



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

VÝPOČTY ŘEZNÝCH SIL PŘI FRÉZOVÁNÍ

CUTTING FORCE CALCULATIONS FOR MILLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Prášil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel

Klíč

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Vojtěch Prášil**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Daniel Klíč**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výpočty řezných sil při frézování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro lepší pochopení dějů uvnitř CNC frézky je třeba znát průběhy sil při frézování. Zadání práce je zaměřeno na porovnávání různých metod výpočtu sil s přímým měřením.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti sil při frézování, jejich měření a výpočty.
Příklady výpočtu řezných sil pomocí různých technik.
Porovnání jednotlivých výpočtů proti experimentu na dynamometru.
Závěr a vyhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

Kovalčík, Jaroslav, Predikce silových parametrů řezného procesu při frézování Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/91031>.

ČSN ISO 3002-4. Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení. Část 4: Sily, práca a výkon. Nové Zámky: Český normalizační institut. 1994.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., FEng.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Frézování je v dnešní době jednou z nejdůležitějších obráběcích operací, a proto je potřebné se zabývat ději, které při něm vznikají. Hlavním cílem této práce je porovnat různé metody výpočtu řezných sil s výsledky získanými přímým měřením. Experiment byl proveden formou přímého měření na piezoelektrickém dynamometru, kde byl při frézování na CNC frézce upnut obrobek. První technikou určenou pro stanovení řezných sil analyticky byl jejich výpočet na obráběcích kalkulačkách. K tomu byly vybrány dvě kalkulačky jako mobilní aplikace a jedna jako online webová aplikace. Druhou technikou byl výpočet řezných sil dle vzorců z norem. Do všech výpočtů byly dosazeny řezné podmínky odpovídající experimentu na dynamometru. Porovnání ukazuje, že pro frézování čela dosáhly výpočty z norem a z kalkulačky Hoffmann MC přijatelných hodnot oproti těm změřeným. Výsledky vypočtené při variantě frézování boků se však od těch naměřených značně liší.

Klíčová slova

Frézování, řezné síly, dynamometr, kalkulačky řezných sil, výpočty řezných sil

Abstract

Milling is nowadays one of the most important machining operations, and therefore it is necessary to deal with the processes involved. The main objective of this work is to compare different methods of calculating cutting forces with the results obtained by direct measurement. The experiment was carried out by direct measurement on a piezoelectric dynamometer where the workpiece was clamped while milling on a CNC milling machine. The first technique designed to determine the cutting forces analytically was their calculation on machining calculators. Two mobile application calculators and one online web application calculator were selected for this purpose. The second technique was to calculate the cutting forces using formulas from the standards. The cutting conditions corresponding to the dynamometer experiment were inserted into all calculations. The comparison shows that for face milling, the calculations from the standards and from the Hoffmann MC calculator achieved acceptable values compared to the measured ones. However, the results calculated for milling the sides differ significantly from those measured.

Keywords

Milling, cutting forces, dynamometer, cutting force calculators, calculations of cutting forces

Bibliografická citace

PRÁŠIL, V. *VÝPOČTY ŘEZNÝCH SIL PŘI FRÉZOVÁNÍ*. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí Ing. Daniel Klíč.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výpočty řezných sil při frézování vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a zdrojů, uvedených v seznamu, který se nachází na konci této práce práce.

Vojtěch Prášil

Poděkování

Tímto děkuji Ing. Danielu Klíčovi za odborné vedení mé práce, rady a vhodné připomínky při konzultacích.

Vojtěch Prášil

Obsah

Úvod	10
1 Frézování	11
1.1 Frézování sousledné	12
1.2 Frézování nesousledné	12
1.3 Frézky	13
1.4 Frézy	13
2 Síly při frézování	15
2.1 Základní údaje	15
2.2 Průřez třísky	16
2.3 Řezné síly	18
3 Měření sil při frézování	20
3.1 Přímé měření sil	20
3.1.1 Piezoelektrické dynamometry	21
3.1.2 Dynamometr Kistler 9129AA	21
3.2 Nepřímé měření sil	22
4 Kalkulačky pro výpočet sil při obrábění	25
5 Experiment	27
5.1 Měření řezných sil na dynamometru	27
5.1.1 Základní údaje experimentu	27
5.1.2 Frézování čela 3×1 mm	31
5.1.3 Frézování čela 3×2 mm	31
5.1.4 Frézování boků 3×2 mm	32
5.1.5 Stanovení velikosti řezné síly z naměřených dat	33
5.2 Výpočet řezných sil pomocí volně dostupných kalkulaček	36
5.2.1 Mobilní kalkulačka Hoffmann MC	36
5.2.2 Mobilní kalkulačka FS Wizard	37
5.2.3 Webová aplikace Kennametal MTC	38
5.3 Výpočet řezných sil dle norem	40
6 Porovnání jednotlivých metod	42
6.1 Frézování čela 3×1 mm	42
6.2 Frézování čela 3×2 mm	43
6.3 Frézování boků 3×2 mm	43
6.4 Hodnocení výpočetních metod	44
Závěr	46
Literatura	48
Seznam použitých zkratk a symbolů	50

Úvod

Frézování (obrázek 1) je dnes jednou z klíčových operací ve strojírenství. V průmyslové výrobě má zásadní význam pro svou všestrannost a flexibilitu. Díky těmto vlastnostem slouží k obrábění různých materiálů, a to do složitých tvarů při požadavcích na vysokou přesnost. Pro pochopení dějů probíhajících při frézování je důležitá znalost řezných sil, vznikajících při této operaci. Řezné síly působí nejen na životnost nástrojů, ale i na kvalitu obrobenej plochy. Vhodné nastavení řezných podmínek i celého výrobního procesu vede ke snižování provozních nákladů a celkové optimalizaci výroby.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou výpočtu řezných sil při frézování. Zaměřuje se na porovnání různých metod výpočtu s výsledky dosaženými pomocí přímého měření. Měření je provedeno při čelním frézování na CNC frézce. Pro výpočty jsou použity volně dostupné kalkulačky řezných sil. Dvě z nich jsou ve formě mobilní aplikace a třetí je dostupná online. Další výpočetní technikou, použitou v této práci, je výpočet řezných sil dle vzorců z norem.

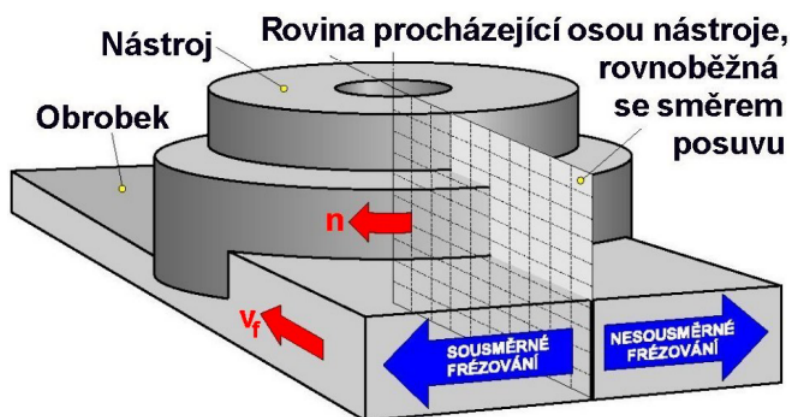
Tyto obráběcí kalkulačky jsou určeny nejenom pro rychlé a snadné odhady řezných sil, ale pomáhají i s výpočtem řezných podmínek, strojního času, ekonomiky řezného procesu a dalších parametrů při obrábění. Tato práce se však zabývá řeznými silami. Jejich porovnání ukazuje, jak se řezné síly, dosažené pomocí výpočetních metod, liší od sil změřených na dynamometru. Rozdíly mezi hodnotami změřenými a vypočtenými mohou pomoci s volbou kalkulačky pro predikci řezných sil před určitou metodou frézování. Následné odhady řezných sil mohou přispět ke zvýšení efektivity výroby.



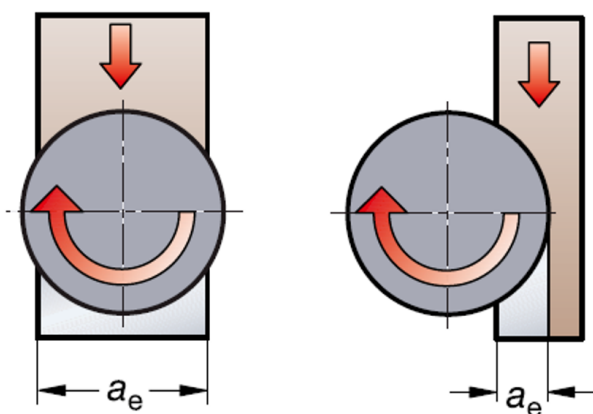
Obrázek 1: Frézování [26]

1 Frézování

Frézování je technologie třískového obrábění, při kterém koná hlavní - rotační pohyb nástroj. Vedlejší - posuvný pohyb koná obrobek, který je upnut na pracovním stole stroje tj. frézky. Odebírání materiálu je prováděno pomocí frézy, jedno a vícebřitého nástroje s pevnou osou otáčení. Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky o proměnné tloušťce. Frézování se používá ke tvorbě rovinných a tvarových ploch. Pro tvorbu rovinných ploch se používá válcového frézování, které je možno rozdělit na sousledné a nesousledné frézování. Rovinných ploch lze také dosáhnout pomocí čelního frézování (obrázek 1.1), zde je ovšem na rozdíl od válcového frézování osa otáčení nástroje kolmá k obráběné rovinné ploše. Čelní frézování se dále může rozdělit na frézování symetrické a nesymetrické (obrázek 1.2) a to dle polohy osy nástroje vůči obrobku. U symetrického frézování prochází středem obrobku osa frézy, zato u frézování nesymetrického osa nástroje středem obráběné plochy neprochází. Z těchto základních způsobů vychází další způsoby, jako frézování planetové či okružní. [10] [20]



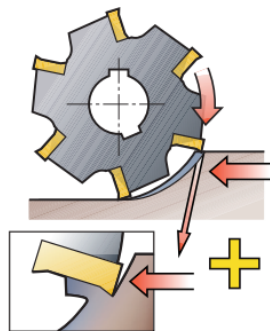
Obrázek 1.1: Čelní frézování [10]



Obrázek 1.2: Symetrické a nesymetrické čelní frézování [2]

1.1 Frézování sousledné

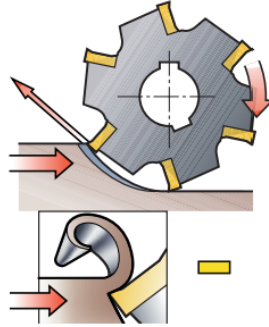
Při sousledném (sousměrném) frézování (obrázek 1.3) se obrobek posouvá souhlasně se směrem otáčení nástroje. Během sousledného frézování obvodem frézy se od začátku řezu postupně snižuje tloušťka odstraněných třísek až k nulové hodnotě. Velká tloušťka třísky při vstupu břitu do materiálu má za následek vznik nežádoucích rázů. Při sousledném frézování mají řezné síly tendenci jak přitlačovat obrobek do svěráku, tak i přitahovat obrobek směrem k nástroji a udržovat břit v řezu. Tento způsob vyžaduje schopnost stroje umožnit kompenzaci vůle pohybového šroubu posuvu stolu dovolující zamezení zpětných pohybů. Mezi výhody sousledného frézování patří například dosažení vyšší životnosti břitu, možnost frézování za vyšších řezných rychlostí, lepší kvalita výsledného povrchu a možnost upnutí pomocí jednodušších upínacích přípravků. [10] [1]



Obrázek 1.3: Sousedné frézování válcovou frézou [2]

1.2 Frézování nesousledné

Při nesousledném (konvenčním nebo také protisměrném) frézování (obrázek 1.4) se obrobek posouvá proti směru otáčení nástroje. Během nesousledného frézování se tloušťka třísky postupně mění, a to od nulové hodnoty k největší tloušťce na výstupu břitu z obrobku. V době výstupu břitu z frézované součásti vznikají velká tahová pnutí, která mohou vést k rychlejšímu poškození břitu. Řezné síly (hlavně radiální) zde mají tendenci vytahovat obrobek ze svěráku a to směrem od frézy. Ostří musí být do obrobku přitlačováno a dochází tak k odírání a ohlazování břitu o obrobek, který je často mechanicky zpevněn v důsledku působení předchozího břitu. Tyto vlivy vedou díky tření ke vzniku vysokých teplot a k většímu opotřebení nástroje. Zvýšené teploty a velká tloušťka třísky mohou vést k navařování třísek, nebo jejich ulpívání na břitu, kde jsou unášeny až do zahájení příštího řezu. Mohou také způsobit okamžité vylomení ostří. Při nesousledném frézování dochází ke vzniku menších rázů než při frézování sousledném, a tak je vhodnější pro použití při obrábění pomocí keramických břitových destiček, které jsou na rázy náchylnější. [1]



Obrázek 1.4: Nesousledné frézování válcovou frézou [2]

1.3 Frézky

Stroj určený pro technologii frézování se nazývá frézka. Hlavní parametry pro volbu stroje jsou šířka plochy pro upínání na stole frézky a velikost kužele ve vřetení pro upnutí nástrojů. Mezi další důležité technické parametry patří rozsahy otáček posuvů a vřeteně, maximální délky pohybu vřeteníku a pracovního stolu, výkon elektromotoru vřeteně a dosahované parametry kvality povrchu u obráběných ploch, apod. Frézky můžeme rozdělit na ručně ovládané a programově řízené, dále je můžeme rozčlenit dle jejich stavby na konzolové, stolové, rovinné a speciální. [10]

