

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Měření řezných sil při obrábění

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Autor: Matyáš Dalecký

Praha 2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Matyáš Dalecký

Technologická zařízení staveb

Název práce

Měření řezných sil při obrábění

Název anglicky

Measurement of cutting forces in machining

Cíle práce

- shromáždit aktuální informace o metodách a zařízeních používaných pro měření řezných sil při obrábění kovů.

Metodika

- současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

soustružení; frézování; vrtání; řezné síly; dynamometr

Doporučené zdroje informací

ASTAKHOV, V. P.: Metal cutting mechanics. Boca Raton, CRC Press 1999.

BYRNE, P.: Turning, milling and grinding processes. London, Arnold 1996.

Force sensors from Kistler. https://www.kistler.com/cz/en/products/components/force-sensors/#1__component__force__sensor__fz__up__to__7__5__k__n__1__68__klbf__9001__a

FOREJT, M., PÍŠKA, M.: Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno, Akademické nakladatelství CERM 2006.

HUMÁR, A.: Materiály pro řezné nástroje. Praha, MM publishing 2008.

KALPAKJIAN, S.: Manufacturing processes for engineering materials. 3rd Edition. Menlo Park, Addison-Wesley Publishing Company 1997.

MÁDL, J.: Technologie obrábění. 1. díl, 2. díl, 3. díl. Praha, České vysoké učení technické 2000.

Normy, časopisy, firemní literatura.

SMITH, G. T.: Cutting tool technology. Industrial handbook. London, Springer 2008.

Team of authors: Modern metal cutting. A practical handbook. Sandviken, Sandvik Coromant 1994.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 25. 1. 2018

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 03. 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Měření řezných sil při obrábění vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne.....

Podpis.....

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc. za metodické a odborné konzultace, které mi poskytl při zpracování mé bakalářské práce.

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá problematikou řezných sil při obrábění a zároveň se zaměřuje na metody měření těchto sil. V první části seznamuje s procesem obrábění a pojednává o důvodech znalosti řezných sil. Poté se soustředí na pojmy týkající se procesu obrábění, které souvisí s řeznými silami. Hlavní část práce se zabývá přímo měřenými silami. Jejím cílem je shrnutí poznatků o silách vznikajících při obrábění a pojednává o možných způsobech jejich měření. Nejprve objasňuje měření nepřímou metodou a poté metodou přímou, která zahrnuje sledování silových veličin dynamometry, jejichž jednotlivé druhy jsou popsány. Poslední část práce pojednává o faktorech ovlivňujících řezné síly a specifickou metodu měření u konkrétních procesů třískového obrábění.

Klíčová slova: soustružení; frézování; vrtání, řezné síly; dynamometr

Measurement of cutting forces in machining

Summary: The bachelor thesis deals with the issue of cutting forces in machining and it also focuses on methods of measuring these forces. In the first part, it learns about the machining and discusses the reasons for the knowledge of the cutting forces. Then the thesis focuses on the concepts of the machining process related to the cutting forces. The main part of the project deals directly with the measured forces. Its aim is to summarize the knowledge about machining forces and discusses possible ways of measuring them. First it explains the measurement by an indirect method and then a direct method that includes monitoring the forces with the dynamometers whose individual species are described. The last part of the thesis deals with the factors influencing the cutting forces and the specific measurement method for concrete processes of chip machining.

Key words: turning; milling; drilling, cutting forces; dynamometer

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Metodika práce	3
4	Obrábění.....	4
5	Základní pojmy	5
5.1	Obrobek.....	5
5.2	Řezný nástroj.....	5
5.3	Kinematika řezného pohybu	7
5.4	Geometrie obráběcích nástrojů	8
6	Síly při řezání.....	10
6.1	Nepřímá metoda měření	12
6.1.1	Určování sil pomocí výkonu stroje.....	12
6.1.2	Určování sil pomocí krouticích momentů	13
6.1.3	Měrný řezný odpor a síla	13
6.2	Přímé metody měření	15
6.2.1	Princip měření.....	16
6.2.2	Cejchování dynamometru	17
6.2.3	Rozdělení dynamometrů	18
6.2.4	Mechanický dynamometr	18
6.2.5	Hydraulický dynamometr	19
6.2.6	Pneumatický dynamometr	20
6.2.7	Indukční dynamometr	20
6.2.8	Kapacitní dynamometr.....	21
6.2.9	Odporový dynamometr	21
6.2.10	Piezoelektrický dynamometr	25
7	Základní metody třískového obrábění	27

7.1	Soustružení.....	27
7.1.1	Faktory ovlivňující řezné síly	27
7.1.2	Měření řezných sil u soustružení	29
7.2	Vrtání.....	30
7.2.1	Faktory ovlivňující řezné síly	30
7.2.2	Měření řezných sil u vrtání	31
7.3	Frézování.....	32
7.3.1	Faktory ovlivňující řezné síly	32
7.3.2	Měření řezných sil u frézování	33
8	Závěr	34
9	Seznam citované literatury.....	35
10	Přílohy.....	38

Seznam zkratek

F	[N]	celková řezná síla
a_p	[mm]	hloubka řezu
D	[mm]	průměr nástroje nebo obrobku
f	[mm/ot]	rychlost posuvu
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
k_c	[N/mm ²]	měrná řezná síla
M_k	[Nm]	krouticí moment
M_{kb}	[Nm]	krouticí moment od řezné složky síly obrábění
P_c	[W]	výkon stroje při obrábění
P_o	[W]	výkon stroje při chodu naprázdno
v_c	[m/min]	řezná rychlost
V_o	[U]	výstupní napětí
F_x	[N]	vychylující složka síly
F_y	[N]	vychylující složka síly
R	[N]	řezný odpor
S	[mm ²]	průřez odřezávané vrstvy

Seznam obrázků

Obr. 1 Plochy na obrobnku	5
Obr. 2 Plochy na řezném nástroji.....	6
Obr. 3 Řezné pohyby u obráběcích procesů	7
Obr. 4 Nástrojové roviny	8
Obr. 5 Ortogonální a vázané řezání	10
Obr. 6 Složky celkové řezné síly	11
Obr. 7 Závislost měrného odporu na posuvu	14
Obr. 8 Různá provedení elastického členu	16
Obr. 9 Schéma mechanického dynamometru	19
Obr. 10 Schéma hydraulického dynamometru	19
Obr. 11 Schéma pneumatického dynamometru	20
Obr. 12 Schéma indukčního dynamometru	20
Obr. 13 Fóliový tenzometry	23
Obr. 14 Schéma Wheatstoneova můstku	25
Obr. 15 Jednosložkové dynamometry	26
Obr. 16 Vícesložkové dynamometry	26
Obr. 17 Piezoelektrický dynamometr pro soustružení.....	29
Obr. 18 Schéma uložení dynamometru.....	29
Obr. 19 Možnosti uložení rotačního a stacionárního dynamometru.....	31
Obr. 20 Ukázka stacionárního dynamometru	33

1 Úvod

Měření řezných sil během obráběcích procesů je důležitým krokem k určení a kontrole podmínek, při kterých pracuje stroj, nástroj a obrobek. Jejich měřením lze určit parametry, které jsou nutné k odhadu a kontrole kvality výrobku. Protože se v současné době klade důraz na vysokou kvalitu výrobků při nízkých nákladech, je poznání řezných sil klíčové.

Tato bakalářská práce poskytuje základní informace o metodách měření řezných sil při obrábění. První část práce poskytuje pohled do procesu obrábění a vysvětluje důvody, proč je třeba znát problematiku řezných sil ve strojírenství. Následuje část, ve které se práce zabývá základními pojmy z oblasti obrábění, jež jsou úzce spjaty s problematikou řezných sil. Uvedeny jsou zejména kinematika řezného pohybu a geometrie nástroje. V následující kapitole jsou již rozebírány síly v procesu řezání, kde práce seznamuje stručně s jejich rozdělením a popisem. Poté jsou uvedeny samotné metody měření, které dělíme na přímé a nepřímé. Práce zde popisuje možnosti, jakými se v dnešní době řezné síly měří. V další kapitole jsou uvedeny faktory, které ovlivňují velikosti řezných sil u jednotlivých procesů obrábění, a zároveň se zde stručně popisuje možnost měření konkrétní metodou.

Závěr práce bude věnován celkovému shrnutí poznatků, které byly čerpány z dostupných zdrojů a zároveň budou uvedeny přínosy, které tato práce nabídne.

2 Cíl práce

Cílem této práce je shromáždit aktuální informace o metodách a zařízeních používaných pro měření řezných sil při obrábění kovů, přičemž pozornost je věnována především třískovému obrábění. V jednotlivých kapitolách práce jsou představeny jednotlivé metody používané pro měření řezných sil a zároveň jsou popsána používaná zařízení pro měření.

Výsledky práce mohou také sloužit k zefektivnění výroby v rámci obráběcích procesů.

V následující kapitole je představena metodika bakalářské práce, v níž jsou popsány způsoby, které vedou k naplnění cíle práce.

3 Metodika práce

Tato bakalářská práce byla zhotovena na základě dostupných dat z publikovaných informačních zdrojů. K vytvoření práce bylo použito především české a anglické literatury a internetových zdrojů, věnujících se danému tématu. Součástí práce jsou i odborné články týkající se dané problematiky. Využito bylo knih v tištěné i elektronické podobě. Tištěná literatura byla zapůjčena v Národní technické knihovně ČVUT. Odborné články byly získány především prostřednictvím sociální sítě pro vědce ResearchGate a vědecké databáze ScienceDirect. Vyhledáním a zpracováním údajů byla vytvořena ucelená forma literární rešerše, která se zabývá aktuálními metodami a zařízeními pro měření rezných sil při obrábění kovů. Seznam literatury je poslední kapitolou této práce.

4 Obrábění

Obrábění je technologický proces, při němž vytváříme povrchy obrobku určitého tvaru, rozměrů a jakosti odebráním částic nebo oddělováním částí materiálu pochody fyzikálními a chemickými, případně jejich kombinací [21].

Fyzikálně-chemický proces, při kterém dochází k odebrání materiálu ve formě třísky, nazýváme jako řezání, respektive řezný proces. Podle způsobu oddělování materiálu rozlišujeme řezný proces:

- 1) Kontinuální (soustružení, vrtání, vyvrtávání).
- 2) Diskontinuální (hoblování, obrážení).
- 3) Cyklický (frézování, broušení) [7, 1].

Z hlediska použitých pochodů lze obrábění rozdělit obrábění na konvenční, kdy břit nástroje odebrá částice ve formě třísky a na druhé straně obrábění nekonvenční, kde se využívá pochodů elektrických, chemických apod.

