

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní



Diplomová práce

Monitorování řezného procesu při vrtání

Drilling proces monitoring

Vypracoval: Bc. Jonáš Budín
Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Studijní program: Výrobní inženýrství
Zadávací ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Praha, 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Budín** Jméno: **Jonáš** Osobní číslo: **465336**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Monitorování řezného procesu při vrtání

Název diplomové práce anglicky:

Drilling proces monitoring

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Hodnocení parametrů procesu vrtání
3. Experimentální měření
4. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci s názvem Monitorování řezného procesu při vrtání vypracoval samostatně s použitím literatury uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

Podpis autora:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za skvělé vedení a cenné rady při konzultacích a samotném experimentu. Moje poděkování patří rovněž Ing. Zdeňku Pitrmucovi za pomoc a rady při realizaci experimentu.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Jonáš Budín
Název:	Monitorování řezného procesu při vrtání
Title:	Drilling proces monitoring
Akademický rok:	2020/2021
Studijní program:	Výrobní inženýrství
Škola	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí BP:	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 84 Počet obrázků: 48 Počet tabulek: 13
Klíčová slova:	Vrtání, dynamometr, řezné síly, teplo, teplota, vrták
Keywords:	Drilling, dynamometer, cutting forces, heat, temperature, drill
Anotace:	Tato diplomová práce se zabývá monitorováním řezného procesu při vrtání. Práce se skládá z rešerše a experimentu. Teoretická část je věnována řezným silám a teplotnímu chování procesu vrtání. Praktická část diplomové práce se věnuje monitorování procesu vrtání z hlediska silového působení. Experiment byl proveden s titanovou slitinou Ti-6Al-4V v kombinaci s monolitními povlakovanými karbidovými vrtáky.
Annotation:	This diploma thesis deals with the drilling process monitoring. The work consists of theoretical research and experiment. The theoretical part is devoted to cutting forces and thermal behavior during drilling. The practical part of the diploma thesis is devoted to cutting forces measuring and evaluating. The experiment was performed with a titanium alloy Ti-6Al-4V in combination with monolithic coated carbide drills.

Obsah

Seznamy použitých zkratk, značek a veličin	8
Úvod a cíl práce.....	12
1. Úvod k dynamice vrtání	13
2. Měření sil	14
2.1. Motivace měření sil	15
2.2. Nepřímé měření sil a momentů.....	16
2.2.1. Stanovení tangenciální složky obrábění z výkonu.....	16
2.2.2. Stanovení tangenciální složky síly obrábění z krouticího momentu	17
2.3. Přímé měření sil a momentů	17
2.3.1. Základní parametry dynamometrů.....	17
2.3.2. Základní části konstrukce dynamometrů	18
2.3.3. Dělení dynamometrů.....	19
2.3.4. Hlavní typy dynamometrů z pohledu použité technologie	19
2.3.5. Současná dynamometrie (moderní trendy/zajímavosti)	24
2.3.6. Kalibrace dynamometrů.....	27
2.3.7. Problematika vlastních frekvencí dynamometrů	29
2.4. Matematický popis dynamiky procesu řezání/simulace	29
3. Teplota a tepelné jevy při vrtání	33
3.1. Teplo při vrtání	34
3.1.1. Parametry ovlivňující vznik tepla	36
3.2. Měření tepla při vrtání	36
3.3. Teplota řezání/vrtání	37
3.4. Měření teploty při vrtání	38
3.4.1. Měření teploty pomocí termočlánků.....	38
3.4.2. Měření teploty pomocí termistorů	43
3.4.3. Bezdotykové měření teploty	43

3.4.4. Měření teploty – zajímavosti	47
3.5. Matematický popis tepelných jevů při obrábění.....	49
4. Praktická část – experiment.....	50
4.1. Použité vybavení.....	50
4.1.1. Obrobek	50
4.1.2. Nástroje.....	52
4.1.3. Procesní kapalina	53
4.1.4. Obráběcí stroj.....	54
4.1.5. Dynamometrické vybavení	55
4.1.6. Mikroskop.....	57
4.2. Popis experimentu	58
4.2.1. Ověření hodnot dynamometru a kalibrace.....	58
4.2.2. Schéma experimentu.....	58
4.2.3. Princip odečtu hodnot z dynamometru	59
4.3. Naměřené hodnoty	61
4.4. Výstupy a výsledky experimentu.....	64
4.4.1. Snímky z mikroskopu	64
4.4.2. Grafické závislosti	66
4.4.3. Tvořené třísky	70
4.5. Shrnutí experimentální části	71
Závěr	73
Seznam použité literatury	75
Seznam obrázků.....	81
Seznam tabulek	84