1.4 Frézy

Frézy jsou jedno nebo několikabřité nástroje, které mají břity usazeny na válcové, kuželové, nebo tvarové ploše. U čelních fréz jsou břity uspořádány také na čelní ploše. V současnosti se pro břity fréz používá poměrně velkého množství druhů materiálů, jako je rychlořezná ocel, slinuté karbidy, řezná keramika, cermety, supertvrdé materiály a další. Nástroje ze slinutých karbidů se na trhu vyskytují ve formě výměnných břitových destiček nebo jako monolitní frézy. Nástroje z SK jsou často povlakovány a to pro zvýšení výkonnosti. Povlaky zlepšují vlastnosti v oblastech řezné rychlosti, trvanlivosti břitu, tepelné odolnosti břitu a jiné. [10][25]

Z pohledu počtu zubů frézy na průměr se používají frézy jemnozubé, polohrubozubé a hrubozubé. Pro klidný chod frézy má být navržen takový počet zubů, aby byly současně v záběru aspoň dva zuby. Jemnozubé frézy jsou určeny pro obrábění na čisto. Hrubozubé frézy jsou navrženy pro velké úběry při hrubování a polohrubé frézy jsou určeny pro středně velké úběry. Zuby hrubovacích fréz mohou mít vybroušeny děliče třísek. [25]

Z technologického hlediska lze tyto nástroje rozdělit na frézy pro obrábění rovinných ploch (frézy válcové, čelní a frézovací hlavy), a obrábění tvarových ploch (frézy tvarové, drážkovací, kopírovací, apod.). [25]

Dle geometrického tvaru jsou frézy rozděleny na válcové frézy, které mají zuby osazeny pouze na válcové ploše, a dále na čelní válcové frézy, u nichž jsou zuby na čelní i válcové ploše. Lze rozeznat kotoučové frézy se zuby přímnými, nebo se zuby do šroubovice. Tvarové frézy, úhlové frézy jednostranné nebo dvoustranné. [25]

Z hlediska upínání na stroj jsou tyto nástroje rozděleny na frézy nástrčné a frézy s válcovou či kuželovou stopkou. [25]

2 Síly při frézování

2.1 Základní údaje

Otáčky vřetena n [min^{-1}]

Tato veličina udává počet otáček, které fréza, upnutá ve vřeteni, vykoná za jednu minutu. Odpovídá danému stroji a je stanovena z doporučených řezných rychlostí pro určitou operaci. [10]

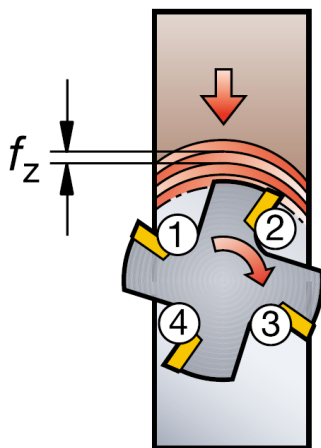
Řezná rychlost v_c [m/min]

Řezná rychlost v metrech za minutu je stanovena jako obvodová rychlost na daném průměru frézy. [10]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [m/min] \quad (2.1)$$

Posuv na zub f_z [mm]

Je základní hodnotou pro stanovení posuvu stolu. Je definován jako dráha, o kterou se posune obrobek, zatímco se fréza pootočí o jeden zub - viz obrázek 2.1. [10]



Obrázek 2.1: Posuv na zub při čelním frézování [2]

Počet efektivních břitů nástroje z_c [-]

Slouží k určení posuvu na otáčku f_n a rychlosti posuvu v_f . Mívá rozhodující vliv na odvod třísky a funkční stabilitu. [10]

Posuv na otáčku f_n [mm]

Je pomocnou hodnotou, která vyjadřuje vzdálenost, o jakou se fréza posune za jednu její otáčku. [10]

$$f_n = f_z \cdot z_c \quad [mm] \quad (2.2)$$

Rychlost posuvu v_f [mm/min]

Posuv stolu či strojní posuv je vztažen v milimetrech za minutu. Znázorňuje pohyb nástroje vůči obrobku. Závisí na počtu zubů frézy, otáčkách a posuvu na zub. [10]

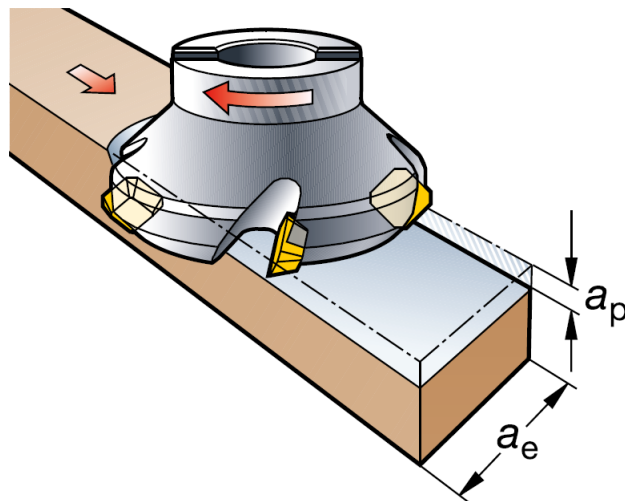
$$v_f = f_z \cdot z_c \cdot n \quad [mm/min] \quad (2.3)$$

Šířka záběru ostří a_p [mm]

Neboli axiální hloubka řezu znázorňuje množství materiálu, který je odebrán nástrojem z povrchu obrobku. Je vzdáleností v milimetrech, o kterou je fréza nastavena pod povrchem obrobku, viz obrázek 2.2. Největší hodnota a_p je omezena velikostí břitové destičky a také výkonem obráběcího stroje. Mezi další významné vlivy patří krouťící moment u hrubovacích operací a vibrace u dokončovacích operací. [10] [1]

Šířka záběru a_e [mm]

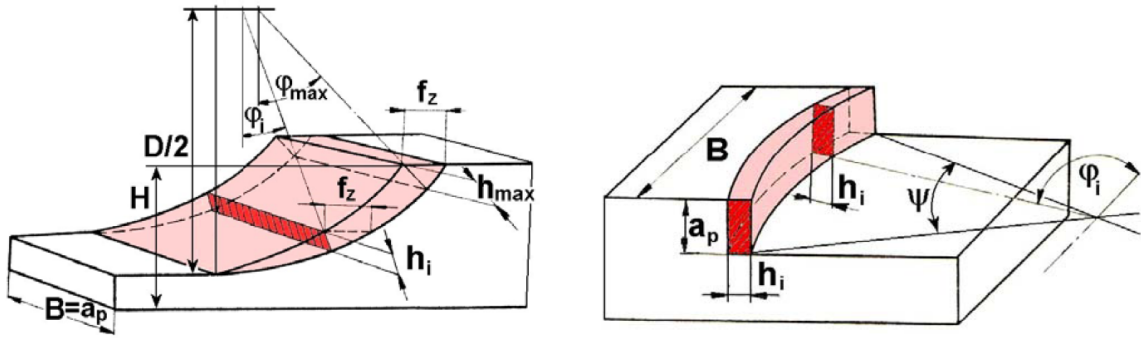
Je šířkou frézy v radiálním směru (obrázek 2.2), která je zapojená v řezu. Překročení maximální hodnoty a_e je nebezpečné zejména při ponorném frézování a vzhledem k vibracím i při frézování rohů. [10]



Obrázek 2.2: Šířka záběru ostří a šířka záběru při čelním frézování [2]

2.2 Průřez třísky

Tloušťka třísky h_i - obrázek 2.3, jenž je při válcovém nesousledném frézování odřezávána, se mění od nulové do maximální hodnoty. U frézování válcového sousledného se tato hodnota mění od maxima k nule. U čelního frézování se průřez třísky také mění, a to podle toho, zda se jedná o frézování sousledné nebo nesousledné. Pouze u symetrického frézování se tloušťka třísky nemění viz obrázek 2.3 vpravo.[10]



Obrázek 2.3: Průřez třísky při válcovém a čelním frézování [6]

Jmenovitá tloušťka třísky h_i je u válcového frézování v libovolné fázi jejího odřezávání vyjádřena vztahem: [10]

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin(\varphi_i) \quad [mm] \quad (2.4)$$

φ_i – úhel posuvového pohybu [°].

Změna velikosti úhlu posuvového pohybu φ_i je závislá nejen na poloze řešeného zubu, ale mění se i podél ostří, a to u fréz se šikmými zuby, nebo u fréz se zuby do šroubovice. [10]

Vztah pro určení maximální velikosti jmenovité tloušťky třísky je: [10]

$$h_{max} = f_z \cdot \sin(\varphi_{max}) = f_z \cdot \frac{2}{D} \cdot \sqrt{D \cdot H - H^2} \quad [mm] \quad (2.5)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} nabývá hodnotu: [10]

$$A_{Di} = h_i \cdot a_p = f_z \cdot a_p \cdot \sin(\varphi_i) \quad [mm^2] \quad (2.6)$$

Šířka záběru a_p pro válcovou frézu s přímými zuby odpovídá šířce frézované plochy. Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky tedy je: [10]

$$A_{Dmax} = h_{max} \cdot a_p = f_z \cdot a_p \cdot \sin(\varphi_{max}) \quad [mm^2] \quad (2.7)$$

Při čelním frézování se tloušťka třísky mění s úhlem posuvového pohybu a zároveň i s úhlem nastavení hlavního ostří, viz obrázek 2.4. Jmenovitá tloušťka třísky h_i tedy odpovídá hodnotě: [10]

$$h_i = f_z \cdot \sin(\kappa_r) \cdot \sin(\varphi_i) \quad [mm] \quad (2.8)$$

Pro libovolný úhel posuvového pohybu φ_i je u čelního symetrického frézování jmenovitá šířka b_i konstantní a rovná se: [10]

$$b = \frac{a_p}{\sin(\kappa_r)} \quad [mm] \quad (2.9)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} pro čelní frézování je: [10]

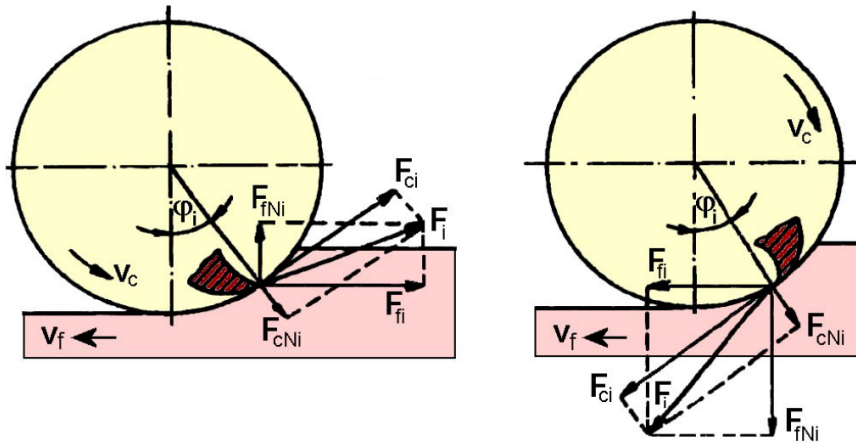
$$A_{Di} = h_i \cdot b = f_z \cdot a_p \cdot \sin(\varphi_i) \quad [mm^2] \quad (2.10)$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky je při $\varphi = 0$: [10]

$$A_{Dmax} = f_z \cdot a_p \quad [mm^2] \quad (2.11)$$

2.3 Řezné síly

Pro určování řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu. Poloha břitu je určena úhlem φ_i . Při použití frézy s přímými zuby se celková řezná síla F_i , která působí na břit, rozkládá na složky F_{ci} a F_{cNi} při nesousledném, nebo na F_{fi} a F_{fNi} při sousledném frézování (obrázek 2.4). [20]



Obrázek 2.4: Řezné síly na zub válčové frézy v pracovní rovině P_{fe} při nesousledném a sousledném frézování [6]

F_{ci} – řezná síla,

Řezná síla F_{ci} se vyjadřuje pomocí měrné řezné síly k_{ci} a daného průřezu třísky A_{Di} : [20]

$$F'_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin(\varphi_i) \quad [N] \quad (2.12)$$

Měrná řezná síla k_{ci} se vyjadřuje: [20]

$$k_{ci} = \frac{C_{F_c}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{F_c}}{(f_z \cdot \sin(\varphi_i))^{1-x}} \quad [MPa] \quad (2.13)$$

C_{F_c} – vyjadřuje vliv obráběného materiálu [-],
 x – exponent vyjadřující vliv tloušťky třísky [-].

Dosazením a úpravou vztahů 2.12 a 2.13 vznikne: [20]

$$F_{ci} = C_{F_c} \cdot a_p \cdot (f_z)^x \cdot \sin^x(\varphi_i) \quad [N] \quad (2.14)$$

Obdobně je vyjádřena řezná síla i při čelním frézování: [20]

Měrná řezná síla k_{ci} se vyjadřuje: [20]

Tabulka 2.1: Hodnoty konstant C_{F_c} a exponentů x pro frézování čelní a válcovou frézou [20]

Materiál		Válcové frézy		Čelní frézy	
		C_{F_c}	x	C_{F_c}	x
Nelegovaná ocel	$R_m = 450$ MPa	1200	0,63	1900	0,97
	650 MPa	1380	0,72	2030	0,93
	850 MPa	1600	0,72	1900	0,94
Chromniklová ocel	$R_m = 550$ MPa	1390	0,66	2030	0,90
	800 MPa	1440	0,72	2970	0,90
	900 MPa	1740	0,74	3160	0,94
Litina	HB 180 - 200	850	0,67	1100	0,90
	220	950	0,67	1420	0,89
Bronz		420	0,60	670	0,79

$$k_{c_i} = \frac{C_{F_c}}{h_i^{1-x}} = \frac{1}{(f_z \cdot \sin(\kappa_r) \cdot \sin(\varphi_i))^{1-x}} \quad [MPa] \quad (2.15)$$

Dosažením a úpravou vzorců 2.12 a 5.3 vznikne: [20]

$$F_{c_i} = C_{F_c} \cdot a_p \cdot (f_z)^x \cdot \sin(\kappa_r)^{x-1} \cdot \sin^x(\varphi_i) \quad [N] \quad (2.16)$$

Empiricky stanovené konstanty C_{F_c} a exponenty x jsou vypsány v tabulce 2.1.