Produktivita a hospodárnost u obráběcího procesu je ovlivňována čtyřmi základními faktory:

- 1) Obráběcí stroj.
- 2) Řezný nástroj.
- 3) Obráběný materiál.
- 4) Pracovní podmínky [21].

S produktivitou a hospodárností souvisí pojem obrobiteľnosť. Obrobiteľnosť je vlastnosť, ktorá vyjadruje, jak efektívny môže byť obrábění při nízkých nákladech a za daných technologických podmínek [15]. Jedním z faktorů, které ovlivňují obrobiteľnosť, jsou řezné síly.

Znalost řezných sil je naprosto nezbytná pro strojírenskou výrobu, protože jejich měřením lze určovat pracovní podmínky, které mají přímý vliv na tvorbu tepla, opotřebení řezných nástrojů, výkonnost obráběcích strojů, kvalitu povrchu, přesnost obráběných součástí atd. Touto znalostí je možné vysoce zefektivnit obráběcí proces [15, 22].

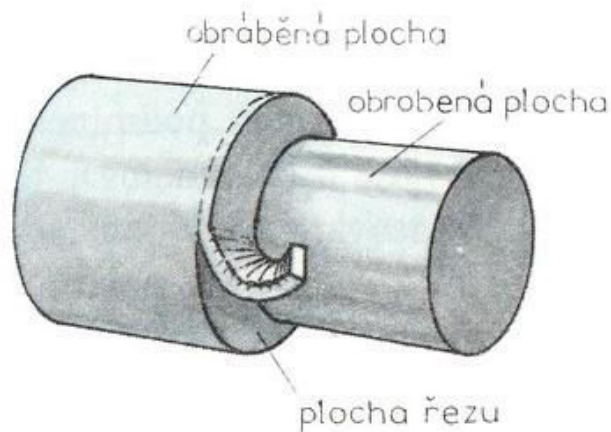
5 Základní pojmy

Před seznámením s problematikou řezných sil je nutné si objasnit některé základní pojmy z oboru třískového obrábění.

5.1 Obrobek

Obrobek je obráběná nebo částečně již obrobená příp. úplně obrobená součást. Jako objekt obráběcího procesu je z geometrického hlediska charakterizována obráběnou, obrobenou a plochou řezu (obr. 1) [7].

Obr. 1 Plochy na obrobku



Zdroj: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1183>

Obráběná plocha – je část povrchu obrobku odstraňována obráběním.

Obrobená plocha – je plocha obrobku vzniklá obráběním.

Plocha řezu – je plocha obrobku vznikající těsně za břitem nástroje [21, 17].

5.2 Řezný nástroj

Řezný nástroj v interakci s obrobkem umožňuje realizaci řezného procesu. Uskutečňuje řezání tím, že svou pracovní částí tj. břitem vniká do materiálu obrobku a odděluje z něho postupně částice ve tvaru třísky. Řezné nástroje se skládají z těchto základních částí:

Řezná část – je funkční část nástroje, která obsahuje prvky tvořící třísku.

Břit – je prvek řezné části nástroje ve tvaru klínu. Ten je tvořen plochami, které nazýváme čelo, hřbet a vedlejší hřbet. Nástroje mohou být jednobřité (soustružnický nůž), nebo vícebřité (vrtáky, frézy, výstružníky atd.).

Čelo – plocha, po níž odchází tříska, je rovinná nebo zakřivená.

Hřbet - plocha řezné části obrácená směrem k řezné ploše obrobku.

Vedlejší hřbet - plocha řezné části odvrácená od řezné plochy obrobku.

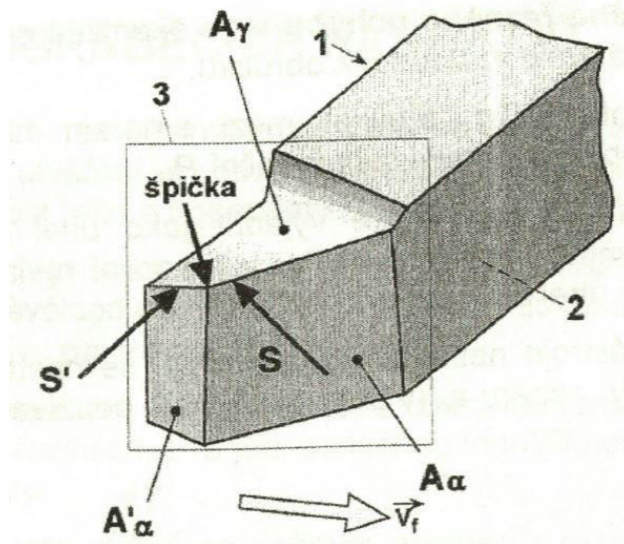
Ostří – je průsečnice plochy čela a plochy hřbetu. Průsečnice čela a vedlejšího hřbetu nazýváme **vedlejší ostří**.

Upínací část (stopka) – je část nástroje, které slouží k upínání do obráběcího stroje.

Základna – jedná se o plochý prvek stopky nástroje. Slouží k umístění a orientaci nástroje při jeho výrobě [7, 17, 21].

Jednotlivé části a plochy jsou uvedeny na obr. 2.

Obr. 2 Plochy na řezném nástroji



1-upínací část, 2-základna, 3-řezná část, S -hlavní ostří, S' -vedlejší ostří, A_γ -čelo nástroje,
 A_α -hlavní hřbet, A'_α -vedlejší hřbet

Zdroj: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1184>

5.3 Kinematika řezného pohybu

Aby se mohl uskutečnit proces řezání, musí se nástroj pohybovat proti obrobku určitou rychlostí po určité dráze.

Hlavní řezný pohyb – je relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem, který je realizován obráběcím strojem. Může být:

- 1) Přímočarý (hoblování, obrážení).
- 2) Otáčivý (soustružení, vrtání, frézování).
- 3) Složený (honování, lapování).

Řezná rychlost v_c – je vyjádřena jako okamžitá rychlost hlavního řezného pohybu.

Posuv – je pohyb mezi nástrojem a obrobkem, při kterém dochází k odřezávání třísky v požadované délce obrobku. Může být plynulý nebo přerušovaný.

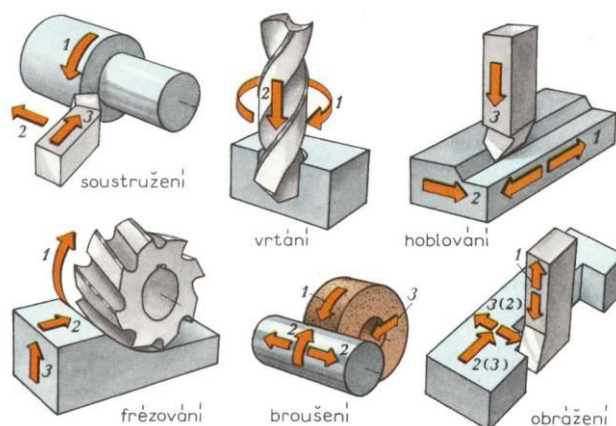
Rychlost posuvu f – je dráha, kterou vykoná břit nástroje vůči obrobku za jednotku času, za jednu otáčku, jeden dvojjzdvih apod.

Přísuv – vykonává nástroj nebo obrobek a slouží k nastavení nástroje do pracovní polohy.

Hloubka řezu a_p – je vzdálenost mezi obráběnou a obrobenou plochou [1, 7, 21].

Na obr. 3 jsou uvedeny řezné pohyby u jednotlivých obráběcích procesů.

Obr. 3 Řezné pohyby u obráběcích procesů



1-hlavní řezný pohyb, 2-posuv, 3-přísuv

Zdroj: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1185>

5.4 Geometrie obráběcích nástrojů

Geometrie obráběcího nástroje má značný vliv na velikosti složek řezných sil, proto je její znalost z hlediska hospodárnosti obráběcího procesu nezbytná. Polohu ostří, čela a hřbetu popisujeme pomocí úhlů, které jsou definovány v příslušných souřadnicových rovinách (Obr. 4) [1, 21].

Nástrojová základní rovina P_r – prochází uvažovaným bodem ostří a je orientována kolmo na vektor rychlosti hlavního pohybu.

Nástrojová rovina ostří P_s – je tečná k ostří a kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r .

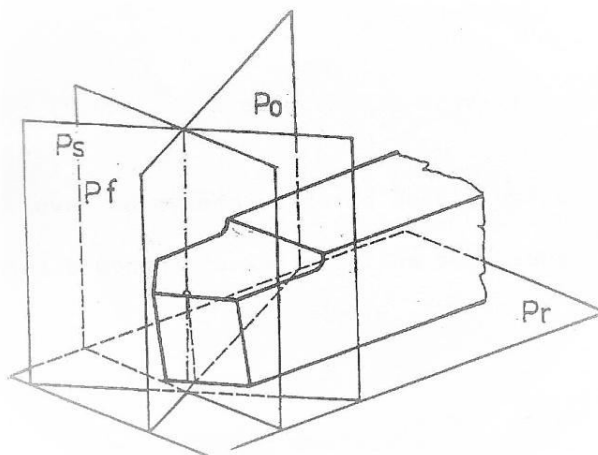
Nástrojová ortogonální rovina P_o – prochází uvažovaným bodem a je kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r a nástrojovou rovinu ostří P_s .

Nástrojová boční rovina P_f – prochází uvažovaným bodem ostří a je všeobecně orientována ve směru posuvu.

Nástrojová zadní rovina P_p – prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na rovinu P_f a P_r .

Normální rovina P_n – prochází uvažovaným bodem a je kolmá na ostří [1, 7, 21].

Obr. 4 Nástrojové roviny



Zdroj: SOVA, František. *Technologie obrábění a montáže*. Praha: Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. ISBN 978-80-7082-823-4.

Pomocí těchto rovin se určují nástrojové úhly břitu. Indexy úhly jsou totožné s indexy nástrojových rovin, ve kterých jsou měřeny.

Nástrojový úhel břitu β

Jedná se o úhel mezi čelem a hřbetem nástroje. Podle rovin, ve kterých je úhel měřen, máme β_o – ortogonální úhel, β_n – normálový úhel, β_f – boční úhel a β_p – zadní.

Nástrojový úhel čela γ

Jedná se o úhel mezi čelem nástroje a nástrojovou základní rovinou P_r . Podle měřených rovin dostáváme γ_o , γ_n , γ_f a γ_p .

Nástrojový úhel hřbetu α

Jde o úhel, který svírá plocha hřbetu s nástrojovou rovinou ostří P_s . Opět podle měřených rovin máme α_o , α_n , α_f a α_p .

