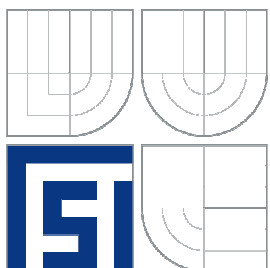


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SILOVÉ ZATÍŽENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PŘI FRÉZOVÁNÍ

FORCE LOAD OF THE CUTTING TOOLS IN MILLING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ VAŠÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ALEŠ POLZER, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Vašíček

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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 diplomové práce:

Silové zatížení řezných nástrojů při frézování

v anglickém jazyce:

Force load of the cutting tools in milling

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průběhu třískového obrábění frézováním je možno měřit aktuální hodnoty silového zatížení řezného nástroje/obrobku. Znalost velikosti silové výslednice i jejího směru pak umožňuje lépe rozhodovat o způsobu programování technologie frézování a o vhodnosti aplikace různých obráběcích strategií.

Cíle diplomové práce:

- stručný rozbor možností měření při třískovém obrábění
- návrh experimentálního měření silového zatížení řezného nástroje/obrobku
- praktické měření silového zatížení při frézovacích operacích
- vyhodnocení silového záznamu s doporučením pro případnou změnu strategie obrábění

Seznam odborné literatury:

TSCHÄTSCHE, Heinz. Applied machining technology. Dordrecht: Springer, c2009, xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.

BUDAK, Erhan. Machining dynamics: fundamentals, applications and practices. London: Springer, c2009, xviii, 328 s. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 978-1-84628-367-3.

SHAW, Milton Clayton. Metal cutting principles. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005, xix, 651 s. ISBN 01-951-4206-3.

QUESADA, Robert. Computer numerical control: machining and turning centers. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005, 548 s. ISBN 01-304-8867-4.

AB SANDVIK COROMANT. Technická příručka obrábění: soustružení - frézování - vrtání - vyvrtávání - upínání nástrojů. 2005.10. Švédsko: Elanders, 2005.

SIEMENS. Sinumerik 840D/840Di/810D: Příručka programování - Základy. 03.04. 2004, 486 s.

SIEMENS. Sinumerik 840D/840Di/810D: Příručka programování - Pro pokročilé. 03.04. 2004, 660 s.

SIEMENS. Sinumerik 840D sl: ShopMill - obsluha/programování. 11/2006. 2006, 447 s.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na měření silového zatížení při frézování. V teoretické části jsou popsány metody měření sil s hlubším zaměřením na jednotlivá měřidla. Dále je zde popsána charakteristika frézovacího procesu. Experimentální část je zaměřena na návrh experimentu při čelním frézování, jeho realizaci a následné vyhodnocení.

Klíčová slova

Řezná síla, silová analýza, frézování, dynamometry.

ABSTRACT

The thesis is focused on measuring the power equipment for milling. The theoretical part describes the method of measuring forces with a deeper focus on the individual meter. There is also the description of the characteristics of the milling process. Experimental part is focused on the proposal of experiment of the face milling, its implementation and subsequent evaluation.

Key words

Cutting force, force analysis, milling, dynamometers.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAŠÍČEK, Jiří. *Silové zatížení řezných nástrojů při frézování*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 78 s., příloh 2. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Silové zatížení řezných nástrojů při frézování** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

29.5.2014

Datum

Bc. Jiří Vašíček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi během zpracování diplomové práce věnoval. Dále děkuji panu Milanu Rusiňákovi za pomoc při přípravách a realizaci experimentu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU	10
1.1 Možnosti měření silového zatížení při třískovém obrábění	10
1.1.1 Základní rozdělení snímačů silového zatížení	12
1.1.2 Dynamometry s pružným členem	13
1.1.3 Dynamometry bez pružného členu	17
1.2 Piezoelektrické materiály	19
1.2.1 Krystalické piezoelektrické materiály	19
1.2.2 Keramické piezoelektrické materiály	20
1.2.3 Piezoelektrické polymery	21
1.3 Piezoelektrický jev	22
1.3.1 Piezoelektrický jev - historie	23
1.3.2 Piezoelektrický jev - využití v praxi	24
1.3.3 Využití piezoelektrického jevu ve vědě a průmyslu	25
2 CHARAKTERISTIKA FRÉZOVACÍHO PROCESU	26
2.1 Technologická charakteristika frézování	26
2.2 Analýza průřezu třísky	28
2.2.1 Čelní frézování	28
2.2.2 Válcové frézování	30
2.3 Frézovací nástroje	31
2.3.1 Rozdělení fréz	31
2.3.2 Rozdělení nástrojových materiálů	33
2.3.3 Základní druhy upínání nástrojů	37
3 NÁVRH EXPERIMENTU	39
3.1 Parametry navrhovaného experimentu	39
3.1.1 Volba obráběcího stroje	39
3.1.2 Volba obráběcího nástroje	40
3.1.3 Volba obráběného materiálu	41
3.1.4 Řezné podmínky	42
3.1.5 Přístrojové vybavení pro měření sil	42

3.1.5.1 Křemíkový dynamometr KISTLER 9257B	43
3.2 Teoretický výpočet sil	45
3.2.1 Teoretický výpočet sil dle metodiky firmy Walter	47
3.2.2 Teoretický výpočet sil podle knihy Technologie obrábění	49
4 REALIZACE EXPERIMENTU	51
5 ANALÝZA SILOVÉHO ZÁZNAMU	55
6 DISKUZE	72
ZÁVĚR	73
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
Seznam použitých symbolů a zkratk	77
SEZNAM PŘÍLOH	78

ÚVOD

V průběhu obecného procesu obrábění řezným nástrojem, dochází při vnikání řezného klínu nástroje do materiálu obrobku vlivem plastických deformací ke vzniku napjatosti, která způsobuje oddělování materiálu ve formě třísek. Tento proces je doprovázen značnou tvorbou zatěžujících sil. Znalost těchto sil a převážně jejich výslednice nám umožňuje získat přehled o mechanickém namáhání obráběcí soustavy stroj - nástroj - obrobek a předpokládat možné důsledky a rozhodovat o optimálním nastavení procesu. Dále nám poskytuje informace potřebné pro vyhodnocování faktorů provázející obrábění, jako je utváření třísky, vývoj tepla mezi nástrojem a obrobkem či trvanlivost a životnost nástroje. K určení těchto sil lze využít některého simulačního software, výpočtů či praktická měření. Z hlediska přesnosti jednotlivých metod lze konstatovat, že praktickými zkouškami získáváme reálné hodnoty, které mohou i s odchylkami být přesnější, nežli hodnoty určené teoretickými výpočty či simulací. Tato měření se provádějí buď nepřímo měřením výkonu na vřetenu stroje s následným přepočtem či přímo na stroji pomocí různých typů dynamometrických měřidel.

Obsahem této diplomové práce je nastínění problematiky a popis základních způsobů měření zatěžujících sil při obrábění, se zaměřením na piezoelektrické dynamometrické snímače s následujícím praktickým experimentem v oblasti frézování.

1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU

Frézování patří mezi progresivní a vysoce rozšířenou metodu obrábění. Vzhledem ke zvyšování objemu produkce a nároků na tvarovou složitost obrobků, vznikající při narůstající rychlosti procesu obrábění, dochází k neustálému zdokonalování frézovacího procesu. Současné trendy vedou k vývoji nových, výkonných obráběcích strojů - zejména strojů s číslicovým řízením, umožňujících dosažení vysokých výkonů díky spolehlivým pohonům a vhodným řídicím systémům. Stejně tak dochází k vývoji samotných řezných nástrojů, u kterých hraje významnou roli trvanlivost, kterou je snaha s optimálním využitím řezných materiálů za daných řezných podmínek neustále zvyšovat. Tento vývoj vede k možnostem obrábět širokou škálu materiálů, různé tvarové složitosti. Při frézovacích operacích dochází vlivem nestejnomyšlnosti průřezu třísky k dynamickému rozvoji silového zatížení. Znalost tohoto silového zatížení nástrojů pak sehrává důležitou roli v rozeznávání oblastí negativně, či pozitivně ovlivňující řeznou část nástroje, a tím jeho trvanlivost a celkovou životnost. Umožňuje nám získat přehled o mechanickém namáhání soustavy obrábění, a tím i podklady pro řešení celé technologické soustavy jak z hlediska pevnosti, tak i její tuhosti včetně dynamické stability řezného procesu. Dále je nepostradatelná při určování příkonu obráběcího stroje, zajištění energetické účinnosti řezného procesu. Analýzu silového zatížení lze aplikovat např. při experimentech řezivosti nástrojů, sledování vývoje sil při použití povlakovaných nástrojů, využívajících nové materiály. Dále například sledování tribologického chování materiálů za různých podmínek (použití procesních kapalin a jejich vhodnost pro danou operaci) a mnoho dalších využití. Určování silového zatížení se nejčastěji provádí pomocí přímého měření v průběhu vlastního řezného procesu. I když se jedná o náročnější a nákladnější metodu, lze takto získat poměrně vysoce přesné hodnoty, z kterých lze dále optimalizovat celý výrobní proces [7, 8, 35].

Významnou veličinou řezného procesu je řezná síla mezi čelem nástroje a třískou F [N], která se dynamicky mění v čase. Stav napjatosti v obráběném materiálu způsobuje řezný odpor R [N], který síla řezání musí při řezném procesu neustále překonávat. Pro podmínku rovnováhy pak platí: [8, 35]

Podmínka rovnováhy [8]:

$$F = - R \quad (1.1)$$

1.1 Možnosti měření silového zatížení nástroje při třískovém obrábění

V průběhu obráběcího procesu dochází k vzájemné interakci nástroje a obrobku, která je doprovázena plastickou deformací, třením a vznikem mikrotrhlin. Tyto mechanické jevy způsobují tvorbu tvářecích a řezných sil o vysoké frekvenci akustické emise [3].

Z hlediska experimentálního studia silových poměrů při třískovém obrábění jde v podstatě o **přímé** a **nepřímé** stanovení řezné síly, jejích složek a momentů působících v řezném procesu při různých pracovních podmínkách [35].

Přímé měření zahrnuje upnutí nástroje nebo obrobku na snímací zařízení - dynamometr. Tento snímač při zatěžování reaguje na vznik silových složek (F_x , F_y , F_z), popřípadě momentů, vytvářením elektrického signálu, odpovídajícímu velikosti působící síly [2].

Nepřímá metoda měření spočívá ve sledování reakcí stroje v průběhu obráběcího procesu. Převážně vychází z měření výkonu elektromotoru stroje (na vřetenu stroje, posuvového zařízení) v souvislosti s růstem zatěžujících sil vzniklých např. opotřebením nástroje. Ze známého vztahu pro výpočet užitečného výkonu $P_{už}$ [W] při obrábění (viz. vztah 1.2) plyne, že nepřímým měřením lze stanovit pouze tangenciální složku řezné síly. Zejména u CNC strojů, vybavených vysoce citlivými pohonnými jednotkami (vřetenem stroje, posuvového zařízení) mohou být nepřímé metody využity ke stanovení aktivních složek těchto sil [35, 2].

Zjednodušený vztah pro výpočet užitečného výkonu [9]:

$$P_{už} = F_c \cdot v_c \quad (1.2)$$

Uvedená metoda nepřímého stanovení řezné síly je poměrně jednoduchá a nevyžaduje žádnou nákladnou speciální měřicí techniku a je možné ji aplikovat u všech způsobů obrábění. Nevýhodou této metody je omezená přesnost měření, způsobená rozdílnou účinností stroje při zatížení a při chodu na prázdko a zanedbání vlivu ostatních složek řezné síly na výkon elektromotoru stroje. Je tedy vhodná spíše pro monitorovací účely [35, 2].

Další nepřímou měřicí metodou využívanou převážně u vrtacích operací je stanovení tangenciální složky řezné síly pomocí kroutícího momentu M_k [N.m]. Tato metoda vychází v měření celkového výkonu pomocí přenosného univerzálního zapisovacího přístroje. Po změření výkonu se vysune nástroj ze záběru a při stejných otáčkách se vřeteno zatěžuje mechanickou brzdou tak, dokud nedosáhne stejného údaje na registračním přístroji jako při obrábění. Výslednou tangenciální sílu lze určit z následujícího vztahu [35]:

Podmínka rovnováhy mezi kroutícím momentem od tangenciální složky M_k a momentem vyvolaným mechanickou brzdou M_{kb} [35]:

$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} = M_{kb} \quad (1.3)$$

kde: D [mm] - průměr nástroje nebo obrobku.

Základní rozdělení metod pro měření silového zatížení:

- vyvážením měřené síly známou gravitační silou, vyvozenou tělesem o standardní hmotnosti buď přímo, nebo přes soustavu pák,
- měřením zrychlení tělesa známé hmotnosti, na které působí měřená síla,

- vyvážením měřené síly magnetickou silou, vyvozenou elektrickým proudem, procházejícím cívku umístěnou v magnetickém poli,
- převedením síly na tlak kapaliny (plynu) a následné měření tohoto tlaku,
- působením síly na pružné těleso a měření deformace tohoto tělesa,
- působením síly na speciální krystal a měření elektrického náboje, který vzniká při deformaci tohoto krystalu [4].

1.1.1 Základní rozdělení snímačů silového zatížení

Jak již bylo uvedeno, pro přímé měření jednotlivých složek dynamického silového zatížení vznikajícího u obráběcích operací, se používají speciální snímací zařízení - dynamometrická měřidla. Každý tento snímač by měl mít vysokou citlivost, tuhost, vysokou frekvenční odezvu, linearitu a nízkou odchylku. Citlivost je vyjádřena jako poměr elektrického výstupu na jednotku silového vstupu. Využití dynamometry musí být schopné rozlišit minimálně 1 % plného rozsahu výstupu. Tuhost snímače silně závisí na jeho konstrukci, která musí zajistit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly a nedocházelo k jejich zkreslení. Převodník snímače síly je obvykle nejméně tuhým elementem konstrukce celého dynamometru. Frekvenční odezva dynamometru je přímo závislá na jeho přirozené frekvenci a charakteristice tlumení. Silové dynamometry různé konfigurace jsou neocenitelnými nástroji pro hloubkové studium obrobitelnosti, protože indikují přesné podmínky, vzniklé na řezném nástroji za dynamických situací [35, 2].

Podle metody obrábění, u které jsou dynamometrická měřidla aplikována rozeznáváme dynamometry pro operace soustružení, frézování, vrtání, broušení apod. Dle počtu měřených složek silového zatížení je pak dále rozdělujeme na jednosložkové a vícesložkové - měří více složek sil a dále pro měření kroutících momentů [35].

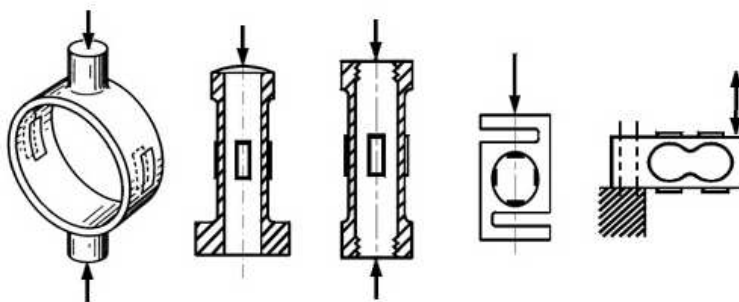
Jak popisuje obr. 1.1 lze toto zařízení rozdělit podle použitých metod měření na tyto základní druhy.



Obr. 1.1 Základní rozdělení dynamometrických měřidel.

1.1.2 Dynamometry s pružným členem

Při zatížení elastického členu dochází k jeho deformaci. Tato deformace je změřena a převedena příslušným zařízením na výslednou hodnotu silového zatížení. Tvary elastických členů (viz. obr.1.2) použitých ve snímačích silového zatížení závisí na řadě faktorů, mimo jiné zahrnující rozsah síly, rozměrové limity, výkon a samozřejmě výrobní náklady. Každý člen je navržen k měření sil, působících podél hlavní osy a není ovlivněn jinými složkami sil (boční zatížení). Materiál, použitý pro výrobu elastického prvku je obvykle nástrojová ocel, korozivzdorná ocel, hliník nebo beryliová měď [1].



Obr. 1.2 Příklady tvarů elastického členu [1,4].

- Mechanický - jedná se pravděpodobně o nejjednodušší měřící zařízení, sestávající se z kovového válečku, který je vystaven síle, působící v jeho podélné ose. Měřítkem síly jsou hodnoty délkové deformace zatěžujícího válce odečítané na úchylkoměru, nebo jiném měřícím zařízení. Odhad síly je potom stanoven pomocí interpolace mezi délkami naměřených, již dříve aplikovaných známých sil. Funkčně podobné je měření pomocí elastického kovového prstence (viz. obr. 1.3) nebo třmenu, kde se deformace měří úchylkoměrem přes vnitřní průměr. Výhodou je jednoduchá konstrukce, spolehlivost. Nevýhodou je malý rozsah, závislost na změně teplot, velká setrvačnost - nevhodnost pro dynamické měření [1, 4, 35].

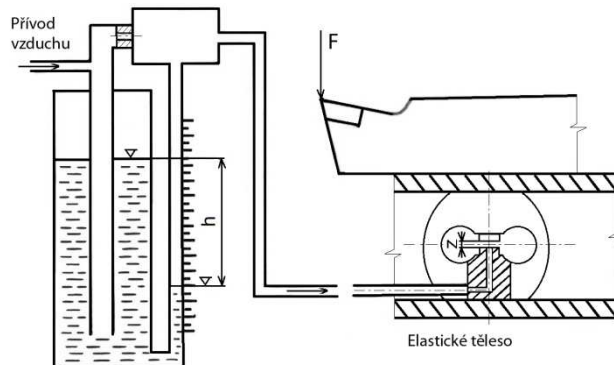


Obr. 1.3 Elastický měřící prstenec [17].

- Pneumatický - založen na principu využití dynamických vlastností vzduchu, kdy zatěžující síla působící na jedné straně pístu nebo membrány z pružného materiálu je vyvažována z druhé strany tlakem vzduchu. Toto působení protitlaku je snímáno manometrem a je přímo úměrné zatěžující síle. Snímací zařízení se skládá z utěsněné komory s ventilem. Vzduch je pod tlakem přiváděn do komory, dokud nedojde k rovnováze sil. Po dosažení této rovnováhy může být přečten údaj tlaku na tlakoměru [1].

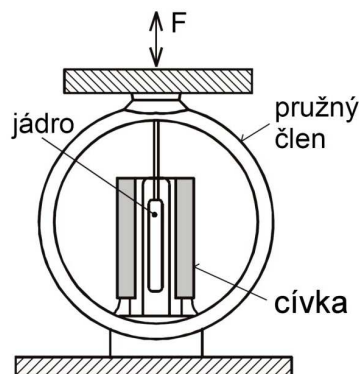
Obdobou této metody snímání je využití deformace elastického členu (viz. obr. 1.4), kdy působením síly dochází k deformaci a změně vzdálenosti stěn zatěžovaného členu. Změna této vzdálenosti způsobuje změnu tlaku plynu, proudícího štěrbinovou tryskou ve stěně, která je snímána trubicovým manometrem v podobě změny výšky hladiny kapaliny. Pneumatické snímače jsou vhodné pro měření statického zatížení. Výhodou je snadná konstrukce a údržba,

jednoduchá obsluha, velká spolehlivost a citlivost. Není však vhodná pro měření dynamických sil [4, 35].



Obr.1.4 Pneumatiký dynamometr [4].

- Indukční - jak popisuje obr. 1.5 při působení síly na elastický člen (v uváděném příkladě elastický prstenec) je jeho deformace přenášena na pohyb kovového jádra v cívce, které tak svojí polohou mění její indukčnost. Změna indukčnosti cívky pak odpovídá danému silovému zatížení [4].



Obr. 1.5 Indukční dynamometr [4].

- Kapacitní - jedná se o snímač, který využívá kapacitní senzor pro snímání deformací elastického elementu. Dochází zde k mechanicko-elektrické transformaci, jako u předchozí indukční metody. Ve většině případů se senzor skládá ze dvou proti sobě uložených, dielektrikem oddělených paralelních desek, tvořících kondenzátor, spojených s elastickým elementem. Deformací tohoto elementu dochází k oddalování nebo přibližování desek kondenzátoru a tím ke změně jeho kapacity, odpovídající danému silovému zatížení [1].

Dle konstrukce kondenzátorů pak rozeznáváme různé typy kapacitních snímačů. Patří sem například konstrukce: desková mezerová, diferenční mezerová, překrývající desková, diferenční překrývající, válcová, apod. Výhodou je malá hmotnost a vysoká citlivost, nevýhodou pak citlivost na okolní vlivy [4].

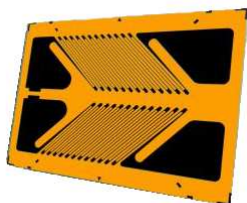
- Elektrické - Potenciometrické

- Reostatové

- Deformace pružného členu je přes mechanický převod přenášena na jezdec potenciometru nebo reostatu. Vyjádřením zatěžující síly je potom změna odporu, přímo úměrná deformaci elastického členu. Tento typ snímače je vhodný pro měření statických sil [4].

- Tenzometrický - jedná se o jeden z nejpoužívanějších typů snímačů, vhodných pro velmi přesné měření dynamického zatížení. Základním principem je měření změny ohmického odporu v závislosti na elastické deformaci kovových vláken tenzometru. Ten je tvořen deformovatelnou konstantanovou mřížkou - buď ve formě meandrovitě vinutého drátu nebo leptané konstantanové fólie různého tvaru, přitmelené k papírové podložce (viz. obr. 1.6). Tenzometry jsou spojeny s pružným deformačním členem pomocí tenké vrstvičky tmelu na bázi epoxidové pryskyřice a nejčastěji zapojovány do můstkových obvodů (viz. obr. 1.9, 1.10). Po silovém zatížení pružného členu, vyvolaném vzájemnou interakcí mezi nástrojem a obrobkem dochází vlivem elastických deformací ke změnám průřezu odporového drátu, nebo folie, což zapříčiňuje změnu odporu. Měřicí tenzometrické systémy jsou vybaveny zdrojem napájecího proudu, propojovací kabeláží, měřicí technikou a vyhodnocovacím zařízením [12,13].

V průběhu let byly vyvinuty polovodičové tenzometry (viz. obr. 1.7), tvořené páskem vyříznutým z monokrystalu polovodiče - nejčastěji křemíkové nebo germaniové, u kterých je změna elektrického odporu při působení deformace vyvolána změnou jejich měrného odporu. Další vývojovou etapu pak tvoří tzv. napařovací tenzometry (viz. obr. 1.8), při kterých se napařují jednotlivé vrstvy na vyleštěné měřené místo elastického elementu. Tyto snímače se vyznačují nepatrnou hmotností, malými rozměry, vysokou citlivostí, tuhostí a v neposlední řadě i životností oproti kovovým tenzometrům. Nevýhodou polovodičových tenzometrů oproti napařovacím je jejich pracná a nákladná výroba [14,15].



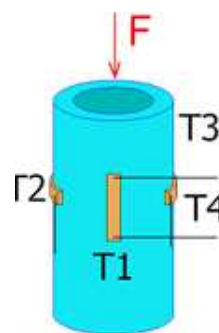
Obr. 1.6 Kovový tenzometr [12].



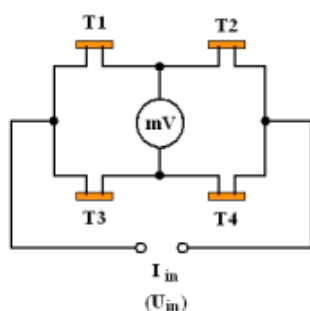
Obr. 1.7 Polovodičový tenzometr [15].



Obr. 1.8 Napařovací tenzometr [12].



Obr.1.9 Příklad zapojení tenzometrů [16].



Obr. 1.10 Zapojení Wheatstoneova můstku [15].

Elektrické dynamometry patří mezi nejrozšířenější a nejčastěji používané dynamometry v technické praxi.

Mezi jejich přednosti patří:

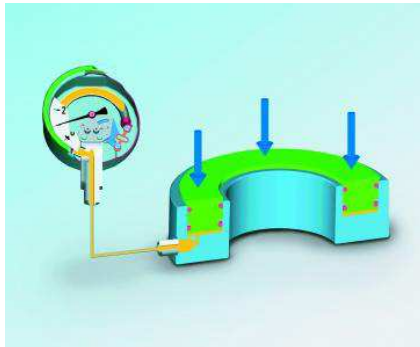
- snadný přenos dálkového signálu,
- možnost snímání signálů u rotujících a pohybujících součástí,
- využití miniaturních měřících elementů,
- snadná dostupnost napájecích zdrojů a čistota provozu [4].

1.1.3 Dynamometry bez pružného členu

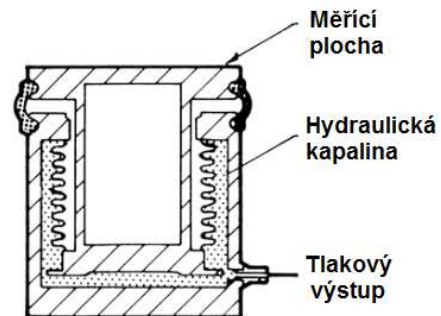
Absencí elastického členu nedochází ke zkreslení sledovaných hodnot, proto lze o těchto snímačích tvrdit, že pracují s vyšší přesností.

- Hydraulický - tento snímač využívá jednoduchého principu měření hydraulického tlaku manometrem, kdy je síla vyhodnocena ze závislosti zjištěného tlaku na známé velikosti plochy, na kterou působí dané zatížení. Výhodou těchto dynamometrů je možnost měření bez přívodu elektrické energie - hydraulické snímače jsou soběstačné a nepotřebují externí napájení. Další výhodou je také jejich jednoduchá konstrukce. Údaj se odečítá z číselníku manometru (viz. obr.1.11 a obr.1.12), který může být umístěn i několik metrů od měřícího zařízení. Dále je možné využít speciálních přípravků, sloužících pro demontáž snímače i během zátěže - bez zastavení stroje. Nevýhodou je citlivost na změnu teploty, velká setrvačnost, nízká citlivost a nutnost těsnění - může dojít k úniku hydraulické

kapaliny a ke znečišťování životního prostředí. Proto nejsou vhodné pro dynamická měření [12, 1, 35].