Během frézování se však používá vícebřitých fréz, což znamená, že může v jednu chvíli zabírat i několik zubů současně. Výsledné síly jsou tedy závislé na počtu zubů v záběru i na okamžité poloze zubů frézy vůči obrobku. Z hlediska potřebného výkonu a kroutícího momentu pro pohon vřetena frézy je klíčovým faktorem celková řezná síla F_c . V případě válcového frézování lze tuto sílu stanovit pomocí následujícího vztahu: [20]

$$F_c = \sum_i F_{c_i} = C_{F_c} \cdot a_p \cdot (f_z)^x \cdot \sum_i \sin^x(\varphi_i) \quad [N] \quad (2.17)$$

Počet zubů, které jsou současně v záběru se určí ze vztahu: [20]

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} \cdot z \quad [-] \quad (2.18)$$

φ_{max} – maximální úhel posuvového pohybu [°],

z – počet zubů frézy [-].

Pro čelní frézování je celková řezná síla F_c stanovena ze vztahu: [20]

$$F_c = \sum_i F_{c_i} = C_{F_c} \cdot a_p \cdot (f_z)^x \cdot \sin(\kappa_r)^{x-1} \cdot \sum_i \sin^x(\varphi_i) \quad [N] \quad (2.19)$$

Počet zubů, které jsou současně v záběru při čelním frézování je stanoveno dle vztahu: [20]

$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \quad (2.20)$$

ψ – úhel záběru frézy [°].

3 Měření sil při frézování

3.1 Přímé měření sil

Přímé měření jednotlivých složek sil a točivých momentů je při frézování realizováno v soustavě stroj, nástroj, obrobek, a to pomocí dynamometrů. Tento měřicí přístroj musí zajistit nezávislost měřené veličiny na provozních vlastnostech přístroje, dále musí zaručit stálost naměřených hodnot v čase, a to včetně reprodukovatelnosti výsledků. Za další důležitou charakteristiku lze považovat schopnost měřit zvolenou veličinu v určeném rozsahu s maximální přesností. [4]

Z výše uvedených charakteristik jsou stanoveny základní požadavky na dynamometry: [4]

- Tuhost dynamometrů je dána velikostí zatěžující síly F , jenž způsobuje deformaci y . Velikost deformace y závisí jak na tvaru a provedení deformačního elementu (čidla), tak na celkové stavbě dynamometru či použité měřicí metodě. Při dynamickém měření je dostatečná velikost tuhosti dynamometru zásadní.
- Citlivost dynamometrů závisí na citlivosti užití měřicí metody a na tuhosti konstrukce dynamometru.
- Stálost údajů dynamometrů závisí na tuhosti, citlivosti, přesnosti od určení nulové polohy až k zachycení údajů o sledované veličině, a to v celkovém čase měření.
- Setrvačnost dynamometrů je závislá na hmotnosti soustavy. Hlavně při dynamických měřeních by měla být hmotnost, potažmo setrvačnost co nejmenší.
- Konstrukce dynamometrů zaručuje, aby se jednotlivé složky řezných sil vzájemně neovlivňovaly.

Zařízení na měření složek řezných sil se skládá ze tří hlavních částí: [4]

- Pružný (měřicí) člen, který absorbuje vnější zatížení a překonává určité změny (deformace, polohy a pod.).
- Snímač, který přeměňuje mechanickou veličinu změny měřicího členu na analogickou hodnotu parametru měřicího zařízení.
- Přijímač, který zesiluje a pracuje se signálem snímače, taktéž může zapisovat velikost zatížení.

Rozdělení dynamometrů

Rozdělení podle typu přenosu z deformačního členu na člen indikační: [5]

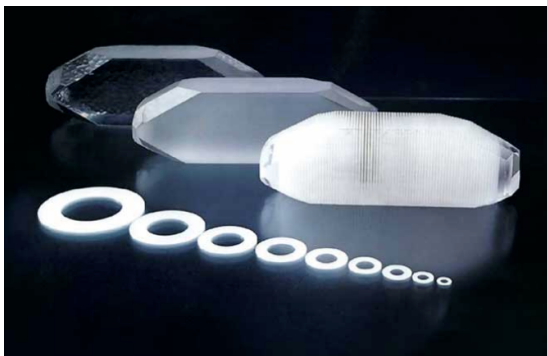
- Mechanické dynamometry
- Hydraulické dynamometry

- Pneumatické dynamometry
- Elektrické dynamometry
 - indukční elektrické dynamometry
 - kapacitní elektrické dynamometry
 - piezoelektrické dynamometry
 - odporové elektrické dynamometry
- Optické dynamometry

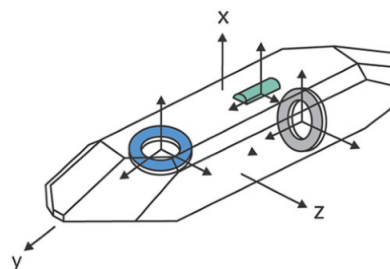
3.1.1 Piezoelektrické dynamometry

Měření na piezoelektrických dynamometrech je založeno na principu piezoelektrického jevu. Ten je charakterizován schopností určitých pevných látek generovat elektrický náboj v reakci na mechanické zatěžování. Účinkující síla způsobuje změnu mikroskopické struktury předmětu, což vede ke vzniku dipólů, mezi nimiž vzniká elektrické pole. Vzniklé elektrické náboje jsou přímo úměrné působící síle. [5] [19]

Pro tvar měřících elementů se nejčastěji používá plochých disků, které jsou vybroušeny z piezoelektrických materiálů (obrázek 3.1). Disky se z krystalů těchto materiálů vyřezávají pod určitými úhly. A to jak podélně (ve směru síly), tak i příčně nebo diagonálně k ní (obrázek 3.2). Mezi nejčastěji používaný piezoelektrický materiál patří křemen. Dále se mohou použít materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli a jiné. [5] [19]



Obrázek 3.1: Výbrusy měřících elementů [19]



Obrázek 3.2: Orientace řezů krystalu [19]

3.1.2 Dynamometr Kistler 9129AA

Pro vlastní měření řezných sil (kapitola 5) byl použit dynamometr s obchodním názvem Multicomponent dynamometer MidiDyn / 9129AA (obrázek 3.3) od společnosti Kistler. Skupina Kistler se zabývá vývojem a výrobou měřící techniky, a to v oblastech technologie dynamického měření síly, tlaku, točivého momentu, zrychlení a dalších. [18]

Tento dynamometr je složen ze čtyř snímačů, které zaznamenávají výsledné složky sil (F_x , F_y a F_z) v rozsahu od -10 kN do 10 kN a výsledné složky momentů (M_x , M_y a M_z) od -500 Nm do 500 Nm . Jedná se o elektrický dynamometr a měření je zde založeno na principu piezoelektrického jevu. Základní údaje o tomto přístroji jsou zaznamenány v tabulce 3.1. [17]

V experimentu byl použit jako stacionární dynamometr. Během tohoto provedení je dynamometr ustaven na pracovní stůl stroje (u experimentu se jednalo o CNC frézku), upnutí lze provést pomocí šroubů nebo magneticky. Obrobek je poté připevněn k desce dynamometru pomocí šroubů zavedených do slepých otvorů se závitem. Schéma dynamometru s jeho zástavbovými rozměry je zobrazeno na obrázku 3.5. Důležité je přesné upnutí na rovnou a čistou plochu, každá nepřesnost při upínání může zkreslit výsledky měření. Další variantou je použití dynamometru při měření řezných sil u obrábění na soustružnických centrech (obrázek 3.4). Zde je k revolverové hlavě CNC soustruhu nejprve připevněn držák (axiálně nebo radiálně), a na něj je upnut vlastní dynamometr. K dynamometru je opět pomocí šroubů připojen držák nástroje, který vede nástroj do řezu. [17] [16]



Obrázek 3.3: Dynamometr Kistler 9129AA [17]



Obrázek 3.4: Možnost upnutí nástroje k dynamometru a dynamometru k revolverové hlavě při soustružení [16]

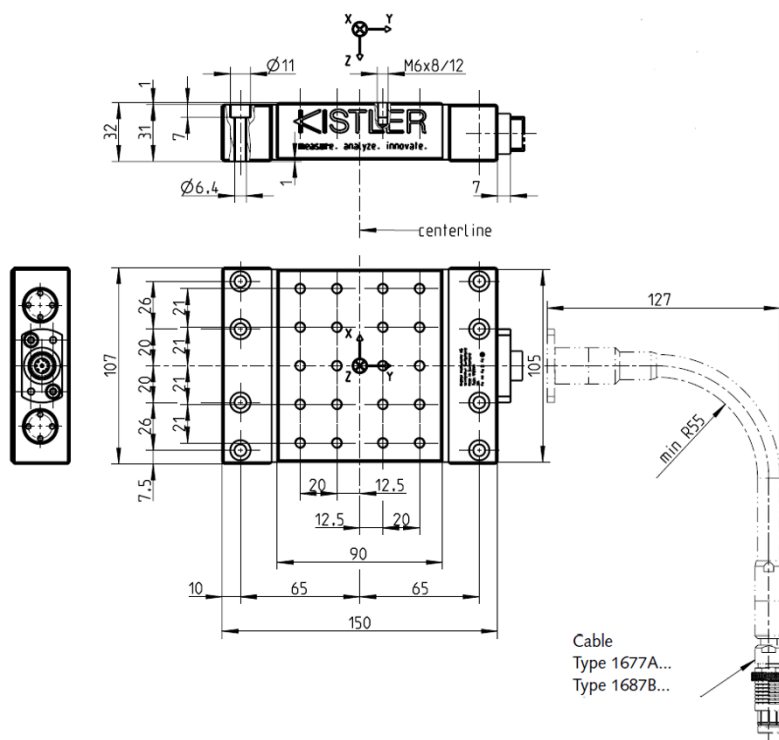
3.2 Nepřímé měření sil

Nepřímé měření řezných sil je realizováno pomocí vztahu pro výpočet užitečného výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Nepřímým měřením lze získat pouze tangenciální složku řezné síly, které lze také dosáhnout nepřímým měřením z točivého (kroutičního momentu). [4]

Vzorec pro užitečný výkon (P_u) je definován jako: [4]

$$P_u = F_c \cdot v_c \quad [W] \quad (3.1)$$

Pro určení tangenciální (řezné) složky z výkonu je třeba znát výkon obráběcího stroje. Ten lze běžně zjistit v operačním systému stroje. Tuto složku síly určíme z užitečného



Obrázek 3.5: Schéma s rozměry Dynamometru Kistler 9129AA [17]

Tabulka 3.1: Základní parametry Dynamometru Kistler 9129AA [17]

Parametr	Symbol	Rozměr	Velikost
Max. povolený rozsah měření (síla aplikovaná na povrch krytu)	F_x, F_y, F_z M_x, M_y, M_z	kN Nm	$-10 \div 10$ $-500 \div 500$
Přetížení	F_x, F_y, F_z	%	20
Práh citlivosti		N	$<0,01$
Citlivost	F_x	pc/N	$\approx 8,1$
	F_y	pc/N	$\approx 4,1$
	F_z	pc/N	$\approx 8,1$
Linearita, všechny rozsahy	F_x, F_y, F_z	$\pm\%/FSO$	$\leq \pm 0,3$
Hystereze, všechny rozsahy	F_x, F_y, F_z	$\%/FSO$	$\leq 0,3$
Přeslechy	$F_z \rightarrow F_x, F_y$	%	$\leq \pm 2$
	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	$\leq \pm 2$
	$F_x, F_y \rightarrow F_z$	%	$\leq \pm 2$
Tuhost	c_x, c_z	$N/\mu m$	$\approx 1\ 000$
	c_y	$N/\mu m$	$\approx 4\ 000$
Vlastní frekvence (upevněno na pevné základně)	$f_n(x)$	kHz	$\approx 3,5$
	$f_n(y)$	kHz	$\approx 4,5$
	$f_n(z)$	kHz	$\approx 3,5$
Teplotní rozsah provozu		$^{\circ}C$	$0 \div 70$
Krytí			IP67
Hmotnost	dynamometr	kg	3,2
	kryt	kg	2,0
Montážní plocha		mm	90x105

výkonu, užitého k vlastnímu obrábění. Postupuje se tedy tak, že se změří výkon nezatíženého stroje (výkon naprázdno P_o) a celkový výkon (výkon při obrábění P_c). A tak vznikne vzorec pro užitečný výkon: [4]

$$P_u = P_c - P_o \quad [W] \quad (3.2)$$

P_c – celkový výkon při obrábění [W],

P_o – výkon nezatíženého obráběcího stroje [W].