Seznamy použitých zkratk, značek a veličin

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Popis
2D	Dvojměrný (systém)
3D	Trojměrný (systém)
CAM	Počítačová podpora obrábění (Computer aided manufacturing)
CCD	Obrazový senzor/čip (Charge coupled device)
CMOS	Obrazový senzor/čip (Complementary metal oxide semiconductor)
CNC	Číslicové řízení počítačem (Computer numeric control)
ČSN	Česká norma
DAQ	Sběr dat (Data acquisition)
DP	Diplomová práce
HSS	Rychlořezná ocel (High speed steel)
IR	Infračervený (Infrared)
MKP/FEM	Metoda konečných prvků, Finite element method
NO	Nástrojové oceli
PE	Piezoelektrický princip
pH	Potenciál vodíku
PVD	Technologie povlakování (Physical vapour deposition)
RCD	Rotační dynamometr (Rotating dynamometer)
RO	Rychlořezné oceli
ŘK	Řezná keramika
SK	Slinuté karbidy
VBD	Vyměnitelná břitová destička

Seznam použitých značek chemických prvků a sloučenin

Značka	Popis
Al	Hliník
C	Uhlík

Co	Kobalt
Fe	Železo
H	Vodík
N	Dusík
O	Kyslík
Ti	Titan
Ti6Al4V	Titanová slitina
TiAlN	Nitrid titanu a hliníku
TiC	Karbid titanu
V	Vanad
WC	Karbid wolframu

Seznam použitých veličin

Značka veličiny	Jednotka	Popis
A	%	Tažnost
A_D	mm ²	Plocha odřezávané vrstvy
$A_{D'}$	mm ²	Plocha odřezávané vrstvy jedním břitem
a_p	mm	Hloubka řezu
α_o	°	Úhel hřbetu měřený v ortogonální rovině
b_D	mm	Šířka odřezávané vrstvy
C_{F_c}	1	Konstanta pro výpočet F_c vyjadřující vliv obráběného materiálu
C_{F_f}	1	Konstanta pro výpočet F_f vyjadřující vliv obráběného materiálu
C_{Θ}	1	Konstanta pro výpočet teploty řezání Θ
D	mm	Průměr vrtáku
δ_o	°	Úhel řezu měřený v ortogonální rovině
E	N/mm ²	Modul pružnosti v tahu
ε	°	Vrcholový úhel vrtáku
f	Hz	Frekvence

f_n	Hz	Vlastní frekvence
f	mm	Posuv
F	N	Celková síla řezání nebo obecně síla
F_c	N	Řezná síla
F_f	N	Posuvová síla
F_p	N	Pasivní síla
F_x	N	Axiální složka síly řezání
F_y	N	Radiální složka síly řezání
F_z	N	Tangenciální (řezná) složka síly řezání
h_D	mm	Tloušťka třísky
H_n	HV	Tvrдость materiálu
I	A	Elektrický proud
k_c	N/mm ²	Měrná řezná síla
L	mm	Délka vrtáku
m	kg	Hmotnost
M_k	Nm	Krouticí moment vyvolaný řeznou silou
M_{kb}	Nm	Krouticí moment vyvolaný mechanikou brzdou
M_z, M_c	Nm	Moment kolem osy z („řezný moment“)
n	ot./min. (min ⁻¹)	Otáčky za minutu
P	W	Výkon
P_c	W	Výkon stroje při obrábění
$P_{už}$	W	Užitkový výkon
P_0	W	Výkon obráběcího stroje naprázdno
ρ	kg/m ³	Hustota, měrná hmotnost
Q	J	Celkové teplo
Q_1	J	Teplo vznikající v oblasti primární plastické deformace
Q_2	J	Teplo vznikající v oblasti sekundární plastické deformace
Q_3	J	Teplo vznikající v oblasti terciální plastické deformace
Q_n	J	Teplo odvedené do nástroje
Q_o	J	Teplo odvedené do obrobku

