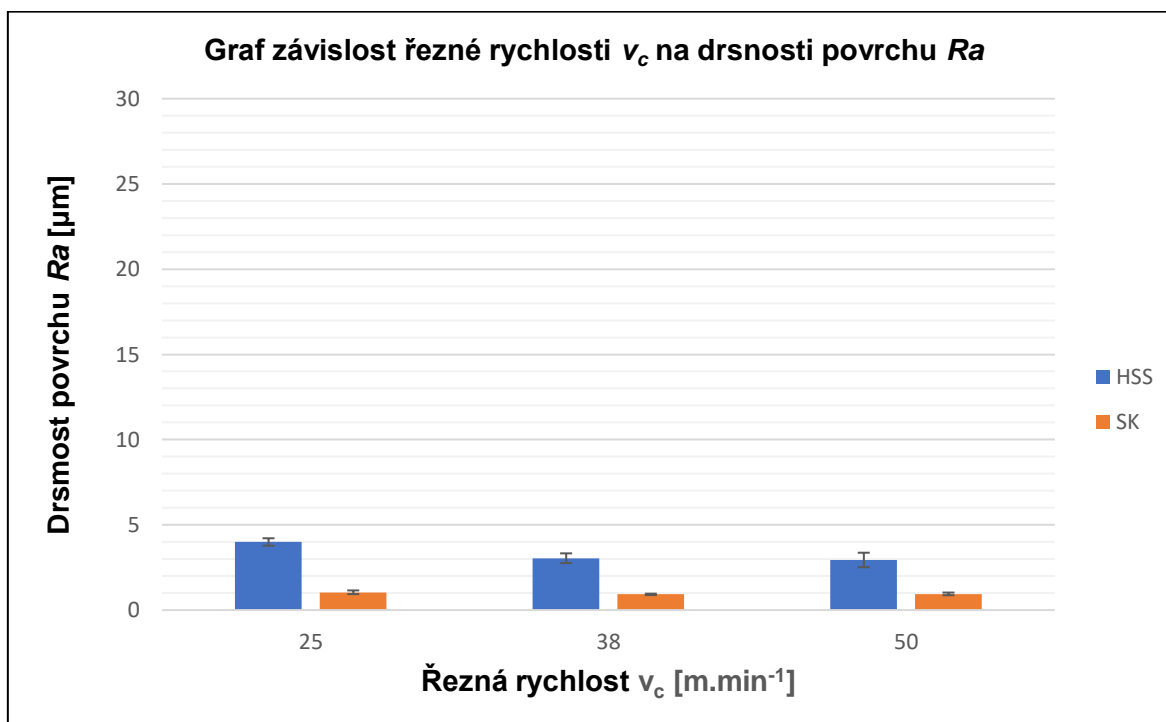
#### 4.5 Závislost řezné rychlosti na drsnosti povrchu

V grafech se nachází hodnoty drsnosti povrchu  $Ra$ ,  $Rz$  a  $Rt$  v závislosti na hodnotách řezné rychlosti. V grafu jsou uvažovány hodnoty na konci obráběcího procesu, tedy po 30 minutách obrábění. Pro experiment byly použity řezné podmínky z tabulky 3.4.

#### Závislost řezné rychlosti na drsnosti povrchu $Ra$

Tabulka závislosti řezné rychlosti na drsnosti povrchu $Ra$		
Materiál nástrojů	HSS	SK
Řezná rychlost [ $m \cdot min^{-1}$ ]	$Ra$ [ $\mu m$ ]	$Ra$ [ $\mu m$ ]
25	$3,99 \pm 0,22$	$1,05 \pm 0,11$
38	$3,04 \pm 0,29$	$0,92 \pm 0,04$
50	$2,94 \pm 0,43$	$0,95 \pm 0,08$

Tab. 4.12: Závislosti řezné rychlosti na drsnosti povrchu  $Ra$



Graf 13: Graf závislosti řezné rychlosti  $v_c$  na drsnosti povrchu  $Ra$

Z grafu 13 je vidět, že při řezné rychlosti  $v_c = 25 m \cdot min^{-1}$  u frézy z HSS je značný nárůst drsnosti povrchu  $Ra$ . U vyšších řezných rychlostí je již rozdíl drsností povrchů u frézy z HSS nepatrný.

Fréza z SK má ve všech použitých řezných podmínkách velmi podobné výsledky drsnosti povrchu.

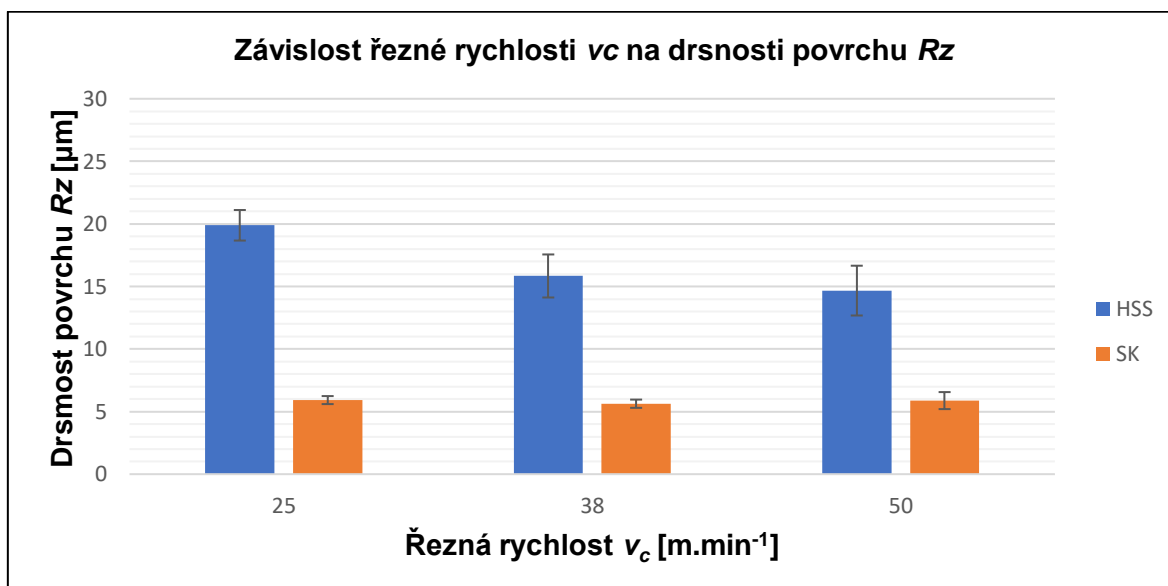
Nejvyšší naměřená hodnota drsnosti povrchu  $Ra$  při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , dosahuje u frézy z HSS hodnoty  $Ra = 3,99 \pm 0,22 \text{ }\mu\text{m}$ , avšak u frézy z SK dosahuje drsnost povrchu jen  $Ra = 1,05 \pm 0,11 \text{ }\mu\text{m}$ .

Nejnižší naměřená hodnota drsnosti povrchu  $Ra$  při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , dosahuje u frézy z HSS hodnoty  $Ra = 2,94 \pm 0,43 \text{ }\mu\text{m}$ , avšak u frézy z SK dosahuje drsnost povrchu jen  $Ra = 0,92 \pm 0,41 \text{ }\mu\text{m}$  při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### Závislost řezné rychlosti na drsnosti povrchu $Rz$

Tabulka závislosti řezné rychlosti na drsnosti povrchu $Rz$		
Materiál nástrojů	HSS	SK
Řezná rychlost [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]
25	$19,89 \pm 1,22$	$5,92 \pm 0,32$
38	$15,84 \pm 1,72$	$5,63 \pm 0,33$
50	$14,67 \pm 1,99$	$5,88 \pm 0,68$

Tab. 4.13: Závislosti řezné rychlosti na drsnosti povrchu  $Rz$



Graf 14: Graf závislosti řezné rychlosti  $v_c$  na drsnosti povrchu  $Rz$

V grafu 14 je vidět, že při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  u frézy z HSS je značný nárůst drsnosti povrchu  $Rz$ . U vyšších řezných rychlostí je rozdíl drsností povrchu zanedbatelný.

U frézy z SK je drsnost povrchu  $Rz$  skoro stejná za všech řezných podmínek.

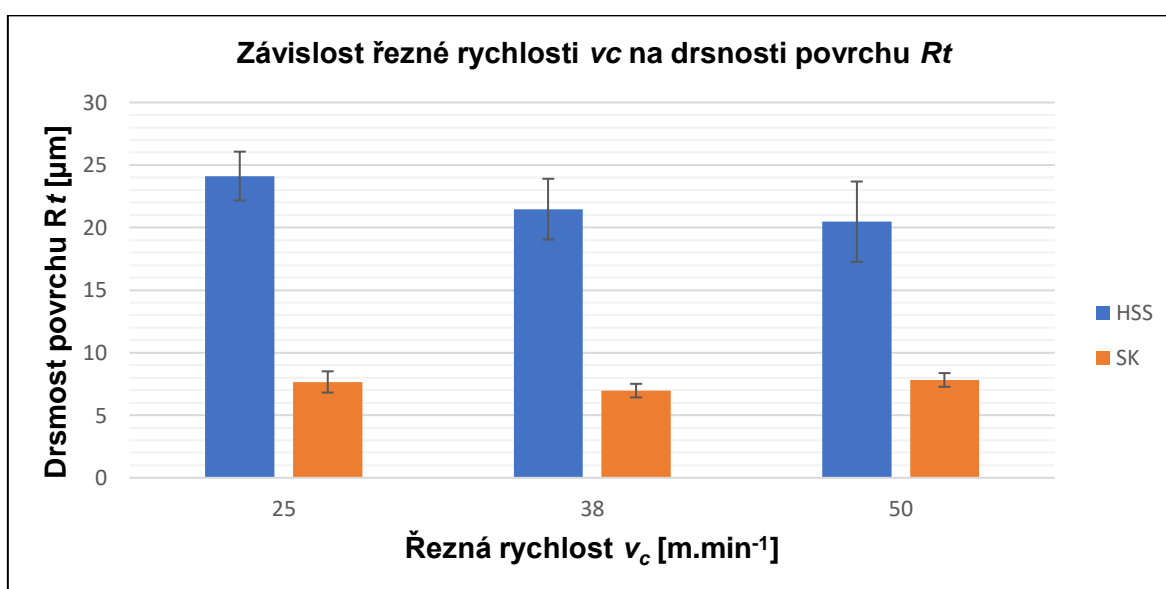
Nejvyšší naměřená hodnota drsnosti povrchu  $Rz$  při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , dosahuje u frézy z HSS hodnoty  $Rz = 19,89 \pm 1,22 \text{ }\mu\text{m}$ , avšak u frézy z SK dosahuje drsnost povrchu jen  $Rz = 5,92 \pm 0,32 \text{ }\mu\text{m}$ .

Nejnižší naměřená hodnota drsnosti povrchu  $R7$  při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , dosahuje u frézy z HSS hodnoty  $Rz = 14,67 \pm 1,99 \text{ }\mu\text{m}$ , avšak u frézy z SK dosahuje drsnost povrchu jen  $Ra = 5,63 \pm 0,33 \text{ }\mu\text{m}$  při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### Závislost řezné rychlosti na drsnosti povrchu $Rt$

Tabulka závislosti řezné rychlosti na drsnosti povrchu $Rt$		
Materiál nástrojů	HSS	SK
Řezná rychlost [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	$Rt$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Rt$ [ $\mu\text{m}$ ]
25	$24,12 \pm 1,95$	$7,66 \pm 0,85$
38	$21,47 \pm 2,43$	$6,97 \pm 0,54$
50	$20,47 \pm 3,21$	$7,82 \pm 0,55$

Tab. 4.14: Závislosti řezné rychlosti na drsnosti povrchu  $Rt$



Graf 15: Graf závislosti řezné rychlosti  $v_c$  na drsnosti povrchu  $Rt$

Z grafu 15 je patrné, že u frézy z HSS se při zvyšování řezné rychlosti snižuje drsnost povrchu  $Rt$ . Fréza z SK má jen nepatrné rozdíly drsnosti povrchu.