Pro určení velikosti tangenciální složky řezné síly se použije upraveného vztahu 3.1: [4]

$$F_c = \frac{P_u}{v_c} \quad [N] \quad (3.3)$$

Metoda určená ke stanovení tangenciální složky sil, jež zde byla uvedena, se vyznačuje především svou jednoduchostí. Lze jí využít u různých druhů obrábění a není nutná nákladná měřicí technika. [4]

4 Kalkulačky pro výpočet sil při obrábění

Pro určení řezných podmínek a řezných sil při obrábění se používají kalkulačky, a to především pro konvenční druhy obrábění jako je soustružení, frézování či vrtání. U frézování se jedná o výpočet základních veličin, jako jsou otáčky, řezná rychlost, posuv na zub, rychlost posuvu a další. Na základě pokročilejších vstupních parametrů, jako je např. materiál obrobku, stupeň opotřebení a úhel čela břitu či účinnost stroje, jsou však schopny stanovit i další výstupní parametry. Mezi ně patří například řezná síla, strojní čas, životnost nástrojů, ekonomika řezného procesu atd. Některé kalkulačky mohou usnadnit výběr vhodných nástrojů pro konkrétní operace při obrábění. Jejich cílem je poskytovat co nejpřesnější odhady výstupních parametrů, které pak slouží ke zvyšování efektivity obrábění a celého výrobního procesu. Dále také pomáhají s minimalizací rizik poškození strojů, nástrojů a obráběných materiálů. [26] [9]

Mezi jejich výhody patří dostupnost. Lze je používat jak online na běžném počítači, tak i offline v mobilní aplikaci, a to obvykle zdarma. Přestože mohou provádět složité výpočty, jejich ovládání je snadné a pro vložení vstupních údajů není třeba větší kvalifikace. Další výhodou je rychlost, uživatel má výsledky výpočtů prakticky ihned po zadání vstupních parametrů. [26] [9]

Mobilní aplikace pro výpočet řezných sil

Hoffmann MC je mobilní aplikací od německé společnosti Hoffmann Group. Tato společnost se zabývá výrobou a prodejem nástrojů, nářadí, měřidel atd. Aplikace je zdarma, funguje i offline. Byla navržena pro jednoduchou a rychlou cestu k řezným podmínkám, výkonu, řezné síle, době řezu, aj. Těchto hodnot v ní lze dosáhnout pro základní druhy obrábění, jako je vrtání, soustružení a frézování. Součástí aplikace je i odkaz do modulu ToolScout (pouze online), který je určen k volbě vhodného nástroje pro konkrétní operaci při obrábění. [9]

Online kalkulačka pro výpočet řezných sil

Kennametal MTC je jedna z inženýrských kalkulaček, které na svých webových stránkách nabízí americká společnost Kennametal. Tato firma je výrobcem nástrojů pro průmyslová odvětví, jako jsou obrábění kovu a dřeva, těžební průmysl, stavební techniku a další. Kennametal MTC je webová kalkulačka, která slouží k výpočtu řezných podmínek včetně dalších parametrů - výkon, kroutící moment, řezná síla a jiné. Tato kalkulačka slouží k výpočtům především u čelního frézování. Pro výpočty u dalších druhů obrábění, například pro výrobu děr, závitování či drážkování, nabízí Kennametal vlastní kalkulačky. [12]

Stanovení řezných sil pomocí softwaru Ansys

Řezných sil, vznikajících při obrábění, lze také dosáhnout pomocí softwaru Ansys. Ansys je platformou pro výpočetní analýzy, virtuální modelování, simulace, řešení MKP a další. Proces obrábění zde tedy lze vymodelovat, nasimulovat a vyhodnotit. Vedle sil působících

při obrábění, je tento software schopný také dosáhnout teplot, velikosti deformací atd. Softwarový balík Ansys je vlastněn americkou společností Ansys, Inc. [3] [24]

5 Experiment

Cílem experimentu bylo stanovení řezných sil vznikajících při frézování pomocí různých technik. První cestou pro dosažení velikosti řezných sil bylo měření při reálném frézování pomocí dynamometru. Dále byly zvoleny dvě výpočetní metody. První z nich bylo určení řezných sil pomocí volně dostupných kalkulaček, k čemuž byly vybrány 2 mobilní aplikace a jedna online webová kalkulačka. Druhou výpočetní technikou bylo určení řezné síly pomocí výpočtu dle vzorce z norem. Pro následné porovnání byly vybrány 3 varianty čelního frézování, u kterých bylo dosaženo řezné síly pomocí jednotlivých technik.

5.1 Měření řezných sil na dynamometru

U fyzického frézování se jednalo o přímé měření řezných sil na piezoelektrickém dynamometru Kistler 9129AA. Skládalo se ze tří částí. Nejprve byla z čela obrobku odfrézována vrstva o šířce záběru ostří $a_p = 1 \text{ mm}$, poté bylo opět frézováno čelo, ale o $a_p = 2 \text{ mm}$. Ve třetí části byl z boků obrobku odebrán materiál při šířce záběru $a_e = 1 \text{ mm}$ a šířce záběru ostří $a_p = 2 \text{ mm}$. Obrobek byl upnut v dynamometru, který zaznamenával průběh působení sil v čase.

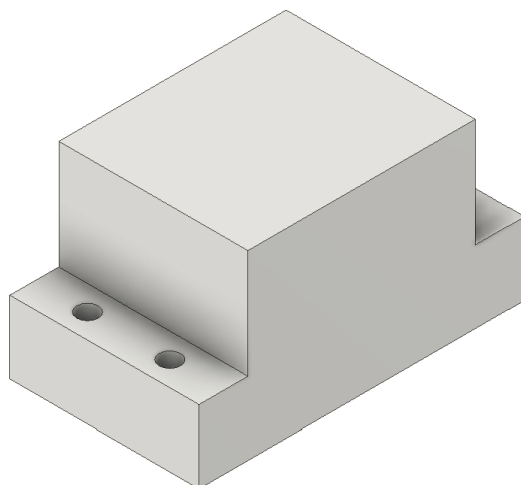
5.1.1 Základní údaje experimentu

Experiment proběhl v dílnách Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky na FSI VUT v Brně. Proveden byl na tříosé frézce MCV 754 QUICK, která je více popsána níže v této podkapitole. Pro měření byl použit piezoelektrický dynamometr Kistler 9129AA (viz podkapitola 3.1.2). Tento typ dynamometru byl vybrán zejména pro svoji vhodnost k dynamickým měřením, vysokou tuhost a dobrou přesnost. Pro materiál obrobku byla zvolena ocel 11 500.

Obrobek

Experiment byl proveden na obrobku z **oceli 11 500**. Tato neušlechtilá konstrukční ocel je běžně používaná pro strojní součásti namáhané staticky či dynamicky. Mez pevnosti tepelně nezpracovaného polotovaru je zde zaručená v rozmezí $R_m = 470$ až 610 MPa . [7]

Obrobek byl před experimentem opracován tak, aby ho bylo možno snadno a přesně upnout do dynamometru. Z obou stran byly vyhotoveny díry pro šrouby o rozteči odpovídající rozteči závitových děr v dynamometru. Na obrázku 5.1 je zobrazen model obrobku vytvořený v aplikaci Autodesk Inventor.



Obrázek 5.1: Model obrobku

Tříosá frézka MCV 754 QUICK

CNC frézka MCV 754 QUICK patří do produktové řady společnosti KOVOSVIT MAS. Tato česká společnost se zabývá především vývojem a výrobou obráběcích strojů. V portfoliu tohoto producenta obráběcích strojů řízených pomocí CNC jsou vedle frézovacích strojů také stroje soustružnické, pětiosé a multifunkční centra, a také stroje určené pro speciální technologie. [22]

MCV 754 QUICK je vertikální tříosý obráběcí stroj s otevřeným rámem (ve tvaru C), viz obrázek 5.2. Rám stroje je navržený tak, aby zajistil vysokou tuhost a stabilitu. Použití lineárního vedení ve všech osách dodává požadovanou přesnost a dynamiku během obrábění. Rychlá výměna nástrojů je zajištěna otočnou mechanickou rukou, která obsluhuje zásobník o 24 polohách. Vřeteno s plynulou regulací otáček a integrovaným pohonem může dosáhnout až 10 000 otáček za minutu. Základní parametry tohoto stroje jsou zaznamenány v tabulce 5.1. [21]

Tabulka 5.1: Základní parametry CNC frézky MCV 754 Quick [21]

Parametr	Rozměr	Velikost
Pracovní rozsah v osách X×Y×Z	mm	754 × 500 × 550
Upínací plocha stolu	mm	1000 × 500
Max. zatížení stolu	kg	400
Výkon motoru vřetena SIEMENS (S1/S6 - 40%)	kW	9/13
Max. otáčky vřetena	min ⁻¹	10 000
Upínací kužel	-	ISO 40
Počet míst v zásobníku nástrojů	-	24
Řídicí systém	-	HEIDENHAIN / FANUC / SIEMENS



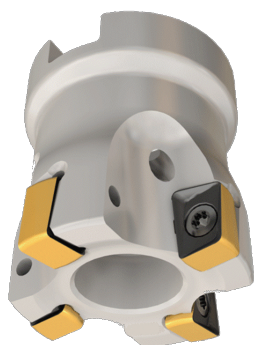
Obrázek 5.2: CNC frézka MCV 754 Quick [21]

Nástroje použité při frézování

Pro frézování byly použity nástroje od společnosti Iscar.

U frézování čela se jednalo o frézovací hlavu Iscar Helido H490 F90AX-12 (obrázek 5.3) s odpovídajícími výměnnými břitovými destičkami H490 ANKX 120508PNTR. Tato fréza je osazena čtyřmi VBD a dosahuje průměru 40 mm.

Při frézování boků byla použita frézovací hlava Iscar Helido H490 E90AX-09 (obrázek 5.4) společně s VBD H490 ANKX 090408PNTR. Tato fréza je osazena dvěma destičkami při průměru 16 mm.



Obrázek 5.3: Čelní fréza Iscar [11]



Obrázek 5.4: Čelní válcová fréza Iscar [11]

Příprava před frézováním

Před vlastním měřením byl ke stolu obráběcího stroje upnut dynamometr a k němu poté obrobek. Pomocí speciálního propojovacího kabelu byl dynamometr připojen k zesilovači, jenž byl umístěn mimo CNC frézku. Zesilovač byl dále propojen s laptopem, který sloužil k ukládání naměřených dat.

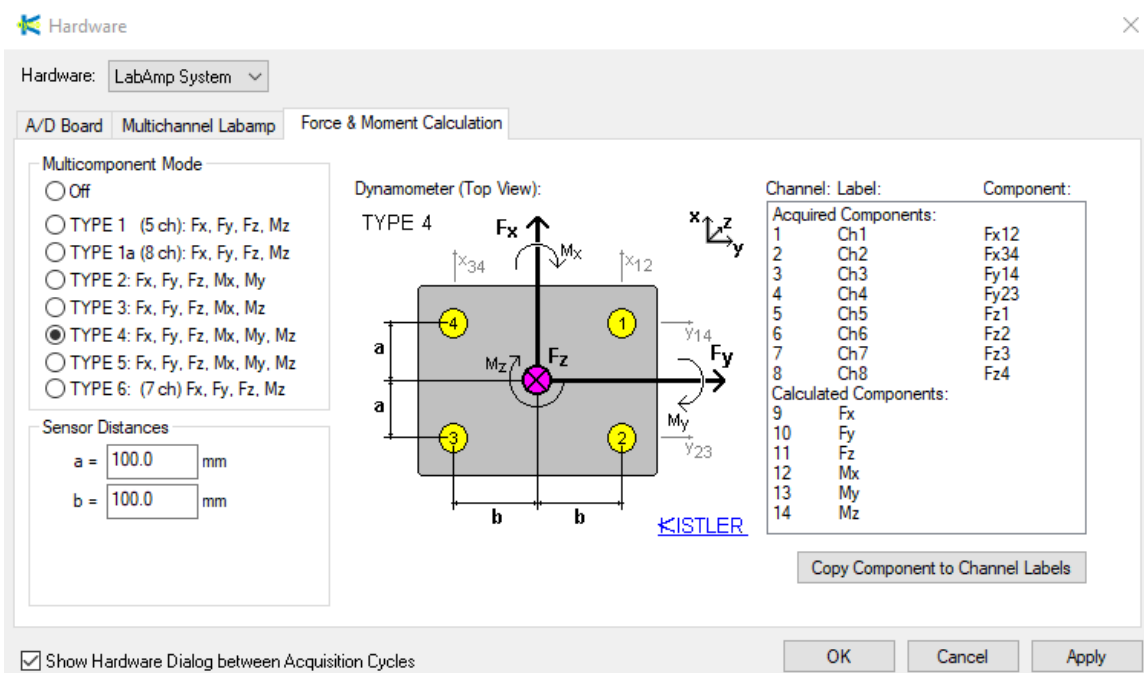
Spojovacím členem mezi dynamometrem a zesilovačem byl kabel typu 1677A5, který je součástí sady od společnosti Kistler. Kabel je speciálně navržen pro použití v náročných podmínkách panujících uvnitř obráběcího prostoru. Je opatřen vysokou izolací ($10^{13} \Omega$) a je chráněn pružným kovovým pláštěm. [13]

Zesilovač, který zde byl použit je opět značky Kistler a to typ 5167A81 (obrázek 5.5). Piezoelektrický dynamometr produkuje elektrický náboj, který se mění přímo úměrně v závislosti se zatížením působícím na snímač. Zesilovač převádí tento náboj přímo na digitální hodnoty nebo proporcionální výstupní napětí a odesílá tyto data do připojeného počítače. [15]

Jako software pro sběr naměřených dat byl použit Kistler DynoWare. Tento univerzální a snadno použitelný software je určený především pro měření sil pomocí jedno nebo vícesložkových dynamometrů. Kromě ukládání a zpracování signálu nabízí DynoWare například i vizualizaci naměřených křivek v reálném čase. Na obrázku 5.6 je zobrazena konfigurace výpočtů sil a točivých momentů před vlastním měřením. [14]



Obrázek 5.5: Zesilovač Kistler 5167A81 [15]



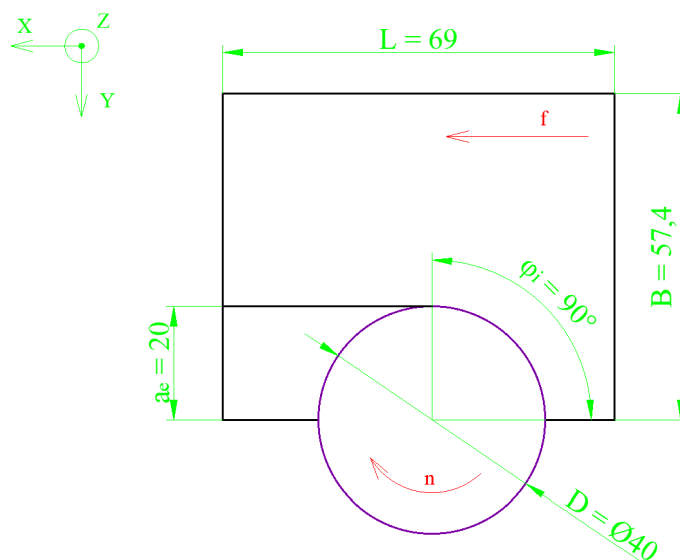
Obrázek 5.6: Konfigurace výpočtu sil a točivých momentů v software DynoWare

Tabulka 5.2: Řezné podmínky a základní údaje frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$

Parametr	Symbol	Velikost	Rozměr
Průměr frézy	D	40	mm
Počet zubů	z	4	-
Řezná rychlost	v_c	120	m/min
Otáčky	n	955	ot/min
Rychlost posuvu	v_f	382	mm/min
Šířka záběru ostří	a_p	1	mm
Šířka záběru	a_e	20	mm

5.1.2 Frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$

Pro obrábění čela byla použita fréza Iscar Helido H490 F90AX-12 (dle podkapitoly 5.1.1). Prvním měřením bylo frézování čela obrobku a to formou úběru 3 vrstev o šířce záběru ostří $a_p = 1 \text{ mm}$. Řezné podmínky nastavené na CNC frézce odpovídaly tabulce 5.2. Ukázka G-kódu obsahující celý proces obrábění je uložena v Příloze I. Jednalo se o nesousledné čelní frézování, což je schématicky zobrazeno v obrázku 5.7.