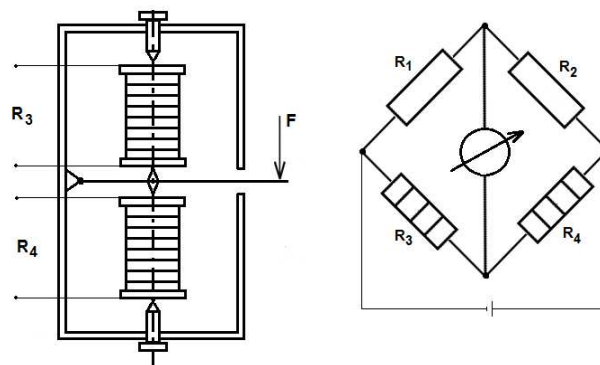


Obr.1.11 Schéma měření hydraulickým dynamometrem [12].



Obr.1.12 Schéma hydraulického dynamometru [1].

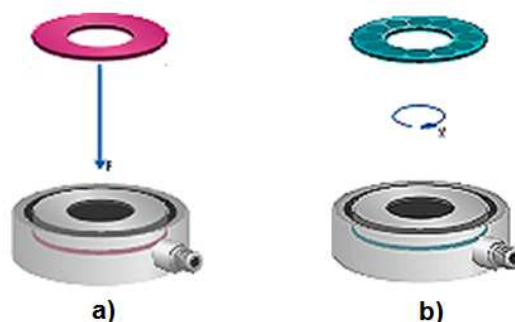
- Uhlíkový dynamometr (viz. obr. 1.13) je tvořen segmenty, které jsou sestavené z jednotlivých uhlíkových destiček. Tyto segmenty jsou zapojené do wheatstoneova můstku a reagují na změnu zatížení změnou odporu. Při zatěžování uhlíkových segmentů, dochází k jejich namáhání, které vede často k poškození segmentů. Výhoda destiček, uspořádaných do segmentu oproti monolitním segmentům, je možnost výměny pouze poškozených destiček [4].



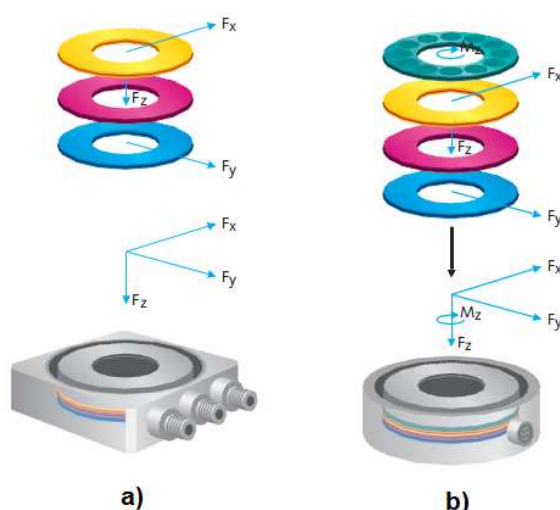
Obr.1.13 Uhlíkový dynamometr [4].

- Piezoelektrický - tento druh dynamometru patří mezi nejpoužívanější moderní senzory silového zatížení s širokým spektrem využití a je součástí měřící aparatury v našem experimentu. Jedná se o senzory využívající k snímání tzv. piezoelektrického jevu, který vzniká jako reakce na silové zatížení specifického piezoelektrického materiálu v určitém směru. Konstrukčně jsou řešeny tak, že tělo snímače tvoří korozivzdorný zásobník, do kterého jsou umístěny výbrusy z piezoelektrického materiálu - např. krystalu SiO_2 . Každý tento element pak snímá jednotlivou složku silového zatížení zvlášť, v závislosti na piezoelektrické orientaci výbrusu [3,18]. Podle množství aplikovaných výbrusů v těle snímače se vyskytují dynamometry jednodílní - měřící jednu složku zatížení (např. jednu složku síly, kroutící moment, obr.1.14 a, b) a vícekomponentní - měřící více složek najednou (např. osově složky sil a kroutící moment, obr. 1.15a, b) [20].

Součástí zařízení je nábojový zesilovač, který slouží pro vytvoření měřitelného výstupu a vyhodnocovací elektronika, propojená vzájemně kabelem se snímačem. Jedná se o snímače o vysoké tuhosti a velkém měřicím rozsahu. Nelze jimi však měřit dlouhotrvající děje, statické síly. Mezi jeho nevýhody patří ovlivnění teplotou [20, 4].



Obr.1.14 Jednokomponentní piezoelektrický snímač a) síly a b) kroutícího momentu [20].



Obr.1.15 Vícekomponentní piezoelektrické snímače a) složek sil, a b) složek sil s kroutícím momentem [20].

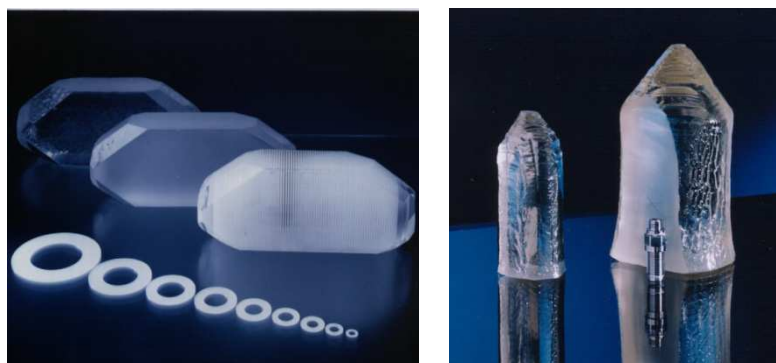
1.2 Piezoelektrické materiály

Tato podkapitola je věnována rozdělení a stručné specifikaci piezoelektrických materiálů běžně používaných v praxi.

1.2.1 Krystalické piezoelektrické materiály

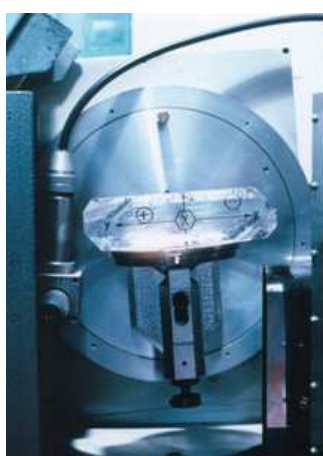
Jedním z prvních studovaných krystalů byl krystal křemene - SiO_2 (viz. obr.1.16), existující v tzv. α fázi. Pro své vlastnosti, jako je chemická odolnost, jednoduchá struktura, nízká permitivita atd. patří mezi nejpoužívanější piezoelektrické materiály. V našem experimentu je aplikován u piezoelektrického snímače síly od firmy Kistler. Tento krystal je uměle pěstován za použití speciálních postupů. Je základem senzorů mechanických veličin (síla, zrychlení, apod.) nebo křemenných

reznátorů. Dalším z komerčně pěstovaných krystalů je například LiNbO_3 , LiTaO_3 využívaný v optice a dále mnoho dalších krystalických materiálů [18,19].

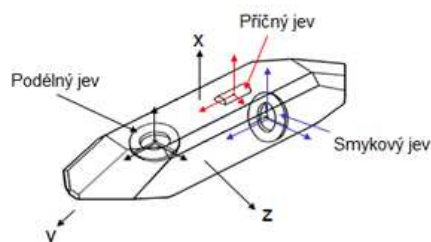


Obr.1.16 Syntetický krystal křemene [27].

Krystaly křemene se uměle pěstují v autoklávech při tlaku nad 100 MPa a teplotě nad 400 °C, s přírůstkem krystalu okolo 1 kg za týden. U takto vytvořeného krystalu se před řezáním určí pomocí rentgenového goniometru orientace krystalových os, které se shodují s osovou složkou síly, určené k měření (viz. obr. 1.17a,b). Následuje řezání podle určené orientace a broušení [20].



a)



b)

Obr.1.17 Určování orientace os krystalu umělého křemene [20].

1.2.2 Keramické piezoelektrické materiály

Vývoj těchto materiálů v oblasti piezoelektriny sahá do období po druhé světové válce. Jedná se o látky na bázi tuhých roztoků oxidů olova, titanu, zirkonu - tzv. PZT keramika. Prvními piezoelektrickými keramickými materiály byly BaTiO_3 , PbTiO_3 , PbZrO_3 . PZT keramika se vyrábí práškovou metalurgií, následně se brousí a řeže diamantovými nástroji do nejrůznějších tvarů (viz. obr.1.18). PZT keramika nachází uplatnění především v ultrazvukové technice (svařování, čištění, diagnostika), jako reznátory atd. [18, 19].



Obr. 1.18 PZT keramika - příklad tvarů [22].

1.2.3 Piezoelektrické polymery

Koncem šedesátých let minulého století byly piezoelektrické vlastnosti objeveny v polymerní látce PVDF (polyvinylidendifluorid). Část polymeru se nachází ve formě krystalků, část potom ve formě amorfních řetězců, proplétajících zrna krystalické fáze s piezoelektrickými vlastnostmi [18, 19].

Výborných piezoelektrických vlastností bylo dosaženo u bublinkového polypropylenu (PP), kde byly bublinky vyplněny inertním plynem (např. Argon, dusík) a polarizované v elektrickém poli. Náboj vzniklý uvnitř bublinek zapříčiňuje vznik dlouhodobě existujících dipólových momentů, které se podílejí na vzniku anizotropie polymeru a jeho piezoelektrických vlastností [18, 19].

Piezoelektrické polymery - piezopolymery jsou častou součástí piezoelektrických kompozitů, kde se využívá kombinace jednotlivých složek. Je-li např. jedna ze složek PZT keramika na rozhraních pevně propojená s polymerem, lze zlepšit piezoelektrický koeficient výsledného kompozitu vůči vlastnostem jednotlivých složek. Kompozity se nejčastěji připravují ve formě tyčinek, destiček či zrn piezoelektrické složky v polymerní matici. Piezopolymery, nejčastěji ve formě tenkých filmů (viz. obr. 1.19), nacházejí uplatnění v elektronice (spínače, akcelerometry, flexi klávesnice), dále pak u akustických zařízení (mikrofony, ultrazvukové detektory, sonar), u vibračních senzorů apod. [18, 19].



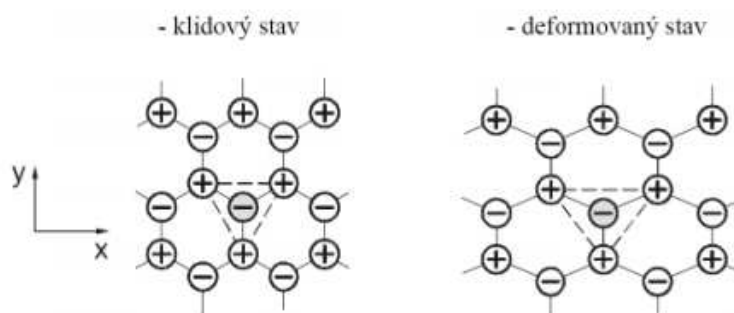
Obr.1.19 Tenký film z PVDF polymeru [30].

Piezoelektrické materiály se průmyslově využívají od poloviny dvacátého století, kdy se započalo s jejich intenzivním výzkumem a vývojem. V současnosti je vývoj těchto látek veden směrem k nalezení materiálů:

- s lepšími piezoelektrickými vlastnostmi (výraznější citlivost),
- s větší účinností převodu elektrické a mechanické energie (úspora energie),
- s lepší tepelnou stabilitou,
- s vhodnou aplikací v piezoelektrických zařízeních (automatizace) [18].

1.3 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev nachází své jméno ve slově řeckého původu - piezein, což v překladu znamená tlačit, mačkat. Podstatou je schopnost vzniku elektrického náboje na plochách určitých krystalů v důsledku jejich mechanického namáhání. Tento děj pak nazýváme jako přímý piezoelektrický jev. Vygenerovaný elektrický náboj je potom tomuto namáhání přímo úměrný. Napětí, které odpovídá vzniklému náboji je odebíráno z elektrod vyvedených přímo na krystalu. Deformací se ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která v nedeformovaném krystalu souhlasí, se od sebe vzdálí (viz. obr. 1.20). Velikost náboje nezávisí na délce krystalu, ale jen na velikosti jeho ploch. Při působení vysokých teplot dochází u jakéhokoliv materiálu ke ztrátě piezoelektrických vlastností, jelikož dochází k narušení uspořádání iontů. K této změně dochází skokově. Přechodová teplota je charakteristická pro daný materiál a nazývá se Curieova teplota [18, 19].



Obr.1.20 Chování piezoelektrický krystalu [18].

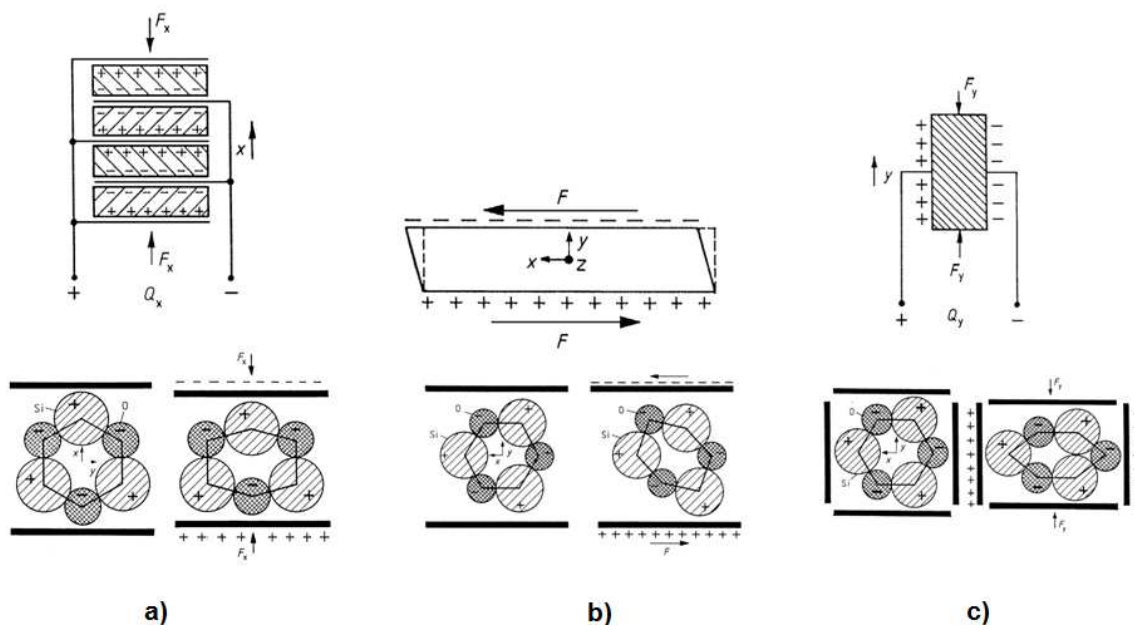
K piezoelektrickému jevu existuje i jev opačný - nepřímý piezoelektrický jev nebo-li tzv. elektrostrikce, kdy při přivedeném elektrickém napětí dochází k posunu iontů a mechanické deformaci krystalu. Platí zde, že čím je větší elektrické pole, tím je větší i deformace krystalu. Na rozdíl od lineární závislosti při přímém piezoelektrickém jevu je u nepřímého závislost kvadratická. Je-li elektrické pole periodicky časově proměnné s kmitočtem, který odpovídá kmitočtu vlastních elastických kmitů krystalu, vzniká rezonance. Elektrostrikce lze pak využít k řízení elektrických kmitů v elektronických generátorech, ultrazvukových generátorech, elektromagnetických filtrech nebo rezonátorech [18].

Přímý piezoelektrický jev se vyskytuje pouze u krystalů elektricky nevodivých materiálů, které nemají střed symetrie - existují díky anizotropii krystalu. Elektrostrikci naopak nalezneme u všech dielektrických materiálů. U amorfních látek se tato vlastnost nevyskytuje [18].

Jak napovídá obr. 1.21 dělíme piezoelektrický jev krystalu dle mechanismu deformace na:

- podélný efekt - při působení tlaku,
- střížný efekt - při působení smykové deformace,

- příčný efekt - při působení tlaku, kdy se náboj generuje na plochách kolmých ke směru zatížení [20].



Obr. 1.21 Rozdělení piezoelektrického jevu dle mechanismu deformace [20].

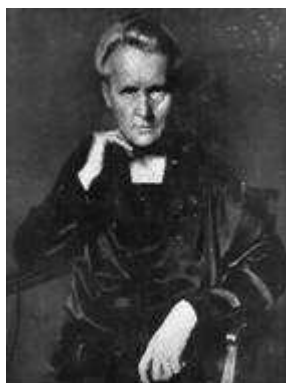
1.3.1 Piezoelektrický jev - historie

K prvnímu přímému zkoumání tohoto jevu došlo koncem devatenáctého století ve Francii, kdy v letech 1880-1882 prováděli bratři Pierre a Jacques Curieovi (viz. obr. 1.22 a 1.23) experimenty spojitosti krystalografické struktury určitých materiálů s piezoelektrickými jevy. Jejich experiment spočíval v měření povrchového náboje, tvořeného na speciálně upravených krystalech (turmalín, topaz, křemen, třtinový cukr, Rochelle sůl), které byly vystavovány mechanickému namáhání - tzv. přímý piezoelektrický jev. K tomuto pokusu si vystačili se základním vybavením, tvořeném staniolovou folií, lepidlem, kovovými vodiči, magnety a klenotnickou pilkou [6].

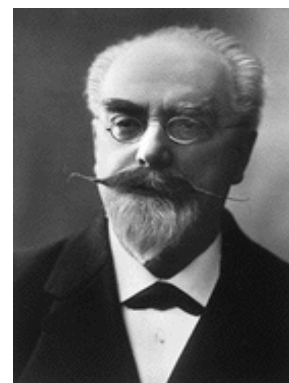
S reakcí na jejich práci přichází roku 1881 pomocí matematických propočtů lucemburský fyzik Gabriel Lippmann (viz. obr. 1.24). Tvrdí, že u krystalů vykazujících přímý jev existuje i nepřímý, čili opačný piezoelektrický jev - kdy dochází k mechanické deformaci krystalu při aplikaci elektrického pole. Toto tvrzení potom bratři Curieovi experimentálně prokázali [6].



Obr. 1.22 Pierre Curie [5].



Obr. 1.23 Paul-Jacques Curie [5].



Obr. 1.24 Gabriel Lippmann [5].

1.3.2 Piezoelektrický jev - využití v praxi

Z historického hlediska se s tímto jevem setkáváme již mnohem dříve - v době pravěké. Tehdy naši předci, aniž by věděli o jeho fyzikální podstatě, používali tohoto efektu k rozdělávání ohně pomocí křesání pazourku o železitý minerál markazit. V období starověku a středověku byl markazit nahrazen slitinou železa ve formě křesadlových ocílek. Tento vynález našel využití jak v běžném životě tehdejšího obyvatelstva, ale posloužil i vojenským účelům v dobách novověkých válek, a to v podobě vynálezu křesadlového zámku, kterými se zapaloval střelný prach tehdejších palných zbraní (viz. obr. 1.25).



Obr. 1.25 Křesadlový zámek francouzské muškety.

Ve východních zemích starého kontinentu býval v dobách starověku tento efekt využíván k léčitelským účelům [6].

První využití, které souviselo s přímým výzkumem piezoelektrického efektu přišlo ve dvacátém století, v období první světové války. Pro vojenské využití bylo vyvíjeno zařízení pro pozorování podmořských plavidel - aktivní sonar. O vynalezení tohoto zařízení se opět zasloužila skupina francouzských vědců, vedených fyzikem Paulem Langevinem. Tito průkopníci se zasadili o uchycení

pevného místa mezi perspektivními technologiemi, velký mezinárodní vývojový zájem, trvajících do dnes a další využití v širokém spektru oborů [6].

1.3.3 Využití piezoelektrického jevu ve vědě a průmyslu

Piezoelektrický efekt našel díky vysokému vývoji uplatnění v mnoha odvětvích (viz. obr. 1.26). Lze se s ním setkat například:

- ve vojenském průmyslu (sonar, zbraňové systémy - spoušťové mechanismy, atd.),
- ve strojírenském průmyslu (snímače, pohony - aktuátory, váhy, atd.),
- v lékařském průmyslu (ultrazvuk - sonografie, chirurgie, léčení neplodnosti - injekce pohlavních buněk apod.),
- v automobilovém průmyslu (bezpečnost - airbagové senzory),
- v elektrotechnice (mikrofony, gramofonové přenosky, zapalovače, apod.),
- v jemné mechanice (mechanismus quartzových hodinek),
- a dalších jiných odvětvích.



Obr.1.26 Praktické příklady využití piezoelektrického efektu [20, 23, 24, 25, 26].

2 CHARAKTERISTIKA FRÉZOVACÍHO PROCESU

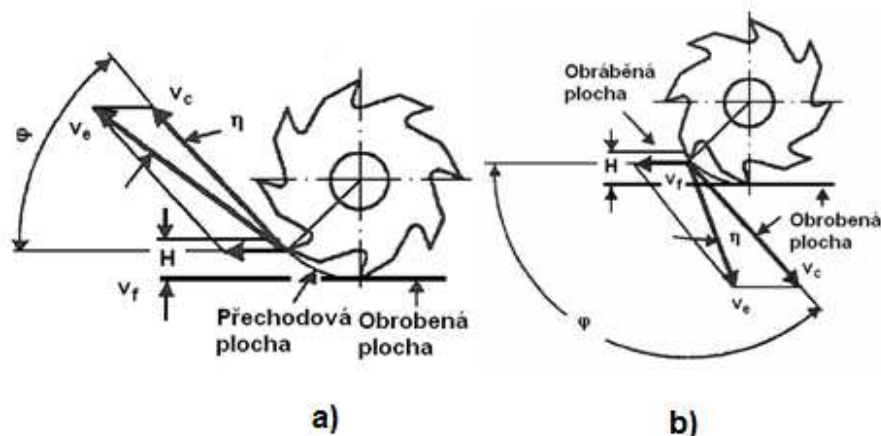
Frézování je obráběcí metoda, při které se materiál obrobku odebírá břity otáčejícího se nástroje. Posuv nejčastěji koná součást převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky [7].

2.1 Technologická charakteristika frézování

Z technologického hlediska se v závislosti na aplikovaném nástroji rozlišuje frézování válcové (frézování obvodem nástroje) a frézování čelní (frézování čelem nástroje). Od těchto základních způsobů se odvozují některé další způsoby, jako frézování okružní a planetové [7].

Kinematika frézování

Válcové frézování se převážně uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje frézování nesousledné a sousledné (viz. obr. 2.1) [7].



Obr. 2.1 Kinematika válcového frézování: a) nesousledné frézování, b) sousledné frézování [7].

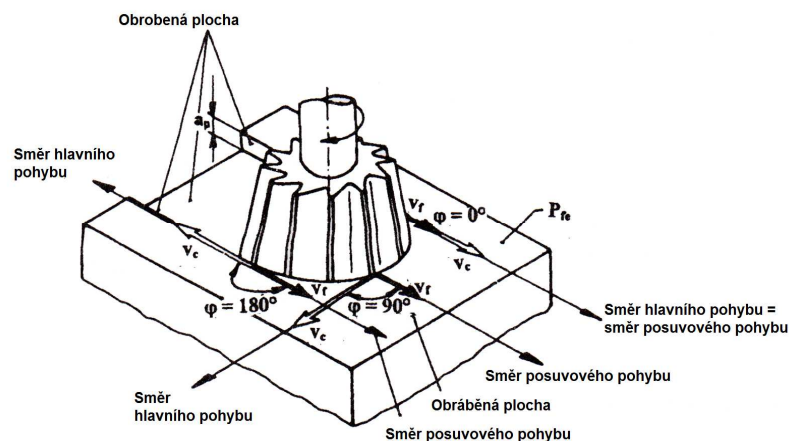
Při nesousledném frézování se obrobek v oblasti řezání posouvá proti směru otáčení frézy. Tloušťka třísky začíná nulovou hodnotou a postupně se zesiluje ke konci záběru až na maximum. Při nesousledném frézování vznikají v okamžiku záběru břitu do obrobku velké řezné síly, které vyvolávají silný tlak mezi obrobkem a frézou. Břit je fakticky odtlačován ze záběru. Přitom dochází v průběhu krátké kluzné fáze ke zpevnění povrchové vrstvy obráběného materiálu. V této fázi vzniká na břitu nástroje vlivem tření a vysokých teplot větší opotřebení, než k jakému dochází v dalším průběhu obrábění. Vznikající síly zvedají obrobek

směrem vzhůru, což vyžaduje velmi stabilní upnutí, aby byl obrobek bezpečně upevněn na stole stroje [10].

O sousledném frézování mluvíme tehdy, je-li směr posuvu obrobku v oblasti řezání shodný se směrem otáčení frézy. Tloušťka třísky je největší na začátku obrábění a směrem ke konci klesá až na nulu, čímž dochází k rázovému namáhání břitu. Nevzniká tu však kluzný efekt jako u nesousledného frézování. Mimoto se rovněž vyvíjí méně tepla a minimální je i sklon ke zpevňování materiálu obrobku zastudena. Velká tloušťka třísky se projevuje příznivě a řezné síly mají tendenci přitlačovat obrobek ke stolu frézky, přičemž je břit stále udržován v řezu [10].

V průběhu obrábění někdy ulpívají třísky na břitu, kde jsou až do okamžiku dalšího záběru. Při nesousledném frézování může být tato tříška snadno vtažena mezi břit a obrobek a tím může dojít k lomu břítové destičky. Jinak je tomu u sousledného frézování. Stejná tříška by v tomto případě byla odražena z břitu a nemohla by jej proto za běžných okolností poškodit [10].