Nejvyšší naměřená hodnota drsnosti povrchu  $Rt$  při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , dosahuje u frézy z HSS hodnoty  $Rt = 24,12 \pm 1,95 \text{ }\mu\text{m}$ , avšak u frézy z SK dosahuje drsnost povrchu jen  $Rt = 7,82 \pm 0,55 \text{ }\mu\text{m}$  při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Nejnižší naměřená hodnota drsnosti povrchu  $R_t$  při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , dosahuje u frézy z HSS hodnoty  $R_t = 20,47 \pm 3,21 \mu\text{m}$ , avšak u frézy z SK dosahuje drsnost povrchu jen  $R_a = 6,97 \pm 0,54 \mu\text{m}$  při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

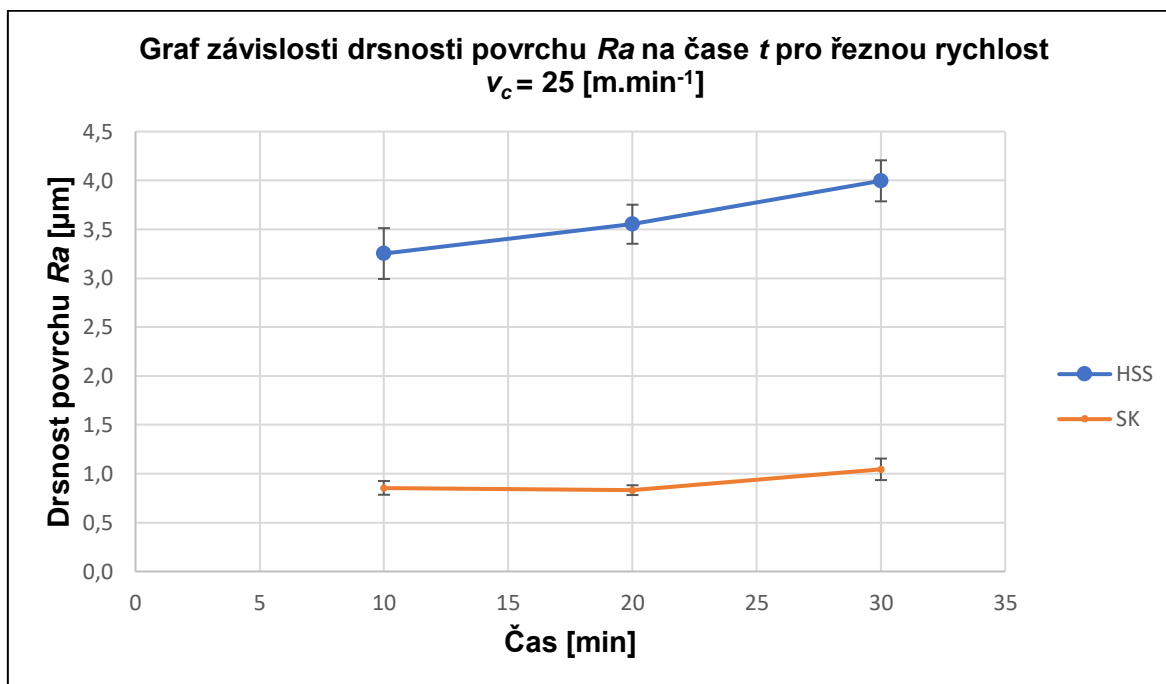
#### 4.6 Závislost drsnosti povrchu na čase

##### Závislost drsnosti $R_a$

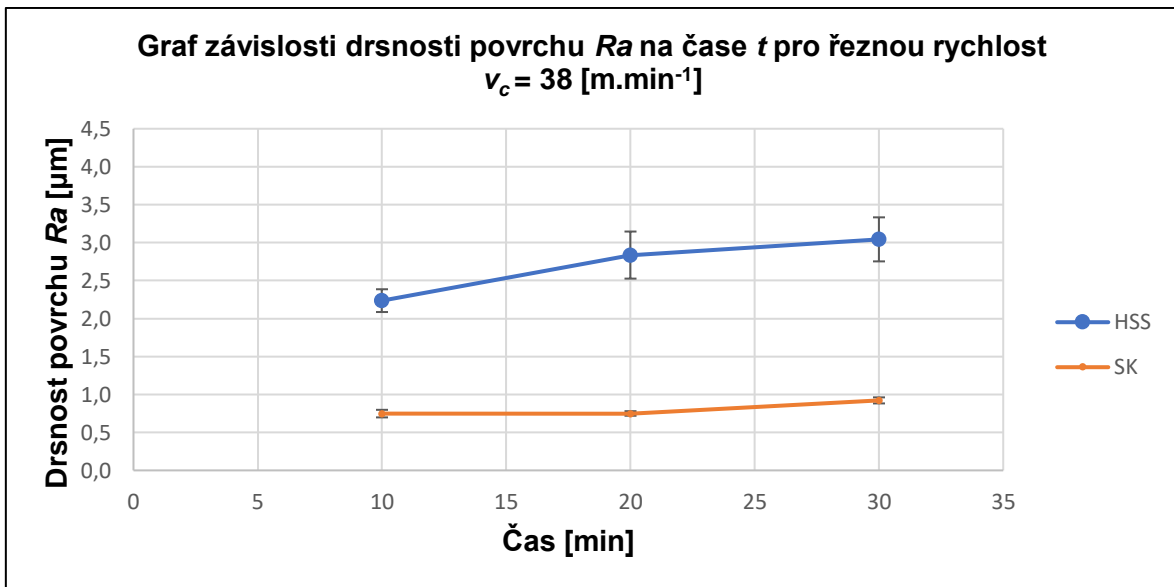
Podmínky pro řezné rychlosti jsou v tabulce 3.4.

Tabulka hodnot pro závislost drsnosti povrchu $R_a$ na čase pro řezné rychlosti						
Řezná rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	25		38		50	
Materiál	HSS	SK	HSS	SK	HSS	SK
Čas [min]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
10	$3,25 \pm 0,26$	$0,86 \pm 0,07$	$2,24 \pm 0,15$	$0,75 \pm 0,05$	$2,71 \pm 0,36$	$0,66 \pm 0,02$
20	$3,55 \pm 0,2$	$0,83 \pm 0,05$	$2,84 \pm 0,31$	$0,75 \pm 0,03$	$2,24 \pm 0,34$	$0,73 \pm 0,05$
30	$3,99 \pm 0,21$	$1,05 \pm 0,11$	$3,04 \pm 0,29$	$0,92 \pm 0,04$	$2,94 \pm 0,43$	$0,95 \pm 0,08$

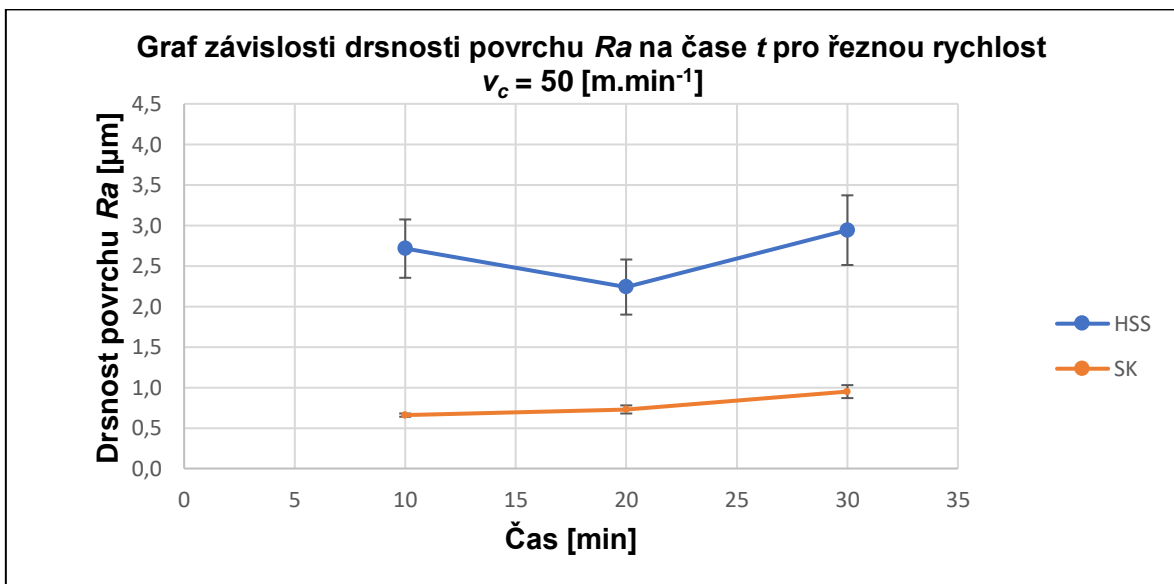
Tab. 4.15: Tabulka hodnot pro závislost drsnosti povrchu  $R_a$  na čase pro řezné rychlosti



Graf 16: Graf závislosti drsnosti povrchu  $R_a$  na čase  $t$  pro řeznou rychlost  $v_c = 25 \text{ [m}\cdot\text{min}^{-1}]$



Graf 17: Graf závislosti drsnosti povrchu  $R_a$  na čase  $t$  pro řeznou rychlost  $v_c = 38$  [m.min<sup>-1</sup>]



Graf 18: Graf závislosti drsnosti povrchu  $R_a$  na čase  $t$  pro řeznou rychlost  $v_c = 50$  [m.min<sup>-1</sup>]

Fréza z SK u všech zkoumaných řezných rychlostí vykazovala mírné postupně se zvyšující drsnosti povrchu v průběhu frézování. HSS fréza již od počátečního měření vykazovala vyšší drsnost povrchu a v průběhu experimentu se drsnost povrchu zvyšovala rychleji než u frézy z SK.

Nejvyšší drsnost povrchu byla naměřena při řezné rychlosti  $v_c = 25$  m.min<sup>-1</sup> u frézy z HSS.



Nejvyšší drsnost povrchu  $R_a$ , při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m.min}^{-1}$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $R_a = 3,99 \pm 0,21 \text{ }\mu\text{m}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje drsnost povrchu pouze  $R_a = 1,05 \pm 0,11 \text{ }\mu\text{m}$ .

Nejnižší drsnost povrchu  $R_a$ , při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m.min}^{-1}$ , v čase  $t = 10 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $R_a = 3,25 \pm 0,26 \text{ }\mu\text{m}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje drsnost povrchu pouze  $R_a = 0,83 \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}$  v čase  $t = 20 \text{ min}$ .

Nejvyšší drsnost povrchu  $R_a$ , při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ m.min}^{-1}$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $R_a = 3,04 \pm 0,29 \text{ }\mu\text{m}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje drsnost povrchu pouze  $R_a = 0,92 \pm 0,04 \text{ }\mu\text{m}$ .

Nejnižší drsnost povrchu  $R_a$ , při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ m.min}^{-1}$ , v čase  $t = 10 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $R_a = 2,24 \pm 0,15 \text{ }\mu\text{m}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje drsnost povrchu pouze  $R_a = 0,75 \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}$ .

Nejvyšší drsnost povrchu  $R_a$ , při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $R_a = 2,94 \pm 0,43 \text{ }\mu\text{m}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje drsnost povrchu pouze  $R_a = 0,95 \pm 0,08 \text{ }\mu\text{m}$ .