Q_{pr}	J	Teplo odvedené do řezného prostředí
$Q_{tř}$	J	Teplo odvedené do třísky
R_m	N/ mm ²	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	N/ mm ²	Mez kluzu
Θ, ϑ	°C	Teplota řezání
t	s	Čas
T	K	Termodynamická teplota
T_m	°C	Teplota tání
U	V	Elektrické napětí
v_c	m/min	Řezná rychlost
x_{F_c}	1	Exponent pro výpočet F_c vyjadřující vliv průměru vrtáku
x_{F_f}	1	Exponent pro výpočet F_f vyjadřující vliv průměru vrtáku
y_{F_c}	1	Exponent pro výpočet F_c vyjadřující vliv posuvu na otáčku
y_{F_f}	1	Exponent pro výpočet F_f vyjadřující vliv posuvu na otáčku
x_{Θ}	1	Exponent pro výpočet teploty řezání Θ zahrnující vliv hloubky řezu a_p
y_{Θ}	1	Exponent pro výpočet teploty řezání Θ zahrnující vliv posuvu f
z_{Θ}	1	Exponent pro výpočet teploty řezání Θ zahrnující vliv řezné rychlosti v_c

Úvod a cíl práce

Obrábění je velice přesnou technologií, ale zároveň většinou patří k nejdražším operacím při výrobě strojírenských součástí. Především kvůli ekonomickým důvodům je žádoucí obráběcí proces značně optimalizovat. Optimalizace může vycházet z monitorování obráběcího procesu z hlediska sil, tepla, teplot či dalších měřitelných parametrů. Monitorování silového chování neslouží pouze k optimalizaci, může se využít například k adaptivnímu řízení řezného procesu, volbě vhodného nástroje a zkoumání vlivu jeho opotřebení, či návrhu nových nástrojů a strojů. Sledování teplot při obrábění lze kromě optimalizace použít pro správnou volbu nástrojového materiálu ve vztahu k jeho limitní teplotě použitelnosti, či indikaci opotřebení nástroje. [16, 23]

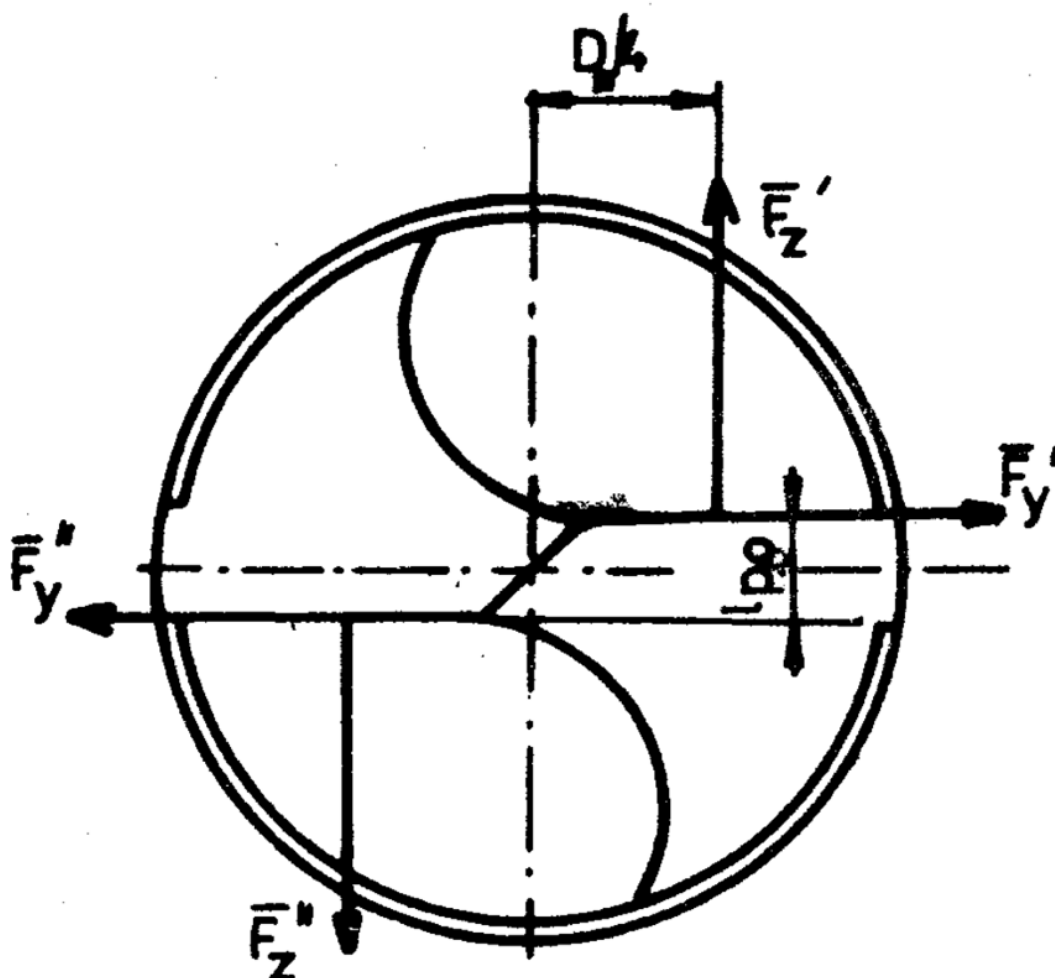
Materiály na bázi titanu nachází v průmyslu uplatnění především díky svému příznivému poměru měrné hmotnosti vůči modulu pružnosti. Dobrá korozní odolnost a možnost jejich použití za vyšších teplot, konkrétně pro případ Ti-6Al-4V až k 400 °C, jsou nezpochybnitelně velice příznivé vlastnosti. Titanová slitina Ti-6Al-4V byla původně vyvinuta pro použití v náročnějších podmínkách, především v leteckém průmyslu. Díky celé řadě příznivých vlastností našly tyto slitiny rovněž uplatnění v automobilovém, námořním či chemickém průmyslu. [33, 34]