Čelní frézování (viz. obr. 2.2) se uplatňuje při práci s čelními frézami, kdy břity jsou vytvořeny na obvodu i čele nástroje [7].



Obr. 2.2 Kinematika čelního frézování [7].

Hlavní pohyb při frézování koná fréza a je definován řeznou rychlostí v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] [7]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Vedlejší pohyb v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] - posuvový pohyb stolu, koná obrobek [7]:

$$v_f = \frac{f_z \cdot z \cdot n}{1000} \quad (2.2)$$

Součet hlavních a vedlejších pohybů udává výsledný efektivní pohyb v_e [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] [8]:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (2.3)$$

2.2 Analýza průřezu třísky

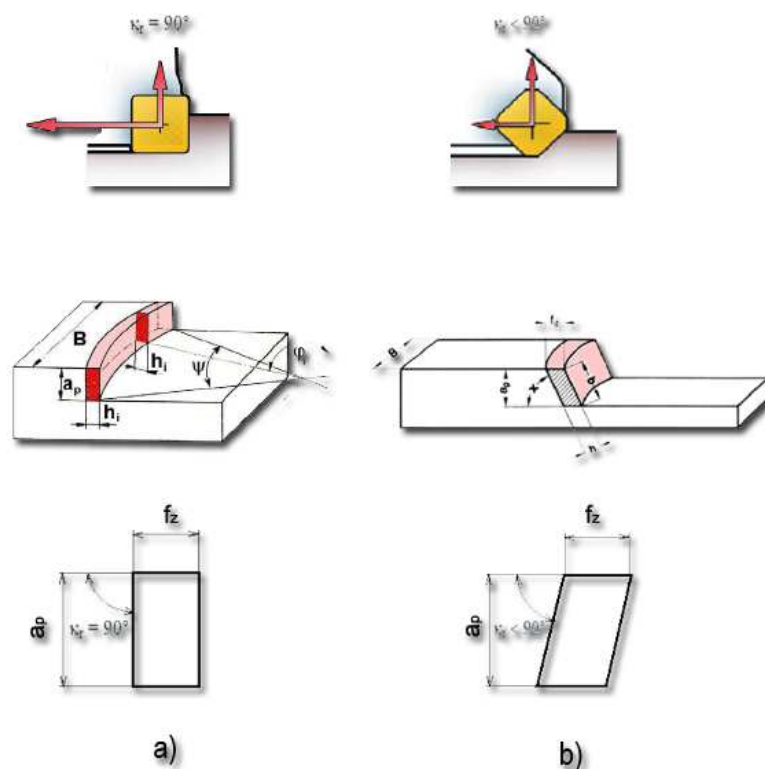
Při řešení průřezu třísky při frézování je nutné vzít v úvahu:

- průřez třísky a silové zatížení není konstantní (mění se tloušťka třísky - viz. obr.2.3),
- v záběru může být i několik břitů frézy,
- záběr břitů je periodicky přerušovaný, tříska je vždy dělená [8].

2.2.1 Čelní frézování

Obecným problémem u všech druhů frézování je závislost tloušťky třísky na úhlu pootočení frézy φ [8].

Na ilustračním obrázku 2.3 je vidět, že tvar průřezu a tloušťka třísky je ovlivněna úhlem nastavení hlavního břitu nástroje κ_r [35].



Obr. 2.3 Vliv úhlu nastavení hlavního ostří na průřez třísky během záběru břitu nástroje

a) při $\kappa_r = 90^\circ$ b) při $\kappa_r < 90^\circ$ [10, 9].

Jmenovitá tloušťka třísky h_D [mm] pro čelní frézování je definována vztahem [8]:

$$h_D = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi \quad (2.4)$$

Jmenovitá šířka třísky b_{Di} [mm] pro úhel κ_r [8]:

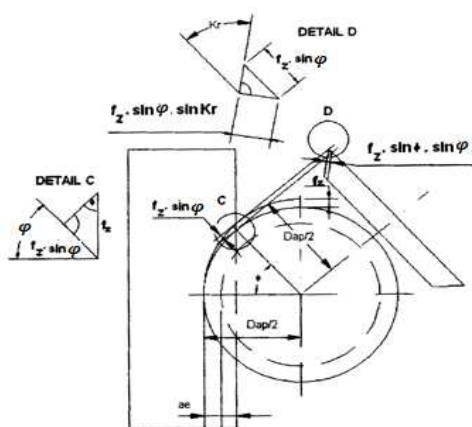
$$b_{Di} = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (2.5)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} [mm²] pro i -tý zub [8]:

$$A_{Di} = h_{Di} \cdot b_{Di} = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_i \quad (2.6)$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky A_{Dmax} je při $\phi = 90^\circ$, pak platí [8]:

$$A_{Dmax} = f_z \cdot a_p \quad (2.7)$$



Obr. 2.4 Průřez třísky při čelním frézování [8].

Vztah pro výpočet síly F_{Ci} [N], působící na i -tý zub [8]:

$$F_{Ci} = A_{Di} \cdot kc_i \quad (2.8)$$

Výpočet silové výslednice F_C [N], působící na frézu [8]:

$$F_C = \sum_{i=1}^{Zz} A_{Di} \cdot kc_i \quad (2.9)$$

Po úpravě se získá vztah pro výpočet silové výslednice [8]:

$$F_C = k_{c1} \cdot a_p \cdot f_z^{1-mc} \cdot \sin \kappa_r^{-mc} \cdot \sin \varphi^{1-mc} \quad (2.10)$$

Z výše uvedené silové analýzy vyplývá, že při frézování dochází k cyklickému zatěžování frézovacích nástrojů. Toto namáhání má negativní vliv na průběh opotřebením břitů a vznik chvění [8].

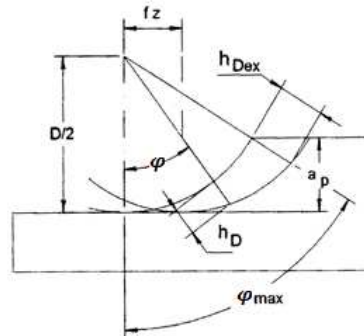
K potlačení cyklického namáhání lze dojít například:

- volbou vhodné geometrie nástroje,
- volbou vhodné rozteče jednotlivých zubů (velká, střední, malá a nepravidelná rozteč) [7, 8].

Je nutné dbát na správnou volbu geometrie frézovacího nástroje, protože se jedná o poměrně nákladné nástroje a jejich opotřebením může dojít k úplnému zničení nástroje.

2.2.2 Válcové frézování

Oproti čelnímu frézování se v průběhu válcového frézování (viz. obr. 2.5) mění plocha průřezu třísky v závislosti na úhlu záběru, ve kterém se zub nástroje nachází. V souvislosti s touto časovou změnou se mění i řezná síla, celkové zatížení zubu nástroje i řezný výkon [8].



Obr. 2.5 Průběh změny tloušťky třísky při válcovém frézování [8].

Vztah pro výpočet tloušťky třísky h_D [mm] pro úhel pootočení φ [°] [8]:

$$h_D = f_z \cdot \sin \varphi \quad (2.11)$$

Hodnotu maximální tloušťky třísky pro úhel φ_{\max} lze určit ze vztahu:

$$h_{D_{\max}} = 2 \cdot f_z \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D}} \quad (2.12)$$

Konečnými úpravami prvotních vztahů a jejich integrací lze pro z_z zubů v záběru odvodit výpočtový vztah pro stanovení průřezu třísky [8]:

$$A_D = f_z \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{s_s}{2\pi}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^{z_z} (\cos \varphi_{1i} - \cos \varphi_{2i}) \quad (2.13)$$

Pokud je známý průběh měrné řezné síly, lze dalšími úpravami dojít ke vztahu pro výpočet elementární řezné síly [8]:

$$F_c = c_0 \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi^{1-mc} \cdot d\varphi \quad (2.14)$$

Řezné síly se v průběhu frézování mění v závislosti na stavu nástroje a jeho opotřebení. Tato skutečnost je nejvíce patrná u nástrojů s břity ve šroubovici, kdy na počátku frézování je nástroj v důsledku pozitivní geometrie vtahována do řezu. Na konci frézování, kdy je nástroj zcela opotřebovaný, se od obrobeného povrchu výrazně odtlačuje. Celkový nárůst řezných sil běžně dosahuje 200 %, ve výjimečných případech dokonce i 300 %. Průběh opotřebení během frézovacího procesu lze analyzovat z časové závislosti rozvoje sil pomocí dynamometrických měřidel. Jedná se časově a finančně náročná měření, jejich výsledky jsou však velmi cenné [8].

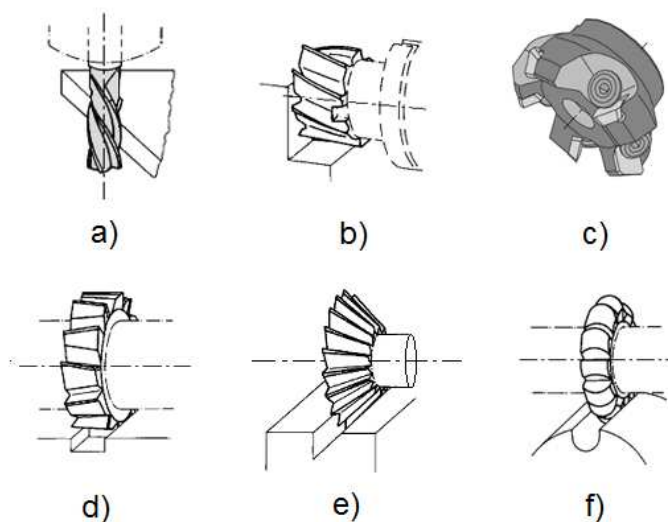
2.3 Frézovací nástroje

Frézy jsou rozměrové vícebřité rotační nástroje, jejichž břity jsou vhodně rozmístěny na povrchu. Frézovací nástroje lze rozdělit podle několika určitých hledisek [11].

2.3.1 Rozdělení fréz

Dle geometrického tvaru:

- válcové frézy (viz. obr. 2.6 - a) nástrčné nebo stopkové - zuby jsou rozloženy pouze po válcové ploše nástroje. Jsou vhodné pro frézování rovinných ploch, rovnoběžných s osou frézy,
- čelní válcové frézy (viz. obr. 2.6 - b) nástrčné nebo stopkové - zuby jsou rozloženy po vnější válcové i čelní ploše nástroje. Vhodné pro obrábění dvou na sebe kolmých rovin,
- čelní frézy (viz. obr. 2.6 - c) - zuby jsou rozloženy jen na čelní ploše nástroje. Používají se pro obrábění rovinných ploch,
- kotoučové frézy (viz. obr. 2.6 - d) - zuby jsou rozloženy na válcové ploše a na jedné nebo obou čelních rovinách. Jsou vhodné pro obrábění drážek a bočních rovin,
- úhlové frézy (viz. obr. 2.6 - e) - jednostranné, oboustranné - zuby na kuželových plochách nástroje. Vhodné pro obrábění nakloněných rovin, zubových mezer nástrojů apod.,
- tvarové frézy (viz. obr. 2.6 - f) - nacházejí uplatnění při obrábění tvarových ploch, z jejichž tvaru jsou odvozeny. Mají široké spektrum použití, jako například obrábění kruhových tvarů, drážek, obecných tvarů, závitů apod. [8, 11].



Obr. 2.6 Rozdělení frézovacích nástrojů dle geometrického tvaru [11].

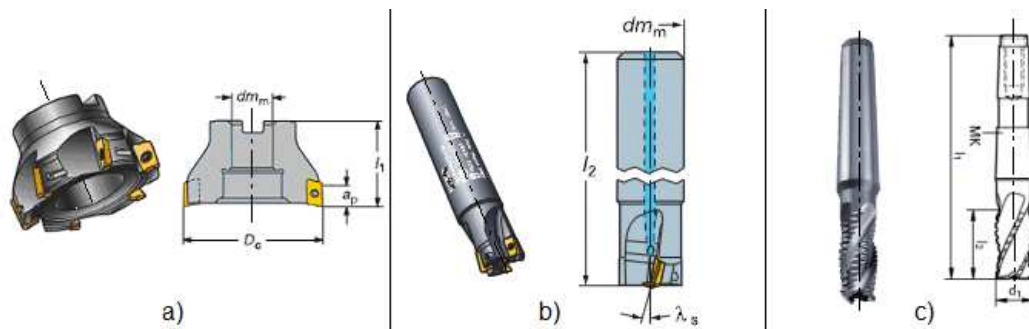
Rozdělení fréz dle konstrukce:

Mimo výše uvedeného rozdělení dle geometrického tvaru, lze frézy rozdělit do dalších skupin dle různých hledisek:

- dle tvaru zubu rozeznáváme frézy se zuby:
 - frézovanými (ostrobřité s rovinnou nebo lomenou hřbetní plochou),
 - podsoustruženými (hřbet tvořen Archimédovou spirálou),
 - litými (s válcovou hřbetní plochou).
- podle průběhu ostří dělíme frézy se zuby:
 - přímými - s přímými drážkami, rovnoběžnými s osou frézy,
 - šikmými - drážky skloněny pod určitým úhlem sklonu vůči ose nástroje,
 - ve šroubovici - drážky skloněné ve šroubovici pod úhlem 10-60° vůči ose nástroje.

Zuby šikmé a ve šroubovici mohou mít sklon buď pravý nebo levý. Dochází tak k tlumení rázů a přispívají ke klidnému chodu celé obráběcí soustavy.

- podle způsobu upnutí dělíme frézy na:
 - nástrčné (viz. obr. 2.7 a) - upínají se pomocí upínacích trnů,
 - stopkové - upnutí se provádí pomocí stopky (válcové (viz. obr. 2.7 b), kuželové (viz. obr. 2.7 c) [11].



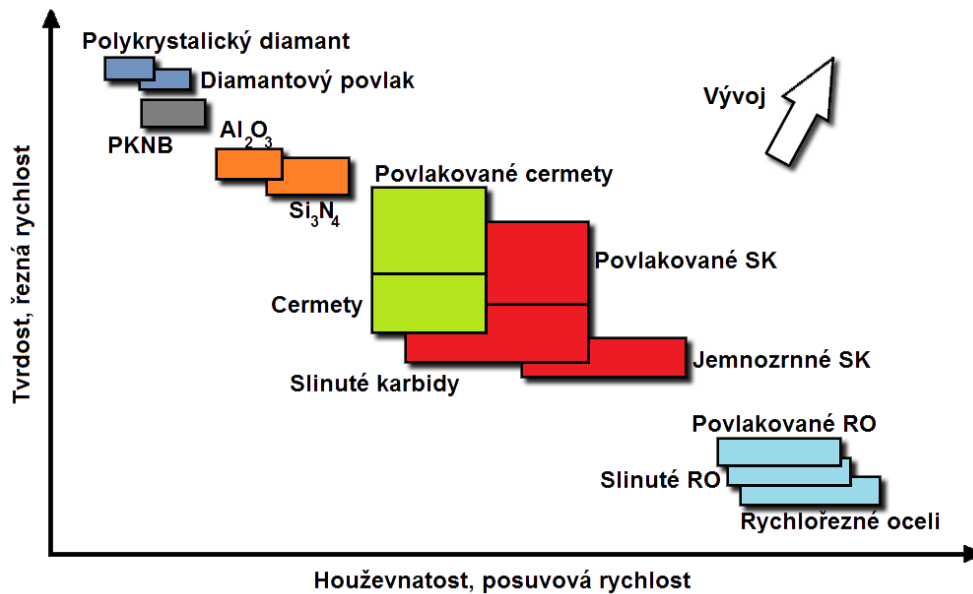
Obr. 2.7 Rozdělení fréz dle způsobu upnutí [11].

- dle smyslu otáčení dělíme frézy na:
 - pravořezné,
 - levořezné.
- podle konstrukčního uspořádání rozeznáváme frézy:
 - celistvé - vyrobené z vhodného rezného materiálu jako jeden kus,
 - s vkládanými zuby - kdy se do tělesa nástroje či jeho jednotlivých částí - ozubených segmentů, umístěných na monolitní tělo, vkládají rezné elementy (rezné destičky).

- dle počtu zubů vzhledem k průměru nástroje rozeznáváme frézovací nástroje na:
 - o hrubozubé,
 - o polohrubozrné,
 - o jemnozubé.
- podle rozteče zubů na frézy s roztečí :
 - o velkou - fréza má po obvodě menší počet zubů a velké zubové rozteče - vhodné pro hrubovací operace,
 - o střední - větší počet zubů a středně malé zubové mezery - vhodné pro vysoké výkony,
 - o malou - mají velmi malé zubové mezery. Vhodné pro vysoké posuvy a obrábění s malou řeznou rychlostí (titanové slitiny),
 - o nestejnou - nestejná vzdálenost mezi břity je efektivním prostředkem k zamezení vibrací .
- podle použitého nástrojového materiálu:
 - o vhodnou volbou řezného materiálu lze optimalizovat jednotlivé operace a ovlivnit celkovou produktivitu obráběcího procesu. Nástrojové materiály se dělí do několika skupin a bude jim věnována podkapitola 2.3.2.
- samostatnou skupinu frézovacích nástrojů pak tvoří:
 - o frézovací hlavy - složené z několika částí (těleso hlavy, řezné destičky, upínací mechanismus),
 - o dělené frézy - řeznou část je možno po naostření opět nastavit na původní rozměr,
 - o frézy složené - jsou složeny z několika jednoduchých fréz, dle tvaru obráběné plochy, upnutých na jednom trnu [7, 11, 10, 8].

2.3.2 Rozdělení nástrojových materiálů

Stále se zvyšující požadavky na výkonnost obrábění vedly k intenzivnímu výzkumu v oblasti nástrojů, což vedlo k vývoji mnoha druhů výkonných a kvalitních řezných materiálů (viz. obr. 2.8). V současnosti je k dispozici široký sortiment řezných materiálů od nástrojových ocelí, slinutých karbidů, cermetů až po kubický nitrid boru či syntetický diamant. Každý z řezných materiálů je zpravidla vhodný jen pro určité aplikace - neexistuje žádný univerzální nástrojový materiál pro všechny obráběné materiály [8,10].



Obr. 2.8 Vývoj nástrojových materiálů [8].

Hlavními vlastnostmi každého řezného materiálu by měly být:

- dostatečná tvrdost, zajišťující odolnost proti opotřebení a plastické deformaci břitu,
- vysoká houževnatost, zajišťující odolnost proti lomu,
- chemicky neutrální chování vůči obráběnému materiálu a chemickou stabilitu, zajišťující odolnost proti oxidaci a difuzi,
- tepelná odolnost [8].

Nástrojové oceli

Nástrojová ocel je nejstarším používaným materiálem pro výrobu řezných nástrojů, jejíž historie sahá do období přelomu 19. a 20. století. Dle stupně legování ji lze rozdělit na:

- nástrojové oceli nelegované - uhlíkové - mají tvrdou martenzitickou strukturu. Není však schopna odolávat vyšším teplotám, kdy ztrácí vlivem popouštění řezivost. Proto je vhodná pouze pro operace s nízkými řeznými rychlostmi - ruční nářadí, pilové listy apod.,
- legované nástrojové oceli - nízko a středně legované - legury (Mn, Cr, V, W, Si, Ni, Mo) zvyšují prokalitelnost a tím odolnost oceli proti abrazi. Jsou vhodné pro výrobu namáhaných nástrojů, jako jsou stříhadla, formy, tvarové nástroje apod.,
- nástrojové oceli rychlořezné (RO nebo HSS) - vysocelegované - tyto oceli jsou legovány W, Mo, Cr, V a Co. Ro jsou tvořeny karbidovými částicemi a popuštěným martenzitem. Vhodné pro vysoké rychlosti obrábění.

Vlastnosti RO lze zlepšovat nitridováním, boridováním a povlakováním, čímž se zvýší tvrdost a odolnost břitu proti vysokým teplotám, což umožňuje zvýšení řezných podmínek nebo prodloužení trvanlivosti břitu [8].

Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (SK) patří mezi nejčastěji používané materiály pro obráběcí operace. Vyskytují se převážně ve formě břitových segmentů rozmanitých tvarů, určených dle použití pro jednotlivé obráběcí operace. Tyto břitové destičky se mechanicky upínají k tělu nástroje a společně tvoří kvalitní, výkonný a moderní nástroj. Ze samotného názvu vyplývá, že výborné funkční vlastnosti jsou dány přítomností tvrdých karbidických částic o velikosti 1-10 μm , které jsou k sobě vázány houževnatým kovovým pojivem. Mezi nejpoužívanější patří karbid wolframu (WC), titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC). Jako pojivo se ve většině případů používá kobalt (Co). Jde o produkt práškové metalurgie, která zahrnuje několik fází:

- výroba prášku,
- lisování polotovarů,
- slinování při vysokých teplotách (1300-1700°C),
- tvarování polotovarů,
- povlakování [10, 8].

SK lze obecně rozdělit na povlakované, které jsou užívány častěji, dále pak na nepovlakované. Povlak zvyšuje výkonnost a trvanlivost břitu, čímž se zvyšuje jeho celková efektivita. Může být jednovrstvý, popřípadě i vícevrstvý, nanášený metodou chemickou CVD nebo fyzikální PVD. Povlaky jsou obvykle na bázi TiC, TiN, Al_2O_3 , TiCN, apod. a jejich tloušťka činí 3-5 μm [10, 8].

Pro velký počet nejrůznějších možností použití byly vyvinuty slinuté karbidy se specifickými vlastnostmi. Aby bylo možné popsat určitý druh SK, byl vyvinut klasifikační systém ISO 513 (viz. tab. 2.1) [10, 8].

Tab. 2.1 Rozdělení slinutých karbidů dle ISO 513 [10, 8].

P	Slitiny na bázi železa s plynulou třískou - ocel, korozivzdorná ocel
M	Slitiny kovů s dlouhou i krátkou třískou - korozivzdorná, žáruvzdorná ocel
K	Slitiny na bázi železa s krátkou třískou - šedá litina, kalená ocel, apod.
N	Neželezné kovy - Al, Cu, apod.
S	Speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti
H	Tvrzené materiály

Cermety

Jedná se o řezné tvrdé kovokeramické materiály, u nichž jsou tvrdé složky tvořeny karbidy TiC, TiCN, TiN nebo WC. Jde o keramické částice, spojené kovovým pojivem. Mají vysokou odolnost proti difúznímu opotřebení a tvorbě nárůstku, chemickou stabilitu, tvrdost za tepla. Jsou vhodné pro dokončovací operace s vysokými řeznými rychlostmi a malými průřezy třísek [10, 8].

Řezná keramika

Keramické řezné materiály jsou tvrdé, mají vysokou tvrdost za tepla a chemicky nereagují s materiálem obrobku. Mohou být použity při vysokých řezných rychlostech s dlouhou trvanlivostí břitů. Rozlišujeme dva základní typy keramiky:

- oxidická keramika - na bázi Al_2O_3 ,
- neoxidická - nitridová na bázi Si_3N_4 .

Oxidická keramika se dále rozděluje na:

- čistá keramika - Al_2O_3 ,
- polosměsná - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$,
- směsná - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, apod.) [10, 8].

Kubický nitrid bóru (KNB)

Je zvláště tvrdý řezný materiál, který se v přírodě volně nenachází. Má vynikající výkonnost, vykazuje mimořádnou tvrdost i za vysokých teplot (2000°C), velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení a výbornou chemickou stabilitu ve styku s železem, nebo jinými kovy. KNB se vyrábí za vysokých tlaků a teplot, jejichž působením se dosáhne spojení kubických krystalů bóru s keramickým nebo kovovým pojivem. Vhodné pro obrábění vysoce tvrdých materiálů (nad 48 HRC), u měkkých obrobků dochází k rychlému opotřebení [10, 8].

Polykrystalický diamant (PKD)

Nejtvrdším známým materiálem je přírodní monokrystalický diamant, jehož tvrdosti téměř dosahuje syntetický polykrystalický diamant. Jeho mimořádná tvrdost umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu opotřebení. Jemné krystaly diamantu jsou spojovány slinováním za působení vysokých teplot a tlaků. PKD je doporučován pro obrábění slitin hliníku a křemíku, umělých hmot, keramiky kompozitních materiálů apod.. I přes svoji pevnost a tvrdost není pro svoji afinitu použitelný k obrábění železných materiálů, protože jeho opotřebení je velmi rychlé [10, 8].

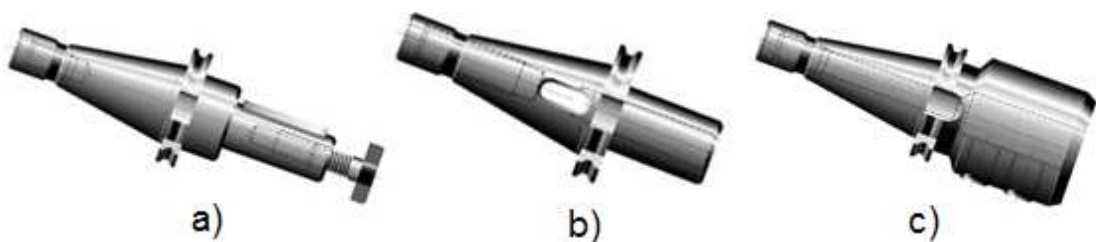
2.3.3 Základní druhy upínání frézovacích nástrojů

Současným záběrem několika zubů nástroje v průběhu frézovacího procesu vznikají velké řezné síly. Vysoké požadavky na řezné nástroje, jako například minimální házivost, kvalitní vyvážení, dostatečná upínací síla při vysokých otáčkách apod., určují podmínky na upínací systém těchto nástrojů. Fréza i obrobek musí být řádně upnuty, aby nedocházelo k vibračním, deformacím obrobku a tím vzniku nechtěných nepřesností a snižování životnosti břitů. Z uvedených důvodů jsou na upínací zařízení kladeny velké požadavky, aby byl nástroj pevně, bezpečně a přesně upnut [7].