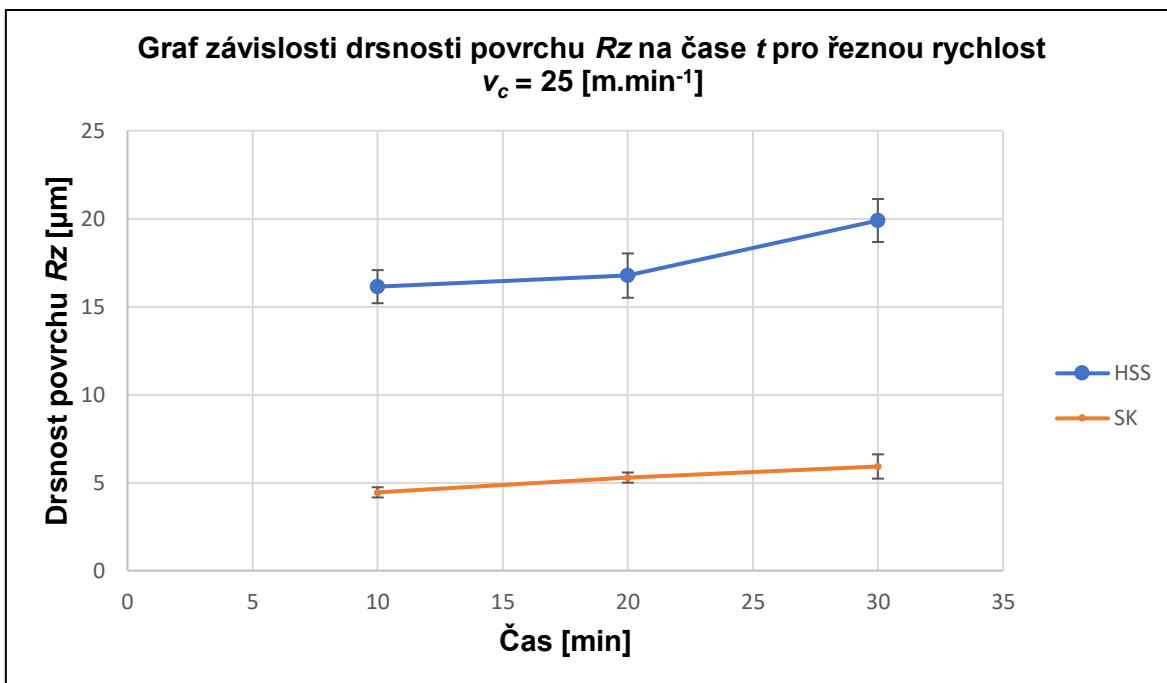
Nejnižší drsnost povrchu  $R_a$ , při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$ , v čase  $t = 20 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahuje hodnoty  $R_a = 2,24 \pm 0,34 \text{ }\mu\text{m}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje drsnost povrchu pouze  $R_a = 0,67 \pm 0,02 \text{ }\mu\text{m}$  v čase  $t = 10 \text{ min}$ .

## Závislost drsnosti $R_z$

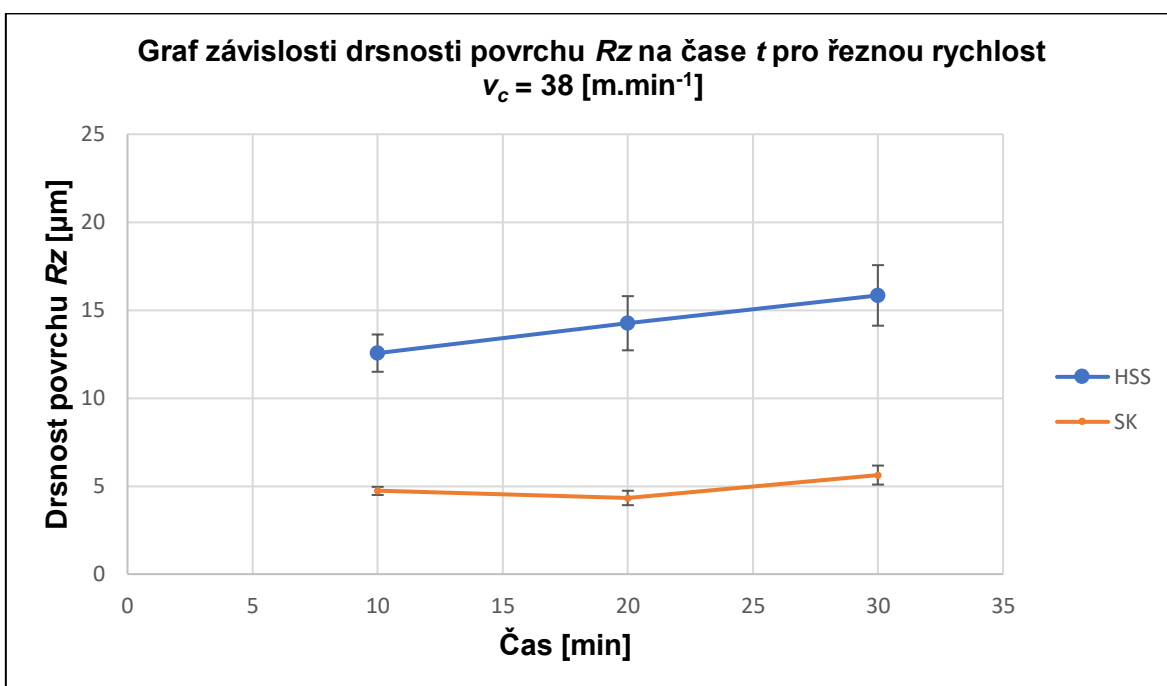
Podmínky pro řezné rychlosti jsou v tabulce 3.4.

Tabulka hodnot pro závislost drsnosti povrchu $R_z$ na čase pro řezné rychlosti						
Řezná rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	25		38		50	
Materiál	HSS	SK	HSS	SK	HSS	SK
Čas [min]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
10	16,14 ± 0,94	4,45 ± 0,29	12,56 ± 1,06	4,73 ± 0,23	13,91 ± 1,13	4,17 ± 0,17
20	16,77 ± 1,26	5,29 ± 0,29	14,26 ± 1,54	4,33 ± 0,41	12,74 ± 1,82	4,41 ± 0,45
30	19,9 ± 1,22	5,92 ± 0,69	15,84 ± 1,72	5,63 ± 0,54	14,67 ± 1,99	5,88 ± 0,32

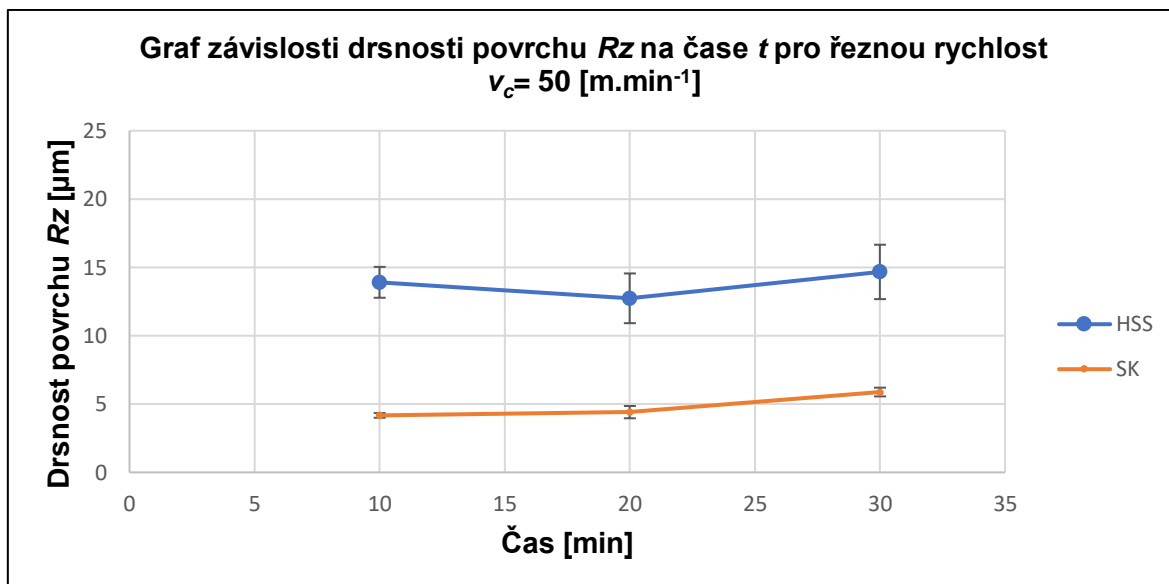
Tab. 4.16: Tabulka hodnot pro závislost drsnosti povrchu  $R_z$  na čase pro řezné rychlosti



Graf 19: Graf závislosti drsnosti povrchu  $R_z$  na čase  $t$  pro řeznou rychlost  $v_c = 25$  [m.min<sup>-1</sup>]



Graf 20: Graf závislosti drsnosti povrchu  $R_a$  na čase  $t$  pro řeznou rychlost  $v_c = 38$  [m.min<sup>-1</sup>]



Graf 21: Graf závislosti drsnosti povrchu  $R_z$  na čase  $t$  pro řeznou rychlost  $v_c = 50 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$

Drsnost povrchu  $R_z$  se u frézy z SK narůstala postupně. U frézy z HSS byla drsnost větší a při nejnižší řezné rychlosti byl zaznamenán velký nárůst drsnosti povrchu  $R_z$ .

Nejvyšší drsnosti povrchu  $R_z$ , při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m.min}^{-1}$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahují hodnoty  $R_z = 19,9 \pm 1,22 \mu\text{m}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje hodnota drsnosti povrchu pouze  $R_z = 5,92 \pm 0,69 \mu\text{m}$ .

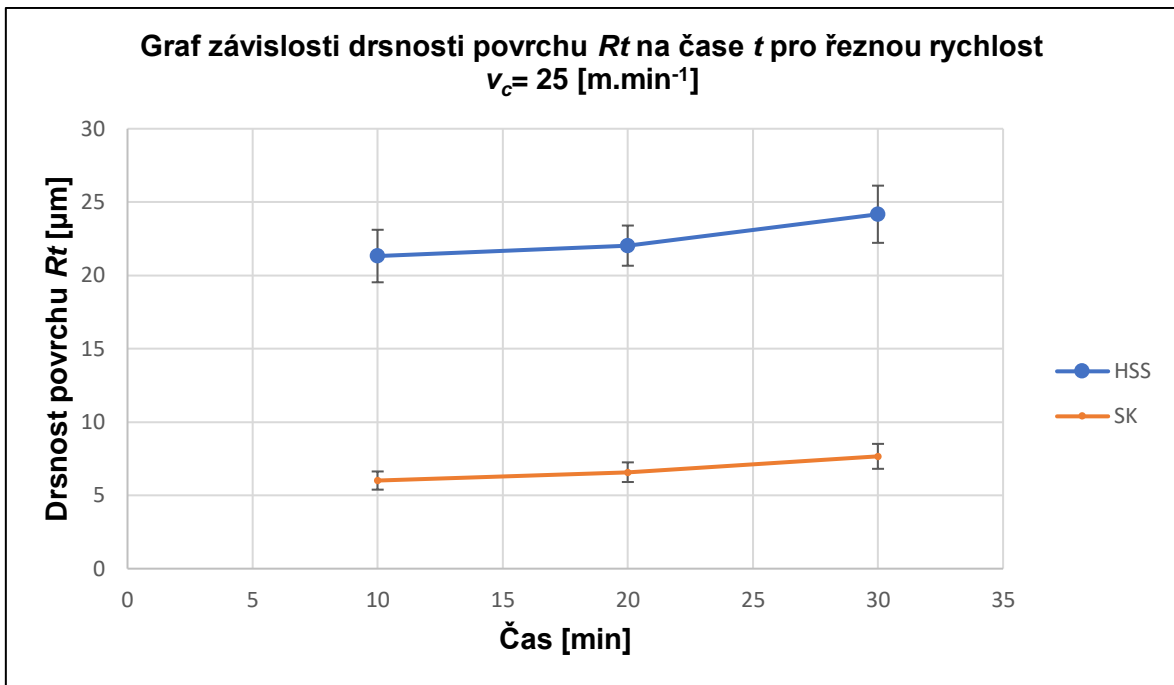
Nejnižší drsnosti povrchu  $R_z$ , při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ m.min}^{-1}$ , v čase  $t = 10 \text{ min}$ , pro frézu z HSS dosahují hodnoty  $R_z = 12,56 \pm 1,06 \mu\text{m}$ , kdežto pro frézu z SK, dosahuje hodnota drsnosti povrchu pouze  $R_z = 4,17 \pm 0,17 \mu\text{m}$  při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$ .