Nástrojový úhel řezu δ

Jedná se o součet odpovídajících úhlů břitu a hřbetu.

Nástrojový úhel nastavení κ

Je úhel mezi hlavním ostřím a směrem posuvu, nebo který svírá nástrojová rovina ostří P_s se směrem pohybu ostří.

Nástrojový úhel špičky ε

Je úhel mezi nástrojovou rovinou ostří N a nástrojovou rovinou vedlejšího ostří N' .

Úhel sklonu ostří λ

Je úhel mezi ostřím a základní nástrojovou rovinou P_r [1, 21].

Zakresleny a znázorněny jsou nástrojové úhly v příloze.

6 Síly při řezání

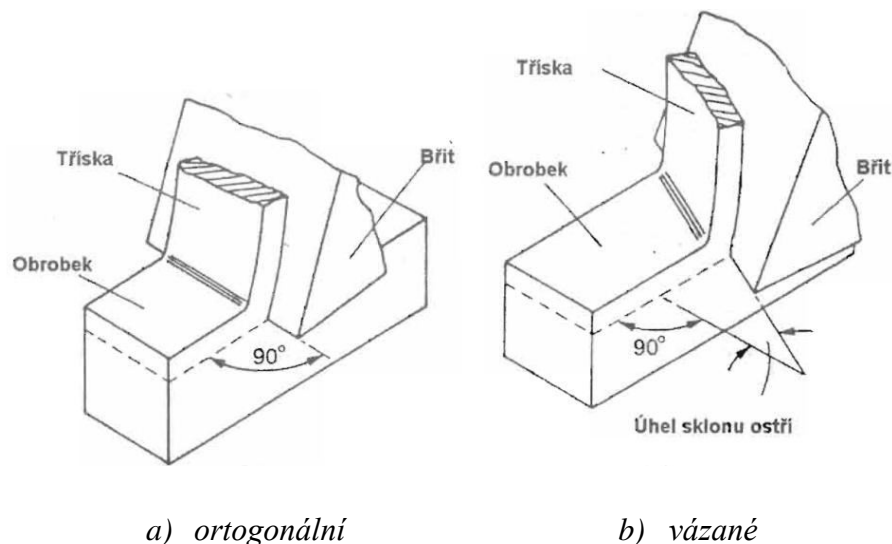
Jak již bylo uvedeno, při obrábění je oddělován materiál z obrobku ve formě třísky.

Mechanismus tvorby třísky prokazuje, že při vnikání rezného klínu do materiálu obrobku vzniká v obráběném materiálu stav napjatosti, který způsobuje v mezní situaci jeho dělení. Proces tohoto dělení doprovází menší anebo větší plastické, ale i elastické deformace. Kromě jevů deformačních se při tomto procesu prosazují i poměry silové [1].

Pro oddělení třísky z materiálu je nutné překonat tzv. řezný odpor R , jež klade obráběný materiál. Překonáním řezného odporu je nutné působit vnější silou, kterou nazýváme celková řezná síla F [8, 21].

Sílu F rozkládáme do jejích složek. Ty jsou různé u ortogonálního řezání (obr. 5a) a u vázaného řezání (obr. 5b). Při ortogonálním řezání leží celková řezná síla F v rovině kolmé na ostří a skládá se z řezné síly F_c a posuvové síly F_f . Tento způsob je realizován např. u zapichování, frézování, hoblování atd. Při vázaném řezání, které představuje třírozměrný systém, přidáváme kromě řezné síly F_c a posuvové síly F_f ještě pasivní sílu F_p . Tento způsob najdeme u podélného soustružení, vrtání nebo u frézování frézami se šikmými zuby [8, 9].

Obr. 5 Ortogonální a vázané řezání



Zdroj: MÁDL, J. et al. *Technologie obrábění - 1., 2., 3. díl.* Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02091-6.

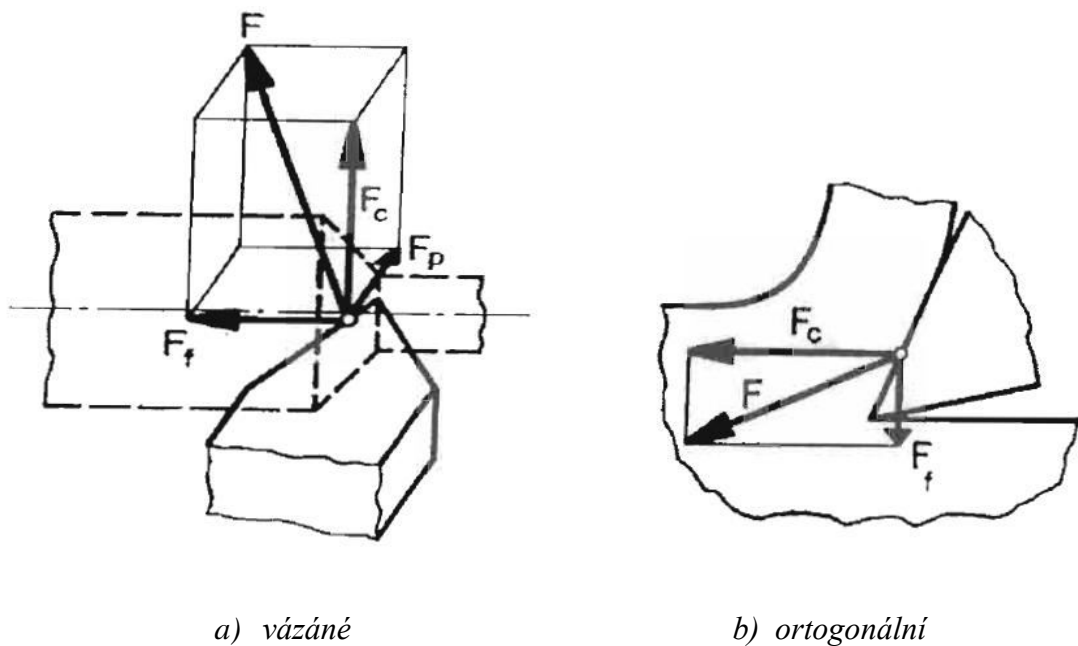
Řezná síla F_c – jedná se o tečnou složku celkové řezné síly. Působí ve směru hlavního pohybu a ze všech ostatních složek je největší (až 99% celkové řezné síly). Určuje efektivní výkon obrábění a je základem při optimalizaci řezných podmínek.

Posuvová síla F_f – působí ve směru posuvu a její velikost je přibližně polovina řezné síly. Je zachycována tuhostí soustavy stroj-nástroj-obrobek a působí v největší míře na rozměrovou přesnost obrobků.

Pasivní síla F_p – vyskytuje se pouze u vázaného řezání a působí kolmo na obrobenou plochu. Její velikost je přibližně čtvrtina řezné síly, a proto má tato složka má nejmenší význam [1, 9, 21].

Obr. 6.2a ukazuje rozložení celkové řezné síly F do jednotlivých složek u vázaného řezání a obr. 6.2b u ortogonální řezání.

Obr. 6 Složky celkové řezné síly



Zdroj: MÁDL, J. et al. *Technologie obrábění - 1., 2., 3. díl.* Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02091-6.

Výsledná řezná síla je dána vztahem

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} [N] \quad (6.1)$$

Určení těchto složek celkové řezné síly \mathbf{F} je možné provést metodou přímou nebo metodou nepřímou [21].

6.1 Nepřímá metoda měření

Nepřímá metoda spočívá ve stanovení cílové veličiny na základě určitého fyzikálního vztahu, přičemž hodnoty v tomto vztahu určujeme měřením přímým. Nejčastěji se používá k určení řezných sil výkonu a krouticího momentu obráběcího stroje [1, 5].

6.1.1 Určování sil pomocí výkonu stroje

Tato metoda spočívá v určení výkonu stroje, a to zejména z výkonu jeho elektromotoru. Pro měření výkonu se používají především wattmetry, které dávají přímý údaj v porovnání s jinými metodami měření výkonu [1].

Princip této metody spočívá ve změření výkonu stroje \mathbf{P}_0 při chodu na prázdno, při obráběcích otáčkách a rychlosti posuvu. Zároveň se vypočítá výkon stroje \mathbf{P} při obrábění a z těchto výkonů je možné určit řeznou složku celkové řezné síly \mathbf{F}_c .

$$F_c = \frac{60 \cdot 10^3 (P - P_0)}{v} [N] \quad (6.2)$$

Kde v , je řezná složka rychlosti obrábění v mm/min ,

P je výkon stroje při obrábění v kW,

P_0 je výkon stroje naprázdno v kW [7, 3].

Výhoda této metody je v jednoduchosti provedení, nenáročnosti na drahé přístroje a lze ji použít u veškerého obrábění. Nevýhoda spočívá v nepřesnosti způsobenou zaprvé rozdílnou účinností stroje při chodu na prázdno a při zatížení. Další nevýhoda měření spočívá v zanedbání posuvové síly \mathbf{F}_f a pasivní síly \mathbf{F}_p [1].

6.1.2 Určování sil pomocí krouticích momentů

Krouticí moment je také možné použít k určení řezné síly. Principem je měření celkového výkonu pomocí univerzálního zapisovacího přístroje. Po vysunutí nástroje ze záběru se vřeteno zatíží mechanickou brzdou tak, aby bylo dosaženo stejného momentu jako v zátěži [1].

Krouticí moment je potom dán vztahem:

$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} = M_{kb} [Nm] \quad (6.3)$$

Kde D je průměr nástroje nebo obrobku,

M_{kb} je krouticí moment vyvolaný mechanickou brzdou,

M_k je krouticí moment od řezné síly.

I když při aplikaci této metody není určování řezné síly ovlivňováno rozdílnou účinností stroje při zatížení a při chodu naprázdno, je však ovlivňováno proměnlivostí součinitelem tření na brzdě. Tato metoda se používá méně často [1].

Další uvedené metody k zjištění řezné síly uvedené níže jsou dnes již málo používané. Ovšem v rámci seznámení s problematikou jsou i tyto metody popsány.