Problémem obrábění slitin titanu je nárůst teploty v místě řezu, který je způsoben nízkou teplotní vodivostí titanu. Odvod tepla do obráběného materiálu je tudíž omezen. V případě vrtání je situace ještě ztížena hromaděním třísek v drážkách vrtáku. Teplo odvedené do třísek je tedy u hlubokých otvorů předáváno do nástroje. Při vrtání slitin titanu je většina tepla přenášena/odváděna nástrojem, z tohoto důvodu jsou vrtáky značně teplotně namáhány, což způsobuje jejich intenzivnější opotřebování.

Cílem předložené diplomové práce je monitorování a hodnocení řezného procesu při vrtání. Cílem experimentální části diplomové práce je monitorování a hodnocení složek síly řezání při vrtání monolitními povlakovanými karbidovými vrtáky do titanové slitiny Ti-6Al-4V.

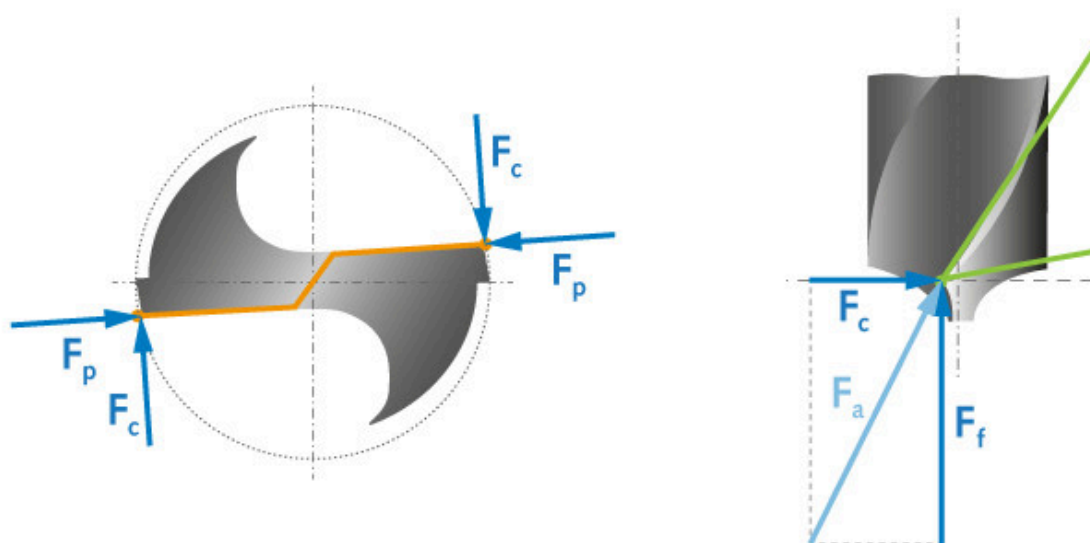
1. Úvod k dynamice vrtání

K měření sil při vrtání je potřeba si je nejprve definovat. Síla řezání při vrtání působí v obecném směru, lze ji rozložit do tří složek. Jedná se o složky F_z , F_y a F_x . Jednotlivé složky řezné síly vznikají z dílčích složek, jejichž počet odpovídá počtu břitů vrtáků. Často se značí čárky v indexu, aby bylo jasně definované, ke kterému břitu patří. V případě souměrného vrtáku jsou si odpovídající dílčí složky sil z pohledu velikosti rovny. Tangenciální (řezná) složka síly obrábění se značí F_z , jedná se o sílu, která působí ve směru hlavního řezného pohybu. F_y představuje radiální složku síly řezání, která je kolmá na tangenciální složku a zároveň je kolmá ještě k ose rotace vrtáku. Poslední složkou řezné síly je síla axiální F_x . Složky F_z a F_y jsou znázorněny na obrázku č. 1, axiální složka zde znázornění není. Ta by měla takový směr, že by „vystupovala“ z obrázku. [1,2]



Obrázek 1 Znázornění jednotlivých složek síly obrábění při vrtání [1]

Jiné značení lze vidět na obrázku č. 2. F_z označení tangenciální neboli řezné síly odpovídá označení F_c . Radiální složka F_y se často nazývá jako pasivní síla a používá se pro ni rovněž označení F_p . Osovou sílu F_x lze chápat i jako sílu posuvovou, značí se tedy i F_f . Obvykle se směry složek sil řezání značí od nástroje, zde autoři obrázku použili opačný přístup. Jde ovšem pouze o představení různých přístupů, stěžejní je ale zde použité indexové značení, jenž se téměř výhradně používá v dnešní praxi. [11]