### Závislost drsnosti $R_t$

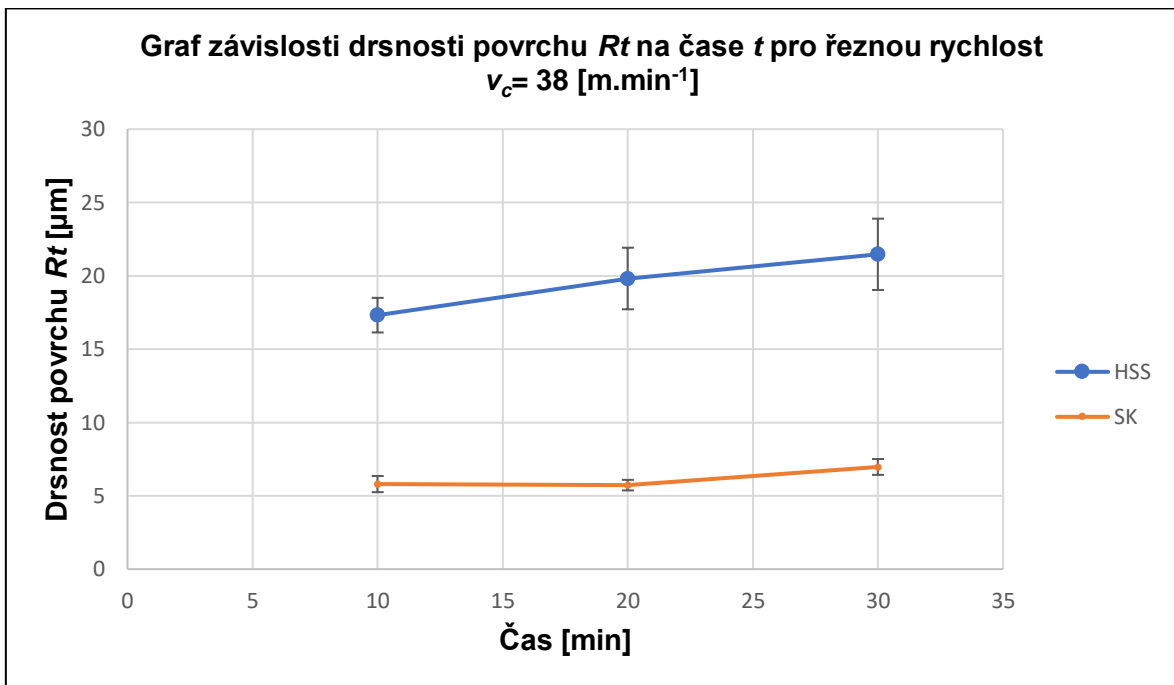
Podmínky pro řezné rychlosti jsou v tabulce 3.4.

Tabulka hodnot pro závislost drsnosti povrchu $R_t$ na čase pro řezné rychlosti						
Řezná rychlost [ $\text{m.min}^{-1}$ ]	25		38		50	
Materiál	HSS	SK	HSS	SK	HSS	SK
Čas [min]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]
10	21,32 ± 1,79	6,01 ± 0,62	17,32 ± 1,18	5,8 ± 0,55	17,19 ± 1,27	5,52 ± 0,42
20	22,03 ± 1,37	6,58 ± 0,67	19,82 ± 2,1	5,73 ± 0,36	19,08 ± 3,61	6,07 ± 0,49
30	24,17 ± 1,95	7,66 ± 0,85	21,47 ± 2,43	6,97 ± 0,54	20,47 ± 3,21	7,82 ± 0,55

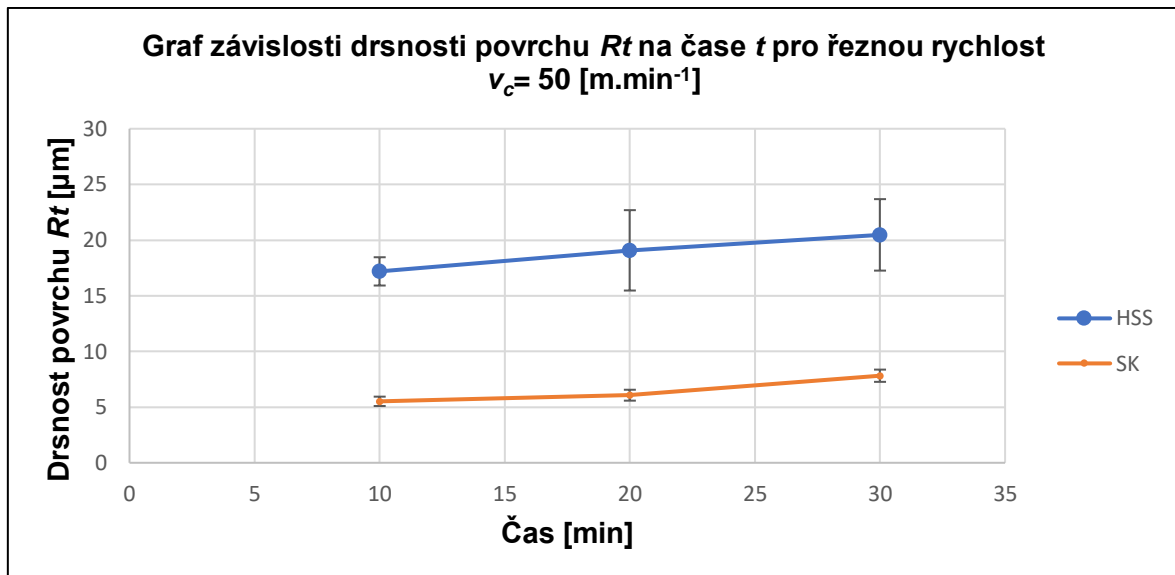
Tab. 4.17: Tabulka hodnot pro závislost drsnosti povrchu  $R_t$  na čase pro řezné rychlosti



Graf 22: Graf závislosti drsnosti povrchu  $R_t$  na čase  $t$  pro řeznou rychlost  $v_c = 25$  [m.min<sup>-1</sup>]



Graf 23: Graf závislosti drsnosti povrchu  $R_t$  na čase  $t$  pro řeznou rychlost  $v_c = 38$  [m.min<sup>-1</sup>]



Graf 24: Graf závislosti drsnosti povrchu  $R_t$  na čase  $t$  pro řeznou rychlost  $v_c = 50$  [m.min<sup>-1</sup>]

Frézy z SK mají ve všech použitých řezných podmínkách velmi podobné výsledky drsnosti povrchu  $R_t$ . Drsnost povrchu u fréz z HSS narůstá více než u frézy z SK.

Nejvyšší drsnosti povrchu  $R_t$ , při řezné rychlosti  $v_c = 25$  m.min<sup>-1</sup>, v čase  $t = 30$  min, pro frézu z HSS dosahují hodnoty  $R_t = 24,17 \pm 1,95$  µm, kdežto pro frézu z SK, dosahuje hodnota drsnosti povrchu pouze  $R_t = 7,82 \pm 0,55$  µm při řezné rychlosti  $v_c = 50$  m.min<sup>-1</sup>.

Nejnižší drsnosti povrchu  $R_t$ , při řezné rychlosti  $v_c = 25$  m.min<sup>-1</sup>, v čase  $t = 10$  min, pro frézu z HSS dosahují hodnoty  $R_t = 17,19 \pm 1,27$  µm, kdežto pro frézu z SK, dosahuje hodnota drsnosti povrchu pouze  $R_t = 5,52 \pm 0,42$  µm při řezné rychlosti  $v_c = 50$  m.min<sup>-1</sup>.

#### 4.7 Závislost opotřebení břitu nástroje na čase

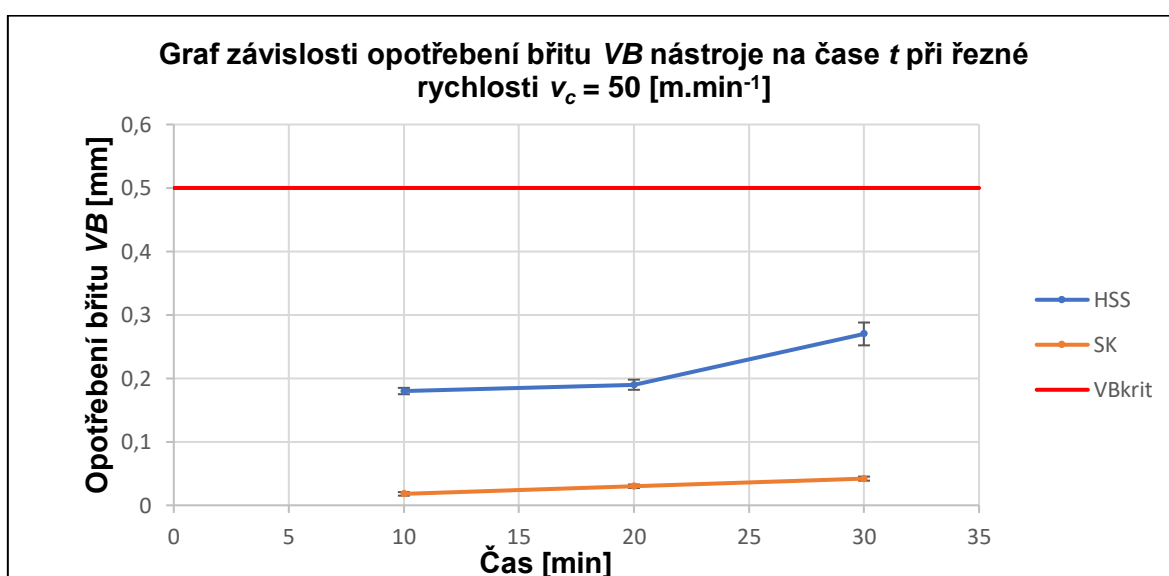
V této části experimentu bylo zkoumáno, jak se bude měnit opotřebení břitu frézy za časový interval deseti minut. Experiment byl realizován pro sady řezných podmínek. Řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Graf byl doplněn o přímku  $VB_{krit}$ . Tato hodnota označuje hodnotu maximálního možného poškození řezného nástroje. Při překročení  $VB_{krit}$  řezný nástroj nadále nemusí splňovat požadované parametry výroby.

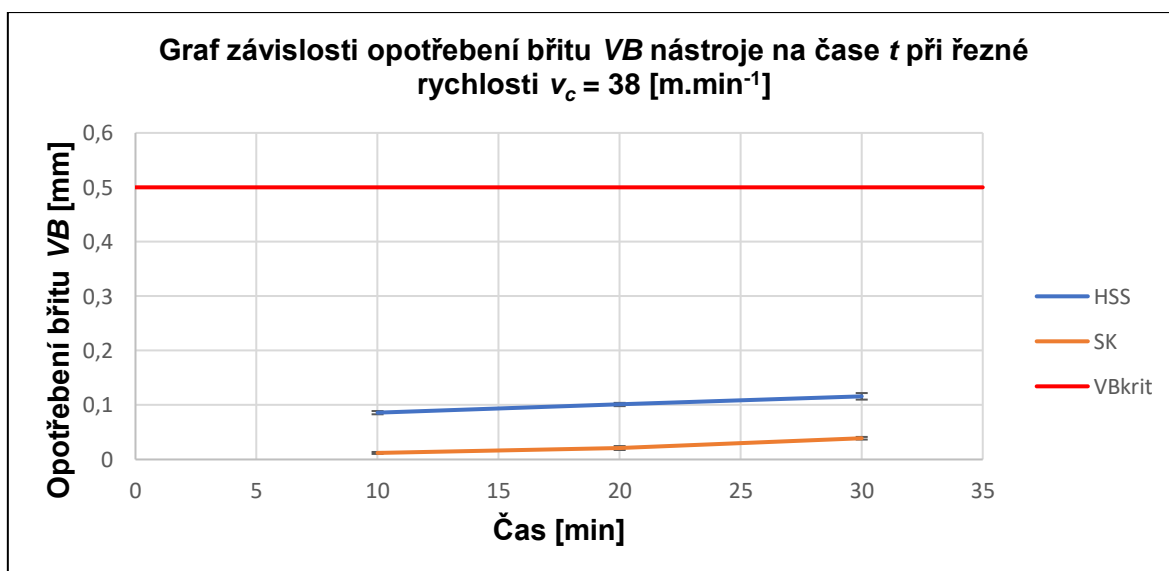
Hodnota  $VB_{krit}$  byla stanovena v tomto případě ze šířky fazetky řezného nástroje. Hodnota  $VB_{krit} = 0,5$  mm.