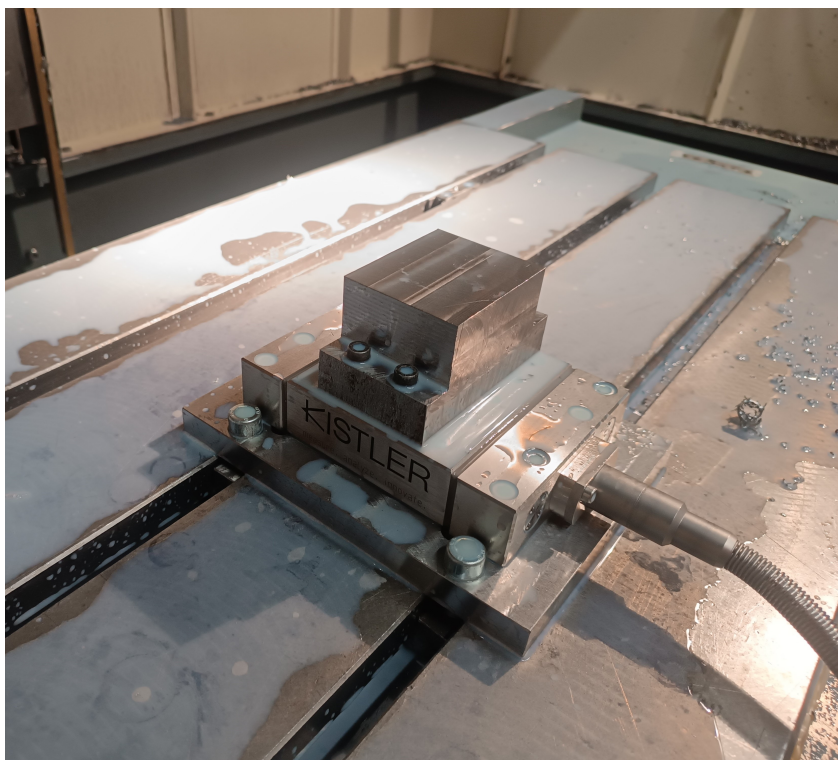
Obrázek 5.7: Schéma čelního frézování $3 \times 1 \text{ mm}$

5.1.3 Frézování čela $3 \times 2 \text{ mm}$

Frézování čela $3 \times 2 \text{ mm}$ proběhlo velmi podobně jako frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$. Rozdílem však byla šířka záběru ostří, která zde dosáhla 2 mm . I zde šlo o nesousledné čelní frézování viz obrázek 5.7. Řezné podmínky byly zvoleny dle tabulky 5.2 stejně jako u frézování $3 \times 1 \text{ mm}$ až na již zmíněné a_p . Na obrázku 5.8 je vidět upnutí obrobku do dynamometru a dynamometru ke stolu frézky, a to ve fázi mezi obráběním čela $3 \times 1 \text{ mm}$ a $3 \times 2 \text{ mm}$.

Tabulka 5.3: Řezné podmínky a základní údaje frézování boků $3 \times 2 \text{ mm}$

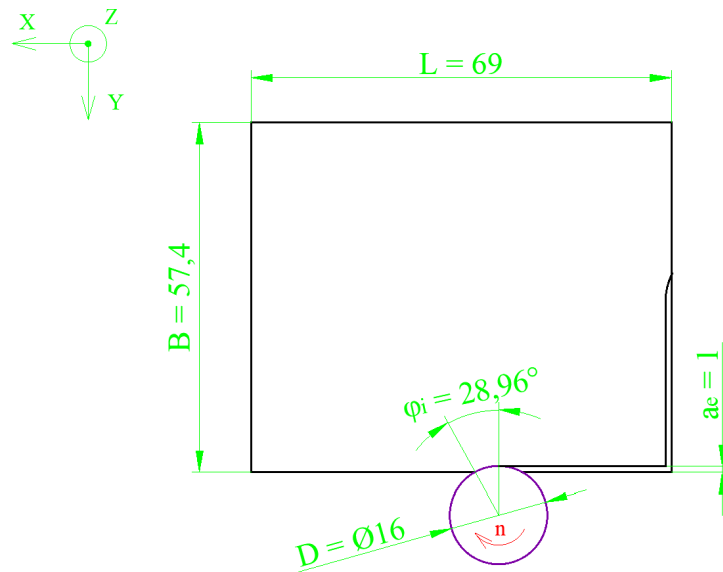
Parametr	Symbol	Velikost	Rozměr
Průměr frézy	D	16	mm
Počet zubů	z	2	-
Řezná rychlost	v_c	120	m/min
Otáčky	n	2387	ot/min
Rychlost posuvu	v_f	4778	mm/min
Šířka záběru ostří	a_p	2	mm
Šířka záběru	a_e	1	mm



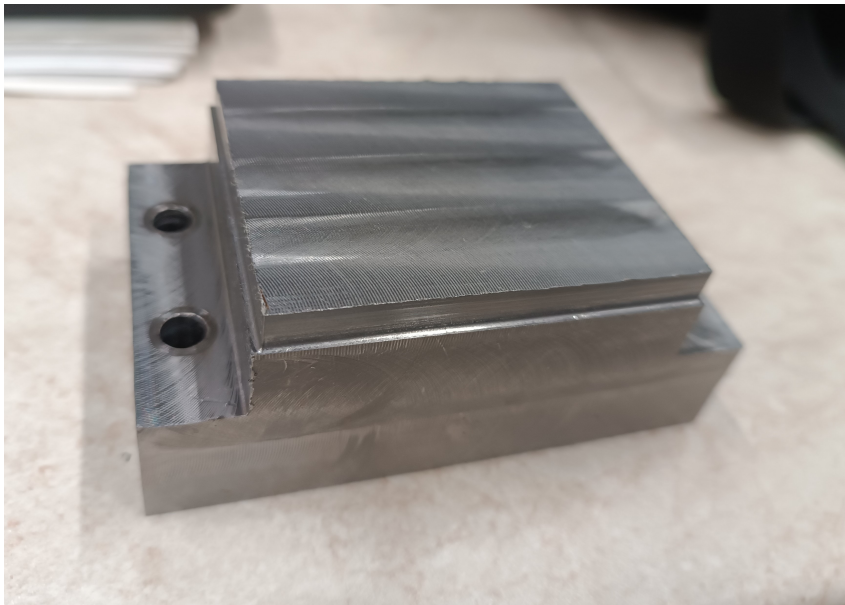
Obrázek 5.8: Podoba obrobku mezi frézováním čela $3 \times 1 \text{ mm}$ a $3 \times 2 \text{ mm}$

5.1.4 Frézování boků $3 \times 2 \text{ mm}$

Před třetím měřením byl vyměněn nástroj na dvoubřitou frézu o průměru 16 mm viz 5.1.1. Operační systém stroje se zde řídil dle řezných podmínek z tabulky 5.3. Při frézování boků fréza $3 \times$ objela obrobek a ubrala 1 mm z každé strany ($a_e = 1 \text{ mm}$) při $a_p = 2 \text{ mm}$. Jednalo se o sousledné frézování, což lze poznat z obrázku 5.9, na kterém je zobrazen i nájezd frézy do obrobku z boku. Obrázek 5.10 ukazuje finální podobu obrobku po experimentu.



Obrázek 5.9: Schéma frézování boků $3 \times 2 \text{ mm}$



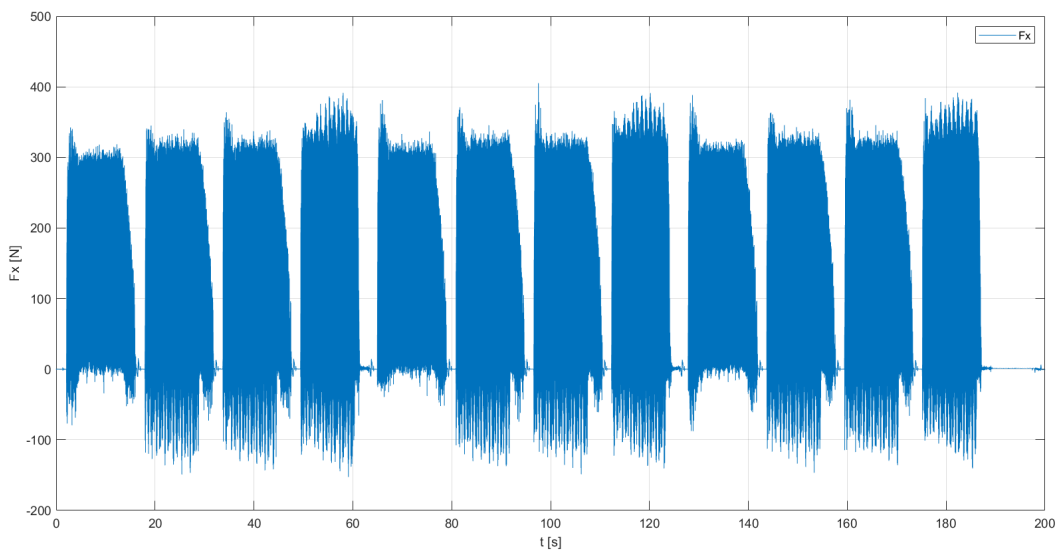
Obrázek 5.10: Podoba obrobku po experimentu

5.1.5 Stanovení velikosti řezné síly z naměřených dat

V softwaru DynoWare byl dle předpokládané doby obrábění, zjištěné z operačního systému stroje, nastaven čas měření na 200 s. Dynamometr měří a zaznamenává výsledky ve frekvenci 1000 měření za vteřinu, což znamená, že bylo provedeno 200 000 měření, které byly zapsány do souboru ve formátu CSV (čárkou oddělené údaje). DynoWare vedle ukládání naměřených hodnot také na připojeném PC zobrazoval působení sil na dynamometr v reálném čase. Pro práci s naměřenými daty byl použit software Matlab.

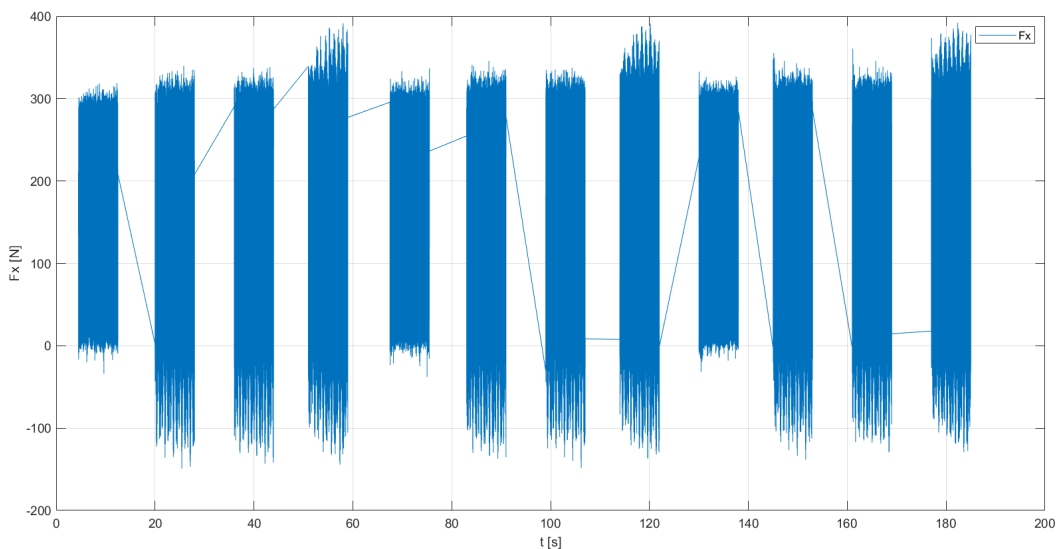
Prvním krokem při vyhodnocování naměřených dat bylo vykreslení grafů průběhů sil. Na obrázku 5.11 je zobrazena závislost síly F_x na čase u frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$. Grafy všech tří složek síly (F_x , F_y a F_z) ze všech tří variant měření (frézování čela 3×1 a $3 \times 2 \text{ mm}$

a frézování boků $3 \times 2 \text{ mm}$) jsou uloženy v Příloze II. Matlab skripty s prací s naměřenými daty jsou uloženy v Příloze III.