Obrázek 2 Druhý způsob značení složek síly obrábění [11]

Velikosti jednotlivých složek síly obrábění ovlivňují především tyto činitele:

- Posuv
- Hloubka odřezávané vrstvy
- Řezná rychlost
- Geometrie břitů
- Otupení břitů
- Řezné prostředí
- Druh obráběného materiálu, hlavně jeho tvrdost a pevnost [3]

2. Měření sil

Existují dvě metody stanovení neboli změření sil obrábění, jedná se o metody přímé a nepřímé. V případě nepřímé metody jde o změření jiné fyzikální veličiny, ze které lze následně dopočítat sílu. Používá se například výkon elektromotoru

pohánějící vřeteno. Nepřímá metoda má nevýhodu v tom, že nám umožňuje určit pouze velikost tangenciální, tedy řezné složky síly obrábění. Přímé metody naopak dokážou změřit všechny složky síly obrábění. V přímých metodách se nejčastěji využívá deformace krystalu či mechanického deformačního členu v kombinaci s tenzometry. V dnešní době je měřicí aparatura často spojená i s nějakým výpočetním systémem, což umožňuje i pohodlné zaznamenávání průběhu sil či jejich složek. [4]

2.1. Motivace měření sil

Obrábění, samozřejmě i vrtání, je stále jednou z nejdůležitějších výrobních technologií, zároveň se jedná o spíše dražší proces, tudíž je potřeba vzhledem k ekonomice značně optimalizovat.

Obrábění je exaktní technologie, díky které se dosahuje požadovaných přesností. Se zvyšujícími se požadavky na rychlost a kvalitu obrábění je nezbytné dobře znát samotný proces řezání, čehož lze dosáhnout měřením sil a momentů, jež mají o tomto procesu vysokou vypovídající hodnotu. Nástroje jsou během obrábění vystaveny vysokému mechanickému, tepelnému a chemickému namáhání, což má vliv na jejich opotřebení a řezný výkon. Pouze správně navržené nástroje mohou zaručit stabilní proces řezání. Při vývoji nových nástrojů je nezbytné znát proces řezání z pohledu silového zatížení. Nejčastěji kladenými otázkami jsou: [16]