6.1.3 Měrný řezný odpor a síla

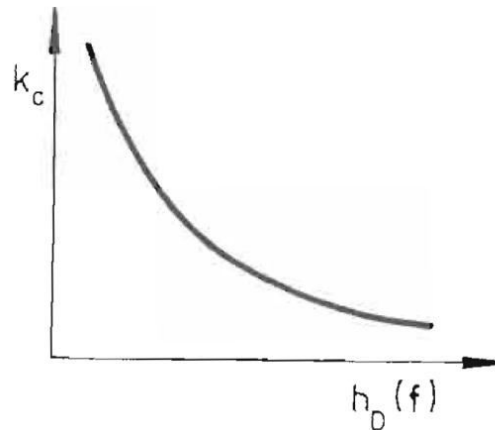
K rychlému určení řezné síly slouží přibližný vztah, kdy se řezná síla počítá z měrného řezného odporu resp. měrné řezné síly k_c . Měrná řezná síla je definována jako velikost řezné síly F_c vztaženou na 1 mm^2 odřezávané vrstvy S [8, 21].

$$k_c = \frac{F_c}{S} [MPa] \quad (6.3)$$

Měrná řezná síla ovšem závisí na mnoha faktorech, a to zejména na obráběném materiálu, tloušťce odřezávané vrstvy, řezné rychlosti, geometrii nože, řezném prostředí atd. [8,9].

Jedním z nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují měrnou řeznou sílu, je její závislost na tloušťce odřezávané vrstvy resp. posuvu (obr. 7) [21].

Obr. 7 Závislost měrného odporu na posuvu



Zdroj: MÁDL, J. et al. *Technologie obrábění - 1., 2., 3. díl.* Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02091-6.

Matematicky lze tuto závislost vyjádřit vztahem:

$$k_c = \frac{C_{kc}}{f^{u_{kc}}} [MPa] \quad (6.4)$$

Kde f je posuv v mm,

C_{kc} , u_{kc} jsou empirické konstanty.

Hodnota exponentu u_{kc} se obvykle pohybuje v rozmezí $0,15 \div 0,30$. Konstanta C_{kc} se mění s použitou technologií a určitým pracovním podmínkám (např. pro soustružení a vyvrtávání je to přibližně $3 \div 5$; pro frézování $4 \div 10$) [21, 9].

Další možností jak přibližně určit měrnou řeznou sílu je ze vztahu:

$$k_c = C_{kc} \cdot R_m [MPa] \quad (6.5)$$

Kde R_m je pevnost v tahu obráběného materiálu.

Z této závislosti je patrné, že měrná řezná síla úměrně stoupá se zvyšující se pevností v tahu.

I přesto, že tyto způsoby určování měrné řezné síly jsou jednoduché, je nutné si uvědomit, že měrná řezná síla závisí na mnoha faktorech. Tyto faktory nejsou vždy známy pro konkrétní druhy obrábění, a proto je často tento způsob pouze přibližný [8].

Další způsob, jak určit složky celkové řezné síly, je použití tzv. empirických vztahů. Pro soustružení lze psát:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [N] \quad (6.6)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [N] \quad (6.7)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [N] \quad (6.8)$$

Zde konstanty C_{fc} , C_{fp} , C_{ff} a exponenty x_{Fc} , y_{Fc} , x_{Fp} , y_{Fp} , x_{Ff} , y_{Ff} jsou určeny empiricky.

Např. pro soustružení oceli ČSN 12 050, DIN C45, nástrojem s břitovou destičkou SK je uváděna závislost [7]:

$$F_c = 2007 \cdot a_p^{0,98} \cdot f^{0,71} \quad [N] \quad (6.9)$$

Ovšem při výpočtu řezných sil těmito vztahy je důležité si uvědomit, že jejich platnost není obecná, ale vztahuje se pouze na určitou část pracovních podmínek (hloubka řezu, posuv). Proto je nutné pro přesný výsledek, mít rozsáhlé výsledky praktických zkoušek [21].

6.2 Přímé metody měření

Pro praktické určení všech tří složek řezné síly se používá metody přímého měření, při které se pro změření jednotlivých složek používají speciální siloměrné přístroje, nazývané dynamometry [21].

Použití dynamometrů je velmi cenné pro výzkum, výrobu nástrojů a výrobních technologií. Určení složek řezných sil při obrábění se používá při analýze, porovnávání a výběru materiálů, nástrojů a strojů [6].

6.2.1 Princip měření

Velikost některých fyzikálních veličin, jako je síla, nelze přímo kvantifikovat. Velikost síly lze však určovat jejími účinky na jiný materiál jako je např. deformace nebo tlak. Tyto efekty nazýváme signály a ty často ještě vyžadují správnou úpravu pro přesné a spolehlivé měření [12].

Proces měření se skládá ze tří částí:

1) Cílová fyzická proměnná (např. síla) se úměrně přemění na jinou vhodnou proměnnou (např. napětí, odpor, výchylka atd.) zvanou signál, pomocí vhodného snímače síly.

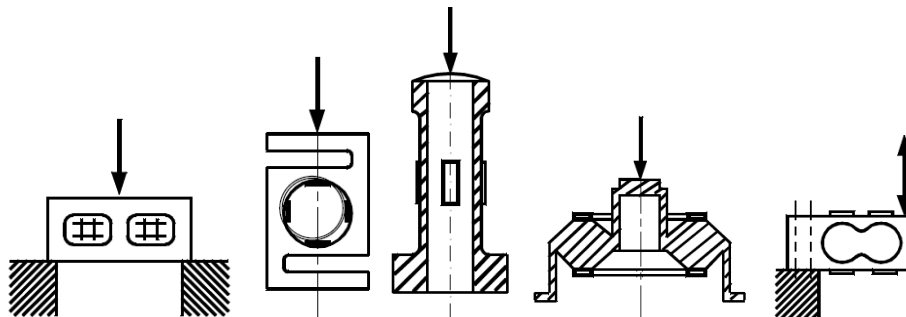
2) Slabý a šumivý signál je zesílen, filtrován a stabilizován pro přesnost měření.

3) Upravený signál je kvantitativně stanoven a zaznamenán pomocí nějaké čtecí jednotky, jako je galvanometr, osciloskop, záznamník nebo počítač [12].

Existuje mnoho typů snímačů síly, které se používají s přístroji s různou složitostí. Velká část z nich používá určitou formu pružného prvku nebo kombinace prvků. Aplikace síly na pružný prvek způsobuje jeho deformaci, která je pak snímačem převáděna na výstup. Výstup může být ve formě elektrického signálu jako u tenzometrických snímačů, nebo mechanických indikací jako u kovových válečků nebo prstenců. Takové snímače jsou obecně známé jako elastické přístroje a tvoří většinu běžně používaných snímačů síly [4].

Různá provedení elastického členu jsou uvedena na obr. 8.

Obr. 8 Různá provedení elastického členu



Zdroj: HUNT, A. et al. Guide to the Measurement of Force. London: Institute of Measurement and Control, 2013. ISBN 0 904457 28 1.

Všechny elastické přístroje fungují na tomto principu, ovšem způsob měření deformace se značně liší [4].

Mezi další široce používané snímače síly patří snímače, využívající piezoelektrického jevu. To je schopnost krystalického materiálu produkovat elektrický náboj, který je úměrný aplikované síle [11, 4].

Sílu lze indikovat i pomocí působení tlaku na tělesu.

Všechny uvedené metody budou podrobněji popsány níže.

6.2.2 Cejchování dynamometru

Výstup měření není přímo síla, ale jiná veličina např. odpor nebo napětí. Proto je nutné určit vztah právě mezi těmito dvěma veličinami, aby na jeho základě bylo možné sílu určovat. K tomu slouží proces zvaný cejchování [4].

Cejchování je definováno jako použití dané metody za stanovených podmínek k určení vztahu mezi známou vstupní proměnnou a měřenou výstupní proměnnou [6].

Správné cejchování má velký vliv na přesnost měření jednotlivých složek řezných sil. Během cejchování se snímače podrobí zatížení předem známé síly a měřicím zařízením se zaznamenávají odpovídající hodnoty výstupní proměnné. Výsledky se zaznamenávají tak, že se přímo vyjadřuje vztah mezi skutečným zatížením dynamometru v místě působení složky síly řezání a údajem na měřicím zařízení. Výsledkem cejchování je sestavení cejchovní křivky, která je grafickým vyjádřením závislosti mezi danou složkou síly řezání a odpovídající veličinou (např. mA, mV, apod.). Při cejchování vícesložkových dynamometrů je nutné uvedený způsob cejchování aplikovat pro každou složku síly řezání i krouticí moment [1, 6, 4].

Aby docházelo k co nejmenším chybám v měření, měl by dynamometr zaručit následující podmínky:

Vysokou tuhost – tuhost je dána zatěžující silou, která způsobí deformaci. Tato deformace nesmí být vysoká, aby nebyly ovlivněny podmínky obrábění.

Vysokou citlivost – citlivost je vyjádřena jako poměr elektrického výkonu na jednotku vstupní síly. Dynamometry musí být schopny rozlišovat nejméně 1 % plného rozsahu výkonu. Citlivost úzce souvisí s použitím měřicí metody a tuhostí dynamometru.

Vysokou frekvenční odezvu – ta zaručuje, aby hodnoty nebyly ovlivněny vibracemi v rámci měření.

Nízkou setrvačnost – setrvačnost je důležitá zejména při dynamických měřeních, kdy je důležité sledovat kromě měřené síly i její časový průběh. Pro korektnost měření by měla být setrvačnost co nejmenší.

Opakovatelnost – je definována jako míra shody mezi výstupy systému měření pro opakované aplikace.

Reprodukovatelnost – je definována jako blízkost mezi výsledky měření stejné síly za pozměněných podmínek [1, 4, 5].

6.2.3 Rozdělení dynamometrů

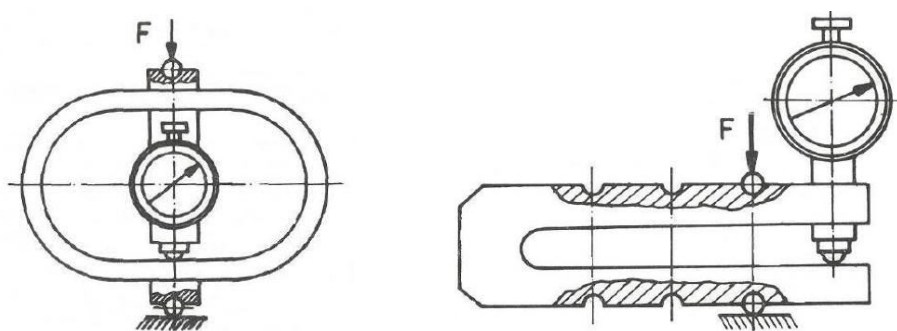
Dynamometry lze rozdělit do několika skupin:

Podle počtu měřených složek rozdělujeme dynamometry jednosložkové, dvousložkové, tříložkové a pro měření krouticích momentů. Dále podle metody obrábění jsou dynamometry pro soustružení, frézování, vrtání atd. Podle měřicí metody máme dynamometry mechanické, pneumatické, elektrické (indukční, kapacitní, odporové, piezoelektrické), optické atd. [1].