Pro upínání frézovacích nástrojů se používají různé druhy systémů, mezi něž patří upínání pomocí frézovacích trnů (viz. obr. 2.9 a). Tyto trny se využívají pro upínání čelních nástrčných fréz a frézovacích hlav. Upínací kužel frézovacích trnů a pracovního vřetena může být buď metrický - s kuželovitostí 1:20, nebo Morse kužel 1:19 - 20, či strmý 1:3,5. Metrický a Morse kužel jsou samosvorné a mohou přenést kroutící moment (dále jen MK) z vřetena na frézovací trn. Trny s těmito kuželi se nesnadno vyjímají z pracovního vřetena. Strmý kužel pouze středí trn ve vřeteni a MK se zde přenáší dvěma unášecími kameny. Poloha frézy na dlouhém trnu se zajišťuje volně navlečenými rozpěracími kroužky na frézovacím trnu. Aby bylo upnutí nástrojů na frézovacím trnu co nejtuzší, upínají se frézy co nejbližší k vřeteni stroje [11].

Frézy s kuželovou stopkou se upínají redukčními pouzdry (viz. obr. 2.9 b) přímo do upínacího kužele vřetena stroje. Redukční pouzdro se používá také tehdy, neshoduje-li se kužel frézovacího trnu s kuželem vřetena [11].

Frézy s válcovou stopkou se upínají do vřetena stroje při použití sklíčidla s upínacím trnem (viz. obr. 2.9 c) nebo pomocí kleštinového upínacího pouzdra [7, 11].



Obr. 2.9 Základní druhy upínačů [27].

Mezi další, stále častěji používané upínací systémy s malou házivostí patří upínání tepelné, tzv. hydroupínání a silové deformační.

- Princip tepelného upnutí (viz. obr. 2.10) spočívá v teplotní roztažnosti materiálu, kdy dojde vlivem ohřevu držáku ke zvětšení upínacího otvoru, do kterého se následně vloží určený nástroj. Následujícím ochlazením dojde ke smrštění otvoru a tím k upnutí nástroje [11].



Obr. 2.10 System tepelného upínání [28].

- Základem hydro-upínání (viz. obr. 2.11) je zvyšování tlaku kapaliny stavitelným šroubem, tlačícím na pístek. Kapalina tlačí na stěny rozpínacího pouzdra v držáku, do kterého je vkládán nástroj. Po dosažení patřičného tlaku dojde k pevnému upnutí nástroje v pouzdře [11].



Obr. 2.11 System hydro-upínání (schematické a praktické znázornění) [29].

- Silové deformační upínání - polygonální (viz. obr. 2.13) využívá pro upnutí nástroje elastické deformace upínače, které umožňuje jeho opakovatelné použití, stejně jako u předchozích systémů [11].



Obr. 2.12 System silového deformačního upínání (schematické a praktické znázornění) [29].

3 NÁVRH EXPERIMENTU

Cílem této diplomové práce je sledování silových změn během operace čelního frézování při excentrickém polohování nástroje vůči obrobku a porovnání experimentálních hodnot s teoretickými.

Tato kapitola obsahuje rozbor návrhu experimentální zkoušky, včetně volby obráběného materiálu, řezných podmínek, vhodného zařízení a experimentálního měřicího příslušenství. Dále pak teoretický výpočet hodnot řezných sil a jejich souvisejících parametrů, které by se měli blížit hodnotám zjištěných experimentem.

3.1 Parametry navrhovaného experimentu

Tato část se zabývá rozplánováním veškerých hledisek provedeného experimentu. Jednotlivým aspektům se tato část věnuje individuálně.

3.1.1 Volba obráběcího stroje

Jako obráběcí stroj pro realizaci celého experimentu byla vybrána vertikální frézka FB 32 V (viz. obr. 3.1) od strojírenského podniku TOS, která je součástí strojního vybavení dílen na půdě FSI VUT v Brně. Tento stroj je ovládán pomocí závěsného ovladače a je vhodný pro přesné kusové i sériové obrábění. Užitečné základní technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 3.1.



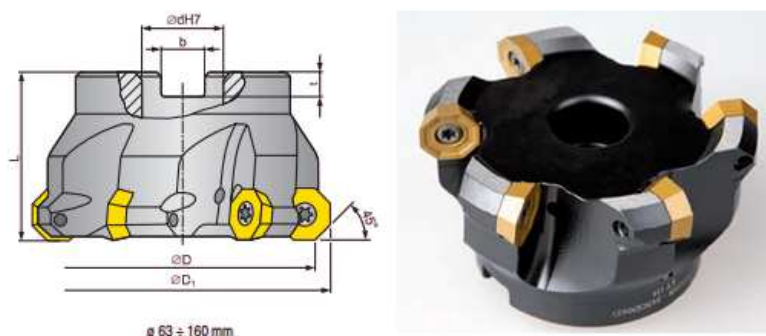
Obr. 3.1 Vertikální frézka FB 32 V od firmy TOS.

Tab. 3.1 Základní technické parametry vertikální frézky FB 32 V.

Maximální podélný zdvih (X - osa)	950 mm
Maximální příčný zdvih (Y - osa)	450 mm
Maximální vertikální zdvih (Z - osa)	320 mm
Rozměry stolu	450 x 1400 mm
Rozsah otáček vřetena	28 - 1400 min ⁻¹
Rozsah posuvů	10 - 2000 mm.min ⁻¹
Maximální zatížení stolu	800 kg

3.1.2 Volba obráběcího nástroje

Pro experiment byla zvolena nástrčná rovinná čelní fréza s označením **80A06R-S45OD06D** (viz. obr. 3.2) od výrobce Pramet Tools s.r.o, která je schopna pojmout až 6 vyměnitelných břitových destiček. Parametry použitého nástroje jsou uvedeny v tabulce 3.2.

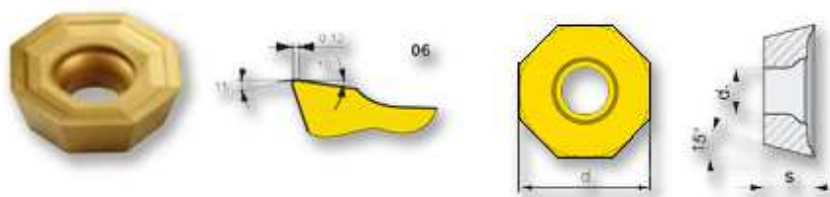


Obr. 3.2 Nástrčná čelní fréza 80A06R-S45OD06D s upnutými destičkami ODMT 0605ZZN od společnosti Pramet Tools s.r.o.[30].

Tab. 3.2 Základní technické parametry nástrčné čelní frézy 80A06R-S45OD06D, uváděných v nabídkovém katalogu společnosti Pramet Tools s.r.o. [30]

ØD ₁ [mm]	ØD [mm]	ØdH7 [mm]	L [mm]	b [mm]	t [mm]	Z* [-]
89,5	80	27	50	12,4	7	6

Fréza byla osazena jednou vyměnitelnou břitovou destičkou ve tvaru osmihranu, uváděná v katalogu společnosti Pramet Tools s.r.o. pod označením **ODMT 0605ZZN** (viz. obr. 3.3). Břitová destička je vyrobena ze slinutého karbidu 5026, s povlakováním metodou MTCVD. Jedná se o destičku s mírně pozitivním úhlem čela, úhel nastavení hlavního ostří je $\kappa_r = 45^\circ$. Je vhodná pro obrábění oceli, litiny i korozivzdorných ocelí, podmíněně žáruvzdorných a kalených ocelí. Parametry destičky udávané výrobcem jsou uvedeny v tab. 3.3 [30].



Obr. 3.3 Použitá výměnná břitová destička ODMT 0605ZZN od společnosti Pramet Tools s.r.o. včetně profilu hlavního břitu [30].

Tab. 3.3 Základní technické parametry výměnné břitové destičky ODMT 0605ZZN, uváděných v nabídkovém katalogu společnosti Pramet Tools s.r.o. [30]

materiál	Ød [mm]	s [mm]	Ød ₁ [mm]	f _z [mm*zub-1]	a _p [mm]
5026	15,875	5,56	5,5	0,12 - 0,4	1 - 8,6

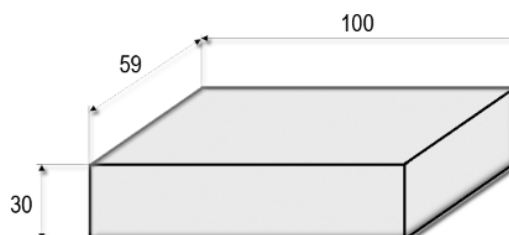
3.1.3 Volba obráběného materiálu

K realizaci experimentu byl pro obrábění čelní frézou zvolen materiál s označením dle DIN C45 (Ck45), shodný s označením dle starého značení ČSN 12 050. Jedná se o uklidněnou konstrukční uhlíkovou ocel k zušlechťování. Použití oceli je vhodné pro výrobu hřídelí, ozubených kol, ojníc, pístnic, čepů a mimo jiné také frézovacích trnů a vrtacích tyčí. Chemické složení uvedeného materiálu jsou uvedeny v tabulce 3.4 [31].

Tab. 3.4 Chemické složení konstrukční uhlíkové oceli C45. [31]

Hmotnostní obsah prvků oceli C45							
C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]
0,42 - 0,5	0,5 - 0,8	0,17 - 0,37	max. 0,04	max. 0,04	max. 0,25	max. 0,3	max. 0,3

Obráběný vzorek z materiálu uvedeného výše má tvar kvádrů. Jeho předobrobené rozměry včetně grafického znázornění jsou patrné z obrázku 3.4.



Obr. 3.4 Tvar a rozměry obráběného vzorku.

Rozměry obrobku a nástroje byly vybrány s ohledem na splnění podmínky čelního frézování, aby byl průměr nástroje minimálně o 20 % vyšší než šířka záběru a_e .

3.1.4 Řezné podmínky

Vzhledem k parametrům použitého stroje, na kterém byl prováděn experiment, bylo nezbytné upravit řezné podmínky tak, aby nepřekračovaly maximální hodnoty parametrů stroje a co nejvíce se blížili hodnotám doporučených výrobcem nástrojů. Jde především o hodnoty otáček a posuvové rychlosti. Zvolené řezné podmínky experimentu jsou uvedeny v tabulce 3.5.

Tab. 3.5 Zvolené hodnoty řezných podmínek.

a_p [mm]	v_f [mm.min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	a_e [mm]
1	80	900	59

Výpočet řezné rychlosti dosazením do vztahu (2.1):

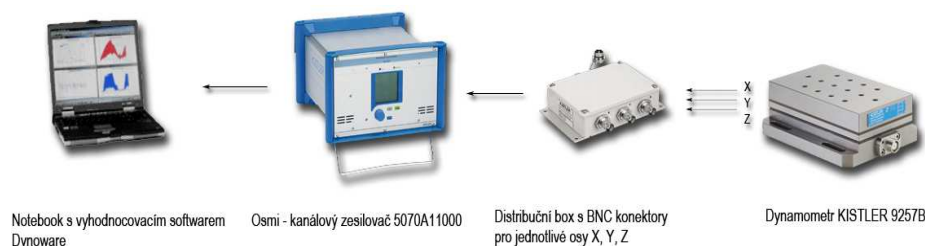
$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 80 \cdot 900}{1000} = 226,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad (3.1)$$

Výpočet posuvu na zub - odvozeno ze vztahu pro výpočet posuvové rychlosti (2.2):

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \Rightarrow f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} = \frac{80}{1 \cdot 900} = 0,89 \text{ mm} \quad (3.2)$$











3.1.5 Přístrojové vybavení pro měření sil

Pro snímání silového zatížení řezného nástroje v osách X, Y, Z byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER 9257B, tvořící s dalšími, vzájemně propojenými komponenty celou měřící aparaturu. Uvedený dynamometr je soustavou propojovacích kabelů spojen s distribučním boxem s BNC konektory pro snímání zatížení u jednotlivých os. Dále je měřený signál zesílen a zpracován v nábojovém zesilovači a převeden na elektrické napětí, které je přes AD převodník převedeno na signál pro následné vyhodnocení v PC pomocí softwaru Dynoware. Schematické znázornění celé měřící aparatury, včetně nejdůležitějších komponent je znázorněno na obr. 3.5. Seznam komponent měřící aparatury KISTLER je uveden v tab. 3.6 [32].



Obr. 3.5 Schematické znázornění zapojení měřící aparatury KISTLER [32, 33].

Tab. 3.6 Seznam nejdůležitějších komponent měřící aparatury KISTLER [32, 33].

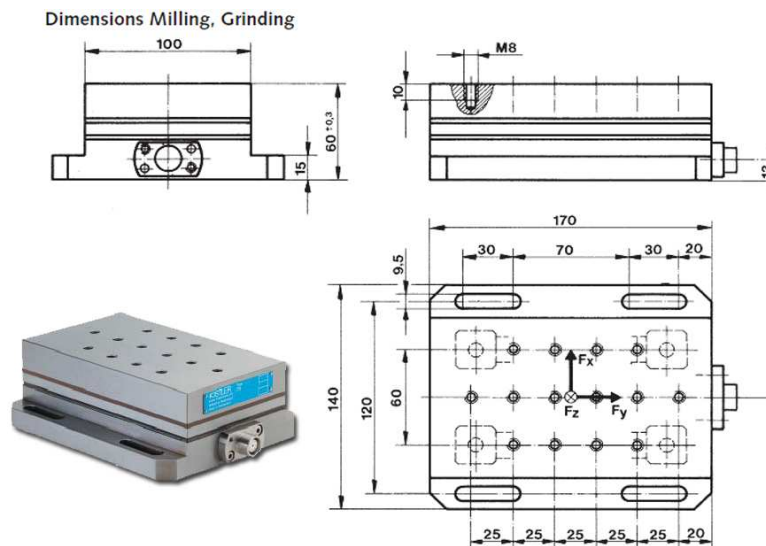
Komponenty měřící aparatury KISTLER		
Komponenta	Počet použitých kusů	Ilustrační obrázek
Dynamometr kistler typ 9257B	1	
Propojovací kabel typ 1631C5	1	
Prodlužovací kabel typ 1688B5	1	
Distribuční box s BNC konektory	1	
BNC - BNC kabel na vstup do zesilovače typ 1601B2	3	
8-kanálový nábojový zesilovač typ 5070A11000	1	
Propojovací kabel k A/D převodníkům typ 1500A7	1	
A/D převodník pro stolní PC (notebook) typ 2855A5	1	
karta PC-CARD-DAS, 8 kanálů, 16 bitů, vzorkovací frekvence 100 kHz	1	
Notebook Acer s vyhodnocovacím softwarem Dynoware	1	

3.1.5.1 Křemíkový dynamometr KISTLER 9257B

Dynamometr (viz.obr. 3.6) se skládá ze čtyř tříkomponentních silových snímačů, uložených s vysokým předpětím mezi horní a základovou desku. Každý ze snímačů obsahuje tři páry křemíkových destiček, jednu citlivou na tlakové zatížení ve směru osy Z další dvě reagující na smykové působení ve směrech os X a Y.

Výstupy ze čtyř zabudovaných silových snímačů jsou uvnitř dynamometru propojeny tak, aby bylo možné provádět vícesložkové měření sil a momentů. Osm

výstupních signálů je vyvedeno do konektoru s devíti výstupy. Tělo dynamometru je odolné proti korozi a proti vniknutí chladicí kapaliny a speciální tepelná izolační vrstva v horní části, činí dynamometr do značné míry necitlivý na teplotní vlivy. Tento typ dynamometru je používán nejčastěji pro měření sil při operacích soustružení, frézování, broušení. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 3.7 [33]. Kalibrační list dynamometru je vložen do přílohy 1 na konci práce.



Obr. 3.6 Dynamometr KISTLER 9257B včetně základních rozměrů [33].

Tab. 3.7 Technické parametry dynamometru KISTLER 9257B [33].

Technical Data			
Range	F_x, F_y, F_z	kN	-5 ... 5 ¹⁾
	F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	kN	-5 ... 10 ²⁾
Calibrated partial range 1	F_x, F_y	N	0 ... 500
	F_z	N	0 ... 1 000
Calibrated partial range 2	F_x, F_y	N	0 ... 50
	F_z	N	0 ... 100
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	-7,5/7,5
	F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	kN	-7,5/15
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	$\approx -7,5$
	F_z	pC/N	$\approx -3,7$
Linearity, all ranges		%FSO	$\leq \pm 1$
Hysteresis, all ranges		%FSO	$\leq 0,5$
Cross talk		%	$\leq \pm 2$
Rigidity	c_x, c_y	kN/ μ m	>1
	c_z	kN/ μ m	>2
Natural frequency	$f_n(x, y, z)$	kHz	$\approx 3,5$ ³⁾
Natural frequency (mounted on flanges)	$f_n(x, y)$	kHz	$\approx 2,3$ ⁴⁾
	$f_n(z)$	kHz	$\approx 3,5$ ⁴⁾
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	≈ 220
Insulation resistance (20 °C)		Ω	$> 10^{11}$
Ground insulation		Ω	$> 10^8$
Protection class EN60529		-	IP67 ⁵⁾
Weight		kg	7,3
Clamping area	mm		100x170
Connection			Fischer flange, 9 pol. neg.

3. 2 Teoretický výpočet sil

Jako vstupní hodnoty teoretické řezné síly F_c [N], vhodné k porovnání s experimentálně zjištěnými hodnotami byly použity různé typy teoretických výpočtů. První z nich vycházel ze vztahu (2.10), který byl získán z odborné publikace a již byl zmíněn výše v práci.

$$F_C = k_{c1} \cdot a_p \cdot f_z^{1-mc} \cdot \sin \kappa_r^{-mc} \cdot \sin \varphi^{1-mc} \quad (3.3)$$

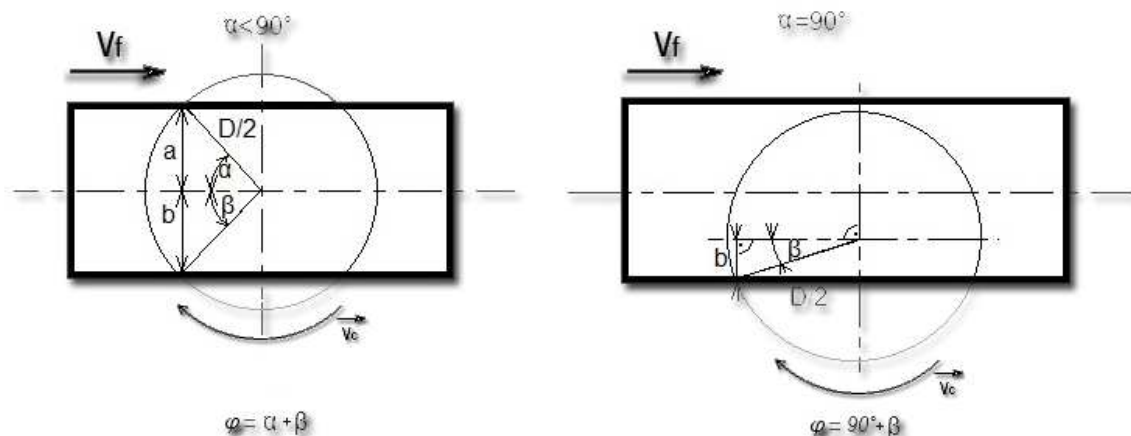
Pro další výpočet teoretické řezné síly, vhodné k porovnání byl použit vztah pro výpočet specifické řezné síly k_c [N.mm⁻²] (3.4), uvedený v metodických pokynech firmy Walter [34].

$$k_C = \frac{1-0,01 \cdot \gamma_0}{h_m^{m_c}} \cdot k_{c1} \quad (3.4)$$

Dosazením k_c a jmenovité tloušťky třísky A_{Di} do vzorce (2.8) uvedeného výše, lze získat hodnotu řezné síly.

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_{ci} \quad (3.5)$$

Pro oba vztahy bylo nutné vypočítat hodnoty úhlů záběru φ pro jednotlivé úběry materiálu. V tomto případě se vycházelo ze vzájemné polohy nástroje vůči obrobku (viz. obr. 3.8).



Obr. 3.8 Určování úhlu záběru dle vzájemné polohy nástroje a obrobku.

Z uvedeného obrázku je patrné, že při znalosti hodnot vzdáleností osy nástroje od hran obrobku (a , b) lze pro výpočet úhlu φ použít základních goniometrických funkcí. Postup výpočtu je potom následující:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{a}{D/2} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{29,5}{40} \right) = 47,518^\circ \quad (3.6)$$

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{b}{D/2}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{29,5}{40}\right) = 47,518^\circ \quad (3.7)$$

Výslednou hodnotu úhlu φ pak získáme součtem vypočtených úhlů α a β .

$$\varphi = \alpha + \beta = 47,518 + 47,518 = 95,038^\circ \quad (3.8)$$

Tento postup výpočtu (viz. 3.8) je však vhodný pouze v tom případě, obrábíme-li nástrojem do okamžiku, kdy je břit vybíhající ze záběru vně (viz. obr. 3.8 a), popřípadě souměrně s hranou obrobku. V situaci, kdy by břit vybíhal u spodní hrany obrobku (viz. obr. 3.8 b) - v našem případě u 12. úběru, musíme k existujícímu úhlu β přičíst 90° , nebo pro přímý výpočet úhlu použít vztah [34]:

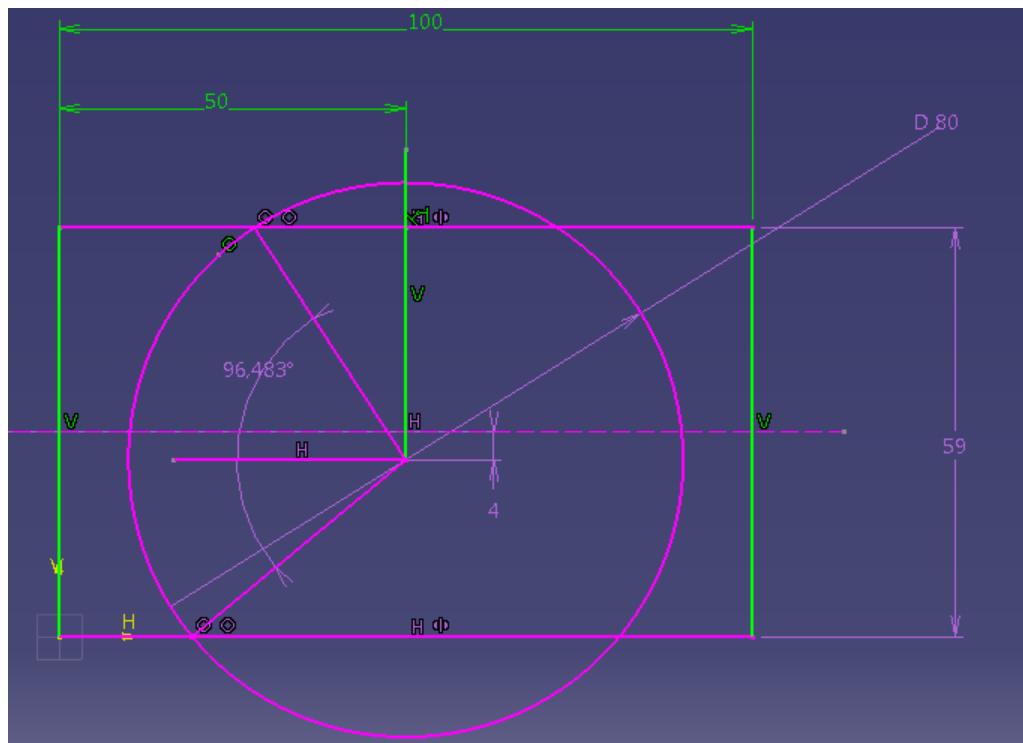
$$\varphi = 90^\circ + \sin^{-1}\left(\frac{ae-(D_c/2)}{(D_c/2)}\right) = 90^\circ + \sin^{-1}\left(\frac{58,5-(80/2)}{(80/2)}\right) = 117,549^\circ \quad (3.9)$$

Teoreticky vypočtené hodnoty úhlu záběru, včetně ostatních potřebných výpočtů jsou uvedeny v tab.***.

Tab. 3.8 Spočtené úhly záběru φ pro jednotlivé úběry materiálu.

Excentricita os	a	b	α	β	φ
[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[°]	[°]
0	29.5	29.5	47.519	47.519	95.038
1	30.5	28.5	49.685	45.439	95.124
2	31.5	27.5	51.952	43.433	95.385
3	32.5	26.5	54.341	41.491	95.832
4	33.5	25.5	56.877	39.606	96.483
5	34.5	24.5	59.598	37.770	97.369
6	35.5	23.5	62.561	35.980	98.541
7	36.5	22.5	65.853	34.229	100.082
8	37.5	21.5	69.636	32.514	102.149
9	38.5	20.5	74.259	30.830	105.090
10	39.5	19.5	80.931	29.176	110.108
11	40.5	18.5	90.000	27.549	117.549

Všechny vypočtené hodnoty úhlů pro jednotlivé záběry byly překontrolovány měřením pomocí CAD systému přeměření kót (viz. obr. 3.9).



Obr. 3.9 Kontrola úhlu záběru φ pomocí CAD softwaru.