Tabulka závislosti opotřebení břitu nástroje na čase						
Řezná rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	25		38		50	
Materiál	HSS	SK	HSS	SK	HSS	SK
Čas [min]	VB [mm]	VB [mm]	VB [mm]	VB [mm]	VB [mm]	VB [mm]
10	0,16 ± 0,01	0,02 ± 0	0,09 ± 0	0,012 ± 0	0,18 ± 0,01	0,02 ± 0
20	0,19 ± 0,01	0,03 ± 0	0,1 ± 0	0,021 ± 0	0,19 ± 0,01	0,03 ± 0
30	0,23 ± 0,01	0,04 ± 0	0,12 ± 0,01	0,039 ± 0	0,27 ± 0,02	0,04 ± 0

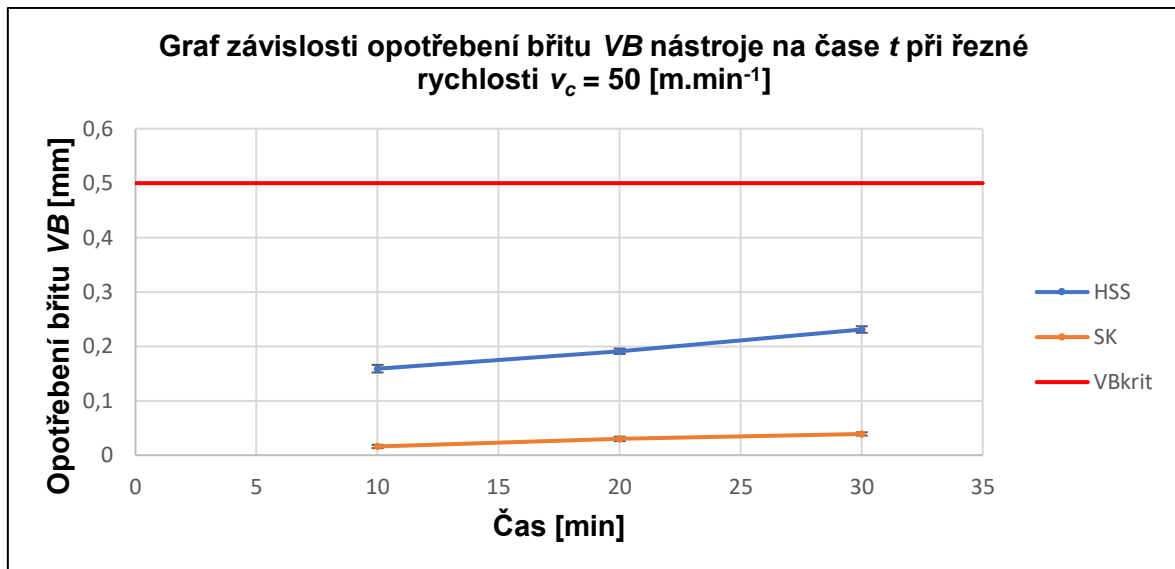
Tab. 4.18: Tabulka hodnot pro závislost drsnosti povrchu na čase pro řezné rychlosti



Graf 25: Graf závislosti opotřebení břitu VB nástroje na čase t při řezné rychlosti  $v_c = 50$  [m.min<sup>-1</sup>]



Graf 26: Graf závislosti opotřebení břitu VB nástroje na čase t při řezné rychlosti  $v_c = 38$  [m.min<sup>-1</sup>]



Graf 27: Graf závislosti opotřebení břítu VB nástroje na čase  $t$  při řezné rychlosti  $v_c = 50$  [m.min<sup>-1</sup>]

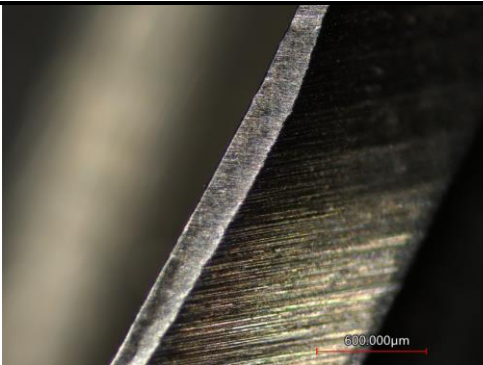

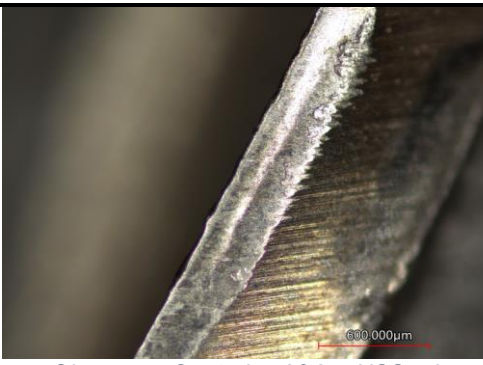
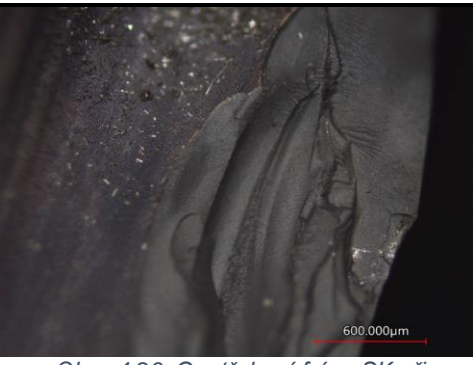


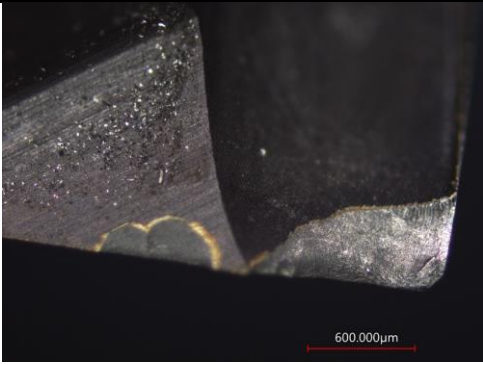

Frézy z SK dosahují velmi malého opotřebení břítu nástroje. Řezná rychlost má na frézy z SK minimální vliv. Oproti tomu, frézy z HSS vykazují veliké opotřebení a z grafů lze vyzorovat, že nejvyšší hodnoty opotřebení břítu se vyskytují u nejnižší rychlosti posuvu  $v_c = 25$  m.min<sup>-1</sup>.

Největší opotřebení břítu, v čase  $t = 30$  min, pro řeznou rychlost  $v_c = 50$  m.min<sup>-1</sup>, vykazovala fréza z HSS a dosahovala hodnot  $VB = 0,27 \pm 0,02$  mm, avšak fréza z SK dosahovala pouze hodnot  $VB = 0,04 \pm 0,00$  mm.

Nejmenší opotřebení břítu, v čase  $t = 30$  min, pro řeznou rychlost  $v_c = 38$  m.min<sup>-1</sup>, vykazovala fréza z HSS a dosahovala hodnot  $VB = 0,12 \pm 0,01$  mm, avšak fréza z SK dosahovala pouze hodnot  $VB = 0,04 \pm 0,00$  mm při řezné rychlosti  $v_c = 25$  m.min<sup>-1</sup>.

V tabulce 3.19 se nachází obrázky opotřebení břítu nástroje společně s fotkami vylomení břítu nástroje (viz obr. 4.26).

Při experimentu bylo zjištěno, že frézy z SK se při nižších otáčkách mají tendenci vylamovat (viz obr. 4.29 a 4.30). Při vyšších otáčkách již experiment probíhal bez poškození frézy z SK.

Materiál nástroje	HSS	SK
$n = 1000$ [ot.min <sup>-1</sup> ]	 <p>Obr. 4.23 Opotřebení frézy HSS při <math>n = 1000</math> [ot.min<sup>-1</sup>]</p>	 <p>Obr. 4.24: Opotřebení frézy SK při <math>n = 1000</math> [ot.min<sup>-1</sup>]</p>
$n = 1500$ [ot.min <sup>-1</sup> ]	 <p>Obr. 4.25: Opotřebení frézy HSS při <math>n = 1500</math> [ot.min<sup>-1</sup>]</p>	 <p>Obr. 4.26: Opotřebení frézy SK při <math>n = 1500</math> [ot.min<sup>-1</sup>]</p>
$n = 2000$ [ot.min <sup>-1</sup> ]	 <p>Obr. 4.27: Opotřebení frézy HSS při <math>n = 2000</math> [ot.min<sup>-1</sup>]</p>	 <p>Obr. 4.28: Opotřebení frézy SK při <math>n = 1500</math> [ot.min<sup>-1</sup>]</p>
Vylomení čela nástroje SK při $n = 1000$ a $n = 1500$ [ot.min <sup>-1</sup> ]	 <p>Obr. 4.29: Vylomení čela u SK frézy při <math>n = 1000</math> [ot.min<sup>-1</sup>]</p>	 <p>Obr. 4.30: Vylomení čela u SK frézy při <math>n = 1500</math> [ot.min<sup>-1</sup>]</p>

Tab. 4.19: Tabulka s obrázky opotřebení břitů

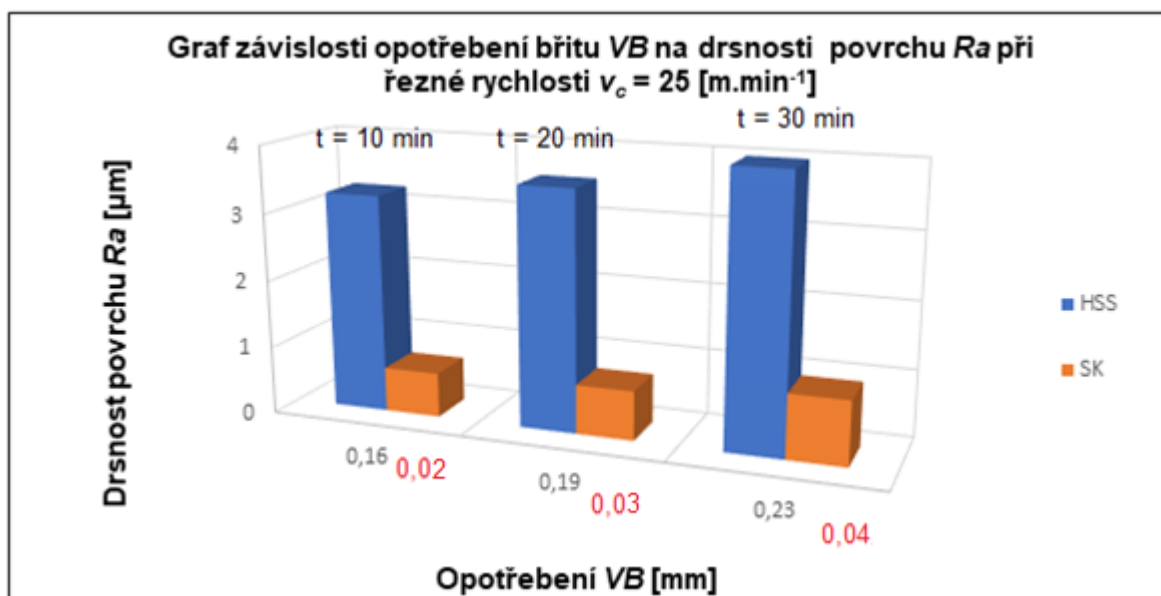


#### 4.8 Závislost opotřebení břitu na drsnosti povrchu

Řezné podmínky pro experiment jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tabulka hodnot pro závislost opotřebení břitu nástroje na drsnosti povrchu při řezné rychlosti $v_c = 25 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$				
Materiál	HSS		SK	
Čas [min]	$R_a \text{ [}\mu\text{m]}$	$VB \text{ [mm]}$	$R_a \text{ [}\mu\text{m]}$	$VB \text{ [mm]}$
10	$3,25 \pm 0,36$	$0,16 \pm 0,01$	$0,66 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0$
20	$3,55 \pm 0,34$	$0,19 \pm 0,01$	$0,73 \pm 0,06$	$0,03 \pm 0$
30	$3,99 \pm 0,43$	$0,23 \pm 0,02$	$0,95 \pm 0,08$	$0,04 \pm 0$

Tab. 4.20: Tabulka hodnot pro závislost opotřebení břitu nástroje na drsnosti povrchu při řezné rychlost  $v_c = 25 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$