6.2.4 Mechanický dynamometr

Mechanický dynamometr je jeden z nejjednodušších způsobů měřidel. Jedná se pouze o kovový váleček zatížený osovou silou. Nejčastěji pomocí číselníkového úchylkoměru se zjistí délka válečku po zatížení a poté se odhaduje síla interpolací na základě předchozích známých sil právě pro změřenou délku válečku. Dalšími možnostmi měření jsou pomocí třmenu nebo prstence (obr. 9a,b), kde se deformace měří přes vnitřní průměr. Kromě jednoduchosti provedení patří mezi výhody těchto zařízení stálost údajů přesnost měření v rozmezí 0,5 ÷ 2 %. Hlavní nevýhodou je závislost údajů na teplotě, malý rozsah a velká setrvačnost, která je znemožňuje použití pro dynamická měření [1, 4].

Obr. 9 Schéma mechanického dynamometru



a) prstencový

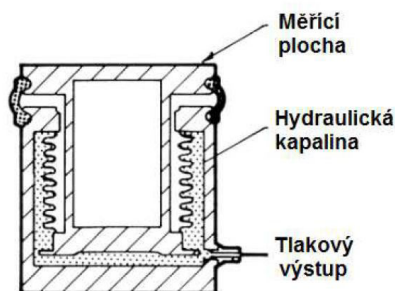
b) třmenový

Zdroj: BRYCHTA, J. et. al. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Ediční středisko VŠB, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3.

6.2.5 Hydraulický dynamometr

Hydraulický dynamometr funguje na principu měření hydraulického tlaku, kdy je zařízení naplněno kapalinou (obvykle olejem) a síla působící na měřicí plochu vyvolá zvýšení tlaku v kapalině (obr. 10). Tento tlak je měřen pomocí tlakového snímače, nebo pomocí manometru. Ten může být umístěn až několik metrů od zařízení za použití speciální kapalinou naplněné hadice. Výhoda těchto dynamometrů spočívá v samostatnosti, kdy není nutno přivádět energii a také v jednoduchosti jejich konstrukce. Nevýhodou je ovšem jejich velká setrvačnost a nízká citlivost a nutnost těsnění, které neumožňují použití při dynamických měřeních [1, 4, 18].

Obr. 10 Schéma hydraulického dynamometru

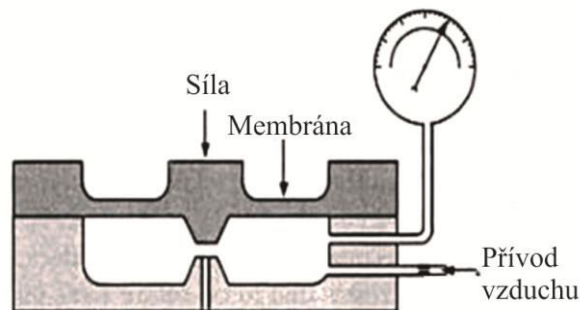


Upraveno; Zdroj: <http://www.npl.co.uk/science+-technology/mass,-force,-pressure/force/hydraulic-load-cell>

6.2.6 Pneumatický dynamometr

Pneumatický dynamometr je funkčně podobný hydraulickému, kdy zatěžující síla působí na stranu pístu nebo membrány z pružného materiálu. Snímací zařízení se skládá z komory s uzávěrem, kudy je vháněn vzduch pod tlakem (obr. 11). Tento tlak působí z druhé strany membrány nebo pístu a je přímo úměrný působící síle. Jakmile dojde k rovnovážnému stavu, je možné přečíst údaj z tlakoměru. Předností je snadná obsluha a údržba, vysoká spolehlivost a citlivost v porovnání s elektrickými způsoby a relativně nízké náklady na pořízení a provoz. Nevýhodou je nízká rychlost odezvy [1, 4].

Obr. 11 Schéma pneumatického dynamometru

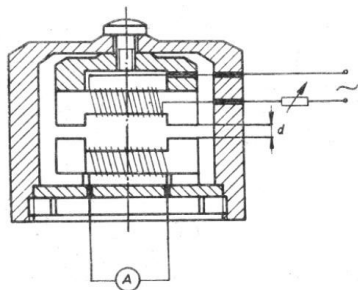


Upraveno; Zdroj: <http://controlmakers.ir/en/weighing-system/load-cell-basics/>

6.2.7 Indukční dynamometr

U elektrických dynamometrů indukčních dochází ke změně indukčnosti v obvodu snímače v důsledku působení zatěžující síly (obr. 12) [1].

Obr. 12 Schéma indukčního dynamometru



Zdroj: BRYCHTA, J. et. al. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Ediční středisko VŠB, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3.

6.2.8 Kapacitní dynamometr

U elektrických dynamometrů kapacitních se používá kapacitní senzor, který snímá deformace elastického prvku. Snímač se skládá ze dvou paralelně uložených desek, které jsou připevněné k elastickému členu. Tyto desky tvoří kondenzátor. Vlivem zatěžující síly se deformuje elastický prvek, což způsobuje změnu vzdálenosti desek kondenzátoru a tím i změnu jeho kapacity. Tato změna odpovídá danému zatížení. Vzhledem k vysoké citlivosti na okolní vlivy a náročnosti na měřicí techniku se tento druh dynamometr používá zřídka [1, 4].

6.2.9 Odporový dynamometr

Elektrický dynamometr odporový funguje na principu měření deformace snímačů, které nazýváme odporové tenzometry. Odporové tenzometry jsou vodiče nebo polovodiče, které se připevňují na deformovaný objekt. Vlivem zatěžující síly se bude objekt deformovat a s ním i odporový tenzometr. Následně měříme jeho změnu odporu, který je přímo úměrný deformaci tělesa. Tato deformace vzniká na deformačním elementu v důsledku působení síly z obrábění [1, 4, 23].

Aby bylo možné pochopit princip odporových dynamometrů, je nutné si vysvětlit podrobněji princip fungování tenzometrů.

Odporové tenzometry se rozdělují na:

- 1) Kovové
 - Drátkové
 - Vrstvové
 - Fóliové
- 2) Polovodičové

Kovový tenzometr

Kovový vodič o délce L , průřezu S a měrným elektrickým odporem ρ má odpor:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (6.10)$$

Deformací vodiče se změní:

- 1) Délka o ΔL .
- 2) Průřez o ΔS .
- 3) Vlivem strukturálních změn i měrný odpor o $\Delta\rho$.

Tím se změní i odpor vodiče o ΔR , kde pro malé změny bude platit vztah:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} \quad (6.11)$$

Uvažujeme-li relativní deformaci,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (6.12)$$

pak je možné odvodit vztah pro relativní změnu odporu v oblasti pružných deformací:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (6.13)$$

Kde k je koeficient deformační citlivosti.

Koeficient deformační citlivosti by z hlediska měřicí techniky měl být stálý, nezávislý na teplotě a deformaci. Jeho hodnota se téměř vždy určuje experimentálně.

Jedním z nejpoužívanějších materiálů u kovových tenzometrů je konstantan (slitina Cu-Ni). Pro tento materiál je konstanta přibližně $k = 2$. Konstanty pro jiné materiály jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Parametry slitin používané pro kovové tenzometry

Název materiálu	Složení	Průměrná hodnota k
Konstantan	57 % Cu, 43 % Ni	2.05
Karma	73 % Ni, 20 % Cr (příp. Fe+Al)	2.10
Nichrome V	80 % Ni, 20 % Cr	2.20
Platina-wolfram	92 % Pt, 8 % W	4.00

Zdroj: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>

Protože změna odporu je hlavně závislá na změně délky, je žádoucí, aby délka vodiče byla co největší. Proto se vodič používá ve tvaru meandru [20, 4, 19, 22].

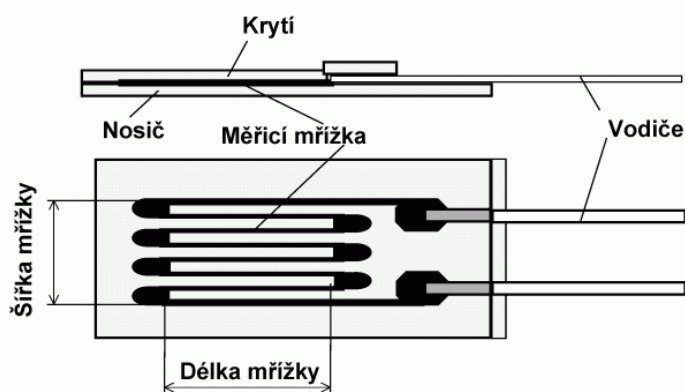
Drátkové

Jedná se o nejstarší typ tenzometru. Skládá se z měřicí mřížky tvořené odporovým drátem o průměru 0,01 až 0,05 mm nalepeným na tenký podklad z papíru nebo plastu. Tenzometr se lepí na měřenou součást speciálním lepidlem z pryskyřic nebo acetátu. Drátkové tenzometry mají malý rozptyl odporu a to 60 až 350 ohmů [4, 1].

Fóliové tenzometry

Fóliové tenzometry jsou dnes jedním z nejpoužívanějších druhem snímačů. Skládají se z izolační vrstvy obdélníkového tvaru o tloušťce přibližně 20-50 μm , na které je upevněna měřicí mřížka vyrobená z tenké fólie o tloušťce přibližně 2-5 μm . Na povrchu snímače je umístěna krycí vrstva. K dosažení požadovaného tvaru měřicí mřížky je obvykle docíleno fotolitografickou technikou z kovových fólií. Výhodou fóliových odporových tenzometrů je vysoká mechanická odolnost, malý vliv změn teplot, necitlivost vůči stranovým namáháním, vysoká životnost nebo možnost vytvoření libovolného tvaru. Ve srovnání s drátkovými tenzometry se fóliové tenzometry vyznačují lepšími podmínkami pro převod deformace na mřížku, proto jsou daleko přesnější a stabilnější. Na obr. 13 je vidět schéma tenzometru [4, 1].

Obr. 13 Fóliový tenzometr



Zdroj: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>

Vrstvové tenzometry

Vrstvové tenzometry se vyrábějí napařováním tenkých vrstev kovů přímo na měřené místo deformačního členu nebo na malý kovový substrát pro následné připevnění k prvku. Tato metoda umožňuje vyrábět snímače velmi malých rozměrů. Na měřené místo se postupně nanáší vrstva izolační, potom vrstva pro spojovací sekci, nakonec vrstva odporová [4].