3. 2. 1 Teoretický výpočet sil dle metodiky firmy Walter

Pro stanovení síly pomocí vztahu dle metodiky firmy Walter (výpočtový list viz. příloha 2), bylo nezbytné vypočítat střední tloušťku třísky h_m [mm] pro každý z provedených úběrů. K výpočtu byl použit vztah [34]

$$h_m = \frac{\{114,7 \cdot f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot (a_e/D)\}}{\varphi} = \frac{\{114,7 \cdot 0,089 \cdot \sin 45^\circ \cdot (59/80)\}}{95,038} = 0,056 \text{ mm} \quad (3.10)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} [mm²] získáme dosazením do vztahu (2.6) odvozeného výše.

$$A_{Di} = h_{Di} \cdot b_{Di} = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_i = 0,089 \cdot 1 \cdot \sin 95,038^\circ = 0,089 \text{ mm}^2 \quad (3.11)$$

Dosazením do vzorce (3.4) vypočteme hodnotu měrné řezné síly pro jeden záběr. Velikost měrné řezné síly k_{c1} a exponent m_c viz. tab. 3.9 byly získány z technické příručky Walter. Měrnou řeznou sílu lze definovat jako sílu ve směru hlavního řezného pohybu, vztaženou na průřez 1 mm² [35].

$$k_C = \frac{1-(0,01 \cdot \gamma_0)}{h_m^{m_c}} \cdot k_{c1} = \frac{1-(0,01 \cdot 5)}{0,056^{0,25}} \cdot 1700 = 3319,9 \text{ N} \cdot \text{mm}^2 \quad (3.12)$$

Tab. 3.9 Hodnoty měrné řezné síly k_{c1} a exponent m_c z katalogu Walter [34].

k_{c1} [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	1700
m_c [-]	0.25

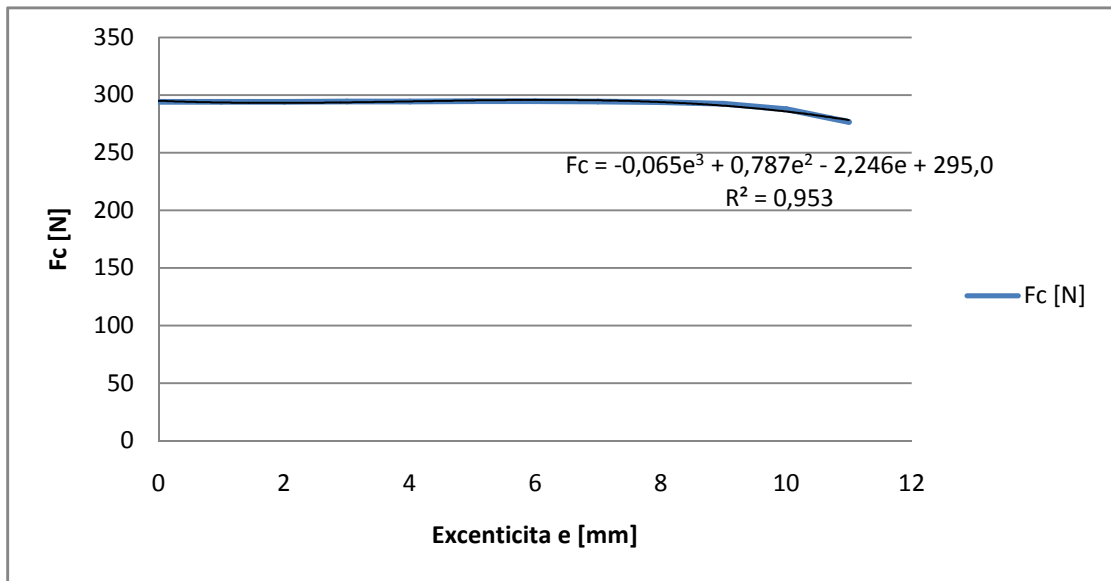
Řezná síla F [N] se pak vypočte dle již uvedeného vzorce (3.5.)

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_{ci} = 0,089 \cdot 3319,9 = 294,034 \text{ N} \quad (3.13)$$

Teoreticky vypočtené hodnoty řezných sil, včetně dalších potřebných výpočtů dle metodiky firmy Walter jsou uvedeny v tab. 3.10. Křivka závislosti vypočtených hodnot na excentricitě, doplněná regresní rovnicí polynomu třetího stupně je patrná z grafu 3.10.

Tab. 3.10 Hodnoty řezných sil F_c [N] v závislosti na změně excentricity spočtených dle metodiky Walter.

Excentricita os	a_e	h_m	k_c	F_c
[mm]	[mm]	[mm]	[$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	[N]
0	59	0.056	3320.721	294.034
1	59	0.056	3321.472	294.062
2	59	0.056	3323.748	294.140
3	59	0.055	3327.635	294.259
4	59	0.055	3333.272	294.396
5	59	0.055	3340.898	294.516
6	59	0.054	3350.906	294.555
7	59	0.053	3363.931	294.399
8	59	0.052	3381.167	293.817
9	59	0.051	3405.245	292.251
10	59	0.048	3445.187	287.572
11	58.5	0.045	3509.432	276.579



Obr. 3.10 Závislost vypočtených řezných sil na excentricitě vypočtených dle postupu firmy Walter.

3. 2. 2 Teoretický výpočet sil dle knihy Technologie obrábění

Pro stanovení síly pomocí vztahu (3.3) byly použity hodnoty úhlů záběru φ z výpočtů dle postupů firmy Walter. Hodnota měrné řezné síly a exponentu m_c byly získány z technické příručky firmy Sandvik Coromant a jsou uvedeny v tab. 3.11.

Tab. 3.11 Hodnoty měrné řezné síly k_{c1} a exponent m_c z technické příručky firmy Sandvik Coromant [10].

k_{c1} [N.mm ⁻²]	1600
m_c [-]	0.25

Dosažením všech potřebných hodnot do patřičného vzorce (3.3) dostaneme velikost teoretické řezné síly pro daný úběr.

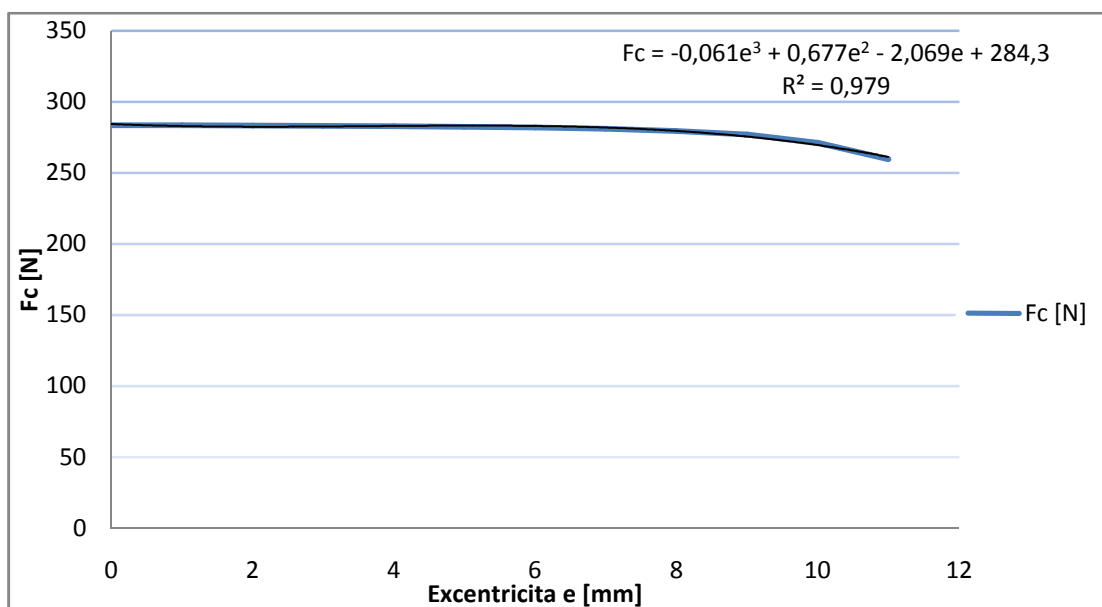
$$\begin{aligned}
 F_C &= k_{c1} \cdot a_p \cdot f_z^{(1-mc)} \cdot \sin \kappa_r^{-mc} \cdot \sin \varphi^{(1-mc)} = & (3.14) \\
 &= 1600 \cdot 1 \cdot 0,089^{(1-0,25)} \cdot \sin 45^{\circ(-0,25)} \cdot \sin 95,038^{\circ(1-0,25)} = \\
 &= 283,485 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Teoreticky vypočtené hodnoty řezných sil dle vztahů z knihy Technologie obrábění jsou uvedeny v tab. 3.12. Pro vykreslenou křivku závislosti těchto sil na hodnotě

excentricity, patrnou z grafu 3.11, byla vytvořena regresní rovnice polynomu třetího stupně.

Tab. 3.12 Spočtené hodnoty řezných sil F_c [N] v závislosti na excentricitě dle vztahů z knihy Technologie obrábění.

Excentricita os [mm]	a_e [mm]	F_c [N]
0	59	283.485
1	59	283.457
2	59	283.368
3	59	283.205
4	59	282.945
5	59	282.546
6	59	281.941
7	59	281.010
8	59	279.520
9	59	276.925
10	59	271.210
11	58.5	259.772



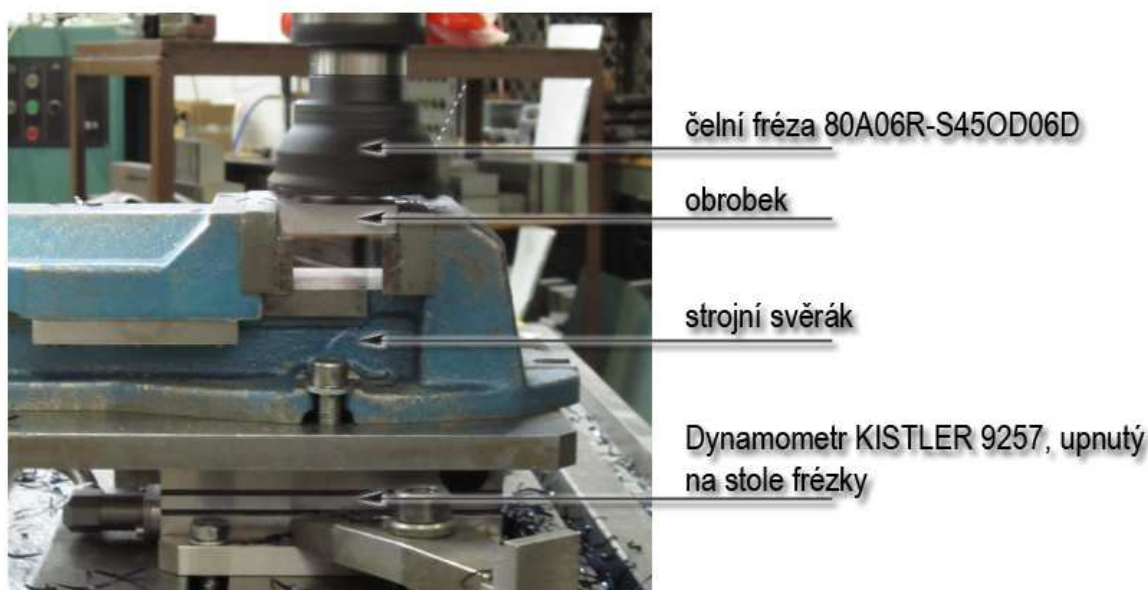
Obr. 3.11 Závislost vypočtených řezných sil na excentricitě vypočtených dle vztahů knihy Technologie obrábění.

4 REALIZACE EXPERIMENTU

Experiment probíhal v dílnách Ústavu strojírenské technologie na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Proveden byl na vertikální frézce FB 32 V, do jejíhož vřetena byla upnuta nástrčná čelní fréza 80A06R-S45OD06D, osazená jednou destičkou typu ODMT.

Obráběný polotovár byl upnut do svěřáku, který byl uchycen na horní desku dynamometru, umístěného na pracovním stole frézky (viz. obr. 4.1).

Na obr. 4.1 je zachycen moment záběru nástroje během experimentu.

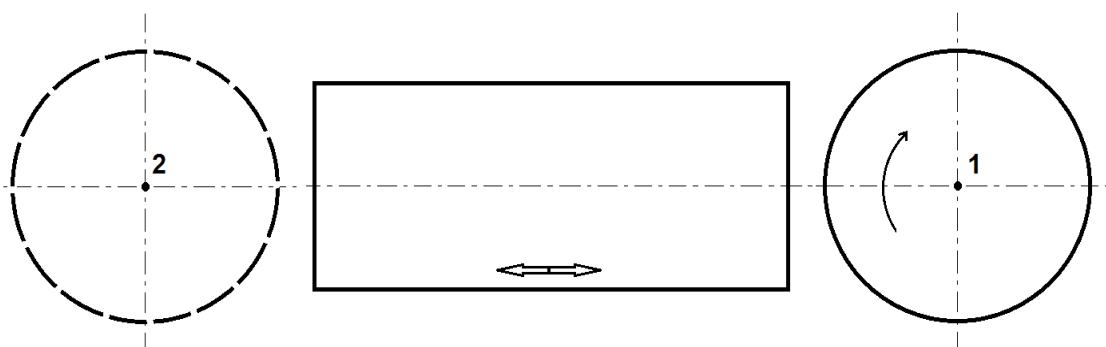


Obr. 4.1 Průběh experimentu.

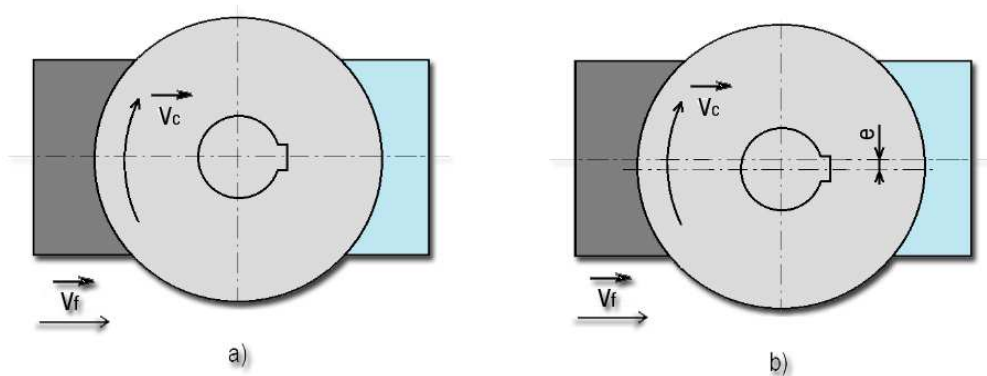
Realizace experimentu je založena na čelním frézování obrobku za sucha v sousledném směru za konstantního nastavení otáček a posuvu stroje a neměnné hloubky záběru nástroje. Experiment probíhal následujícím způsobem. Nejdříve byl proveden jeden zkušební horizontální řez materiálem s cílem zjistit, jak dlouho bude jeden takový řez dle nastavených řezných podmínek trvat (včetně doby potřebné na nájezd a přejezd nástroje). S pomocí stopek bylo zjištěno, že při stávajících podmínkách trval celý proces jednoho řezného cyklu 150 sekund. Tato hodnota včetně maximální hodnoty vzorkovací frekvence $f_v = 150$ Hz byla zadána do softwaru měřicí aparatury KISTLER.

Jak napovídá obrázek 4.2, výchozí postavení frézy se při prvním úběru nacházelo v bodě 1. Pomocí pracovního stolu stroje byla vycentrována osa frézy tak, aby její poloha byla totožná s podélnou osou obrobku (viz. obr. 4.3 a). Nastavením hloubky záběru v axiálním směru a spuštěním pracovního posuvu stolu současně se spuštěním měření byl realizován první měřený úběr. Jakmile nástroj dosáhl koncového bodu 2, bylo měření i posuv stolu zastaveno. Naměřená data (viz. obr.

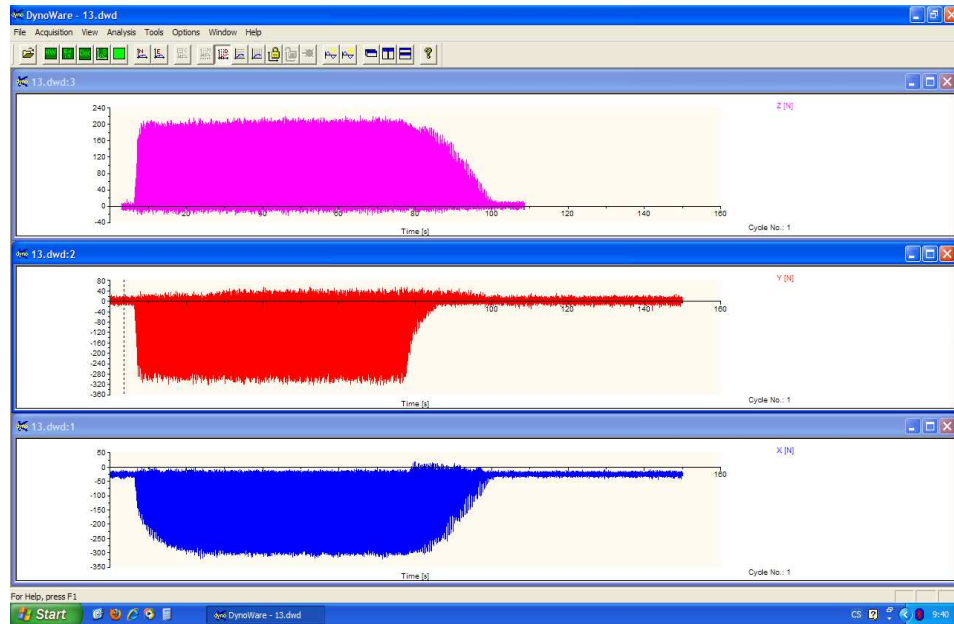
4.4) byla převedena v profesionálním programu Dynoware pomocí ASCII kódu do textového souboru k dalšímu statistickému zpracování za současného návratu nástroje do výchozí polohy 1. Následovalo posunutí nástroje o hodnotu hloubky úběru a excentricity (viz. obr. 4.3 b) a byl realizován následující měřený úběr. Další měření probíhala obdobným způsobem až do okamžiku, kdy břit nástroje kopíroval hranu obrobku. Konečná excentricita nástroje vůči obrobku činila 11 mm, tudíž bylo realizováno celkem 12 měřených úběrů.



Obr. 4.2 Postavení nástroje vůči obrobku během experimentu.

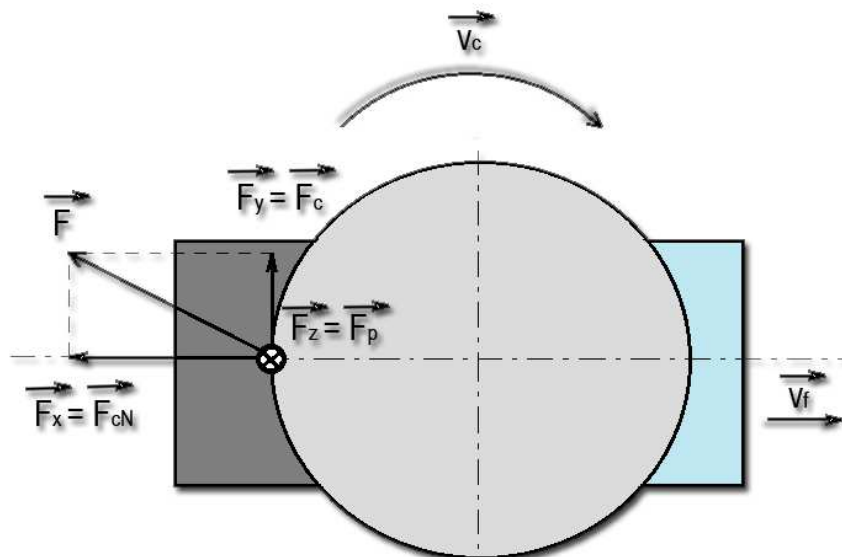


Obr. 4.3 Centrické a excentrické postavení frézovacího nástroje vůči obrobku.



Obr. 4.4 Výstup nefiltrovaných složek řezné síly z měření pomocí dynamometru, zobrazený v programu Dynoware .

Na obr. 4.5 je schematické znázornění silového zatížení při čelním sousledném frézování. Hodnoty sílových složek F_x , F_y , F_z , naměřených dynamometrem při experimentálních zkouškách odpovídají hodnotám řezných složek F_{cN} , F_c , F_p . Rozložení sil platí pouze pro okamžik zachycený na obrázku. Působíště a rozložení sil se mění v závislosti na poloze břitu.



Obr. 4.5 Schéma silového zatížení při čelním sousledném frézování [8].

Tvar třísek se v průběhu experimentu měnil pozvolna z šroubovitého na zvlněný stužkový tvar (viz. obr. 4.6).



a)



b)

Obr. 4.6 Tvar třísek a) na začátku b) na konci obráběcího procesu.

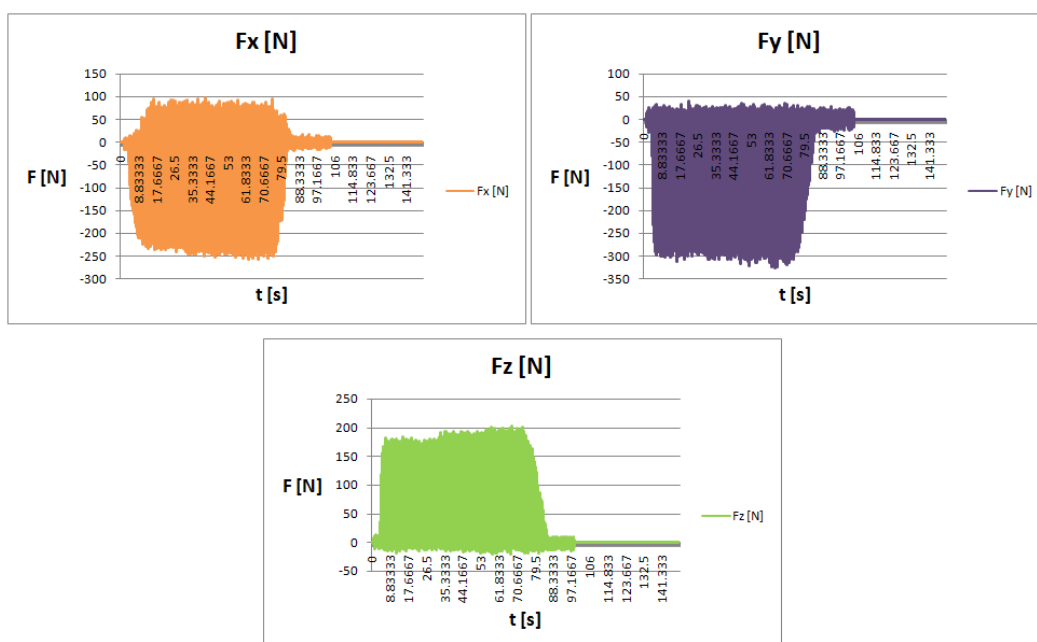
5 ANALÝZA SILOVÉHO ZÁZNAMU

Výstupem měření pomocí dynamometru bylo velké množství dat, obsahujících informace o složkách sil v jednotlivých osách, tedy F_x , F_y , F_z . Hodnoty těchto složek byly pro každý úběr převáděny pomocí softwaru Dynoware do textových souborů. Tyto soubory byly dále pomocí tabulkového procesoru MS Excel převedeny a formátovány do podoby přehledných tabulek, kde každá z těchto tabulek charakterizovala právě jednu konkrétní operaci čelního frézování s ohledem na polohu nástroje a obrobku.

Z naměřených složek F_x , F_y , F_z lze vypočítat hodnotu silové výslednice F , vyjádřenu vztahem [36]:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.14)$$

Naměřená data v každé tabulce obsahují 22 500 záznamů pro jednotlivé osy. Takové množství dat bylo dosaženo díky nastavené vysoké vzorkovací frekvenci dynamometru. Platí, že přesnost celé analýzy silového zatížení břitu nástroje je ovlivněna nastavením vysoké vzorkovací frekvence, neboť poskytuje větší množství vstupních dat, potřebných pro rozbor silového zatížení. Toto velké množství záznamů ovšem zahrnuje i nepodstatná a nadbytečná data. Jde především o data naměřená během náběhů nástroje do materiálu a přeběhů z materiálu obrobku (viz. obr. 5.1). Tyto hodnoty nám neposkytují žádné využitelné informace o silovém zatížení, které vzniká v průběhu odebírání materiálu, proto je můžeme ze souboru odstranit pomocí filtrace dat.



Obr. 5.1 Příklad nefiltrovaných naměřených hodnot (záznam z prvního měření).

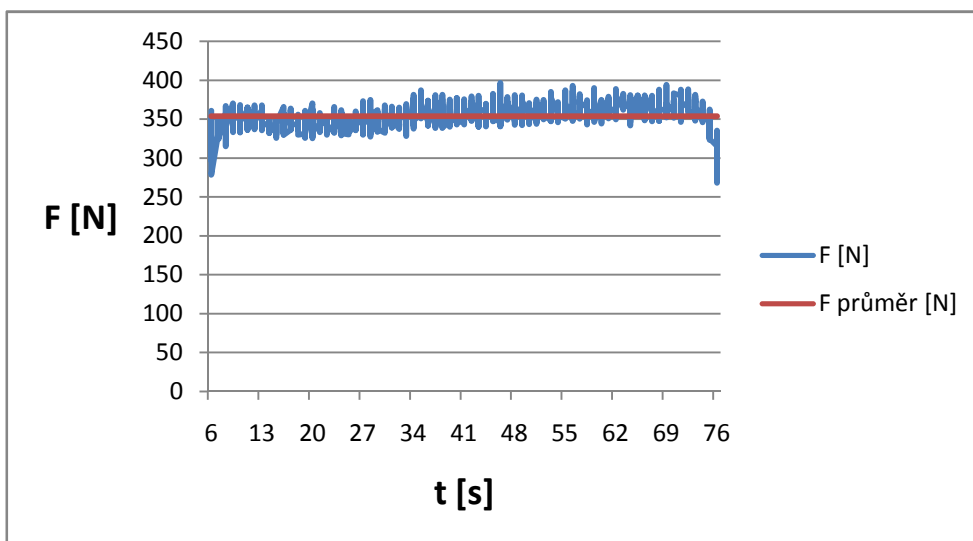
Budeme-li vycházet z předpokladu, že se velikost řezných sil mění v průběhu obrábění v čase podle aktuální polohy břitu, bude pro nás nejdůležitější úsek, dosahující maximálních hodnot. Tyto hodnoty odpovídají maximálnímu průřezu třísky, který vzniká v průběhu obrábění při každém otočení nástroje a bylo nutné je také vyfiltrovat. Filtrace těchto hodnot byla provedena tak, že se vycházelo z hodnoty zubové frekvence f [s^{-1}] (viz. vzorec 3.15), tedy otáček za jednu vteřinu, které břit frézy při daných řezných podmínkách během úběru materiálu provedl.