Graf 28: Graf závislosti opotřebení břitu nástroje na drsnosti povrchu při řezné rychlost  $v_c = 25 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$

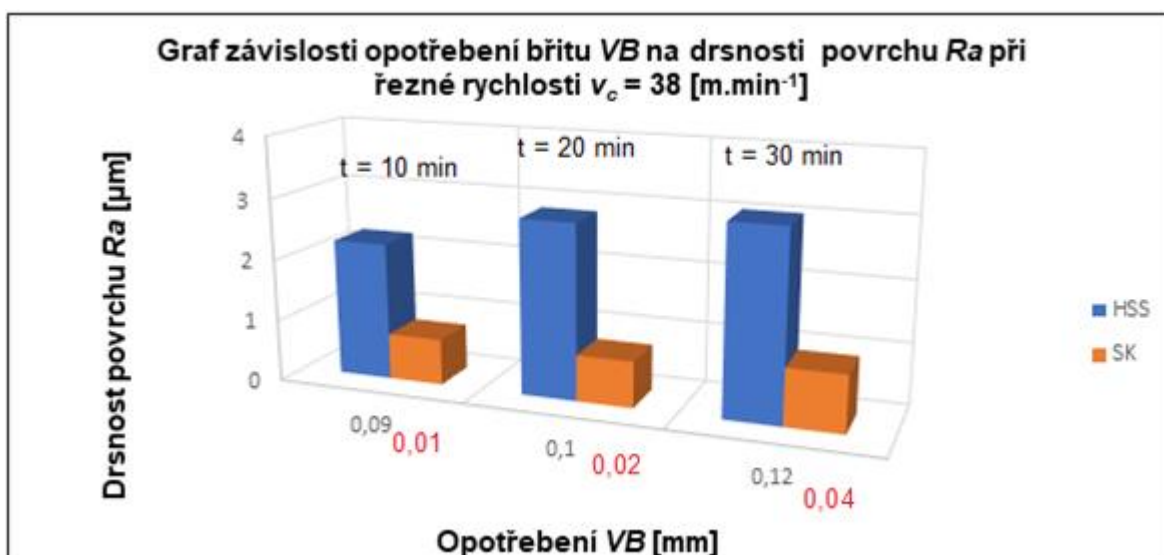
Z grafu 28 je vidět, že nejvyšší opotřebení břitu společně s největší drsností povrchu dosáhla fréza z HSS po 30 minutách obrábění. Fréza z SK také vykazuje nejvyšší hodnoty opotřebení a drsnosti po 30 minutách, ale je několikrát menší jak u frézy z HSS.

Nejhorší povrchovou drsnost  $R_a$  a nejhorší opotřebení břitu  $VB$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m.min}^{-1}$ , vykazovala fréza z HSS, oproti fréze z HSS vykazovala fréza z SK výrazně menší hodnoty.

Nejlepší povrchovou drsnost  $R_a$  a nejmenší opotřebení břitu  $VB$ , v čase  $t = 10 \text{ min}$ , při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m.min}^{-1}$ , vykazovala fréza z SK, oproti fréze z SK vykazovala fréza z HSS zvýšené hodnoty.

Tabulka hodnot pro závislost opotřebení břitu nástroje na drsnosti povrchu při řezné rychlosti $v_c = 38 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$				
Materiál	HSS		SK	
Čas [min]	$R_a \text{ [}\mu\text{m]}$	$VB \text{ [mm]}$	$R_a \text{ [}\mu\text{m]}$	$VB \text{ [mm]}$
10	$2,24 \pm 0,15$	$0,09 \pm 0,00$	$0,75 \pm 0,05$	$0,01 \pm 0,02$
20	$2,84 \pm 0,30$	$0,1 \pm 0,00$	$0,75 \pm 0,03$	$0,02 \pm 0,04$
30	$3,04 \pm 0,29$	$0,12 \pm 0,01$	$0,92 \pm 0,04$	$0,04 \pm 0,02$

Tab. 4.21: Tabulka hodnot pro závislost opotřebení břitu nástroje na drsnosti povrchu při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$



Graf 29: Graf závislosti opotřebení břitu nástroje na drsnosti povrchu při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$

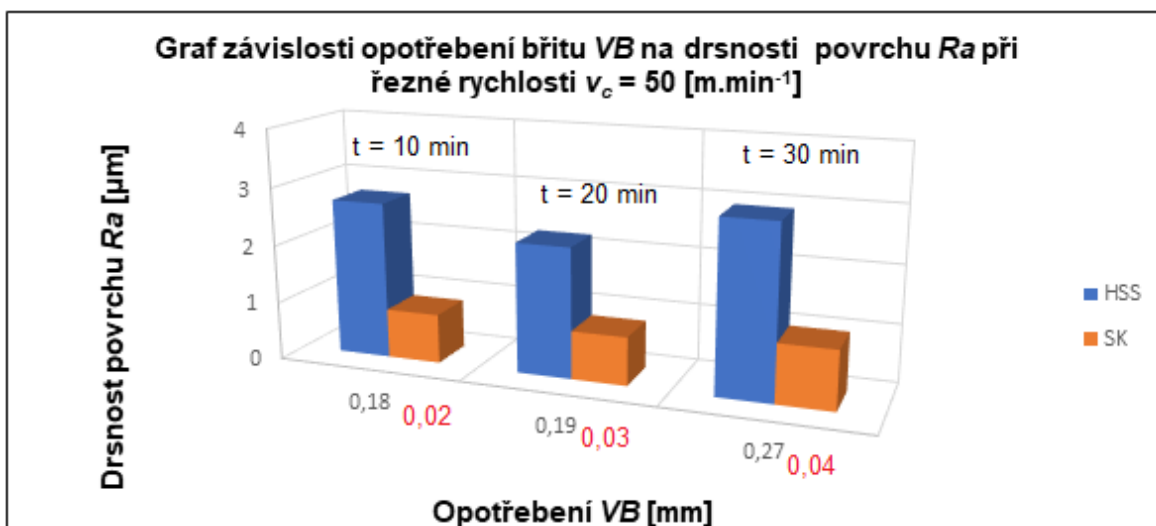
Z grafu 29 je vidět, že nejvyšší opotřebení břitu společně s největší drsností povrchu dosáhla fréza z HSS po 30 minutách obrábění. Fréza z SK také vykazuje nejvyšší hodnoty opotřebení a drsnosti po 30 minutách, ale je několikrát menší jak u frézy z HSS.

Nejhorší povrchovou drsnost  $R_a$  a nejhorší opotřebení břitu  $VB$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ m.min}^{-1}$ , vykazovala fréza z HSS, oproti fréze z HSS vykazovala fréza z SK výrazně menší hodnoty.

Nejlepší povrchovou drsnost  $R_a$  a nejmenší opotřebení břitu  $VB$ , v čase  $t = 10 \text{ min}$ , při řezné rychlosti  $v_c = 38 \text{ m.min}^{-1}$ , vykazovala fréza z SK, oproti fréze z SK vykazovala fréza z HSS zvýšené hodnoty.

Tabulka hodnot pro závislost opotřebení břitu nástroje na drsnosti povrchu při řezné rychlosti $v_c = 50 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$				
Materiál	HSS		SK	
Čas [min]	$R_a \text{ [}\mu\text{m]}$	$VB \text{ [mm]}$	$R_a \text{ [}\mu\text{m]}$	$VB \text{ [mm]}$
10	$2,71 \pm 0,26$	$0,18 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,07$	$0,02 \pm 0,00$
20	$2,24 \pm 0,2$	$0,19 \pm 0,01$	$0,83 \pm 0,05$	$0,03 \pm 0,04$
30	$2,94 \pm 0,22$	$0,27 \pm 0,01$	$1,01 \pm 0,11$	$0,39 \pm 0,00$

Tab. 4.22: Tabulka hodnot pro závislost opotřebení břitu nástroje na drsnosti povrchu při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$



Graf 30: Graf závislosti opotřebení břitu nástroje na drsnosti povrchu při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$

Nejnižší drsnost povrchu vykazují obě frézy při nejvyšší řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$ , avšak vykazují vyšší hodnoty opotřebení břitu.

Nejhorší povrchovou drsnost  $R_a$  a nejhorší opotřebení břitu  $VB$ , v čase  $t = 30 \text{ min}$ , při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$ , vykazovala fréza z HSS, oproti fréze z HSS vykazovala fréza z SK výrazně menší hodnoty.

Nejlepší povrchovou drsnost  $R_a$  a nejmenší opotřebení břitu  $VB$ , v čase  $t = 10 \text{ min}$ , při řezné rychlosti  $v_c = 25 \text{ m.min}^{-1}$ , vykazovala fréza z SK, oproti fréze z SK vykazovala fréza z HSS v čase  $t = 20 \text{ min}$  zvýšené hodnoty.

## 5. Ekonomicko-technologické zhodnocení experimentů

### 5.1 Technologické zhodnocení experimentů

V této části experimentu byly zkoumány doporučené řezné podmínky s ohledem na ekonomický aspekt řezných materiálů. Nástroj byl v záběru po dobu 30 minut a následně bylo zkoumáno opotřebení nástroje, drsnost povrchu obrobeneho materiálu a do zhodnocení ekonomického aspektu věci byl zahrnut i objem odebraného materiálu při doporučených řezných podmínkách od výrobce nástrojů.

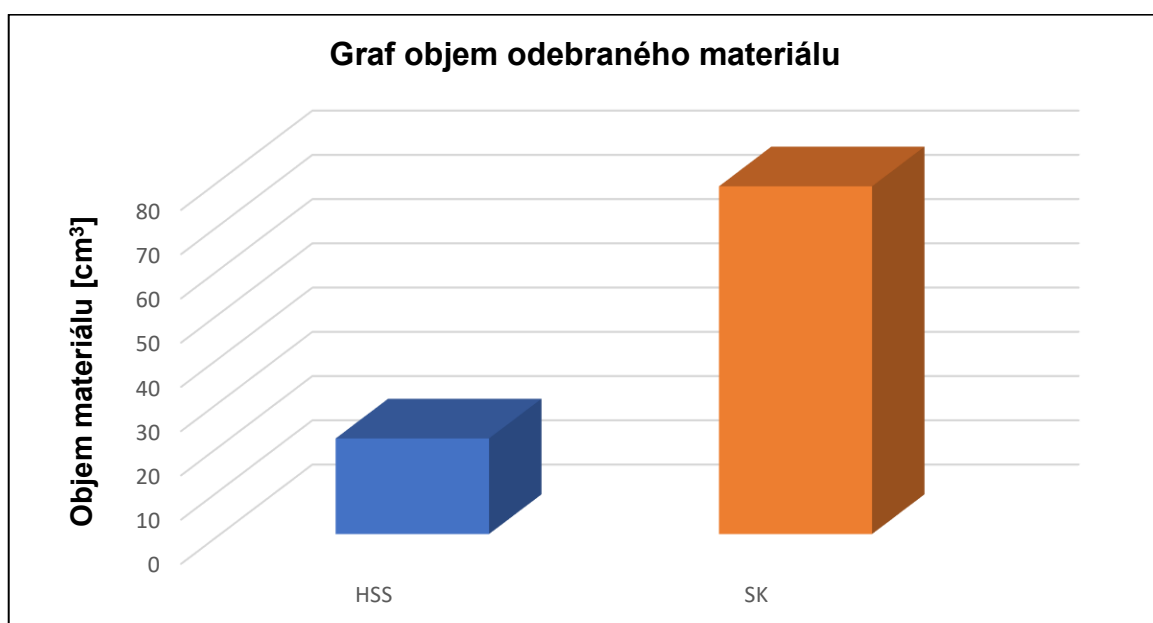
Od každého typu bylo použito 5 ks nástrojů. Naměřené hodnoty byly hodnoty aritmetického průměru s uvedeným intervalem spolehlivosti.

Řezné podmínky pro technologicko-ekonomické zhodnocení se nachází v tabulce 3.5.

Výsledné naměřené hodnoty se nachází v tabulce 5.23.