Polovodičové tenzometry

Vedle kovových tenzometrů se také používají tenzometry polovodičové. Podstatou polovodičových tenzometrů je využití piezorezistentních vlastností některých polovodičových materiálů (např. křemík, germanium), dotovaných dalšími příměsemi. Odporovým elementem je orientovaný výřez ve tvaru tenkého pásku z monokrystalu polovodiče, který svůj odpor při deformaci velmi silně mění. Odporové polovodičové tenzometry se vyznačují vysokou hodnotou součinitele deformační citlivosti, která je při porovnání s odporovými snímači až o dva řády vyšší. Jak je vidět z rovnice, tak oproti kovovým se vyznačují značnou nelinearitou změn odporu na deformaci, kterou je nicméně možné digitálně kompenzovat. Výroba polovodičových tenzometrů je ale velmi pracná a tedy i nákladná. S tímto bezprostředně souvisí i jejich vysoké ceny [4, 20, 24].

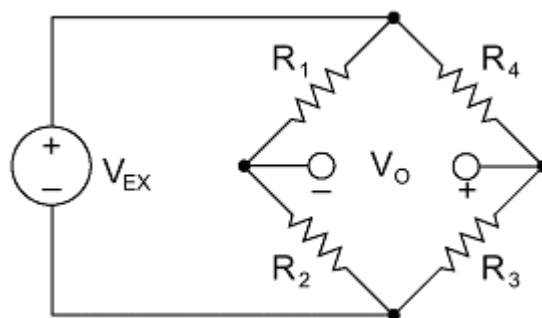
U polovodičového tenzometru je závislost poměrné změny odporu na prodloužení vyjádřena rovnicí:

$$\frac{\Delta R}{R} = k_1 \varepsilon + k_2 \varepsilon^2 \quad (6.10)$$

Kde k_1 , k_2 jsou koeficienty deformační citlivosti.

Protože měřené změny odporu tenzometrů jsou velmi malé, používá se zapojení do Wheatstoneova můstku (obr. 14). Jedná se vlastně o dva děliče napětí tvořené odpory R_1 až R_4 . Pokud platí $R_1/R_2 = R_3/R_4$ je výstupní napětí V_o nulové a můstek je považován za vyvážený. V tom případě jakákoli změna odporu v každé větvi můstku vede k nenulovému výstupnímu napětí. Pokud nahradíme odpor za tenzometr, libovolná změna odporu tenzometru nevyváží most a vytvoří nenulové výstupní napětí. Toto napětí je funkcí deformace, na základě které je možné měřit. Používají se tři druhy můstků – čtvrtmůstek, polomůstek a plný můstek, které jsou dány počtem zapojených tenzometrů, jejich orientací vůči měření a druhem namáhání [10, 22].

Obr. 14 Schéma Wheatstoneova můstku



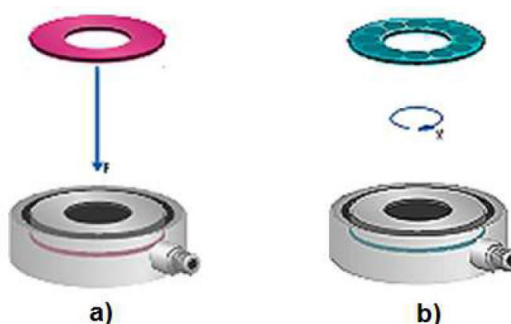
Zdroj: <http://www.ni.com/white-paper/3642/en/>

6.2.10 Piezoelektrický dynamometr

Piezoelektrické dynamometry jsou dnes nejpoužívanější moderní přístroje na měření sil a krouticích momentů. Princip těchto přístrojů se značně liší od jiných metod měření. Ke konstrukci těchto typů snímačů se využívá piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Nejznámější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen díky svým dobrým mechanickým vlastnostem, ale používají se další materiály např. na bázi titaničitanu barnatého nebo Seignettovy soli. Piezoelektrický element tvoří výbrus vytvořený z krystalu křemene, který má často tvar tenkých desek nebo disků. Tyto elementy měří jednotlivé složky sil zvlášť a podle jejich počtu se vyskytují dynamometry jednosložkové (obr. 15), měřící jednu složku síly nebo krouticí moment, a vícenosložkové (obr. 16), měřící více složek sil a krouticí moment. V závislosti na poloze, ve které jsou vyříznuty z krystalu, se získají disky, které jsou [2, 4, 6, 14]:

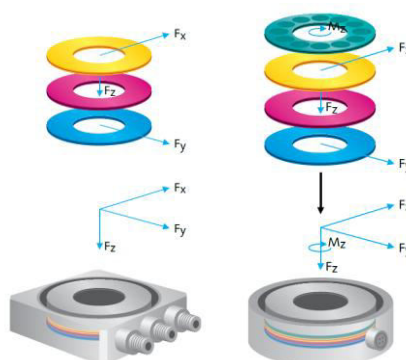
- 1) Citlivé pouze na tlak (podélný efekt), který měří řeznou složku F_c celkové řezné síly.
- 2) Citlivé pouze na smyk v jednom konkrétním směru (střížný efekt), který měří vychylující síly F_x a F_y , kolmé na F_c . Z vychylujících sil je možné dopočítat pasivní a posuvovou sílu. Zároveň měří krouticí moment.

Obr. 15 Jednosložkové dynamometry



Zdroj: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-001e-05.14.pdf>

Obr. 16 Vícesložkové dynamometry



Zdroj: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-001e-05.14.pdf>

U piezoelektrických dynamometrů není průhyb při plném zatížení větší než několik mikrometrů, zatímco u běžných systémů může být zapotřebí několik desetin milimetru. Tak jsou piezoelektrické dynamometry velmi tuhé a mají vysokou frekvenční odezvu, takže i rychlé události mohou být měřeny uspokojivě [2].

Snímač je připojen k elektronickému zařízení pro přeměnu nabíjecího signálu na napěťový signál úměrný mechanické síle. I přesto, že je tento signál poměrně vysoký, není možné k měření použít přímo ukazovacího měřicího přístroje. Nýbrž je nutné zařadit zesilovač s velkým vstupním odporem, jehož hlavním úkolem je impedanční přizpůsobení, méně již vlastní zesílení signálu. Běžně se využívá obvodů realizovaných s tranzistory řízenými elektrickým polem [4, 6, 12, 14].

7 Základní metody třískového obrábění

I když bylo vysvětleno mnoho principů měření, v této části se budeme zabývat pouze piezoelektrickými dynamometry, které jsou dnes nejpřesnější a nejčastěji využívané. Nejprve budou uvedeny faktory ovlivňující velikosti řezných sil u jednotlivých obráběcích procesů, poté je představena metoda měření právě piezoelektrickým dynamometrem.

7.1 Soustružení

Soustružení je metoda obrábění používaná pro zhotovení součástí rotačních tvarů, při níž se většinou používají jednobřité nástroje různého provedení. Z mnoha hledisek představuje soustružení nejjednodušší způsob obrábění a také velmi frekventovanou metodu využívanou ve strojírenství. Obrobek koná hlavní pohyb a nástroj koná pohyb vedlejší.

7.1.1 Faktory ovlivňující řezné síly

Jak již bylo zmíněno, složky celkové řezné síly F jsou ovlivněny mnoha faktory. Ty můžeme rozdělit do několika skupin.

Faktory související obrobkem:

Materiál obrobku – se vzrůstající pevností v tahu a tvrdostí obráběného materiálu se zvyšují složky celkové řezné síly [8].

Faktory související s řeznými podmínkami:

Řezná rychlost v_c – složky celkové řezné síly se zvyšují se vzrůstající řeznou rychlostí až do určité rychlosti, kde dosáhnou maximální hodnoty. Poté se začnou zmenšovat a ve vyšších rychlostech se poměrně stabilizují. Počáteční růst je dán tvorbou nárůstku, který je až 5krát pevnější a tvrdší než tříska. Ve vysokých rychlostech se již nárůstek nevyskytuje kvůli vysoké teplotě okolo 600 °C, kdy je vysoká plasticita materiálu. To má za následek snižování velikosti složek celkové řezné síly. Ovšem rozdíly ve změnách sil nejsou příliš vysoké [8, 3, 16].

Rychlost posuvu f – rychlostí posuvu je velmi ovlivněna řezná síla. Řezná síla roste lineárně s posuvem při vyšších rychlostech, ale při pomalejších rychlostech je změna exponenciální [3, 8].

Hloubka řezu – ve srovnání s řeznou rychlostí a posuvem ovlivňuje složky celkové řezné síly hloubka řezu nejvíce. S nárůstem hloubky řezu se zvětšuje tloušťka třísky, což vyžaduje větší řezné síly nutné pro odříznutí třísky. Nárůst řezné síly poměrně lineární se zvětšující se hloubkou řezu [3, 8].

Procesní kapalina – aplikace procesní kapaliny snižuje složky řezných sil v důsledku snížení vnějšího tření a to až o 40 %. Ovšem se zvyšující se řeznou rychlostí tento účinek klesá [3].

Faktory související s nástrojem:

Úhel čela – z geometrie břitu úhel čela ovlivňuje složky řezných sil nejvíce. S jeho zvyšováním roste měrný řezný odpor a tím řezné síly [8].

Úhel nastavení – s rostoucím úhlem nastavení klesá řezná síla z důvodu zmenšování měrného odporu. Ten klesá v závislosti na zvětšující se tloušťce odřezávané vrstvy. Posuvová síla F_f klesá a pasivní síla F_p roste. To je dáno natáčením jejich výslednice, která přibližně zůstává ve stejné pozici k ostří [8, 3].

Úhel sklonu ostří – obvykle nabývá hodnot mezi -6° do 6° . Protože tento úhel ovlivňuje směr celkové řezné síly, není vliv na jednotlivé složky síly stejný. Hlavní vliv má na posuvovou sílu a pasivní sílu [1, 8].

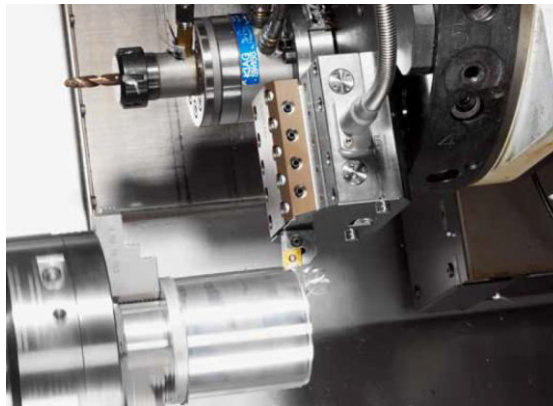
Poloměr špičky – s větším poloměrem špičky výrazně roste hlavně pasivní síla. Posuvová síla naopak klesá. Poloměr špičky mění úhel nastavení, a proto má na složky sil opačný vliv [3, 8].