- Jak velké řezné síly se vyskytují?
- Jak se chovají nástroje při různých podmínkách?
- Jak navrhnout nástroj, aby se daly eliminovat silové špičky/extrémy.
- Jak udržet efektivnost a rychlost procesu? [16]

Zajímavé je kontinuální měření řezných sil přímo při obrábění, díky okamžitým hodnotám sil lze pak upravovat a optimalizovat parametry procesu. Opotřebení nástroje lze pozorovat přes měření silového zatížení nástrojů. Údaje o silovém zatížení lze kontinuálně předávat řídicímu systému stroje, který dokáže upravovat strategie a parametry obrábění. [16]

Analýza silového zatížení přispívá a je podkladem k:

- Zlepšení řezných procesů
- Zlepšení řezných nástrojů
- Zlepšení pomocných zařízení, například optimalizace chlazení

- Návrhu konstrukcí a komponent strojů
- Optimalizaci strategií obrábění
- Chytrému programování CNC stroje díky integraci údajů o silovém zatížení
- Ověření simulací [16]

2.2. Nepřímé měření sil a momentů

Při měření sil nepřímou metodou existují 2 varianty. Jedná se o určení sil z naměřeného rozdílu výkonů elektromotoru, nebo ze změřeného brzdného momentu. Jelikož se jde o nepřímou metodu, tedy pouhý dopočet síly, lze touto metodou získat pouze tangenciální složku síly vrtání/obrábění. [3]

2.2.1. Stanovení tangenciální složky obrábění z výkonu

V této metodě se vychází ze vztahu pro užitkový výkon při obrábění viz rovnice (1), kde $P_{už}$ značí užitkový výkon, F_c tangenciální/řeznou složku síly obrábění a v_c řeznou rychlost. [3]

$$P_{už} = F_c \cdot v_c \quad (1)$$

Obecně se výkon na obráběcím stroji, v tomto případě vrtače, měří wattmetry. Užitečný výkon, tj. výkon potřebný k obrábění, je rozdílem výkonu obráběcího stroje naprázdno P_0 a výkonu stroje při obrábění P_c . Pro užitečný výkon $P_{už}$ tedy platí: [3]

$$P_{už} = P_c - P_0 \quad (2)$$

Tangenciální složka síly obrábění F_c nebo také F_z z upraveného vztahu (1) viz rovnice (3). [3]

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} \quad (3)$$

Výhodou této metody je hlavně její jednoduchost, je snadná na provedení a nevyžaduje žádné speciální a drahé vybavení. Naopak úskalí má tato metoda v omezené přesnosti, kterou zapříčiňuje různá účinnost elektromotoru při běhu naprázdno a při zatížení a zanedbávání zbylých složek síly obrábění. [3]

Novější stroje dokážou rovnou ve svém řídicím systému zobrazovat míru zatížení vřetene v procentech, z čehož lze se znalostí maximálního výkonu motoru

vřetene dopočítat aktuální výkon. Tato metoda je však značně nepřesná a má pouze orientační charakter.

2.2.2. Stanovení tangenciální složky síly obrábění z krouticího momentu

Tato metoda nalézá uplatnění právě při vrtání. Tato metoda opět vychází z principu měření celkového výkonu stroje. Nejprve se měří a zapisuje výkon při obrábění, následně se vyjíždí ze záběru a vřeteno se při stejných otáčkách začíná brzdit mechanickou brzdou do doby, než výkon stroje dostáhne stejné hodnoty jako při obrábění. Při dosažení stejného výkonu jako při obrábění se odečte z měřicího zařízení mechanické brzdy údaj o krouticím momentu. Z podmínky rovnováhy sil/momentů plyne, že moment M_k vyvolaný tangenciální složkou síly obrábění F_c je v rovnováze s krouticím momentem vyvolaným mechanickou brzdou M_{kb} . Rovnováha momentů je popsána v rovnici (4), D znamená v případě vrtání průměr vrtáku. [3]

$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} = M_{kb} \quad (4)$$

Tato metoda má oproti metodě zjišťování tangenciální složky síly obrábění z užitkového výkonu výhodu ve zvýšené přesnosti, jelikož výsledky měření nejsou zatíženy chybou plynoucí z různých účinností stroje v běhu naprázdno a při zatížení. Tato metoda ale trpí chybou plynoucí z proměnlivého součinitele tření na mechanické brzdě. [3]