Při znalosti hodnot otáček stroje n a počtu břitů nástroje z , které v našem případě činí $n = 900 \text{ min}^{-1}$ a $z = 1$, dojdeme dosazením do vzorce 3.14 uvedeného níže k potřebnému výsledku zubové frekvence [36].

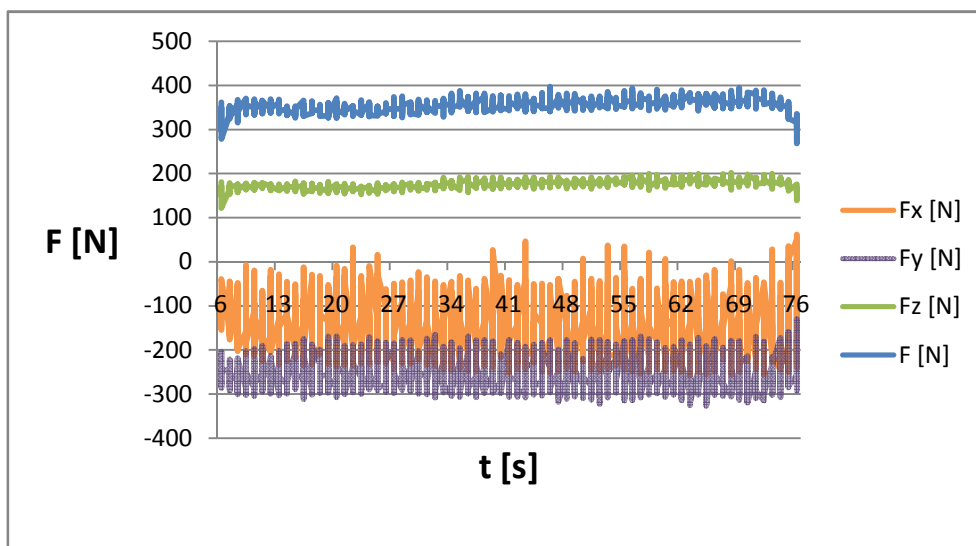
$$f = \frac{n}{60} \cdot z = \frac{900}{60} \cdot 1 = 15 \text{ s}^{-1} \quad (3.15)$$

Jelikož nám pro náš experiment vyšla hodnota zubové frekvence $f = 15 \text{ s}^{-1}$, lze tvrdit, že nás pro každou sekundu provedeného experimentu zajímá právě 15 nejvyšších hodnot. Tyto hodnoty odpovídají maximálnímu zatížení vztaženému na jednu otáčku nástroje, respektive zabírajícího břitu.

Z naměřených hodnot silového zatížení získaných při jednotlivých úběrech a grafů z nich vytvořených jasně vyplývá, že při každém obrábění zabírá nástroj do materiálu přibližně 100 sekund než dokončí každou operaci. To znamená při 15 otáčkách za sekundu 1500 hodnot pro jednotlivé změřené složky sil. Těchto 1500 hodnot bylo vyfiltrováno a přepočteno na aritmetický průměr pomocí tabulkového procesoru MS Excel. Z těchto hodnot byly vybrány pouze ty, při kterých byla fréza v plném záběru. To znamená, že nebyly zahrnuty hodnoty, které by zkreslovaly průběhy sil jako je najíždění a vyjíždění nástroje ze záběru. Výsledné filtrované hodnoty byly převedeny do grafů a proloženy hodnotou vypočteného aritmetického průměru (viz. obr. 5.2-13).



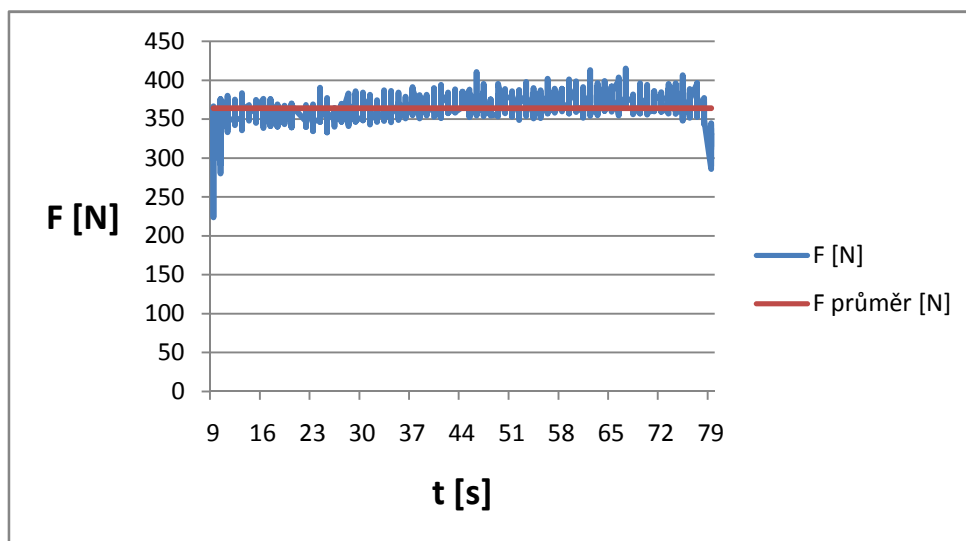
a)



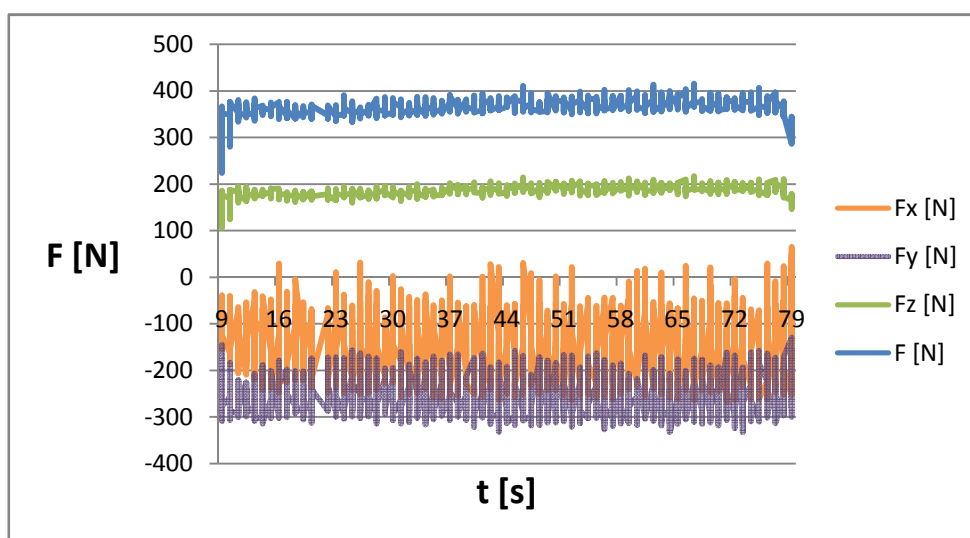
b)

Obr. 5.2 Časový průběh sílového zatížení při prvním úběru (excentricita 0 mm).

Na obr. 5.2 jsou uvedena grafická znázornění časových průběhů sil pro excentricitu 0 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



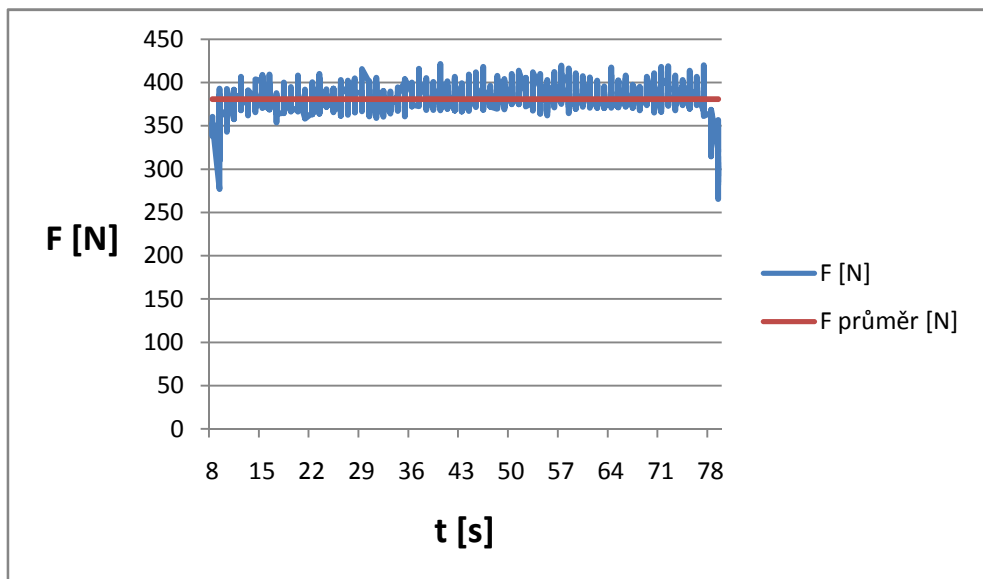
a)



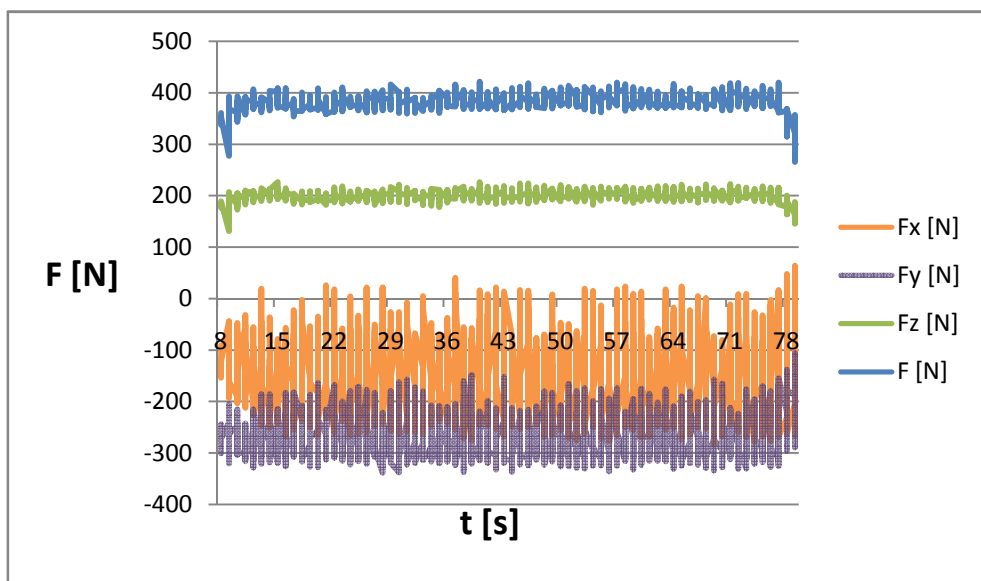
b)

Obr. 5.3 Časový průběh sílového zatížení při druhém úběru (excentricita 1 mm).

Na obr. 5.3 jsou uvedeny časové průběhy sil pro excentricitu 1 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



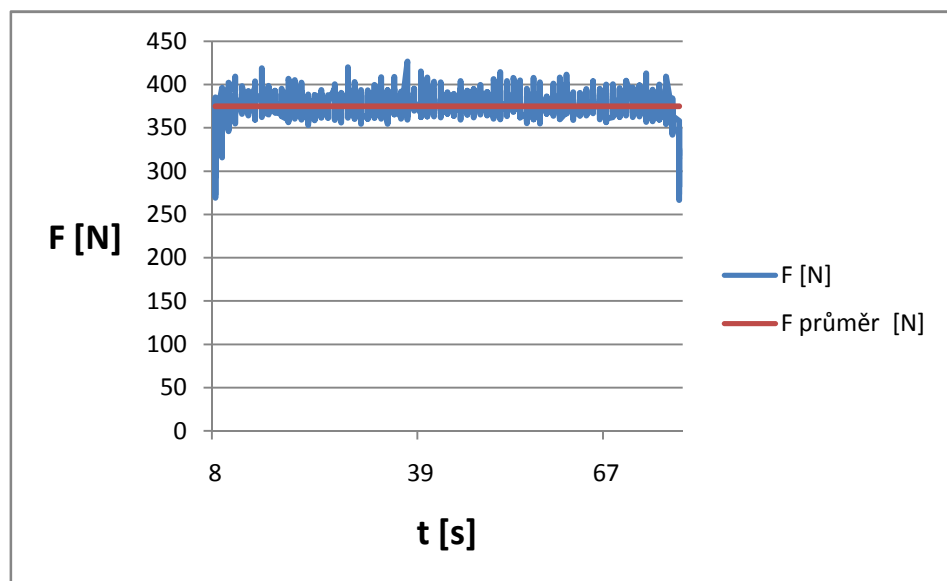
a)



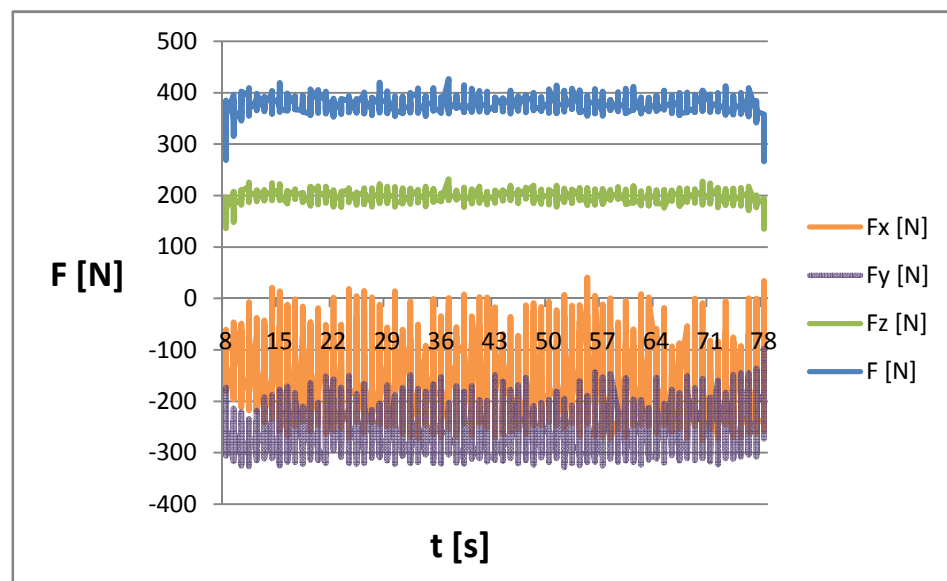
b)

Obr. 5.4 Časový průběh sílového zatížení při druhém úběru (excentricita 2 mm).

Na obr. 5.4 jsou uvedeny časové průběhy sil pro excentricitu 2 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



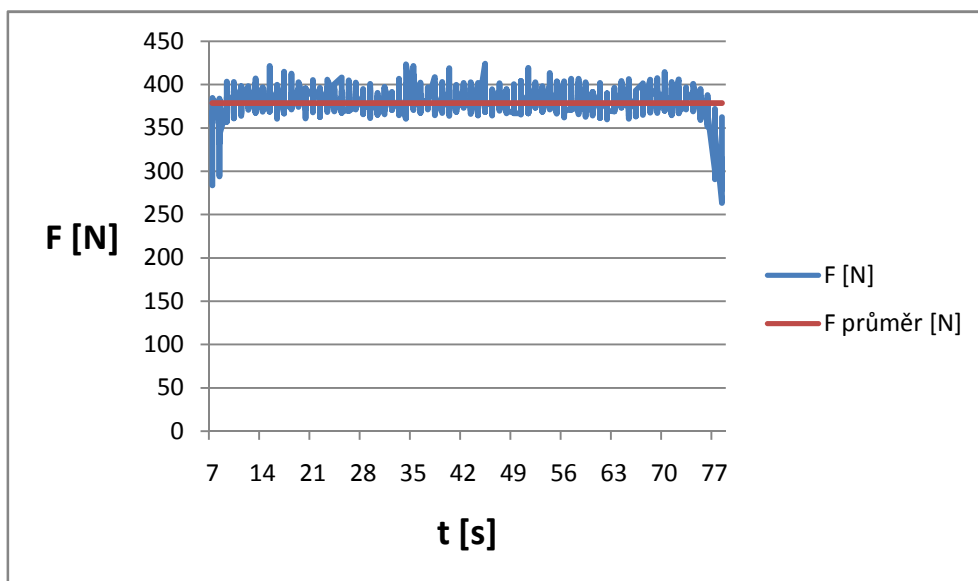
a)



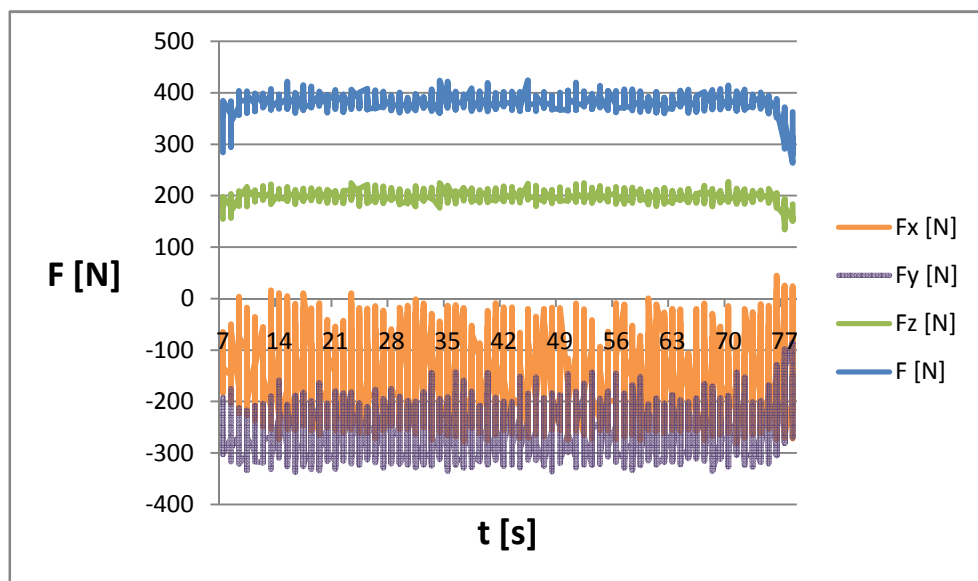
b)

Obr. 5.5 Časový průběh sílového zatížení při druhém úběru (excentricita 3 mm).

Na obr. 5.5 jsou grafická znázornění časových průběhů sil pro excentricitu 3 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



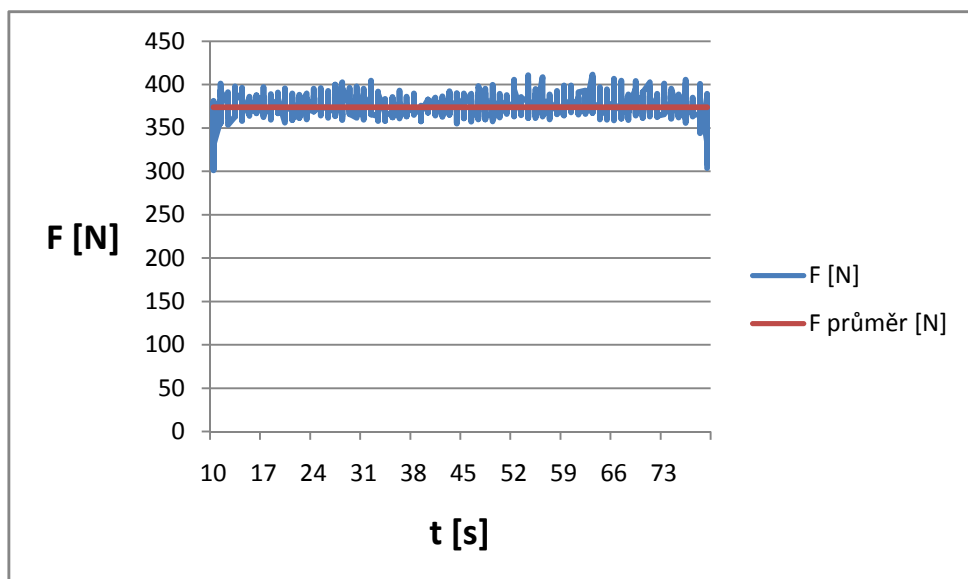
a)



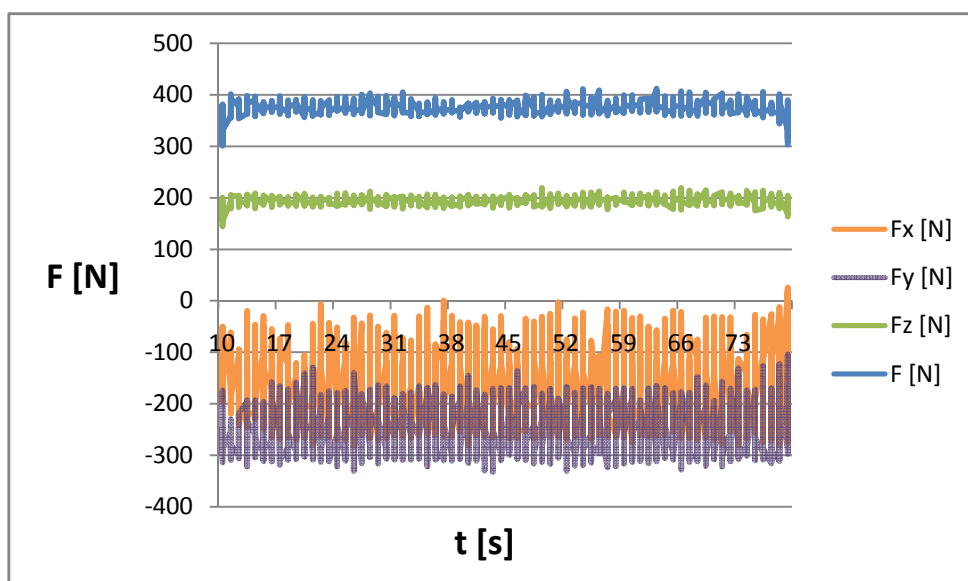
b)

Obr. 5.6 Časový průběh sílového zatížení při druhém úběru (excentricita 4 mm).

Na obr. 5.6 jsou uvedeny časové průběhy sil pro excentricitu 4 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



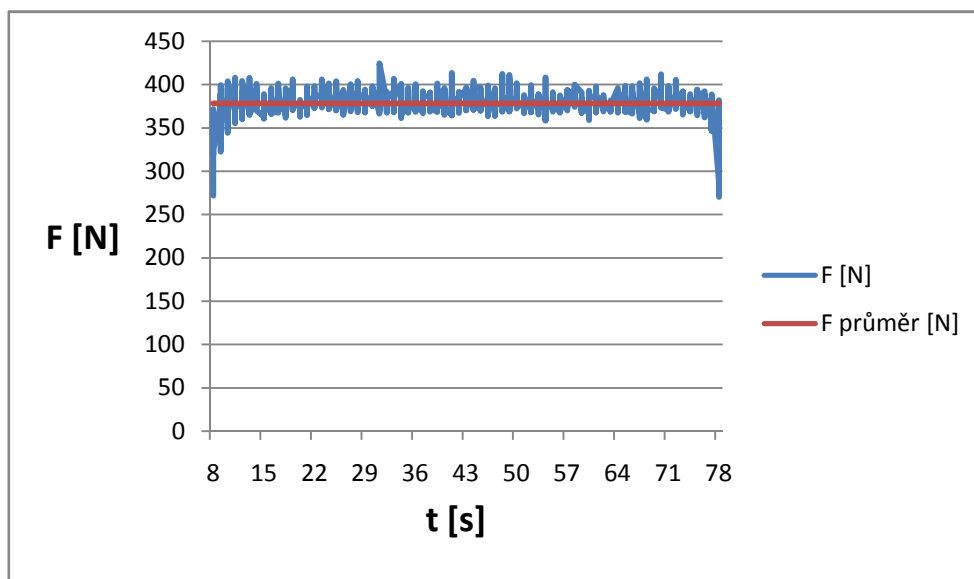
a)



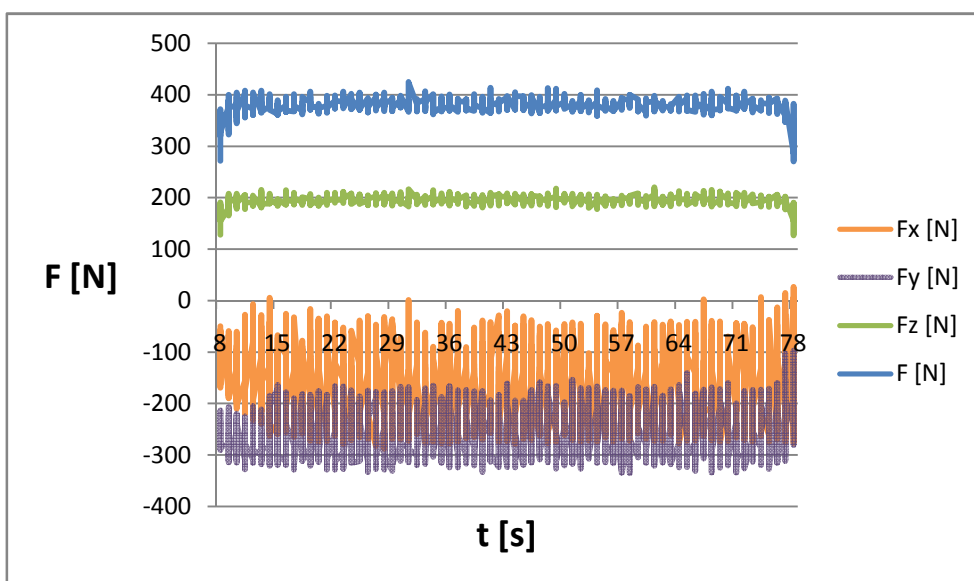
b)

Obr. 5.7 Časový průběh sílového zatížení při druhém úběru (excentricita 5 mm).