Obrázek 5.11: Průběh působení síly F_x v čase, frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$

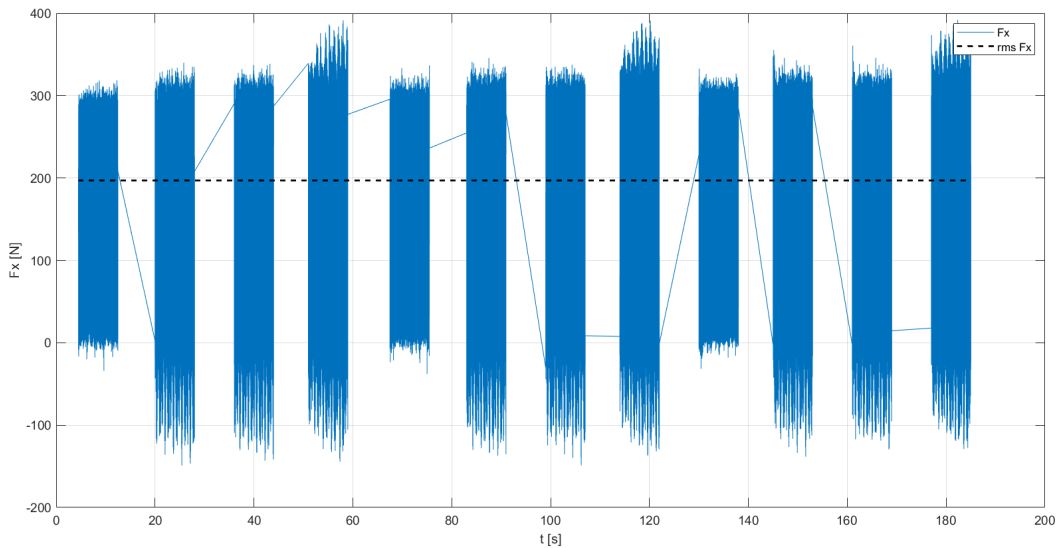
Druhým krokem k určení velikosti řezné síly byl výběr intervalů. Z grafu na obrázku 5.11 je vidět, že v působení sil jsou určité pasáže, kde je zatěžující síla minimální. Tyto pasáže odpovídají času, kdy fréza nebyla v řezu (přejezdy mezi výjezdem a nájездem frézy z materiálu). Intervaly byly tedy vybírány podle dob, kdy fréza v řezu byla. Dále byla snaha umístit jednotlivý interval tak, aby zahrnul co nejméně extrémů (např. skok síly při nájězdu do materiálu). Pro dobu intervalu byl zvolen čas 8 s , který byl vložen na každý z 12 průjezdů frézy materiálem. Graf pro složku síly F_x a variantu frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$ je zobrazen v obrázku 5.12.



Obrázek 5.12: Průběh působení síly F_x v čase, intervaly, frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$

Dalším krokem bylo stanovení velikosti síly v jednotlivých složkách F_x , F_y a F_z . Pro jejich určení bylo použito metody RMS (efektivní hodnoty změřeného signálu). Ta pracuje dle vzorce 5.1, kdy vypočítává efektivní hodnotu ze souboru naměřených dat pomocí odmocniny z aritmetického průměru druhých mocnin těchto dat. Efektivní hodnoty RMS se často používá v elektrotechnice, a to například pro určení střídavého proudu nebo napětí. Vložení velikosti efektivní hodnoty do grafu složky F_x je v obrázku 5.13. [23]

$$F_{x_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot (F_{x_1}^2 + F_{x_2}^2 + \dots + F_{x_n}^2)} \quad [N] \quad (5.1)$$



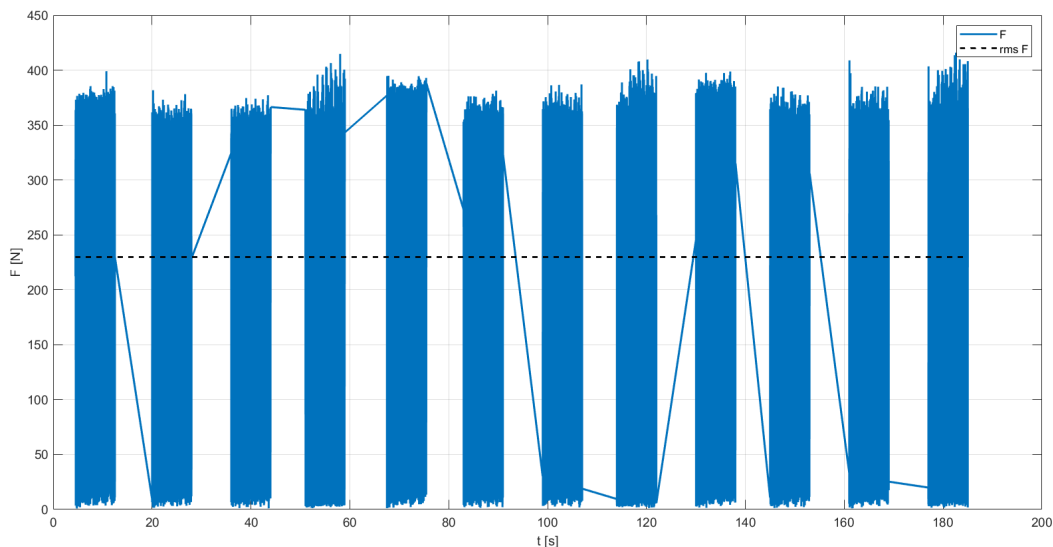
Obrázek 5.13: Průběh působení síly F_x v čase, intervaly, RMS, frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$

Poslední fází bylo určení výsledné síly F . Té bylo docíleno výpočtem z jednotlivých složek RMS F_x , F_y a F_z (vzorec 5.2). Na obrázku 5.14 je zobrazen graf síly F pro variantu frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$. Černou čárkovanou čarou je zde zaznačena velikost výsledné síly F dle metody RMS. V tabulce 5.4 jsou zapsány výsledky pro všechny 3 varianty experimentu.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad [N] \quad (5.2)$$

Tabulka 5.4: Výsledné síly dosažené experimentem na dynamometru

Varianta	F [N]
3×1 čelo	229,87
3×2 čelo	392,76
3×2 boky	103,07



Obrázek 5.14: Výsledná síla F v čase, intervaly, RMS, frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$

5.2 Výpočet řezných sil pomocí volně dostupných kalkulaček

Pro výpočet řezných sil byly použity dvě kalkulačky ve formě mobilních aplikací a jedna online webová kalkulačka. Všechny použité kalkulačky jsou zdarma. Hlavní výhodou obráběcích kalkulaček je snadné dosazení vstupních parametrů a rychlý výpočet, což již bylo zmíněno v kapitole 4. Obrázky se snímky obrazovek ze všech výpočtů jsou uloženy v Příloze V.

5.2.1 Mobilní kalkulačka Hoffmann MC

Pro jednotlivé výpočty byly dosazeny hodnoty odpovídající každému z frézování (čelo 3×1 a $3 \times 2 \text{ mm}$, boky $3 \times 2 \text{ mm}$). Jako obráběný materiál zde byla vybrána ocel podle německého označení DIN: St 50-2, která odpovídá oceli 11 500 dle staré ČSN. Pro vzorový výpočet (obrázek 5.15) byly použity hodnoty frézování čela $3 \times 1 \text{ mm}$. Výsledky jsou zapsány do tabulky 5.5. Výhodou této kalkulačky je to, že jejímu uživateli poskytuje vzorce, dle kterých koná jednotlivé výpočty. Z ukázky těchto vzorců, uložených v Příloze V., lze rozpoznat podobnost se vzorci použitými pro manuální výpočet dle norem.

Tabulka 5.5: Výsledné síly vypočtené kalkulačkou Hoffmann MC

Varianta	F [N]
3×1 čelo	259
3×2 čelo	519
3×2 boky	260

Frézování		f(x)
Výpočet výkonu		
Řezání	4	
Průměr	40	mm
Velikost řezné rychlosti	120	m/min
Posuv na zub	0.1	mm/Z
Otáčky	9549	ot/min
Rychlost posuvu	382	mm/min
Materiál		
DIN: St 50-2		
KC: 1,990	m: 0.26	
Posuv na zub [fz]	0.1	mm/Z
Postavení nástr.	excentrický	
Šířka záb. [ae]	20	mm
Dodání [ap]	1	mm
Úhel nast. [κ]	90°	
Délka [Lf]	69	mm
Výkon	0.5	kW
Točivý moment	5.2	Nm
Rychlost odběru třísky	7.6	cm ³ /min
Hlavní doba	0.24	min
Střední tloušťka třísky	0.064	mm
Zapojovací úhel	90	
Specifická řezná síla	4.072	N/mm ²
Řezná síla	259	N
Řezná síla břítu	259	N

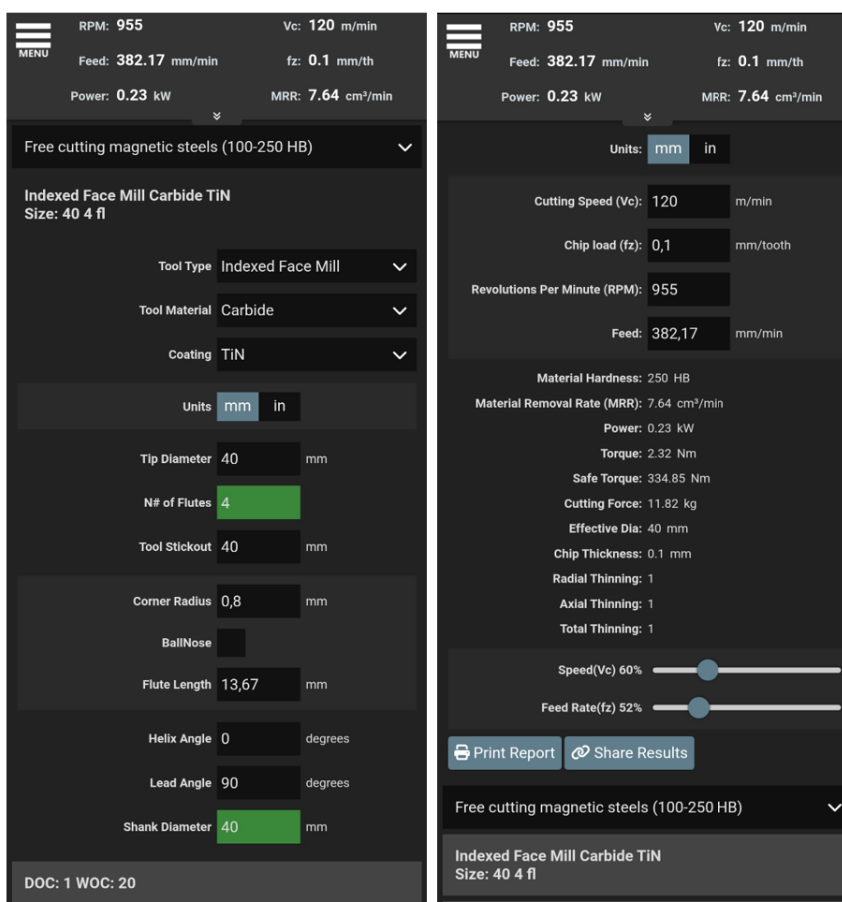
Obrázek 5.15: Výpočet frézování 3×1 mm v aplikaci Hoffmann MC

5.2.2 Mobilní kalkulačka FS Wizard

Zde byly opět postupně do aplikace vloženy vstupní parametry odpovídající podmínkám při měření na dynamometru. Materiál byl zvolen dle tvrdosti HB tak, aby co nejvíce odpovídal materiálu použitém při experimentu. Velikost řezných sil je zde vypočítána v kilogramech a pro další porovnání byly síly pomocí gravitační konstanty přepočteny na Newtony. Převedené výsledky jsou v tabulce 5.6 Vzorový výpočet frézování čela 3×1 mm je zobrazen na obrázku 5.16.

Tabulka 5.6: Výsledné síly vypočtené kalkulačkou FS Wizard

Varianta	F [N]
3×1 čelo	115,95
3×2 čelo	231,81
3×2 boky	14,52



Obrázek 5.16: Výpočet frézování 3×1 mm v aplikaci FS wizard

5.2.3 Webová aplikace Kennametal MTC

I do této online kalkulačky byly dosazeny vstupní parametry (obrázek 5.17) odpovídající experimentu. Materiál obrobku zde byl také dosazen podle tvrdosti. Výsledky vzorového výpočtu jsou zobrazeny na obrázku 5.18. Výsledky sil všech tří variant výpočtu jsou zapsány v tabulky 5.7.

Metric Inch

Conversion of Workpiece Material Rockwell (Optional)

⚠ Skip this step if you already know the Brinell hardness number(HB)

Hardness HRB OR HRC into Brinell Hardness (HB)

Rockwell HRC Rockwell HRB

Characteristics of Workpiece Materials

Brinell Hardness
 HB

Ultimate strength
 N/mm²

Face Mill Nomenclature

d_f Effective cutting diameter
 mm

z Number of inserts in the cutter

Machining Conditions

V_c Cutting speed
 m/min

a_p Axial Depth of cut
 mm (DOC)

a_e Ratio of radial width of cut to cutting diameter
 mm (WOC)

f_z Required feed per tooth
 mm

f_r Radial engagement factor ?

E Machine efficiency factor ?