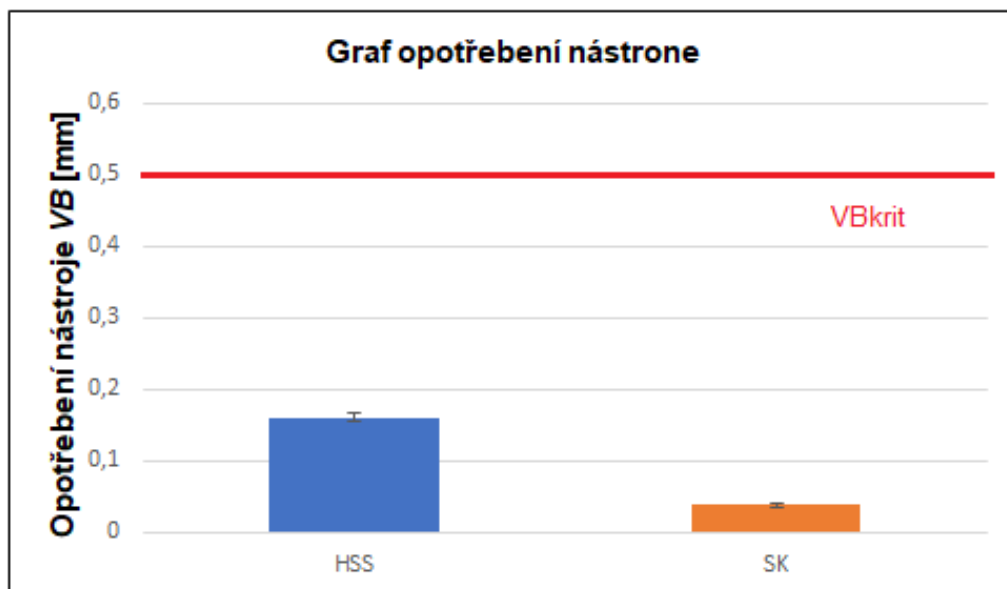
Tabulka naměřených hodnot pro technologicko-ekonomické zhodnocení						
Materiál:	Drsnost obráběného povrchu			Opotřebení nástroje		Odebraný materiál
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]	Břit 1. [mm]	Břit 2. [mm]	[ $\text{cm}^3$ ]
HSS	3,31 $\pm$ 0,23	16,35 $\pm$ 1,32	23,67 $\pm$ 2,64	0,16 $\pm$ 0,01	0,14 $\pm$ 0,01	21,6
SK	1,07 $\pm$ 0,03	6,23 $\pm$ 0,56	7,84 $\pm$ 0,77	0,04 $\pm$ 0,00	0,04 $\pm$ 0,00	78,59

Tab. 5.23: Tabulka naměřených hodnot po 30 minutách obrábění za doporučených podmínek



Graf 31: Graf objemu odebraného materiálu za 30 minut

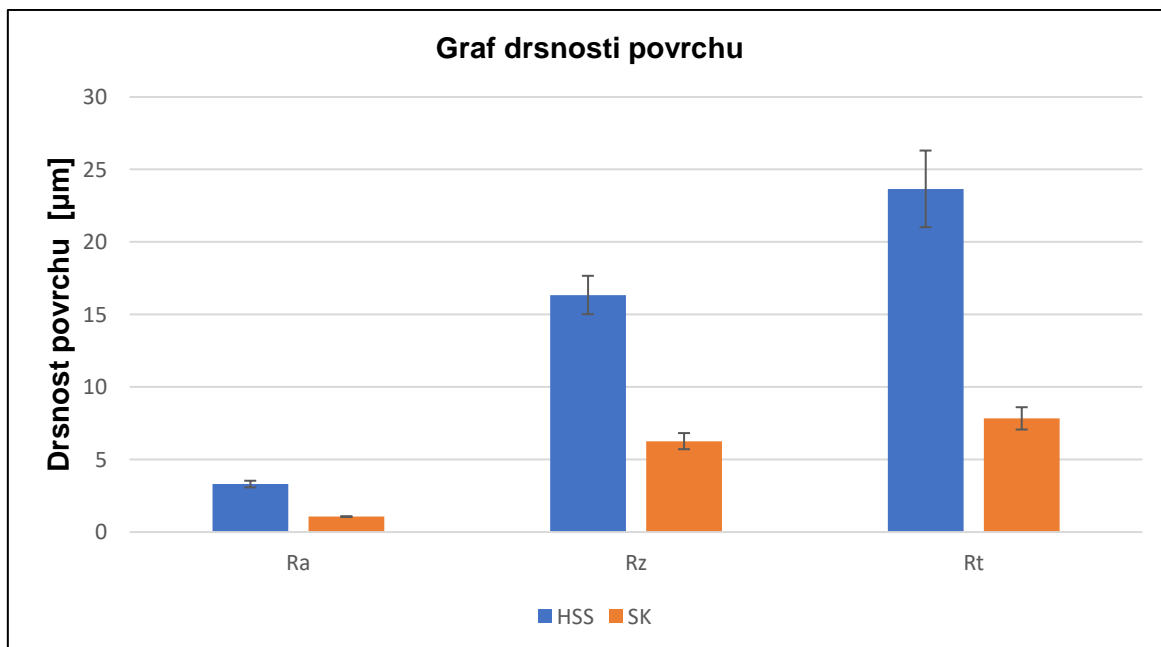
Objem odebraného materiálu (viz graf 31) při obrábění frézou z SK při podmínkách doporučených výrobcem vzrostl o 263,85 %. Drsnost povrchu  $R_a$  se zmenšila o 211 % a opotřebení břitu nástroje se za použití doporučených řezných podmínek snížilo o 322 %.



Graf 32: Graf opotřebení řezného nástroje

Fréza z HSS na hodnotu  $VB_{krit}$  nedosahuje, ovšem kvalita obrobeného povrchu při optimálních řezných podmínkách zadaných výrobcem frézy se blížila kritické hodnotě vybrané drsnosti povrchu pro tento experiment. Fréza tudíž nemusí dosáhnout ani  $VB_{krit}$ , aby byla hodnota požadované drsnosti povrchu překročena.

Větší opotřebení břitu frézy je jasně pozorovatelné u frézy z HSS. Opotřebení je větší o 322 % za stejnou dobu frézování. Díky vyššímu opotřebení se zvětší také drsnost povrchu obrobku, jak je patrné z grafu 33. Hodnoty  $R_a$ ,  $R_z$  i  $R_t$  jsou u frézy z HSS nejméně o 200 % vyšší než u frézy z SK.



Graf 33: Graf drsnosti povrchu

## 5.2 Ekonomické zhodnocení experimentů

Při ekonomickém hodnocení bylo vycházeno z 8hodinové pracovní směny. Pro vyhodnocení experimentu byla maximální povolená drsnost povrchu stanovena na  $Ra = 3,5 \mu\text{m}$ . Po překročení  $Ra$  se z obrobku stává vadný díl.

Průměrná cena frézy z HSS se pohybuje v rozmezí 170 až 340 Kč, proto byla zvolena cena průměrná kupní cena 225 Kč. Cena frézy z SK je dána výrobcem 431 Kč.

Tabulka údajů použitá pro výpočty ekonomické zhodnocení.

Tabulka údajů pro ekonomické zhodnocení			
Materiál nástroje	HSS	SK	[-]
Odebraný objem za 30 min	21,6	78,592	[cm <sup>3</sup> ]
Cena nástroje	225	341	[Kč]
Doba výměny 1 nástroje	5	5	[min]
Kontrola obrobků	40	40	[min]
Příprava vzorků	20	20	[min]
Doba výměny nástrojů	60	30	[min]
Doba frézování	360	390	[min]
Životnost nástroje	30	65	[min]
Pracovní doba	480	480	[min]
Počet vyměnění nástroje	12	6	[-]

Tab. 5.24: Tabulka údajů pro ekonomické zhodnocení

K určení ekonomického zhodnocení byla do výpočtu zahrnuta doba na kontrolu drsnosti povrchu, čas na přípravu materiálu a doba na výměnu nástroje. Údaje o časech jsou obsaženy v tabulce 5.24. Z tabulky je patrné, že fréza z HSS má podstatně menší životnost a vydrží 30 minut obrábění, aby dosáhla požadované drsnosti povrchu  $R_a = 3,5 \mu\text{m}$ . Fréza z SK vydrží 65 minut obrábění a stále splňuje požadovanou drsnost povrchu  $R_a$ . Z těchto údajů plyne, že se fréza z SK nemusí měnit tak často.

Výpočet ceny fréz HSS za pracovní dobu 8 hodin:

$$Cena = \text{počet vyměnění nástroje} * \text{cena nástroje} = 12 * 225 = 2700 \text{ Kč}$$

Výpočet ceny fréz SK za pracovní dobu 8 hodin:

$$Cena = \text{počet vyměnění nástroje} * \text{cena nástroje} = 6 * 431 = 2586 \text{ Kč}$$

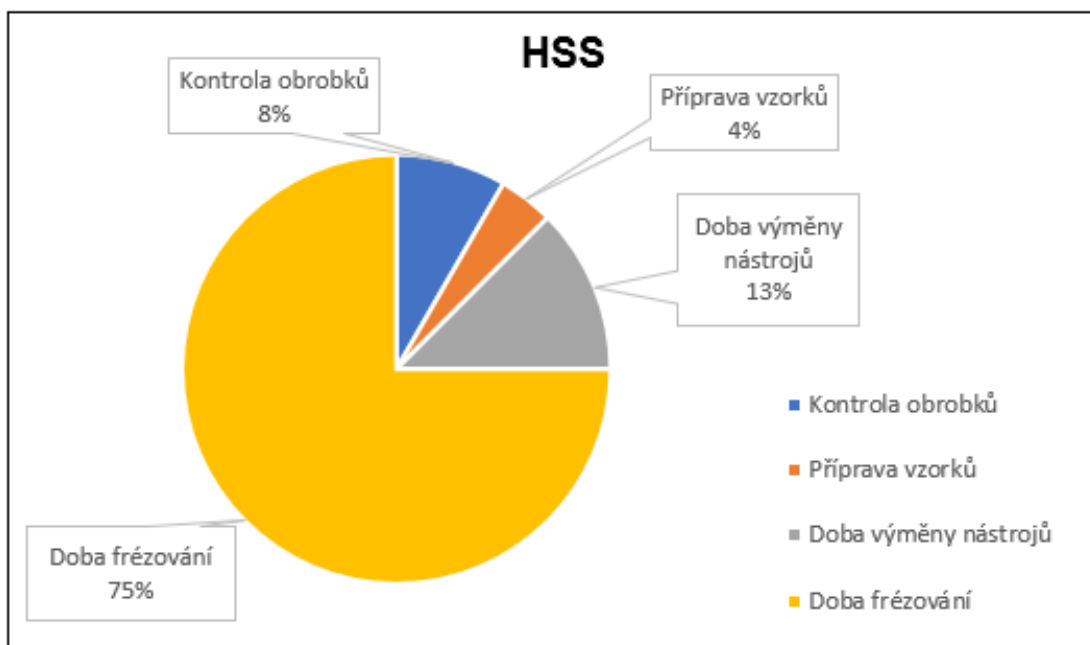
Díky kratšímu spotřebovanému času na výměnu nástrojů se může při používání frézy z SK frézovat o 30 minut déle jak je vidět z grafů 34 a 35.