Nutno dodat, že řezné síly ovlivňují i další neméně důležité podmínky.

7.1.2 Měření řezných sil u soustružení

V případě piezoelektrického dynamometru jsou u soustružení síly měřeny pomocí stacionárního dynamometru (obr. 17). To znamená, že je nástroj připevněn přímo k dynamometru pomocí nástrojového držáku, přičemž dynamometr je vložen mezi nástroj a nožovou nebo revolverovou hlavu. Tímto sestavením lze měřit vysoce přesně a dynamicky [6].

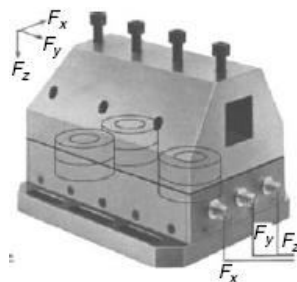
Obr. 17 Piezoelektrický dynamometr pro soustružení



Zdroj: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-001e-05.14.pdf>.

V případě piezoelektrického dynamometru se často používá třísložkový systém pro měření všech složek celkové řezné síly. V tomto případě jsou použity dva disky citlivé na smyk pro měření vychylujících složek F_x a F_y a jeden disk citlivý na tlak pro měření složky F_z . Tyto disky jsou jednotlivě vloženy pod vysokým předpětím mezi základovou desku a horní desku (obr. 18) [2,6].

Obr. 18 Schéma uložení dynamometru



Zdroj: EBRAHIMI, F. *Piezoelectric Materials and Devices - Practice and Applications*. London: InTech, 2013. ISBN 978-953-51-1045-3.

7.2 Vrtání

Vrtání je druh třískového obrábění, kterým se zhotovují průchozí či neprůchozí otvory stanoveného průměru v různých materiálech. K vrtání se používá nástrojů vrtáků a zařízení vrtaček.

Výslednou řeznou sílu F lze při vrtání dvoubřítým šroubovitým vrtákem rozložit na tři složky – řeznou F_c , posuvovou F_f a pasivní F_p jako u soustružení. Každá z těchto sil se však ještě rozkládá na další dvě složky (při použití dvoubřitého vrtáku) [3, 8].

7.2.1 Faktory ovlivňující řezné síly

Faktory související s obrobkem:

Materiál obrobku – stejně jako u soustružení, zvyšující se tvrdost a pevnost materiálu obrobku má za následek zvětšování řezných sil [3].

Faktory související s geometrií vrtáku:

Průměr vrtáku – se zvyšujícím se průměrem vrtáku se zvětšuje průřez odřezávané vrstvy, a tím i řezná síla a krouticí moment [3].

Úhel sklonu šroubovice – při zvětšování úhlu sklonu šroubovice se zvětšuje i úhel čela. To vede ke zmenšování oblasti plastické deformace a ke snižování tření třísky v drážce vrtáku, a tím i ke zmenšování silových poměrů [3, 8].

Úhel nastavení – zvětšováním tohoto úhlu roste tloušťka odřezávané vrstvy a klesá měrný odpor a krouticí moment. Ovšem obráběný materiál se hůře dostává pod břít vrtáku a osová síla se zvětšuje [8].

Faktory související s řeznými podmínkami:

Rychlost posuvu – větší posuv zvětšuje průřez odřezávané vrstvy, což má za následek vyšší řezné síly [3].

Hloubka vrtu – jestliže zvyšujeme hloubku vrtání, vytváříme nesprávné podmínky pro přívod řezné kapaliny, odvod třísky a vývoje tepla. Kvůli tomu se zvyšuje opotřebení nástroje stejně jako krouticí moment a posuvová síla [3].

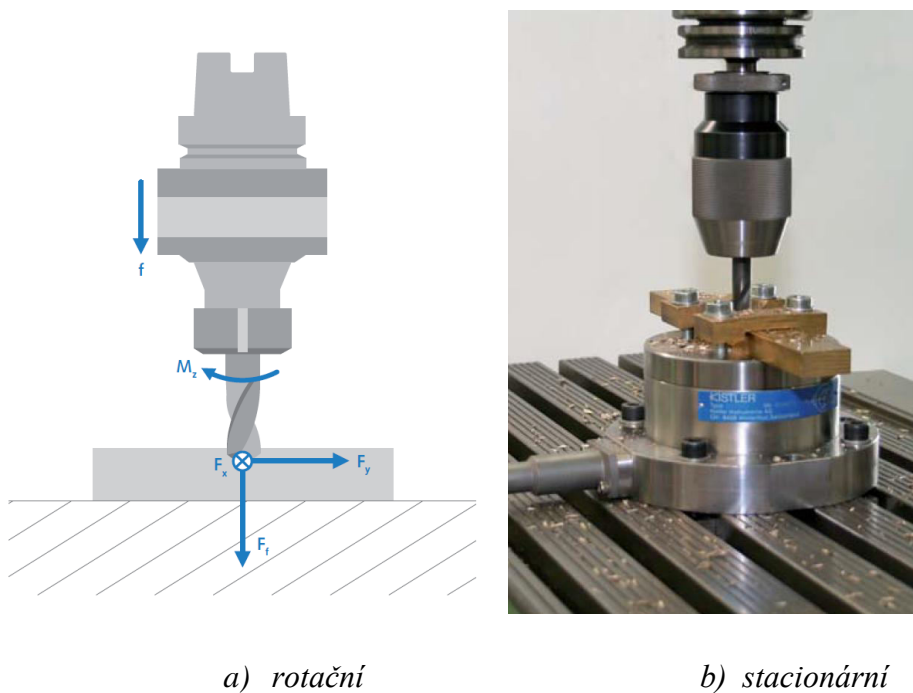
Řezná kapalina – použití vhodné řezné kapaliny může snížit posuvovou sílu a krouticí moment až o 30% pro ocel [3].

7.2.2 Měření řezných sil u vrtání

U procesu vrtání jsou k dispozici dvě techniky měření. První možnost je pomocí stacionárního dynamometru, kde je obrobek namontován na jeho horní desce (obr. 19b). Obrobek se musí udržovat neustále ve středu dynamometru pomocí vhodných držáků. Druhá možnost je měření pomocí rotačních dynamometrů, kdy je dynamometr vložen přímo do vřeten stroje a nástroj je připojen k dynamometru (obr. 19a). Ve srovnání se stacionárním přináší rotační dynamometr několik výhod, a to je měření krouticího momentu přímo a nezávislost na poloze vrtání [6].

Při měření je možné monitorovat krouticí moment, posuvovou sílu F_f a vychylující síly F_x a F_y . Řeznou sílu F_c a pasivní sílu F_p je nutné vypočítat z těchto složek.

Obr. 19 Možnosti uložení rotačního a stacionárního dynamometru



Zdroj: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-001e-05.14.pdf>

7.3 Frézování

Jedná se o obráběcí metodu, při které dochází k úběru materiálu břity otáčejícího se nástroje.

7.3.1 Faktory ovlivňující řezné síly

Faktory související s obrobkem:

Materiál obrobku – podobně jako u soustružení a vrtání, zvyšující se tvrdost a pevnost materiálu obrobku má dopad na zvětšování řezných sil [3, 8].

Faktory související s geometrií frézy:

Průměr frézy – má vliv na velikost tloušťky třísky. Navzdory zvyšujícímu se měrnému řeznému odporu (síle), klesá průřez třísky a tím i řezné síly [3].

Poloměr ostří – zvyšující se poloměr ostří má dopad na zvětšování řezných sil.

Úhel čela – s menšími úhly čela se snižuje stupeň plastické deformace. To má za následek zmenšení řezných sil [3].

Faktory související s řeznými podmínkami:

Rychlost posuvu – se zvýšením posuvu se okamžitě zvětší tloušťka třísky a to má za následek nárůst řezných sil [25].

Radiální hloubka řezu – radiální hloubka řezu hraje důležitou roli ve frézovacích silách, protože při větší radiální hloubce řezu se "kontaktní plocha" zvyšuje a tím se zvětšují i řezné síly [25].

Axiální hloubka řezu - axiální hloubka řezu je dalším faktorem ovlivňujícím "kontaktní plochu", protože ovlivňuje axiální délku řezu. To znamená, že když se zvětší axiální hloubka řezu, zvětší se délka drážek frézy zapojených v řezu a také se zvýší síla frézování [25].

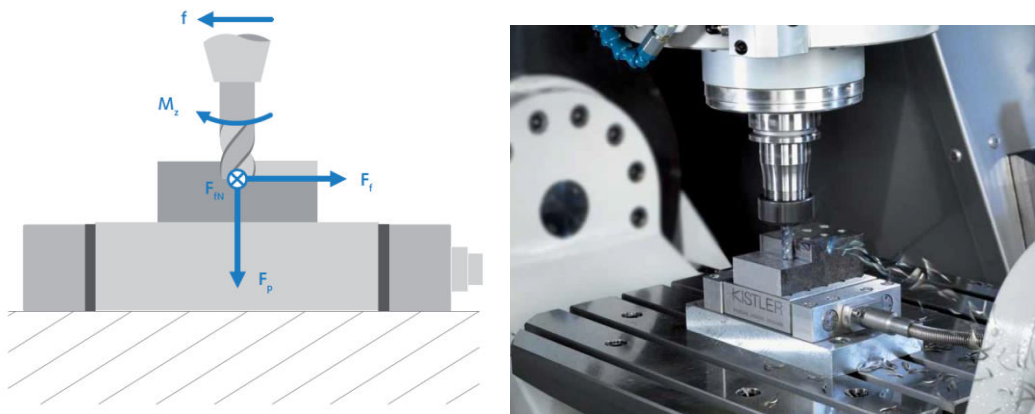
7.3.2 Měření řezných sil u frézování

Síly během frézovacího procesu se značně mění. Je to způsobeno přerušovaným řezem, měnící se tloušťce třísky a měnícímu se počtu zubů v záběru. To znamená, že dynamometr je vystaven extrémně silnému dynamickému zatížení [6].

Pro měření řezných sil je možné použít stacionární a rotační dynamometr. Při použití stacionárního dynamometru se namontuje na stůl obráběcího stroje [obr. 20]. Aby se snížila váha na dynamometru a tím se snížil negativní vliv na dynamiku dynamometru, obrobek se přišroubuje přímo k dynamometru, což umožňuje vynechání těžkých a často nepevných upínacích zařízení. Rotační dynamometr je vložen přímo do vřetena stroje, zatímco nástroj je připojen k dynamometru. Oproti stacionárním dynamometrům má rotační dvě výhody: Dynamika měřicího přístroje na jedné straně není ovlivněna změnou hmotnosti, protože hmotnost nástroje zůstává konstantní. Na druhé straně je možné měřit krouticí moment přímo během celého měření [6].