Obrázek 5.17: Vstupní hodnoty pro frézování $3 \times 1 \text{ mm}$ zadané do webové aplikace Kennametal MTC

Calculated Machining Conditions	
n Spindle speed	954.9 rpm
V_f Feed rate	381.96 mm/min (no productivity formula)
Reduced feed per tooth	0.1 mm (no productivity formula)
F_p Feed rate	381.96 mm/min (with productivity formula)
Q_p Metal removal rate	7.64 cm ³ /min (no productivity formula)
Q Metal removal rate	7.6 cm ³ /min (with productivity formula)
A calculator:CrossSectionalAreaOfChip	0.1 mm ²
z_c Number of inserts in the cut	1
a_e/d_f Ratio of radial width of cut to cutting diameter	0.5

Calculated Required Power	
F_t Tangential cutting force	133.4 N
T Torque at the cutter	2.67 Nm 2668 Nmm

Machining Power	
P_s at the cutter	0.3 kW
P_m at the motor	0.33 kW

Obrázek 5.18: Výsledky výpočtu frézování $3 \times 1 \text{ mm}$ dosažené pomocí webové aplikace Kennametal MTC

Tabulka 5.7: Výsledné síly vypočtené kalkulačkou Kennametal MTC

Varianta	F [N]
3×1 čelo	133,4
3×2 čelo	266,8
3×2 boky	33

5.3 Výpočet řezných sil dle norem

Pro výpočet velikosti řezných sil byl použit vzorec z normy **ČSN ISO 3002-4**. Tato norma se zabývá základními veličinami při řezání a broušení a konkrétně její 4. část se specializuje na síly, práci a výkon. [8]

Řezná síla na jednotku plochy řezu k_c je stanovena jako poměr řezné síly F_c vyvolané řeznou částí a nominální plochou řezu A_D : [8]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad [N/mm^2] \quad (5.3)$$

Vzorec pro řeznou sílu F_c vzniklý po úpravách pro čelní frézování je zde použit z kapitoly o řezných silách - 2.19. Řezná síla na jednotku plochy řezu k_c je zde zahrnuta v konstantě C_{F_c} a exponentu x , které značí vliv druhu obráběného materiálu. Jmenovitou plochu řezu A_D zde zastupují šířka záběru ostří a_p a posuv na zub f_z . Úhel sklonu hlavního ostří je označen κ_r a poloha břitu v řezu φ_i .

$$F_c = \sum_i F_{c_i} = C_{F_c} \cdot a_p \cdot (f_z)^x \cdot \sin(\kappa_r)^{x-1} \cdot \sum_i \sin^x(\varphi_i) \quad [N] \quad (5.4)$$

Výpočet řezné síly při frézování čela 3×1 mm

Pro ukázkový výpočet bylo vybráno frézování čela 3×1 mm. Do výpočtu byly dosazeny údaje odpovídající této variantě experimentu (tabulka 5.8) a jako materiál byla zvolena ocel 11 500 s mezí pevnost v tahu $R_m = 610 \text{ MPa}$. Ocel s takovou velikostí R_m však v tabulce 2.1 není, a proto byly hodnoty C_{F_c} a x pro tuto ocel zjištěny pomocí lineární interpolace mezi ocelmi s $R_m = 450$ a 650 MPa . Výsledky výpočtů jsou zapsány v tabulce 5.9. Jednotlivé výpočty provedené v programu Matlab jsou zahrnuty v Příloze IV.

Tabulka 5.8: Základní parametry dosazené do výpočtu

Parametr	Symbol	Velikost	Rozměr
Konstanta	C_{F_c}	2004	-
Exponent	x	0,938	-
Šířka záběru ostří	a_p	1	mm
Posuv na zub	f_z	0,1	mm
Úhel sklonu hlavního ostří	κ_r	90	°
Poloha břitu v řezu	φ_i	90	°

Vzorový výpočet s dosazením z tabulky 5.8:

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p \cdot (f_z)^x \cdot \sin(\kappa_r)^{x-1} \cdot \sin(\varphi_i)^x \quad [N] \quad (5.5)$$

$$F_c = 2004 \cdot 1 \cdot 0,1^{0,938} \cdot \sin(90)^{0,938-1} \cdot \sin(90)^{0,938} = 231,152 \text{ N} \quad (5.6)$$

Tabulka 5.9: Výsledné síly vypočtené dle ČSN ISO 3002-4

Varianta	F [N]
3×1 čelo	231,15
3×2 čelo	462,3
3×2 boky	234,18

6 Porovnání jednotlivých metod

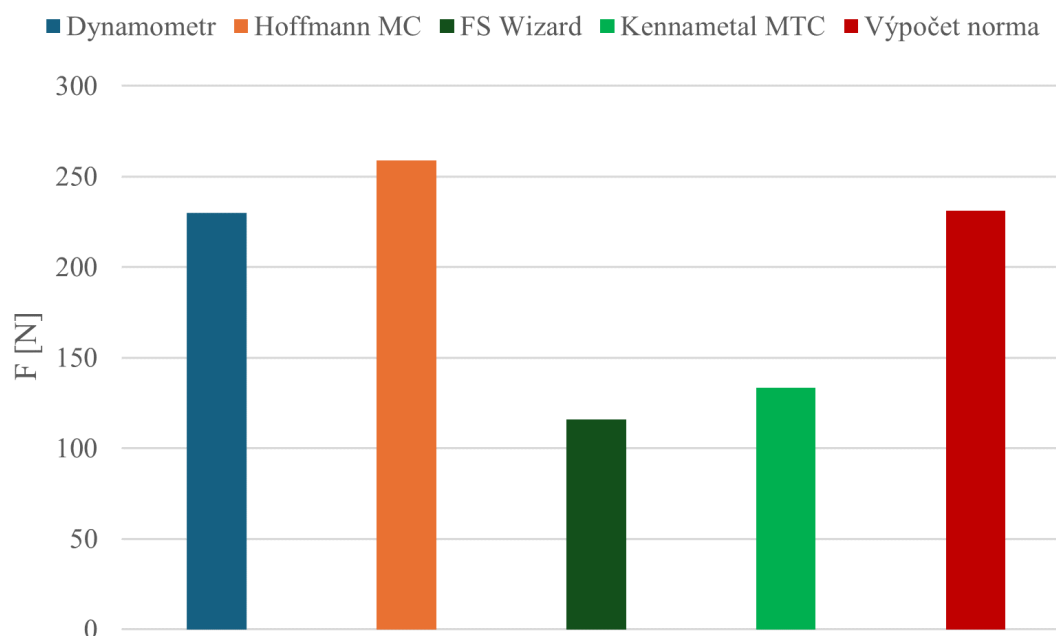
Jedním z cílů této práce je porovnání výsledků výpočtů vůči těm z měření na dynamometru. Hodnoty výsledných sil, získaných dle jednotlivých technik (kapitola 5), jsou zapsány do společné tabulky 6.1. Pro názorné porovnání byly vytvořeny sloupcové grafy, ukazující výsledné hodnoty.

Tabulka 6.1: Výsledné síly F pro frézování čela 3×1 a 3×2 , boků 3×2

Varianta	Metoda				
	Dynamometr	Hoffmann	FS Wizard	Kennametal	Výpočet norma
3×1 čelo	229,87	259	115,95	133,4	231,15
3×2 čelo	392,76	519	231,81	266,8	462,3
3×2 boky	103,07	260	14,52	33	234,18

6.1 Frézování čela 3×1 mm

V obrázku 6.1 jsou graficky znázorněny velikosti síly F pro jednotlivé metody experimentu. Z grafu lze poznat, že výsledná síla dosažená pomocí kalkulačky Hofmann MC a pomocí výpočtu z normy se liší od hodnoty z dynamometru jen málo. Pro kalkulačku Hoffmann je F vyšší o cca 13 %, což je pro rychlý odhad řezné síly, který mají tyto kalkulačky poskytovat přijatelný výsledek. Síla z výpočtu dle normy se od té z dynamometru liší dokonce jen o méně než 2 N . Na druhou stranu kalkulačky Kennametal a FS Wizard dosáhly na výsledky, které se od toho změřeného na dynamometru značně vzdalují. Výsledná síla F je u kalkulačky Kennametal menší o zhruba 44 %. U kalkulačky FS Wizard je tato síla dokonce přibližně poloviční.

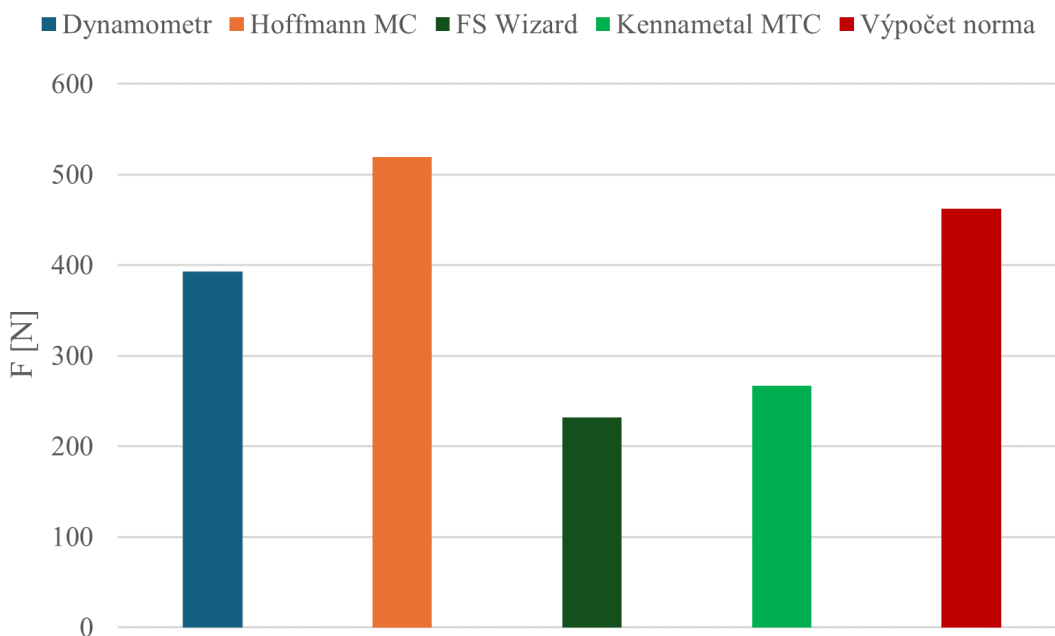


Obrázek 6.1: Porovnání výsledků, frézování čela 3×1 mm

6.2 Frézování čela 3×2 mm

I zde jsou výsledné síly vykresleny pomocí sloupcového grafu (obrázek 6.2). Obě varianty frézování čela (3×1 a 3×2 mm) proběhly podle stejných řezných podmínek a za použití stejného nástroje. Jediným rozdílem byla změna šířky záběru ostří (a_p) z 1 mm na 2 mm. Z porovnání výsledků (tabulka 6.1) u těchto dvou variant a u všech výpočetních metod je zřejmé, že když se tento vstupní parametr zvýší dvakrát, tak se dvakrát zvýší i výsledná řezná síla. Ovšem v porovnání výsledných sil z měření na dynamometru je vidět, že při reálném obrábění se tato síla dvakrát nezvýšila.

Z grafu porovnání výsledků pro frézování čela 3×2 mm lze rozpoznat, že se k hodnotě dosažené pomocí měření na dynamometru opět nejvíce blíží výpočet z normy (rozdíl je zde přibližně 70 N a tedy 18 %). V podobné vzdálenosti od F dle dynamometru se nachází síly z kalkulaček od společností Hoffmann a Kennametal, síla dle Hoffmann MC je však o 126 N vyšší a ta dle Kennametal MTC nižší. I zde se výsledkem nejvíce vzdaluje kalkulačka FS Wizard.

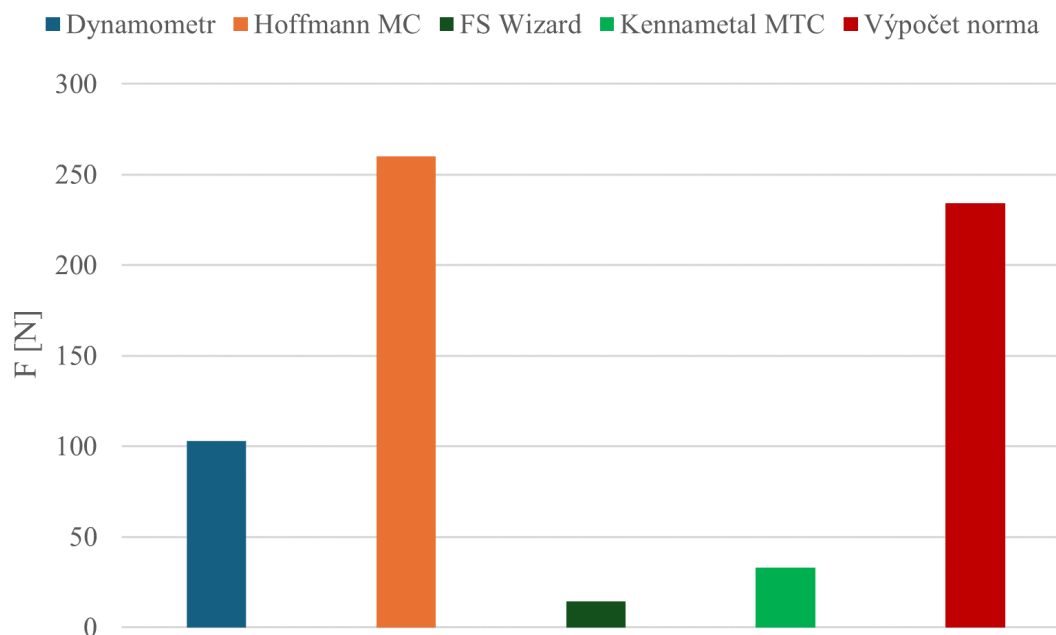


Obrázek 6.2: Porovnání výsledků, frézování čela 3×2 mm

6.3 Frézování boků 3×2 mm

Z obrázku 6.3 je na první pohled zřejmé, že se výsledné vypočtené síly od té získané pomocí dynamometru značně liší. K naměřené hodnotě (103 N) se nejvíce přibližuje síla vypočtená kalkulačkou Kennametal, která však dosahuje pouze přibližně její třetinové velikosti (33 N). Výpočtem pomocí kalkulačky FS Wizard bylo dosaženo ještě menší velikosti výsledné síly. Ta zde vyšla dokonce pouze 14,5 N, což pro představu odpovídá přibližně hmotnosti 1,5 kg. Výsledky dosažené kalkulačkou Hoffmann MC a výpočtem z normy vycházejí na druhou stranu oproti výsledku z měření o dost více. Síla dle norem

vyšla vyšší o cca 127 % a F dle Hoffmann MC vyšla ještě vyšší a to o 152 % oproti síle z měření.