Na obr. 5.7 jsou znázorněny časové průběhy sil pro excentricitu 5 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



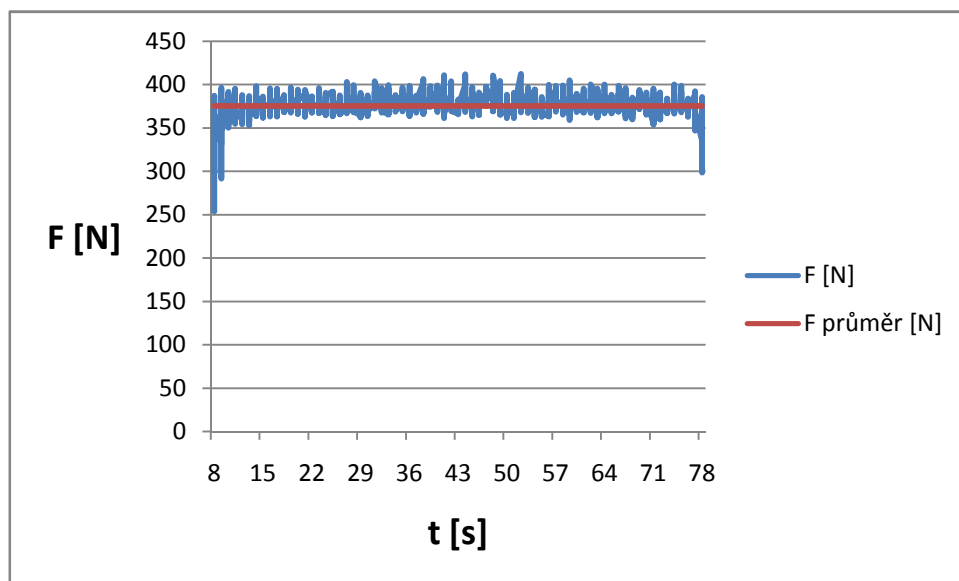
a)



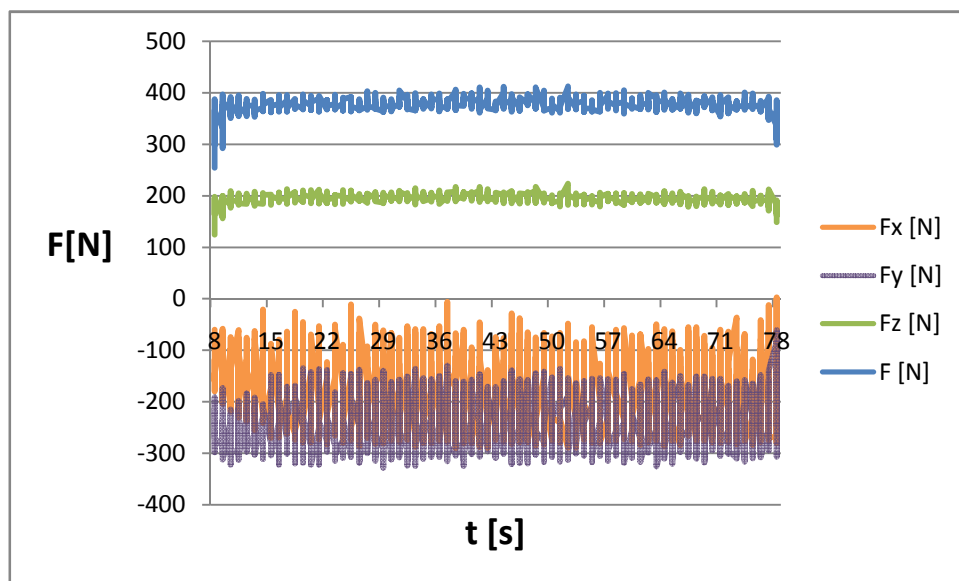
b)

Obr. 5.8 Časový průběh sílového zatížení při druhém úběru (excentricita 6 mm).

Na obr. 5.8 jsou zobrazeny časové průběhy sil pro excentricitu 6 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



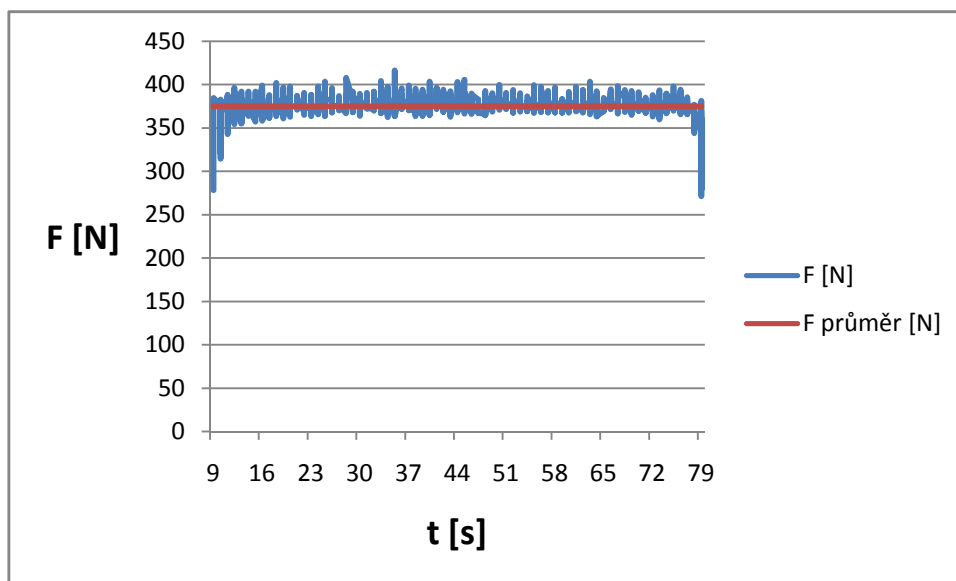
a)



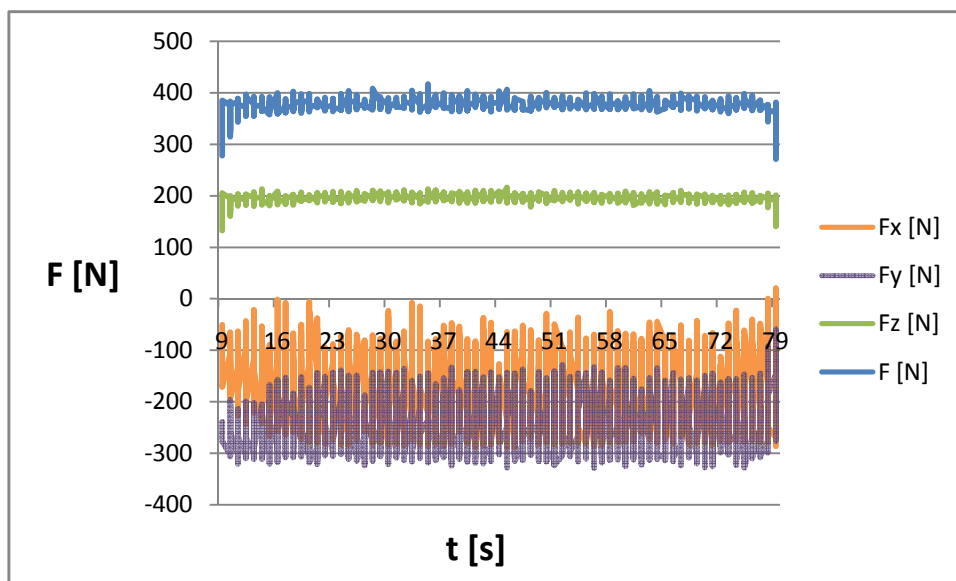
b)

Obr. 5.9 Časový průběh sílového zatížení při druhém úběru (excentricita 7 mm).

Na obr. 5.9 jsou uvedeny časové průběhy sil pro excentricitu 7 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



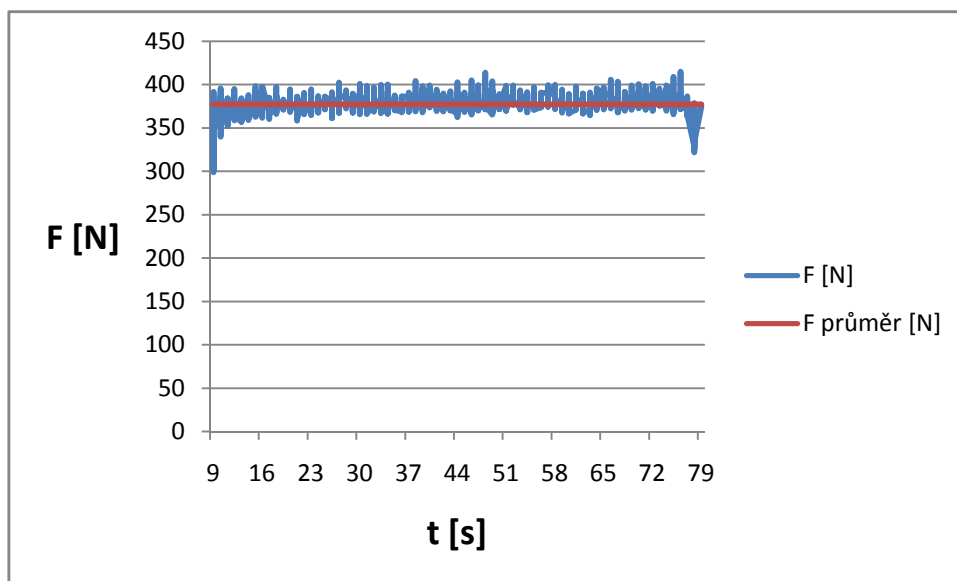
a)



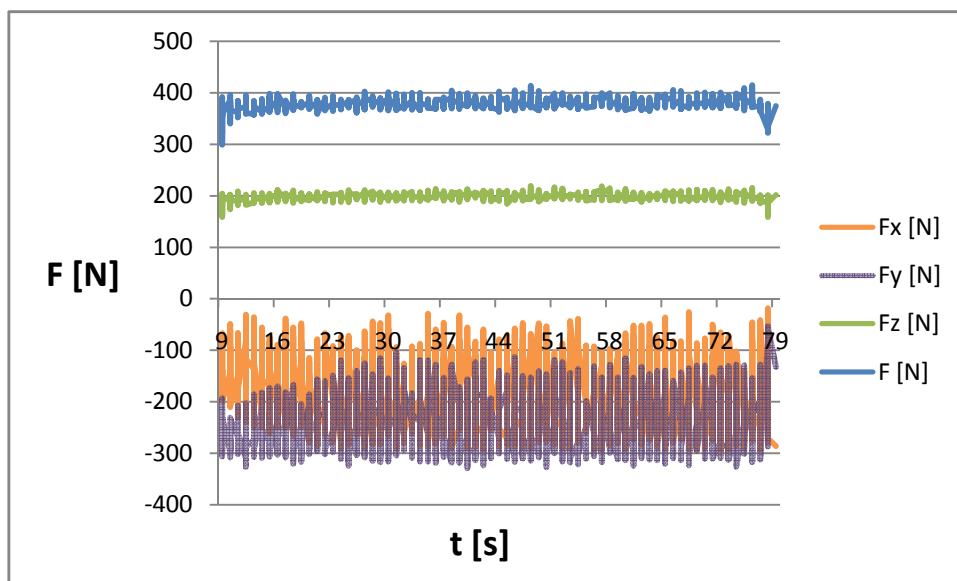
b)

Obr. 5.10 Časový průběh silového zatížení při druhém úběru (excentricita 8 mm).

Na obr. 5.10 jsou uvedena grafická znázornění časových průběhů sil pro excentricitu 8 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



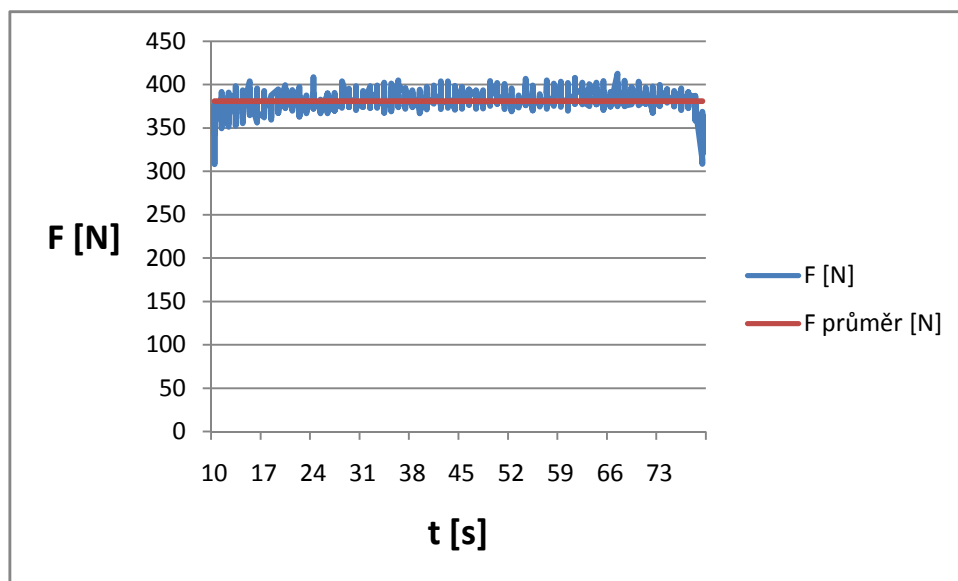
a)



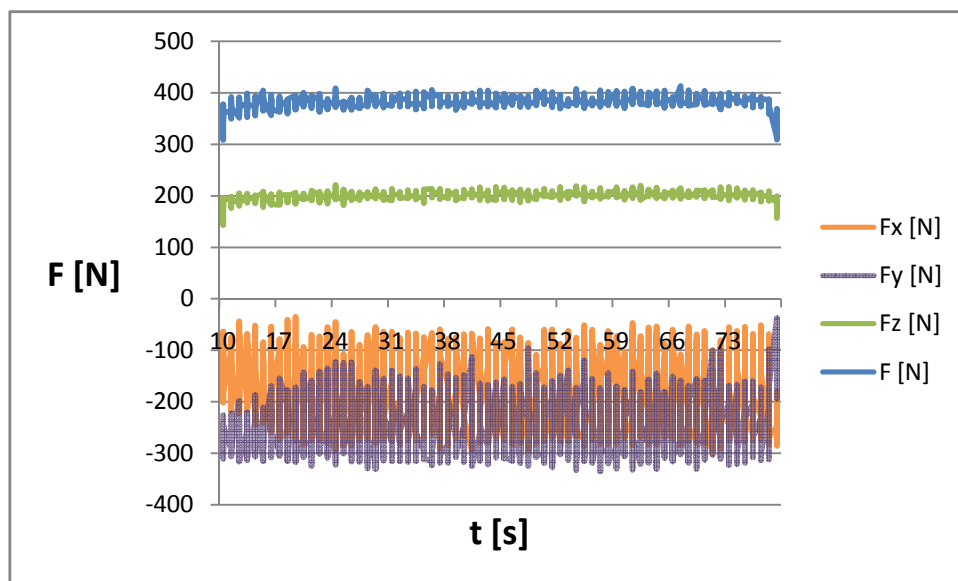
b)

Obr. 5.11 Časový průběh silového zatížení při druhém úběru (excentricita 9 mm).

Na obr. 5.11 jsou zobrazeny časové průběhy sil pro excentricitu 9 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



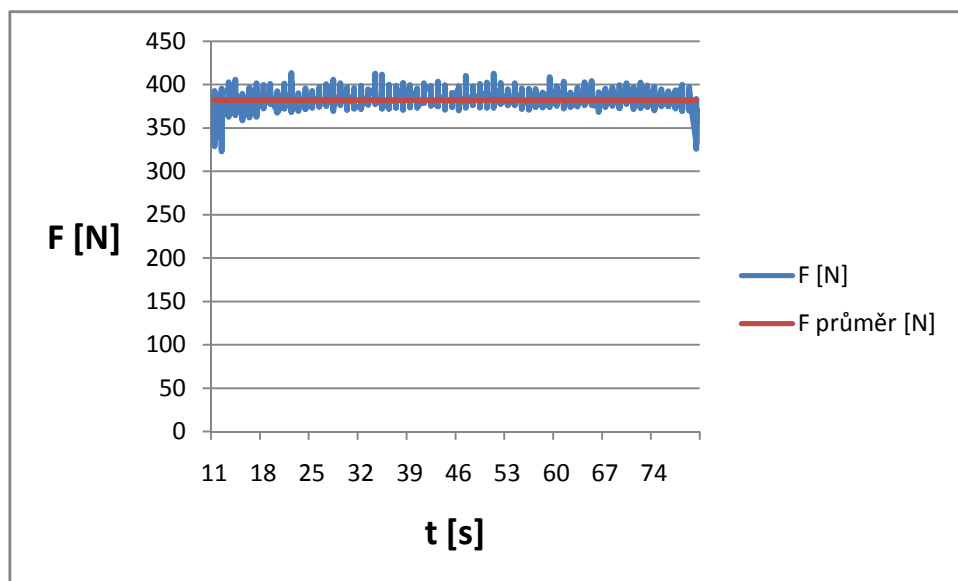
a)



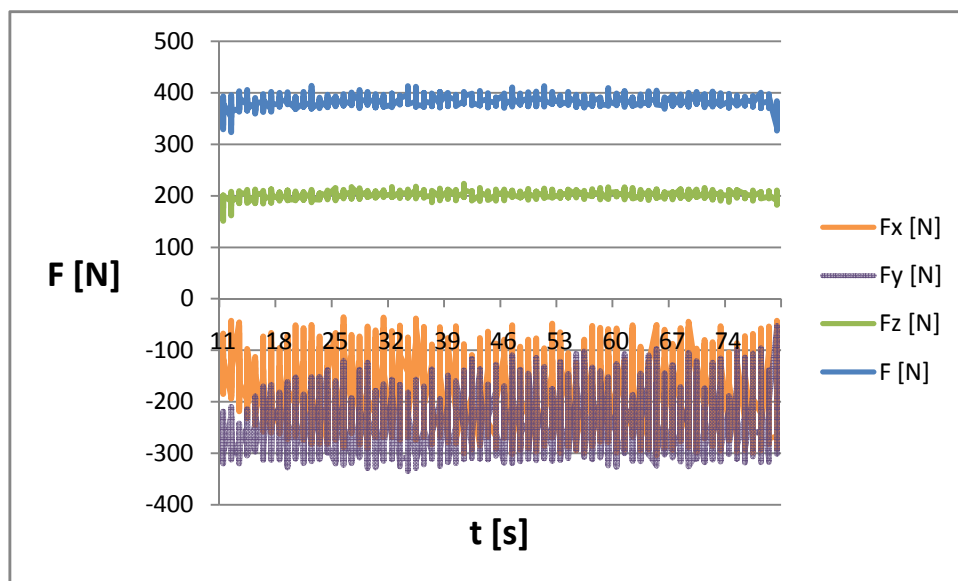
b)

Obr. 5.12 Časový průběh sílového zatížení při druhém úběru (excentricita 10 mm).

Na obr. 5.12 jsou uvedeny časové průběhy sil pro excentricitu 10 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.



a)



b)

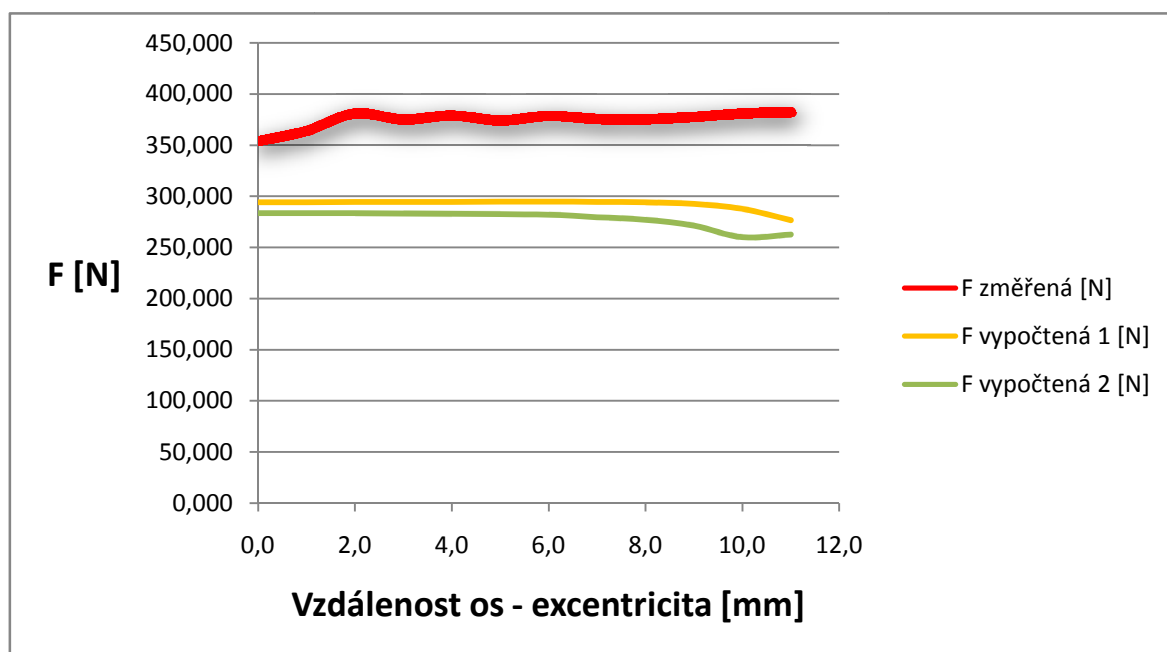
Obr. 5.13 Časový průběh sílového zatížení při druhém úběru (excentricita 11 mm).

Na obr. 5.13 jsou uvedena grafická znázornění časových průběhů sil pro excentricitu 11 mm. Graf a) znázorňuje vyfiltrované hodnoty, proložené aritmetickým průměrem, graf b) hodnoty průběhů složek sil a jejich výslednice.

Výsledné aritmetické průměry řezných sil z každé měřené operace byly zpracovány do tabulky (viz. tab. 5.1) a převedeny do grafu, kde jsou srovnány s teoretickými výpočty (viz. obr. 5.14).

Tab. 5.1 Porovnávací tabulka aritmetických průměrů naměřených a spočtených hodnot F_c [N] pro jednotlivé úběry materiálu.

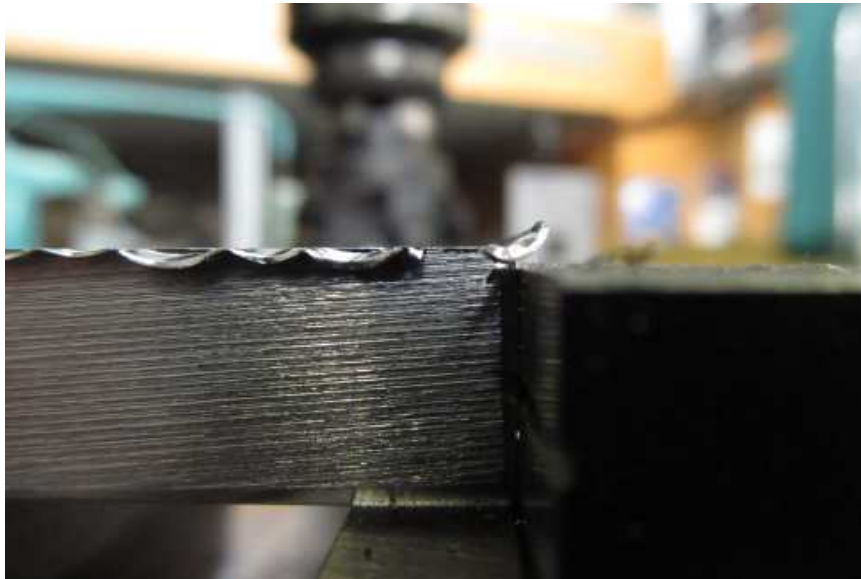
Excentricita os [mm]	F změřená [N]	F vypočtená 1 [N]	F vypočtená 2 [N]
0.0	353.560	294.035	283.485
1.0	363.720	294.062	283.457
2.0	380.640	294.140	283.368
3.0	374.700	294.259	283.205
4.0	378.590	294.396	282.945
5.0	373.780	294.516	282.546
6.0	378.210	294.555	281.941
7.0	375.200	294.398	279.520
8.0	374.950	293.817	276.925
9.0	377.260	292.251	271.211
10.0	380.660	287.572	259.772
11.0	381.980	276.579	262.536



Obr.5.14 Srovnávací graf aritmetických průměrů naměřených a vypočtených hodnot řezných sil pro jednotlivé úběry.

V porovnávacím grafu 5.14 je vidět srovnání experimentálně zjištěných řezných sil s teoreticky vypočtenými silami pro jednotlivé úběry. Nejnižší položená křivka ($F_{\text{vypočtená2}}$) vychází z hodnot získaných podle výpočtů z knihy Technologie obrábění a průměrná hodnota síly této křivky dosahuje 277,6 N. Výše položená křivka ($F_{\text{vypočtená1}}$), tvořená hodnotami vypočtenými dle vztahů z technické příručky firmy Walter dosahuje průměrné hodnoty síly 292,05 N. Obě teoretické křivky mají takřka shodné průběhy lineárního charakteru s mírným poklesem hodnot na konci.