Při frézování se aplikační bod síly značně liší. V důsledku toho se používají dynamometry se čtyřmi kusy třísložkových prvků pro měření síly [2].

Obr. 20 Ukázka stacionárního dynamometru



Zdroj: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-001e-05.14.pdf>

8 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala metodami a zařízeními pro měření řezných sil při obrábění. Pro objasnění dané problematiky byly nejdříve popsány pojmy z oblasti obrábění, které mají přímou souvislost s řeznými silami. Jedná se především o kinematiku řezného pohybu a geometrii řezného nástroje, jež mají zásadní vliv na velikosti složek celkové řezné síly. Po vysvětlení těchto okruhů bylo možné přejít k hlavní části. V této části se práce zabývala nejprve stručným přehledem řezných sil vznikajících při procesu obrábění. A poté práce přešla k jednotlivým metodám, kterými je možné tyto síly změřit. Nejdříve byla popsána metoda nepřímá, ale hlavní pozornost se soustřeďovala na metodu přímou, při které jsou řezné síly měřeny přímo pomocí přístrojů zvané dynamometry. Jednotlivé druhy těchto přístrojů byly podrobněji popsány. V další kapitole se práce zaměřovala na jednotlivé procesy obrábění. Konkrétně to bylo soustružení, vrtání a frézování. U těchto procesů bylo poukázáno na faktory ovlivňující velikosti řezných sil a zároveň byla stručně uvedena konkrétní metoda měření v rámci každého obráběcího procesu.

Protože měřením řezných sil je možné určovat parametry, které vedou k odhadu a kontrole kvality výrobku, je jejich znalost velmi důležitá v rámci hospodárnosti a efektivnosti výroby. Vysoké řezné síly přináší obráběcímu procesu značné množství nevýhod v rámci větších deformací řezných nástrojů a obrobků, nebo také kratší životnosti nástrojů. V dnešní době je žádoucí, aby obrábění probíhalo při nízkých nákladech a zároveň vyprodukovalo co nejvyšší výkon. Proto je nalezení podmínek, které budou udržovat balanc mezi hospodárností a nízkými řeznými silami, velmi zásadní.

Cílem této práce bylo shromáždit aktuální informace o metodách a zařízeních používaných pro měření řezných sil při obrábění. Toho bylo docíleno zejména ze zdrojů české a zahraniční literatury. Bylo čerpáno převážně z monografií, odborných článků a jiných zdrojů v tištěné i elektronické podobě.

Tímto může být tato práce přínosem pro specialisty z oblasti strojírenství, jelikož přesná znalost řezných sil během obráběcích procesů může podstatně zefektivnit strojírenskou výrobu. Měření, jimiž lze určit parametry vedoucí k odhadu a kontrole kvality výrobků, mohou mít pozitivní vliv na ekonomický dopad ve strojírenské oblasti.

9 Seznam citované literatury

- [1] BRYCHTA, J. et al. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Ediční středisko VŠB, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] EBRAHIMI, F. *Piezoelectric Materials and Devices - Practice and Applications*. London: InTech, 2013. ISBN 978-953-51-1045-3.
- [3] EL-HOFY, H. *Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4665-7702-2.
- [4] HUNT, A. et al. *Guide to the Measurement of Force*. London: Institute of Measurement and Control, 2013. ISBN 0 904457 28 1.
- [5] CHILDS, T. et al. *Metal Machining, Theory and applications*. London: Edward Arnold Publishers Ltd, 2000. ISBN 0 340 69159 X.
- [6] *KISTLER measure, analyze, innovate*. [online]. Kistler. [cit. 2018-2-3]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-001e-05.14.pdf>.
- [7] KOČMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Cerm, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [8] MÁDL, J. *Teorie obrábění*. Praha: ČVUT, 1990.
- [9] MÁDL, J. et al. *Technologie obrábění - 1., 2., 3. díl*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02091-6.
- [10] MALAGI, R. R., RAJESH, B. C. *Factors Influencing Cutting Forces in Turning and Development of Software to Estimate Cutting Forces in Turning* [online]. 2012 [cit. 2018-2-22]. Dostupné z: http://www.ijeit.com/vol%202/Issue%201/IJEIT1412201207_07.pdf.
- [11] *Measuring Strain with Strain Gages* [online]. 2016 [cit. 2018-2-22]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3642/en/>.

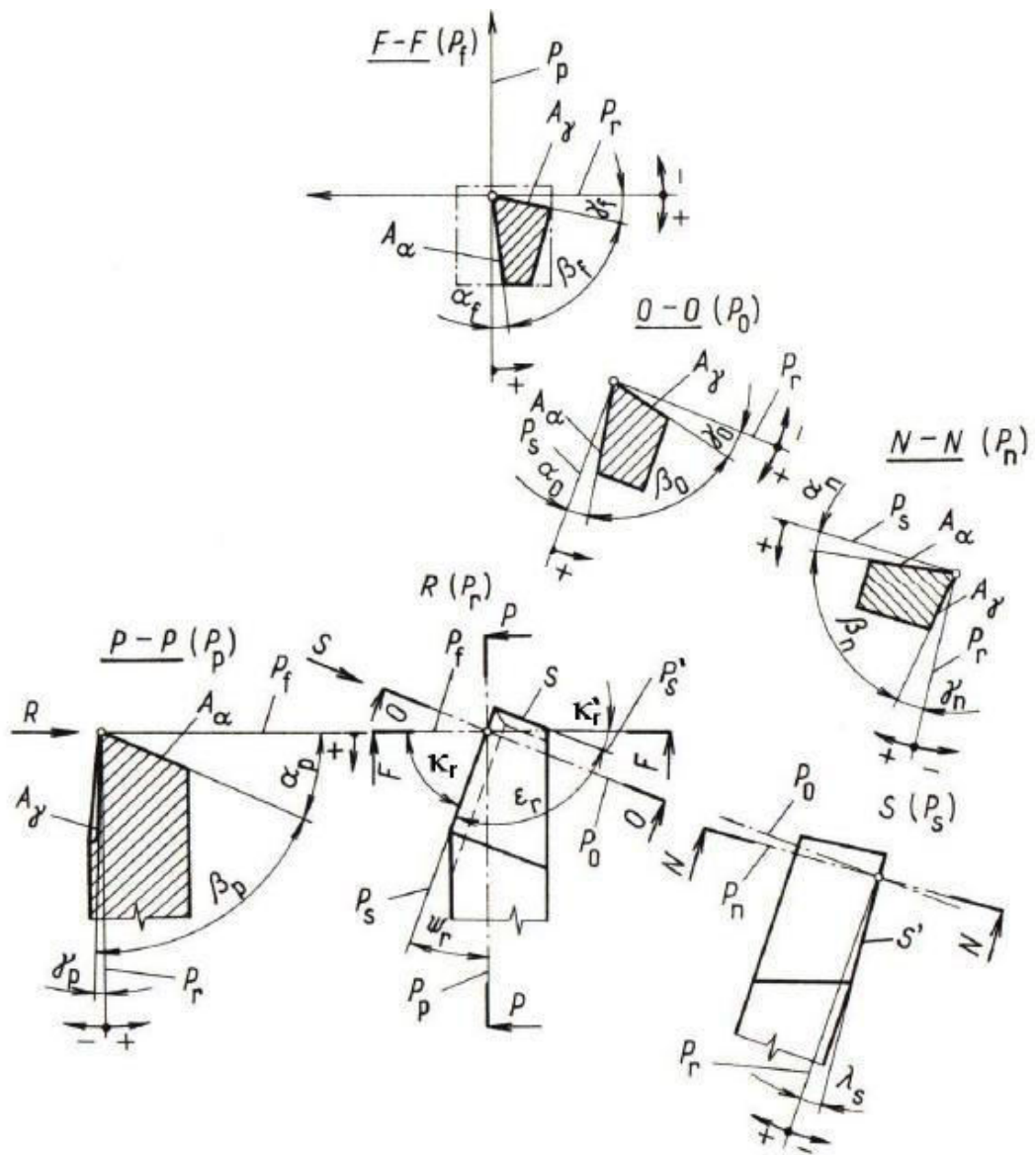
- [12] *Mechanics of machining* [online]. 2009 [cit. 2018-2-22] Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/112105127/pdf/LM-10.pdf>.
- [13] *Měření mechanických veličin* [online]. 2003 [cit. 2018-2-22] Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/sila/ramce_sila.htm.
- [14] *Piezoelektrické snímače* [online]. 2003 [cit. 2018-3-1] Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/ka03-05.htm>.
- [15] *Průručka pro technology* [online]. 2012 [cit. 2018-2-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html>.
- [16] RAO, D. J., NAGESWARA RAO, D., SRIHARI, P. *Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation* [online]. 2013 [cit. 2018-2-22]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813017360>.
- [17] *Řezný nástroj* [online]. 2014 [cit. 2018-2-22] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1184>.
- [18] *Síla bude změřena* [online]. 2008 [cit. 2018-2-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sila-bude-zmerena.html>.
- [19] *Snímače mechanického namáhání* [online]. 2014 [cit. 2018-2-15]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1588>.
- [20] *Snímače pro měření deformace* [online]. 2012 [cit. 2018-3-3] Dostupné z: http://www.kst.tul.cz/podklady/experimentalnimetody/prednasky/p8_snimace_deformace.pdf.
- [21] SOVA, František. *Technologie obrábění a montáže*. Praha: Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. ISBN 978-80-7082-823-4.
- [22] VASQUES, H. *Measuring cutting forces in machining processes* [online]. 2015 [cit. 2018-2-11] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280821670_MEASURING_CUTTING_FORCES_IN_MACHINING_PROCESSES.

- [23] VOJÁČEK, A. *Odporové tenzometry* [online]. 2017 [cit. 2018-2-22]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>.
- [24] VOJÁČEK, A. *Polovodičové tenzometry* [online]. 2006 [cit. 2018-2-2] Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006111601>.
- [25] WEN-HSIANG, L. *Modeling of Cutting Forces in End Milling Operations* [online]. 2000 [cit. 2018-2-22]. Dostupné z: <http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/3-1/3-1-2.pdf>.

10 Přílohy

Příloha č. 1

Nástrojové úhly



Zdroj: BRYCHTA, J. et. al. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Ediční středisko VŠB, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3.