2.3. Přímé měření sil a momentů

U přímých metod měření sil a momentů při obrábění se využívá měření deformací soustavy stroj-nástroj-obrobek přístroji zvanými dynamometry. Dynamometr musí být schopen korektně měřit veličiny, to znamená nezávisle na provozních vlastnostech přístroje. Na dynamometry jsou rovněž kladené nároky ve smyslu stálosti naměřených hodnoty na čase, důležitá je samozřejmě i reprodukovatelnost měření a zaručení určité přesnosti měření při daném rozsahu sil/momentů. V kapitole 2.3.1. jsou sepsány hlavní požadavky na dynamometry, které samozřejmě korespondují s vlastnosti uvedenými výše. [3, 4, 5]

2.3.1. Základní parametry dynamometrů

- **Tuhost** dynamometrů je velice důležitá z důvodu ovlivňování řezného procesu. Případná nízká tuhost by ovlivňovala měření například tím,

že by zmenšila průřez odřezávané vrstvy. Tuhost dynamometru je určena velikostí zatěžující síly, která na deformačním elementu dynamometru způsobí určité posunutí/deformaci. [3, 5]

- **Citlivost** velice koresponduje s principem, na kterém dynamometru pracuje. Citlivost musí odpovídat požadovanému rozsahu měření. Jedná se o to, aby nejmenší odečítané jednotky šly změřit s požadovanou přesností. Nejvíce názorné je pochopení citlivosti na příkladu dynamometru s přesností $\pm 1\%$ a možností měření sil do 100N. 1% ze 100 N je 1 N, což znamená, že přírůstek síly o velikosti 1 N by mělo být možno přesně změřit a odečíst. [4, 5]
- **Setrvačnost** dynamometrů, respektive celé měřicí soustavy, by měla pro pohodlné měření být co nejmenší. Především u časových průběhů sil a momentů by docházelo ke značnému zkreslení výsledků. Existuje jistá souvislost mezi setrvačností měřicí soustavy a vlastní frekvencí jejích kmitů. [3, 5]
- **Stálost údajů dynamometru a stabilita kalibrování** představují, jak věrně po celou dobu měření hodnoty odpovídají kalibrační křivce. [5]
- **Rozsah** dynamometru je interval mezi minimální a maximální možnou měřenou silou. Zvětšení rozsahu dynamometru má za následek snížení jeho citlivosti. [5]
- **Přesnost** dynamometrů představuje chybu naměřené hodnoty vzhledem k hodnotě skutečné, uvádí se v procentech. Přesnost dynamometru by měla být vždy vyšší než vyžadovaná přesnost výsledků v měřené aplikaci. [5]
- **Vlastní frekvence kmitání** dynamometrů určují intervaly použitelnosti, je potřeba, aby pracoval mimo oblast své rezonanční frekvence. [17]

2.3.2. Základní části konstrukce dynamometrů

Konstrukce dynamometrů by měla být navržena tak, aby docházelo k částečné ne-li úplné eliminaci ovlivňování jednotlivých složek síly obrábění. Dynamometr neboli soustava měření se skládá z pružného členu, snímače a přijímače. Pružný člen přebírá zatížení, dochází k jeho deformaci. Snímač je

v podstatě zařízení, které převede velikost mechanické deformace pružného členu na hodnotu analogického parametru měřicí soustavy. Přijímač se stará o zesílení a zpracování signálu snímače, případně může i zapisovat velikost zatížení. [3, 4]