Výpočet množství odebraného materiálu za použití frézy z HSS za pracovní dobu 8 hodin:

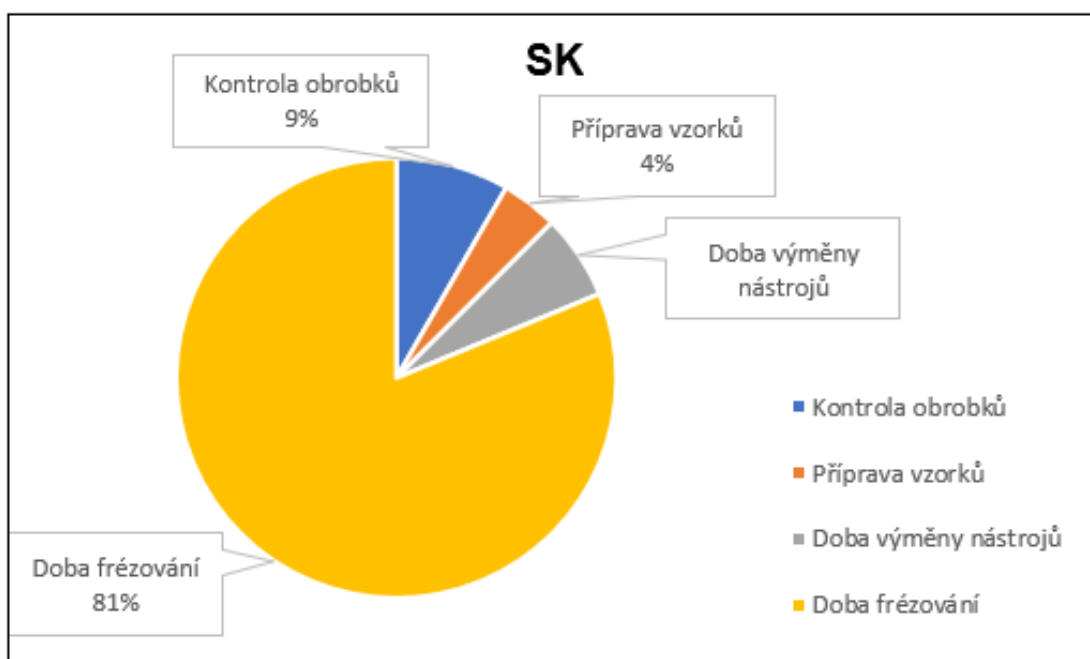
$$V = \text{Odebraný objem za 30 min} * \frac{\text{Doba obrábění HSS}}{30} = 21,6 * \frac{360}{30} = 259,2 \text{ cm}^3$$

Výpočet množství odebraného materiálu za použití frézy z SK za pracovní dobu 8 hodin:

$$V = \text{Odebraný objem za 30 min} * \frac{\text{Doba obrábění SK}}{30} = 21,6 * \frac{390}{30} = 1021,7 \text{ cm}^3$$



Graf 34: Graf využití frézy HSS za 8hodinovou směnu



Graf 35: Graf využití frézy SK za 8hodinovou směnu

Při ceně 431 Kč za SK frézu jsme schopni ušetřit 114 Kč na nástrojích za dobu 8hodinové pracovní směny. Dále je tu také množství odebraného materiálu, u kterého fréza z SK dokázala odebrat o 294,2 % více materiálu než fréza z HSS. Zde také záleží na tvaru obrobku, výrobní strategii a nastavených rezných podmínkách.

Z daných technologických i ekonomických výsledků je očividné, že fréza z SK po 30 minutách má menší opotřebení břitů, lepší drsnost obrobeného povrchu a větší množství odebraného množství materiálu a je vhodnější pro dlouhodobé



používání při frézování. Nástroj z SK je sice dražší, ale za to technologicky i ekonomicky výhodnější. Nástroje z HSS jsou levnější a ekonomicky se nevyplatí.

## 6. Diskuze

Hlavním cílem bakalářské práce bylo porovnání stávajících a nových nástrojů při frézování kovových materiálů.

K dosažení určeného cíle bylo nutné nejprve vytvořit metodiku pro stanovení řezných podmínek pro frézování kovů bez procesní kapaliny. Dále bylo potřeba vytvořit metodiku pro měření sil při frézování, drsnosti povrchu a opotřebení řezného nástroje.

Informace ohledně problematiky frézování kovových materiálů jsou obsaženy v teoretické části bakalářské práce v kapitole 2.

Metodika experimentu se nachází v kapitole 3. Tato kapitola obsahuje informace o nástrojích a strojích, dále přípravě materiálu, způsobu obrábění a volbě řezných podmínek.

Jako zkoumané řezné nástroje byly zvoleny frézy:

1. Dvoubřítá fréza z rychlořezné oceli
2. Dvoubřítá fréza ze slinutého karbidu

Měřené parametry byly:

1. Řezná síla
2. Drsnost povrchu obráběného materiálu
3. Velikost opotřebení nástroje

### **Řezná síla**

Řezná síla byla měřena pomocí Dynamometru KISTLER. Popis zařízení a postup měření je popsán v kapitole 3.4.1.

Nejvyšší hodnoty řezné síly v ose  $x$  byly u frézy z HSS  $F_x = 731,6 \pm 13,8$  N. Naopak síly u frézy z SK dosáhly pouze  $F_x = 327,2 \pm 6,34$  N.

Nejvyšší hodnoty řezné síly v ose  $y$  byly u fréza z HSS  $F_y = 508,8 \pm 12,81$  N. Naopak u frézy z SK dosáhly pouze  $F_y = 337,6 \pm 8,82$  N.

Nejvyšší hodnoty řezné síly v ose  $z$  byly u fréza z HSS  $F_z = 104,8 \pm 6,69$  N. Naopak u frézy z SK dosáhly pouze  $F_y = 78,4 \pm 6,63$  N.

Z výsledků je vidět, že řezné síly u SK dosahovaly nižších hodnot a síly při obrábění narůstaly postupně. U fréz z HSS docházelo k výrazným nárůstům síly.

### **Drsnost povrchu obráběného materiálu**

Drsnost povrchů po frézování byla měřena na dotykovém profilometru MITUTOYO SV-2000N2.

Nejvyšší povrchové drsnosti frézovaného  $R_a$  materiálu byly naměřeny u frézy z HSS  $R_a = 3,99 \pm 0,22 \mu\text{m}$ . Naopak u frézy z SK dosáhly pouze hodnoty  $R_a = 1,05 \pm 0,11 \mu\text{m}$ .

Nejvyšší povrchové drsnosti frézovaného  $R_z$  materiálu byly naměřeny u frézy z HSS  $R_z = 19,90 \pm 1,22 \mu\text{m}$ . Naopak u frézy z SK dosáhly pouze hodnoty  $R_z = 5,92 \pm 0,69 \mu\text{m}$ .

Nejvyšší povrchové drsnosti frézovaného  $R_t$  materiálu byly naměřeny u frézy z HSS  $R_t = 24,17 \pm 1,95 \mu\text{m}$ . Naopak u frézy z SK dosáhly pouze hodnoty  $R_t = 7,82 \pm 0,55 \mu\text{m}$ .

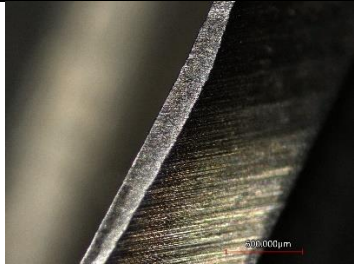

Nejvyšší drsnosti povrchu frézovaného materiálu byly naměřené za řezných podmínek s nejnižší řeznou rychlostí. Lepší kvalita obráběného povrchu byla zaznamenána při vyšších otáčkách. Velikost drsnost povrchu se dá korigovat změnou řezných podmínek.

### **Velikost opotřebení břitu nástroje**

Největší míra opotřebení břitu nástroje byla naměřena u frézy z HSS  $VB = 0,27 \pm 0,02 \text{ mm}$ . Oproti tomu, opotřebení u frézy z SK  $VB = 0,04 \pm 0,0 \text{ mm}$ .

Nejvyšší míra opotřebení břitu byla zaznamenána při nejvyšších řezných podmínkách.

## Shrnutí

Materiál	HSS	SK
Fotka rozdílů opotřebení při $n = 1000$ [ot.min <sup>-1</sup> ]	 <p>Obr. 6.31: Opotřebení břitu frézy z HSS</p>	 <p>Obr. 6.32: Opotřebení břitu frézy z SK</p>
Max. řezná síla N	731,6 ± 13,8	337,6 ± 8,87
Max. drsnost povrchu $R_a$ $\mu\text{m}$	3,99 ± 0,22	1,01 ± 0,11
Max. opotřebení břitu mm	0,27 ± 0,02	0,04 ± 0,00
Množství odebraného materiálu [cm <sup>3</sup> ]	21,6	78,59
Cena nástroje [Kč]	170–340	431
Vhodné pro	Kusovou výrobu	Sériovou výrobu

Tab. 6.25: Tabulka shrnutí výsledků

Z ekonomického hlediska je **výhodnější** pořízení **frézy z SK**. Fréza z SK je sice dražší než fréza z HSS, ale při dlouhodobém používání při použití optimálních podmínek vydrží mnohem déle, má menší řezné síly, lepší drsnost povrchu a výrazně menší opotřebení břitu oproti fréze z HSS. Velký rozdíl je i v odebraném objemu materiálu, kdy fréza z SK odebrala o 294,2 % více materiálu. Při experimentu bylo zjištěno, že u frézy z SK při nižších otáčkách dochází k vylamování.

Dále z experimentu bylo vyhodnoceno, že fréza z HSS se hodí pro kusovou výrobu díky její nízké ceně. Fréza z SK se hodí pro sériovou výrobu i přes její vyšší pořizovací náklady. Díky delší životnosti nástroje se v dlouhodobém časovém úseku vyplatí investovat do frézy z SK.

## 7. Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na téma "Využití nových nástrojů při frézování kovových materiálů".

Práce byla rozdělena do 4 hlavních částí.

Teoretická část se zabývá problematikou frézování kovů, řeznými materiály a jejich výhodami, řeznými nástroji a jejich inovacemi, a opotřebením břitu řezného nástroje.

Metodika experimentu obsažena v druhé části práce se zabývá postupy experimentů, volbou materiálu, řezných podmínek a popisu strojů a nástrojů.

Třetí část se zabývá samotnými experimenty, grafickým zobrazením a výsledky měření.

Čtvrtá část práce byla zaměřena na technologicko-ekonomický pohled na problematiku. V závěru bakalářské práce je diskuze a závěr, kde jsou prezentovány poznatky a výsledky z měření.

Ze souboru naměřených hodnot a výsledků lze vyvodit následující poznatky:

1. Fréza z HSS dosahovala při testování všech řezných podmínek vždy větších řezných sil než fréza z SK.
2. Největší drsnosti povrchu byly také naměřeny při používání frézy z HSS.
3. Největšího opotřebením břitu bylo také dosaženo u frézy z HSS.

Z výsledků získaných při měření lze vyvodit závěr takový, že frézy z HSS mají výrazně vyšší řezné síly. Při použití vyšších otáček se břit frézy opotřebává rychleji, ale drsnost povrchu je lepší než při použití nižších otáček. Optimalizací řezných podmínek se dá zlepšit životnost nástroje a drsnost povrchu. Dle zjištěných výsledků lze HSS frézy použít pro obrábění načisto a SK frézy pro jemné obrábění.

Při ekonomickém zhodnocení bylo zjištěno, že pro sériovou výrobu je vhodnější používat frézu z SK. Nástroj z SK je dražší, ovšem oproti nástroji z HSS vydrží pracovat delší dobu. Také množství objemu odebraného materiálu je mnohem větší, dochází k menšímu opotřebením nástroje a lepší kvalitě povrchu než při použití frézy z HSS.

## Seznam použité literatury

- [1] *DSpace Home* [online]. Copyright © [cit. 16.01.2022]. Dostupné z: [https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/160761/DP\\_Knapek.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/160761/DP_Knapek.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [2] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [3] Sousledné a nesousledné frézování. Sandvik Coromant. [online]. [cit. 20. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>
- [4] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [5] Inovace řezných materiálů. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 8. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/inovace-reznych-materialu>
- [6] Sandvik Coromant. [online]. [cit. 6. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [7] Opotřebenění nástroje. *ELUC* [online]. [cit. 1. 3. 2022]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1203>
- [8] Opotřebenění bříty. Sandvik Coromant. [online]. [cit. 20. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>
- [9] 301 Moved Permanently. *301 Moved Permanently* [online]. [cit. 8. 5. 2022]. Dostupné z: <http://www.oneindustry.cz/lexikon/rychlomezna-ocel/>
- [10] Elektronická učebnice – ELUC. *Elektronická učebnice – ELUC* [online]. [cit. 12. 5. 2022]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1227>
- [11] MM Průmyslové spektrum. *MM Průmyslové spektrum – nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum* [online]. Copyright © 2001 [cit. 19.05.2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rychle-a-kvalitni-obrabeni-s-nizsimi-naklady>