Nejvyšší křivka tvořená naměřenými silami vykazuje téměř lineární charakter vývoje řezné síly, kdy hodnoty sil v závislosti na změně excentricity oproti vypočteným hodnotám mírně narůstají. Tyto síly dosahují průměrné velikosti 374,44 N. Mírné zvýšení naměřených sil zaznamenané na konci křivky je možné vysvětlit třením břitu nástroje o hranu obrobku, který vznikl až u posledního měření (viz. obr.5.15) nebo počínajícím opotřebením břitu nástroje.



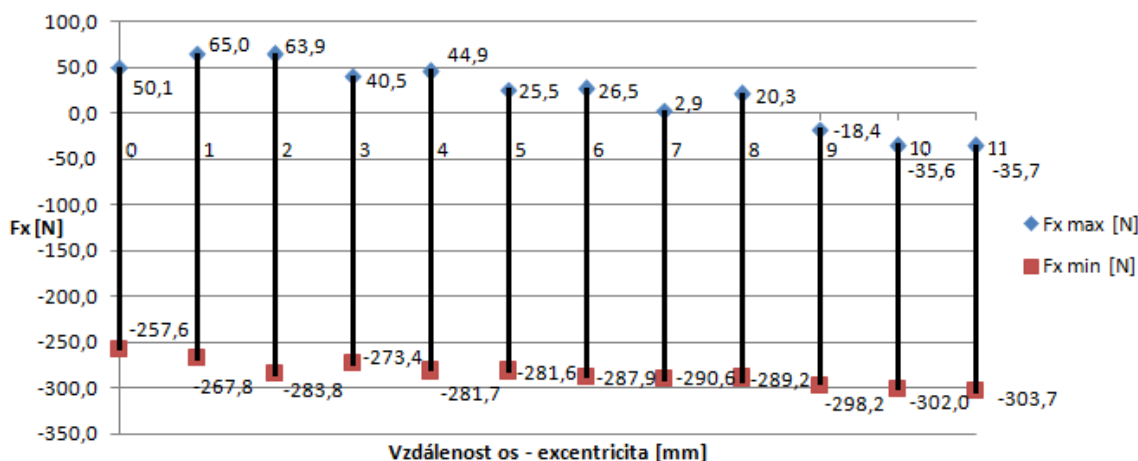
Obr.5.15 Fotografie obrobku s vzniklou hranou po posledním úběru.

Velikost řezných sil je ovlivněna mnoha faktory týkajícími se materiálových charakteristik a řezných podmínek. Rozdílné velikosti naměřených sil oproti silám vypočteným mohou být ovlivněny například volbou tabulkových hodnot, dosazovaných do výpočtů, a to specifické řezné síly k_{c1} a koeficientu m_c . Ty jsou stanoveny pro širší spektrum obráběných materiálů, ale nejsou přímo specifikované pro materiál použitý v našem experimentu. Teoretické výpočty jsou uzpůsobeny pro ideální podmínky obrábění, na rozdíl od našeho experimentu, kdy je nástroj vystaven nestabilním podmínkám.

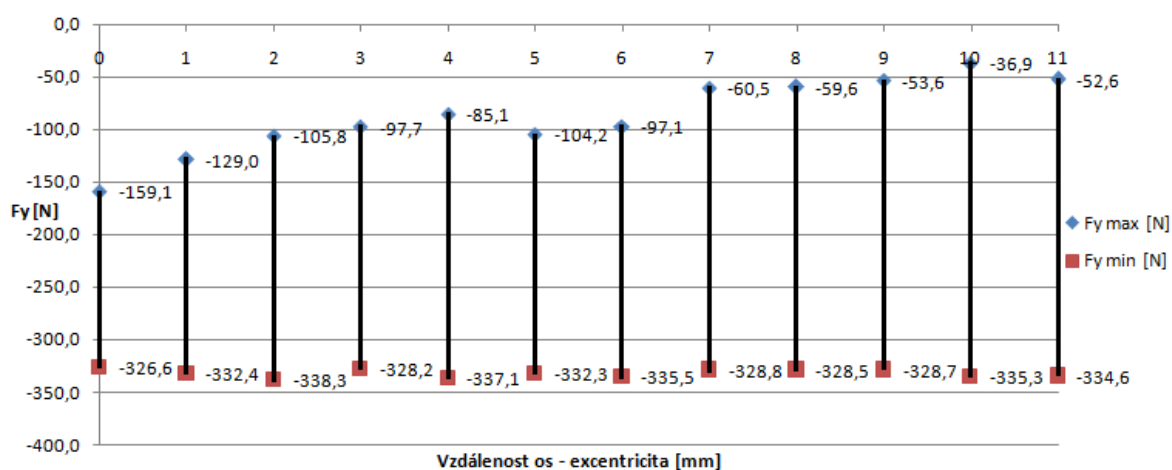
V našem případě byl řezný proces vystaven negativním jevům:

- nevhodné tribologické podmínky vlivem absence mazání s následkem nárůstu teplot, chvění, vliv opotřebením stroje a nástroje, popřípadě tuhostí obráběcí soustavy.

Na směr silové výslednice mají největší vliv tangenciální a normálové složky síly. Pro obě tyto složky byly sestaveny grafy rozptylu mezi maximálními a minimálními hodnotami pro jednotlivé úběry materiálu (viz. grafy 5.16, 5.17).



Obr. 5.16 Rozptyl mezi maximálními a minimálními naměřenými hodnotami radiální složky sil F_x (F_{cN}) pro jednotlivé úběry .



Obr. 5.17 Rozptyl mezi maximálními a minimálními naměřenými hodnotami tangenciální složky sil F_y (F_c) pro jednotlivé úběry .

Z výše uvedených grafů vyplývá, že se rozptyl hodnot radiální složky síly F_{cN} se zvyšující se hodnotou excentricity snižuje. Tangenciální složky síly F_c se naopak se zvyšující se excentricitou zvyšují. Změny v rozptylu hodnot složek sil uvedených ve výše uváděných grafech mohou ovlivnit směr působení řezných sil. Tento fakt může mít za následek vznik vibrací mezi nástrojem a obrobkem v průběhu obrábění.

6 DISKUZE

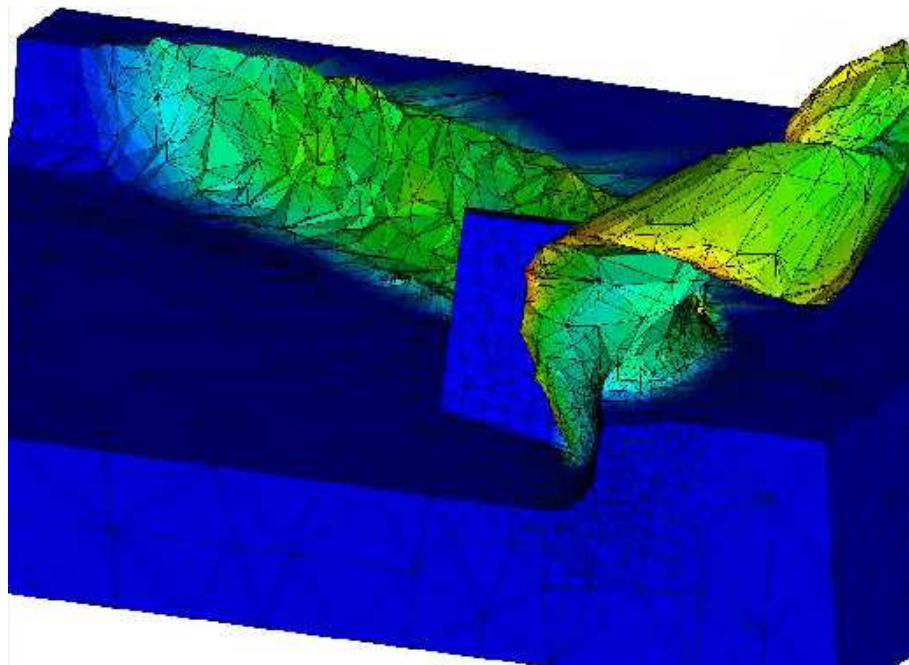
Práce byla založena na teoretických výpočtech a prakticky naměřených hodnotách řezných sil, které byly následně zpracovány do tabulek a grafů a porovnány. Z výsledného grafu (viz.obr. 5.14) vzešel rozdílný průběh na konci křivek a velikostní rozdíl srovnávaných sil.

Jak popisuje příručka obrábění od firmy Sandvik Coromant je excentrické postavení frézy vůči obrobku z technologického hlediska nutné.

Při středovém umístění frézy je délka styku ostří s obrobkem nejkratší, směr radiálních složek kolísá od okamžiku, kdy vstoupí do záběru, až po jeho výstup z materiálu. Excentrická poloha frézy má za následek konstantnější směr působení složky řezné síly [10].

Návrh k řešení je dosažení detailnějšího porovnání experimentálních hodnot s hodnotami teoretickými, získanými za pomoci speciálních simulačních softwarů. Příkladem moderního softwaru, používaného odborníky v technické praxi je program AdvantEdge od společnosti Third Wave Systems.

Jde o software, který pro simulaci procesů řezání využívá modelování pomocí metody konečných prvků a umožňuje provádět analýzy v širokém spektru problémů. Výstupem je animace záběru nástroje a obrobku se znázorněním tvořící se třísky viz. obr. 6.1, kterou lze dále vyhodnocovat z hlediska tvaru a podoby utvářené třísky, velikosti posuvové a řezné síly při obrábění, rozložení teplot a napětí v obrobku, třísce a nástroji [38].



Obr. 6.1 Simulace řezného procesu v softwaru AdvantEdge [37].

Pro zlepšení průběhu a stabilizaci řezného procesu by bylo vhodné optimalizovat tribologické podmínky, jako je například aplikace mazání a chlazení v místě řezu, volba vhodného povlaku nástroje snižujícího koeficient tření apod.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla realizace experimentu v měření silového zatížení řezného nástroje během frézování. Teoretická část byla zaměřena na rozbor možností měření při obrábění s detailnějším popisem snímacích zařízení. Další část byla věnována charakteristice frézování.

V praktické části byl vytvořen návrh experimentu, orientovaný na měření silových změn v závislosti na změně polohy nástroje vůči obrobku při čelním frézování bez použití procesní kapaliny. Následovala realizace měření na půdě Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně. Pro obrábění byla použita vertikální frézka FB 32V, s nástrčnou čelní frézou 80A06R-S45OD06D s upnutými destičkami ODMT 0605ZZN. Obrobkem byla uhlíková ocel C45. K měření zatížení byla využita měřicí aparatura KISTLER. Následovala filtrace a vyhodnocení naměřených výsledků. Na základě výstupních hodnot byly zpracovány grafy. Pro porovnání výsledků získaných experimentem byly použity teoretické výpočty, které byly zpracovány do tabulky a vyneseny do grafu. Porovnáním teoretických a reálných hodnot byla zjištěna skutečnost, že naměřené velikosti sil převyšují teoretické síly, v případě výpočtu podle knihy Technologie obrábění o téměř 35 % a ve druhém případě dle metodiky firmy Walter o více jak 28 %.

Z grafů experimentu vyplývá, že naměřené síly mají srovnatelný horizontální charakter průběhu křivky jako průběhy křivek vypočtených hodnot. Na úrovni excentricity 0 - 2 mm jsme u naměřených hodnot zaznamenali růst křivky, v úrovni 2 - 11 mm je charakter křivky lineární. Změna polohy nástroje vůči obrobku nemá tedy značný vliv na změnu velikosti řezných sil. Ovlivňuje však směr působení těchto sil, zejména tangenciální složku F_c a radiální složku F_{cN} .

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUNT, Andy. *Guide to the measurement of force*. London, 1998. ISBN 09-044-5728-1.
2. CHILDS, T. *Metal machining: Theory and applications*. Elsevier, 2000, 408 s. ISBN 0-340-69159-X.
3. SMITH, Graham T. *Cutting tool technology: industrial handbook*. London: Springer, 2008, 599 s. ISBN 978-1-84800-204-3.
4. Humár, Anton. *Řezné síly a odpory*. [přednáška]. Brno: VUT, 2012.
5. *Piezoelectric history* [online]. Physical chemistry laboratory. [vid. 10.2.2014]. Dostupné z: http://www.tau.ac.il/~phchlab/experiments_new/QCM/piezoelectricity.html.
6. *History of piezoelectricity* [online]. Piezo systems, Inc. [vid. 10.2.2014]. Dostupné z: <http://www.piezo.com/tech4history.html>.
7. KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005.
8. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
9. TSCHÄTSCH, Heinz. *Applied machining technology*. Dordrecht: Springer, c2009, xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.
10. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. ISBN 91-972299-4-6.
11. VAŠÍČEK, Jiří. *Rozbor a využití tvarových frézovacích nástrojů*: Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2010. 44 s., příloh 2. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.
12. *Síla bude změřena* [online]. 2008 [vid. 11.4.2014]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sila-bude-zmerena.html>.
13. *Měřicí technika mechanických veličin s kovovými tenzometry* [online]. 2007 [vid. 21.5.2014]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/merici-technika-mechanickych-velicin-s-kovovymi-tenzometry.html>.
14. *Křemíkové tenzometry v měřicí technice mechanických veličin* [online]. 2007 [vid. 10.5.2014]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kremikove-tenzometry-v-merici-technice-mechanickych-velicin.html>.

15. *Tenzometry - princip a výroba* [online]. VTS Zlín. [vid. 14.3.2014]. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz/polovodicove-tenzometry.php>.
16. *Snímače- snímače s polovodičovými tenzometry* [online]. VTS Zlín. [vid. 14.3.2014]. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz/snimace.php#snimace-foliove>.
17. Proving rings. In: Standart scientific instrument [online]. © 2014 Standart scientific instrument. [vid. 13.2.2014]. Dostupné z: <http://2.imimg.com/data2/NF/LQ/MY-963301/proving-rings-500x500.jpg>.
18. *Tenkvrstvé piezoelektrické senzory*. Dostupné z: http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/14_senzory_QCM.pdf [vid. 14.4.2014].
19. *Základy piezoelektriny pro aplikace*. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1112.pdf [vid. 18.5.2014].
20. *Cutting force measurement*. Dostupné z: <http://www.technovolt.ro/cataloge/kistler/DINAMOMETRE%20%20FIXE%20SI%20ROTATIVE.pdf> [vid. 20.5.2014].
21. *Možnosti simulace řezného procesu* [online]. 2007 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moznosti-simulace-rezneho-procesu.html>.
22. *Common shapes and sizes of piezoelectric elements* [online]. APC International, Ltd.. [vid. 14.3.2014]. Dostupné z: <http://www.americanpiezo.com/product-service/custom-piezoelectric-elements/shapes-sizes.html>.
23. Hodinový strojek. In: Hodinářství zlatnictví Jihlava [online]. © 2009 Hodinářství zlatnictví Jihlava. [vid. 13.2.2014]. Dostupné z: [http://www.hodinky-damske-panske.cz/imgs/images/Myiota\(2\).jpg](http://www.hodinky-damske-panske.cz/imgs/images/Myiota(2).jpg).
24. Piezoelektrický zapalovač TRIK-TRAK. In: Exihand Brno [online]. © 2014 Exihand Brno. [vid. 13.2.2014]. Dostupné z http://www.exihand.cz/pic_zbozi/3050005.jpg.
25. *To beach or not to beach?* [online]. Science in the news. [vid. 10.10.2011]. Dostupné z: <http://www.scienceinthenews.org.uk/contents/?article=4>.
26. Sonotouch. In: V.M.K Praha [online]. © 2014 Exihand Brno. [vid. 13.2.2014]. Dostupné z: <http://www.vmk-rtg.cz/images/sono/sonotouch-200.jpg>.
27. *Pilana mct katalog 2*. Dostupné z: http://www.pilanamct.cz/files/default/content/KATALOGY/katalog2_cz.pdf [vid. 18.2.2014].

28. *Power clamp system*. Dostupné z: http://www.haimer.de/pdf/2013-01_Power_Clamp_System_DE-EN.pdf [vid. 18.5.2013].
29. *Catalog - tool holding systems*. Dostupné z: http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/catalog_ToolholdingSystems_DE_EN.pdf [vid. 19.5.2013].
30. *Katalog pramet frézování 2012* [online]. [vid. 5.4.2014]. Dostupné z: http://katalog.mav.cz/data/pramet2/files/katalog_pramet_frezovani_2012.pdf.
31. *ČSN 12050 - ocel k zušlechťování*. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-12050.pdf> [vid. 14.4.2014].
32. *Dílčí zpráva k projektu č. 456*. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Vybaveni_CNC_KISTLER_JC.pdf [vid. 19.4.2014].
33. *KISTLER measure, analyze, inovate*. [online]. Kistler. [vid. 10.3.2014]. Dostupné z: <http://www.kistler.com>.
34. *Walter catalog general 2012*. [online]. Walter tools. [vid. 21.3.2014]. Dostupné z: <http://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/ro-ro/general-catalogue-2012-ro.pdf>.
35. BRYCHTA, J., ČEP, R., SADÍLEK, M., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. [online]. [vid. 1. 5. 2013]. 1. vyd. Ostrava:Ediční středisko VŠB-TUO, 2007. 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>.
36. ZOUHAR, J. *Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky*: Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2009. 104s, 7s příloh. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.
37. *AdvantEdge FEM*. [online]. Engin soft. [vid. 6.5.2014]. Dostupné z: http://www.enginsoft.net/software/tws/tws_ae_fem/index.html.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A_D	[mm ²]	Jmenovitý průřez třísky
a_e	[mm]	Šířka záběru
a_p	[mm]	Hloubka záběru
b_D	[mm]	Jmenovitá šířka třísky
c	[-]	Exponent
D	[mm]	Průměr nástroje nebo obrobku
F	[N]	Silová výslednice
f	[s ⁻¹]	Zubová frekvence
F_c	[N]	Řezná síla
F_{cN}	[N]	Radiální složka síly
φ	[°]	Úhel pootočení nástroje
F_p	[N]	Pasivní síla
F_x	[N]	Síla působící v ose x
F_y	[N]	Síla působící v ose y
F_z	[N]	Síla působící v ose z
f_z	[mm]	Posuv na zub
γ_o	[°]	Úhel čela
h_D	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
h_m	[mm]	Střední tloušťka třísky
κ_r	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
k_C	[N.mm ⁻²]	Měrná řezná síla
k_{C1}	[N.mm ⁻²]	Měrná řezná síla vztažená na 1 mm ² průřezu třísky
m_C	[-]	Exponent
M_k	[N.m]	Kroutící moment
n	[min ⁻¹]	Otáčky vřetene
$P_{už}$	[W]	Užitečný výkon
R	[N]	Řezný odpor
s	[mm]	Šířka břitové destičky
v_c	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
v_e	[m.mm ⁻¹]	Efektivní pohyb
v_f	[mm.min ⁻¹]	Posuvová rychlost
z	[-]	Počet zubů nástroje
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition
MTCVD	[-]	Middle Temperature Chemical Deposition
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition
SK	[-]	Slinutý karbid

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Kalibrační list dynamometru KISTLER 9257B
Příloha 2 Výpočtový list Walter

PŘÍLOHA 1

KISTLER

measure. analyze. innovate.

Kalibrierschein KRAFT Calibration Certificate FORCE

Type 9257B Serial No. 1017500

Kalibriert durch Calibrated by	Datum Date	
F. Heymann	13.12.1999	
Referenzgeräte Reference Equipment	Typ Type	Serien-Nr. Serial No.
Gebrauchsnorm Working Standard	Kistler 9251A	370372
Ladungsverstärker Charge Amplifier	Kistler 501780800/1	619146
Ladungskalibrator Charge Calibrator	Kistler 5395A0	530634
Umgebungstemperatur Ambient Temperature °C	Relative Feuchte Relative Humidity %	
21	43	

Messergebnisse Results of Measurement

Kalibrierter Bereich Calibrated Range	Empfindlichkeit Sensitivity	Linearität Linearity	Übersprechen Cross talk	
N	pC/N	$\leq \pm \%FSO$	%	%
F_x 0 ... 5000	-7,929	0,1	$F_x \rightarrow F_y$ 2,0	$F_x \rightarrow F_z$ 0,2
F_x 0 ... 500	-7,909	0,1	$F_x \rightarrow F_y$ 2,0	$F_x \rightarrow F_z$ 0,1
F_x 0 ... 50	-7,910	0,2		
F_y 0 ... 5000	-7,940	0,1	$F_y \rightarrow F_x$ -0,8	$F_y \rightarrow F_z$ 0,6
F_y 0 ... 500	-7,920	0,1	$F_y \rightarrow F_x$ -0,8	$F_y \rightarrow F_z$ 0,8
F_y 0 ... 50	-7,923	0,1		
F_z 0 ... 10000	-3,714	0,1	$F_z \rightarrow F_x$ -0,1	$F_z \rightarrow F_y$ 0,1
F_z 0 ... 1000	-3,706	0,1	$F_z \rightarrow F_x$ -0,1	$F_z \rightarrow F_y$ 0,3
F_z 0 ... 100	-3,696	0,1		

Bestätigung Confirmation

Wir bestätigen, dass das oben identifizierte Gerät nach den vorgeschriebenen Verfahren geprüft wurde. Alle Messmittel sind auf nationale Normale rückverfolgbar. Kistler betreibt die SCS (Swiss Calibration Service) Kalibrierstelle Nr. 049, akkreditiert nach ISO 17025. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert.

We confirm that the device identified above was tested by the prescribed procedures. All measuring devices are traceable to national standards. The SCS (Swiss Calibration Service) Calibration Laboratory No. 049 is operated by Kistler and accredited per ISO 17025. The Kistler Quality Management system is certified per ISO 9001.

Kistler Instrumente AG
Eulachstrasse 22
PO Box
CH-8408 Winterthur

Tel: +41 52 224 11 11
Fax +41 52 224 14 14
info@kistler.com

ZKB Winterthur BC 732
Swift: ZKBKCHZZ80A
Account: 1132-0374.628
Seite 1 von 1

IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8
VAT: 229 713
ISO 9001 certified

www.kistler.com

PŘÍLOHA 2

Vzorce pro výpočty: frézování

Otáčky

$$n = \frac{v_c \times 1000}{D_c \times \pi} \quad [\text{min}^{-1}]$$

Řezná rychlost

$$v_c = \frac{D_c \times \pi \times n}{1000} \quad [\text{m/min}]$$

Rychlost posuvu

$$v_f = f_z \times z \times n \quad [\text{mm/min}]$$

Posuv na zub

$$f_z = \frac{v_f}{z \times n} \quad [\text{mm/z}]$$

Objem materiálu za jednotku času

$$Q = \frac{a_p \times a_p \times v_f}{1000} \quad [\text{cm}^3/\text{min}]$$

Příkon

$$P_{\text{mot}} = \frac{a_p \times a_p \times v_f \times k_c}{6 \times 10^7 \times \eta} \quad [\text{kW}]$$

Střední tloušťka třísky

$$h_m = \frac{(114,7 \times f_z \times \sin \kappa \times (a_p / D_c))}{\varphi_s} \quad [\text{mm}]$$

$$f_z = \frac{h_m \times \varphi_s}{114,7 \times \sin \kappa \times (a_p / D_c)} \quad [\text{mm}]$$

nebo

$$h_m = f_z \times \sqrt{\frac{a_p}{D_c}} \quad [\text{mm}]$$

$$f_z = \frac{h_m}{\sqrt{\frac{a_p}{D_c}}} \quad [\text{mm}]$$

jako přibližný vzorec pro $a_p / D_c < 30 \%$

Úhel záběru

při centrálním postavení frízy

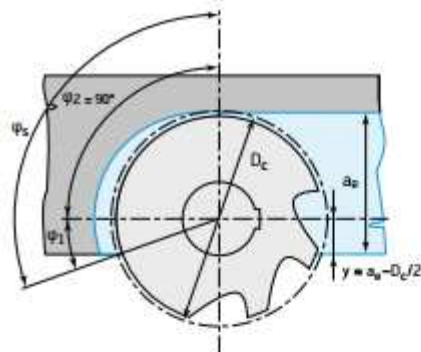
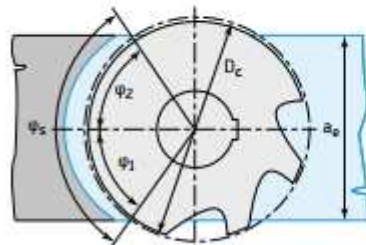
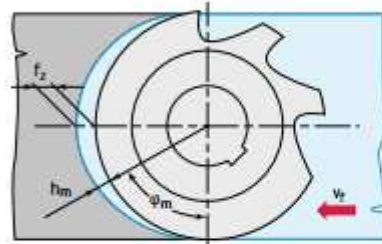
$$\varphi_s = 2 \times \arcsin \left(\frac{a_p}{D_c} \right) \quad [^\circ]$$

při mimořádném postavení frízy

$$\varphi_s = 90^\circ + \arcsin \frac{a_p - (D_c / 2)}{(D_c / 2)} \quad [^\circ]$$

Specifická řezná síla

$$k_c = \frac{1 - 0,01 \times \gamma}{h_m^{m_c}} \times k_{c1,1} \quad [\text{N/mm}^2]$$



n	otáčky	min ⁻¹
D _c	průměr	řezání mm
a _p	hloubka řezu	mm
a _e	síla řezu	mm
z	počet zubů	
v _c	řezná rychlost	m/min
v _f	rychlost posuvu	mm/min
f _z	posuv na zub	mm
Q	objem materiálu za jednotku času	cm ³ /min
P _{mot}	příkon	kW
h _m	střední tloušťka třísky	mm
k _c	specifická řezná síla	N/mm ²
η	účinnost stroje (0,7-0,95)	
κ	úhel nastavení	°
φ _s	úhel záběru	°
φ ₁	rozsah nesousedního frézování	°
φ ₂	rozsah sousledního frézování	°
k _c	specifická řezná síla	N/mm ²
k _{c1,1} *	specifická řezná síla pro 1 mm ² průřezu třísky	N/mm ²
m _c *	nárůst síly k _c	
γ	nesousledný záběr	mm

*m_c a k_{c1,1} viz tabulka na straně H 7