Obrázek 6.3: Porovnání výsledků, frézování boků $3 \times 2 \text{ mm}$

6.4 Hodnocení výpočetních metod

Všechny 3 varianty výpočtu došly k velmi podobným výsledkům u kalkulačky **Hoffmann MC** a u **výpočtu z normy**. Přesněji řečeno, řezné síly vypočtené pomocí normy byly vždy o 10 až 11 % nižší než síly dle kalkulačky Hoffmann. Toto zjištění potvrzuje i to že kalkulačka od společnosti Hoffmann je naprogramována dle podobných vzorců, jako jsou ty pro manuální výpočet, což již bylo zmíněno v podkapitole 5.2.1. Rozdíl mezi těmito výsledky může být dán volbou materiálu. U kalkulačky byl materiál obrobku vybrán z její databáze, kdežto do výpočtu z norem byl materiál dosazen dle meze pevnosti zvoleného materiálu.

Výsledky z kalkulaček **FS Wizard** a **Kennametal MTC** se od sebe také tolik nevzdalovaly. Obdobný jev, jako v předchozím případě zde nastává mezi frézováním čela 3×1 a $3 \times 2 \text{ mm}$. Síly se zde liší u obou variant o 13 %, což je ale spíše dáno tím, že se výsledky první a druhé varianty 2× zvětšily z důvodu zvětšení a_p . U frézování boků $3 \times 2 \text{ mm}$ je však F podle Kennametal více než dvojnásobná oproti F dle FS Wizard. Navíc ani jedna, z těchto amerických společností neposkytuje data ohledně mechanismů fungování jejich kalkulaček. I proto je tedy těžké stanovit důvody, proč se výsledky z těchto kalkulaček tolik liší vůči výsledkům z přímého měření.

Z porovnání provedených v této kapitole tedy lze rozpoznat, že nejpodobnějších výsledků vůči silám, změřených na dynamometru, dosáhly manuální výpočty řezných sil dle norem. Oproti tomu nejhorších výsledků dosahovala kalkulačka FS Wizard. Z porovnání dále plyne, že u standardního frézování čela lze pro přibližnou predikci řezných sil tyto obráběcí kalkulačky (z tohoto porovnání především kalkulačku Hoffmann MC) s jistotou

opatrností použít. U běžných a méně důležitých projektů je použití kalkulaček k výpočtu řezných sil vhodnější oproti přímému měření pro svoji rychlost, jednoduchost a cenu. Ovšem při složitějších frézovacích operacích, jako je třetí varianta experimentu (podkapitola 5.1.4), je dle výsledků (porovnání 6.3) pravděpodobné, že se výsledku budou značně lišit.

Ani stanovení řezných sil dle přímého měření na dynamometru provedené v této práci nemusí být tak přesné. Velikost naměřených řezných sil může ovlivnit stav VBD usazených ve fréze. Při frézování dochází k rázům, například při nájezdu frézy do materiálu. Působení těchto rázů je vidět na průbězích působení sil naměřených při všech variantách měření (Příloha II.). Zahnutí různých extrémů (oblastí s minimálním nebo maximálním působením sil) také může ovlivnit výslednou sílu. Větší důvěryhodnost výsledků, jejich ověření či minimalizaci náhodných chyb by mohlo zajistit provedení většího počtu měření, a to za dodržení stejných podmínek experimentu. Další cestou ke zkvalitnění výsledků by mohlo být porovnání přímého měření na dynamometru s nepřímým měřením z výkonu obráběcího stroje.

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala řeznými silami vznikajícími při frézování. Velikost řezných sil zde byla stanovována pomocí výpočtů, nebo pomocí přímého měření. Hodnoty zjištěné použitím různých výpočetních technik zde byly porovnávány právě se silami naměřenými při reálném frézování.

Před řešením dané problematiky prakticky bylo nutné shrnout základní teoretické znalosti týkající se tohoto tématu. Součástí této práce tedy je i její teoretická část, která se nejprve zabývala frézováním. Přiblížila frézování jako technologii obrábění a popsala její základní principy. Druhou částí rešerše je teorie zabývající se silami při frézování. Zde bylo definováno základní názvosloví týkající se této problematiky. Další částí teorie je kapitola zabývající se měřením sil při frézování. V této části bylo přiblíženo přímé a nepřímé měření sil. Blíže jsou zde popsány piezoelektrické dynamometry a je zde uvedena i specifikace dynamometru použitého při experimentu. Teoretickou část práce uzavírá přiblížení tématu kalkulaček pro výpočet sil při obrábění. Zde bylo rozebráno jejich použití, výhody a druhy.

Praktická část prvně popisuje experiment, který byl proveden pro změření řezných sil, vůči kterým byly poté porovnávány síly, dosažené pomocí výpočetních metod. Měření proběhlo při frézování obrobku z oceli na CNC frézce. Pro experiment bylo zvoleno čelní frézování, které proběhlo ve 3 variantách. Při první i druhé variantě bylo frézováno čelo obrobku za použití stejného nástroje. Pro obě varianty frézování čela byly nastavené i stejné řezné podmínky, a to až na šířku záběru ostří, která se mezi těmito operacemi 2× zvětšila. U třetího měření se frézovaly boky obrobku. Pomocí čelní válcové frézy zde byla odebrána vrstva ze všech stran obrobku. Při každém z měření byly pomocí dynamometru, ve kterém byl upnut obrobek, odesílány naměřené síly do připojeného PC. V něm byla pomocí speciálního softwaru vyhodnocována a ukládána naměřená data. Pomocí matematického softwaru byly z naměřených dat určeny velikosti řezných sil.

Pro stanovení řezných sil vznikajících při frézování byly zvoleny dvě výpočetní metody. První metodou byl výpočet za použití obráběcích kalkulaček, k tomu byly vybrány dvě kalkulačky jako mobilní aplikace a jedna online webová aplikace. Všechny tyto kalkulačky jsou volně dostupné. Druhou metodou byl výpočet řezných sil pomocí vzorce z norem. Do jednotlivých výpočtů byly dosazovány řezné podmínky a další vstupní parametry odpovídající všem třem variantám experimentu.

Porovnání výsledků dosažených výpočty vůči výsledným silám z měření na dynamometru přineslo důležité závěry této bakalářské práce. U frézování čela se k hodnotám z experimentu nejvíce blížily výsledky z výpočtů pomocí norem. Přijatelných výsledků zde dosahovala i kalkulačka Hoffmann MC. Tato kalkulačka pracuje na podobném principu jako výpočet z norem, což zapříčiňuje podobnost výsledků těchto dvou výpočetních metod. Naopak kalkulačka FS Wizard dosáhla na síly, které se nejvíce vzdalovaly od těch z dynamometru. U frézování boků se všechny výpočty značně lišily od síly naměřené. Nejbližší se k ní dostal výpočet, dosažený kalkulačkou Kennametal MTC, ten však nedosahoval ani třetiny její velikosti. Použití kalkulaček pro predikci řezných sil při frézování je tedy doporučeno spíše u standardních operací jako je frézování čela.

Literatura

- [1] AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o.: Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd.: *Advanced optical techniques*. Praha: Scientia, s. r. o., 1997 [cit. 2024-03-14] Přel. z: *Modern Metal Cutting - A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [2] AB SANDVIK COROMANT: Training handbook: Metal cutting technology [online]. 2017 [cit. 2024-03-14] Dostupné z: <https://cdn.sandvik.coromant.com/publications/training-handbook:metal-cutting-technology>
- [3] ANSYS, INC.: Company Information [online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/company-information>
- [4] BRYCHTA, Josef, et al.: Nové směry v progresivním obrábění [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007 [cit. 2024-04-05]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archived/FS/NSPO/texty>
- [5] ČEP, Robert a JANŮ, Petra: Experimentální metody v obrábění [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2024-04-05]. ISBN 978 – 80–248–2533–5. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/cep/PDF/EMO_komplet
- [6] ČEP, Robert a JANŮ, Petra: Technologie obrábění: 1 Frézování [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2024-04-02]. ISBN 978-80-248-3012-4. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/Technologie-obrabeni>
- [7] ČSN 41 1500: Ocel 11 500. Dobrá: Federální úřad pro normalizaci a měření. 1992.
- [8] ČSN ISO 3002-4: Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení. Část 4: Sily, práca a výkon. Nové Zámky: Český normalizační institut. 1994.
- [9] HOFFMANN GROUP: The quick way to calculate cutting data [online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/US/en/hus/services/find-tools-and-data/machining-calculator>
- [10] HUMÁR, Anton: Technologie obrábění 1. část. In *Technologie I*. Studijní opory pro magisterskou formu studia, [online]. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory>
- [11] ISCAR LTD: Ecatalog [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Products>
- [12] KENNAMETAL, INC.: Milling Torque Calculator - Face Milling [online]. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/us/en/resources/engineering-calculators/face-milling-calculators/force-torque-and-power>
- [13] KISTLER HOLDING AG: Connecting cables [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/CA/en/cp/connecting-cables-for-multicomponent-dynamometers>

- [14] KISTLER HOLDING AG: Data sheet, Type 2825A. In: DynoWare [online]. Winterthur (Switzerland), [cit. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/CA/en/p/software-dynoware>
- [15] KISTLER HOLDING AG: Data sheet, Type 5167Ax1. In: Kistler LabAmp for DynoWare [online]. Winterthur (Switzerland) [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/US/en/p/laboratory-charge-amplifier-labamp-with-data-acquisition>
- [16] KISTLER HOLDING AG: Data sheet, Type 9129AA. In: 3-Component Measuring System [online]. Winterthur (Switzerland), 2009 [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce710>
- [17] KISTLER HOLDING AG: Data sheet, Type 9129AA. In: Multicomponent Dynamometer [online]. Winterthur (Switzerland), 2009 [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce709>
- [18] KISTLER HOLDING AG: Kistler [online]. [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/INT/en/about-us>
- [19] KISTLER HOLDING AG: Piezoelectric effect [online]. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/INT/en/piezoelectric-effect>
- [20] KOCMAN, Karel a PROKOP, Jaroslav: *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, s.r.o., 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [21] KOVOSVIT MAS: MCV line: Vertikální obráběcí centra [online]. [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: <http://www.masmachinetools.cz/mcv-754-quick>
- [22] KOVOSVIT MAS: O společnosti [online]. [cit. 2024-04-13]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/o-spolecnosti/>
- [23] OXFORD UNIVERSITY PRESS: A Dictionary of Physics [online]. 6 ed. Oxford: Oxford University Press, 2009 [cit. 2024-05-20]. ISBN 9780199233991. Dostupné z: <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/acref>
- [24] TECHSOFT ENGINEERING: Software pro virtuální modelování a výpočetní analýzy [online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: <https://www.techsoft-eng.cz/software>
- [25] VLACH, Bohumil: *Technologie obrábění a montáží*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00143-9.
- [26] WALTER AG: Walter obráběcí kalkulačka [online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/walter-machining-calculator>

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Význam
CNC	počítačově číslicově řízený (Computer Numerical Control)
CSV	čárkou oddělené údaje (Comma Separated Values)
ČSN	česká státní norma
DIN	Německý ústav pro průmyslovou normalizaci (Deutsches Institut für Normung)
FSI	Fakulta Strojního Inženýrství
HB	tvrdost podle Brinella (Brinell Hardness)
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci (the International Organization for Standardization)
MKP	metoda konečných prvků
PC	osobní počítač (Personal Computer)
RMS	efektivní hodnota (Root Mean Square)
SK	slinutý karbid
VBD	výměnná břitová destička
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symbol	Veličina
A_{Di}	jmenovitý průřez třísky
A_{Dmax}	maximální jmenovitý průřez třísky
a_e	šířka záběru
a_p	šířka záběru ostří
b	šířka třísky
b_i	jmenovitá šířka třísky
C_{Fc}	konstanta vlivu obráběného materiálu
D	průměr frézy
F	výsledná řezná síla
F_{ci}	řezná síla
F_{cNi}	kolmá řezná síla
F_{fi}	posuvová síla
F_{fNi}	kolmá posuvová síla
F_i	celková řezná síla
F_x	síla ve směru osy x
F_{xRMS}	efektivní hodnota síly ve směru osy x
F_y	síla ve směru osy y
F_z	síla ve směru osy z
f_n	posuv na otáčku
f_z	posuv na zub
h_i	jmenovitá tloušťka třísky
h_{max}	maximální jmenovitá tloušťka třísky
k_{ci}	měrná řezná síla
M_x	moment síly k ose x
M_y	moment síly k ose y
M_z	moment síly k ose z
n	otáčky
n_z	počet zubů v záběru
P_c	celkový výkon při obrábění
P_o	výkon nezatíženého obráběcího stroje
P_u	užitečný výkon
v_c	řezná rychlost
v_f	rychlost posuvu
x	exponent vlivu tloušťky třísky
z	počet zubů frézy
z_c	počet efektivních břitů nástroje
κ_r	úhel sklonu hlavního ostří
φ_i	úhel posuvového pohybu
φ_{max}	maximální úhel posuvového pohybu
ψ	úhel záběru frézy

Seznam příloh

- Příloha I. G-kód pro frézování
- Příloha II. Grafy průběhů sil při frézování
- Příloha III. Matlab skripty ze stanovení řezných sil z měření
- Příloha IV. Matlab skripty z výpočtů řezných sil pomocí norem
- Příloha V. Výpočty řezných sil pomocí kalkulaček