2.3.3. Dělení dynamometrů

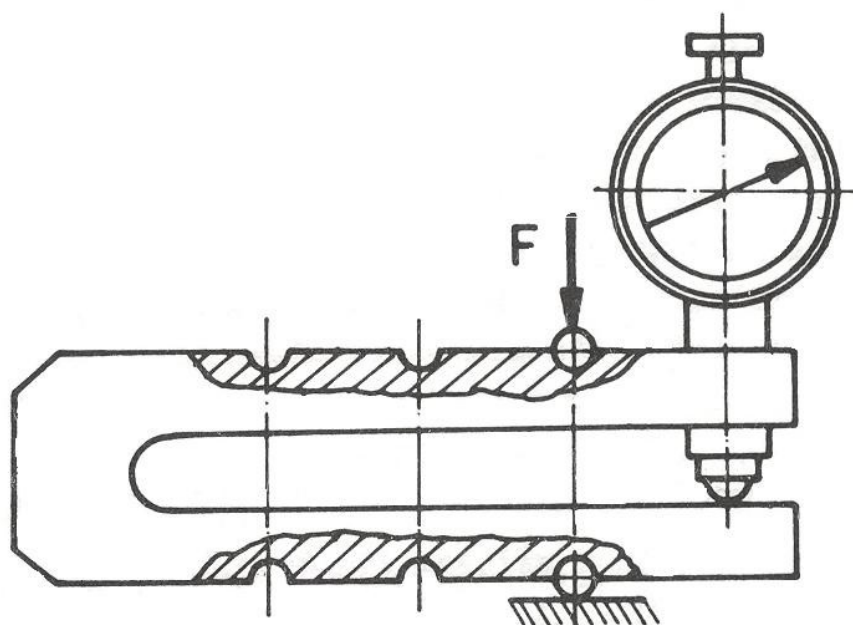
- Podle počtu měřených složek [3, 6]
 - Jednosložkové
 - Dvousložkové
 - Třísložkové
 - Vícesložkové
 - S měřením momentů
- Podle použité měřicí metody [3, 6]
 - Mechanické
 - Hydraulické
 - Pneumatické
 - Elektrické
 - Indukční (parametrické)
 - Kapacitní (parametrické)
 - Odporové (parametrické)
 - Piezoelektrické (generátorové)
 - Optické
- Podle způsobu použití [3]
 - Univerzální pro mnoho technologií
 - Pro vrtání
 - Pro soustružení
 - Rotační
 - Statické atd.

2.3.4. Hlavní typy dynamometrů z pohledu použité technologie

Mechanické dynamometry

Mechanické dynamometry disponují velice jednoduchou konstrukcí, může se u nich vyloučit vliv rušení, tudíž se často používají k nastavování, ověřování či cejchování ostatních typů. Využívá se v nich namáhání mechanického deformačního elementu v oblasti elastické deformace, tedy platnosti Hookova zákona, tudíž

závislost mezi sledovanou silou a naměřenými údaji je lineární. O velikosti síly rozhoduje deformace deformačních elementů, kterými mohou být pružiny, kroužky, nosníky, membrány, třmeny, prstence a podobně. Působení síly se přímo nebo s mechanickým převodem (kvůli zvětšení rozsahu dynamometru) převádí na měřicí prvek, kterým je zpravidla číslicový úchylkoměr. Mezi přednosti mechanických dynamometrů patří právě jednoduchost konstrukce a spolehlivost. Tyto přístroje mají rovněž spoustu nevýhod, kterými jsou především závislost měřených údajů na teplotě a velká setrvačnost, která v podstatě zabraňuje nasazení v dynamických měřeních. Při jejich výrobě je nesnadné najít kompromis mezi tuhostí a citlivostí. Další nevýhodou je obtížná změna rozsahu přístroje, únava materiálu a potřeba vymezování vůlí v mechanismech. [3, 4, 7]

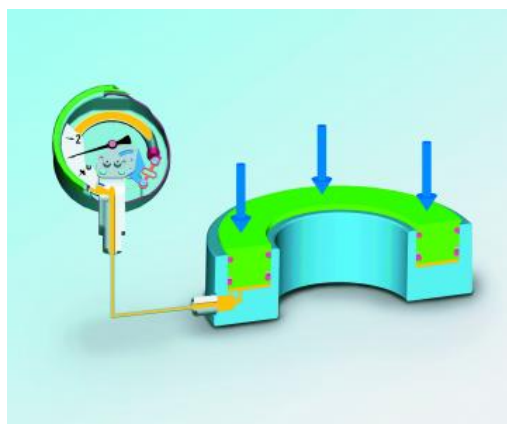


Obrázek 3 Schéma mechanického třmenového dynamometru [3]

Hydraulické dynamometry

Konstrukce hydraulického dynamometru je založená na změně tlaku v kapalině, kterou způsobí pohyb pístu či membrány zprostředkovaný silou od obrábění. Tato změna tlaku je následně nasnímana manometrem. Tento typ dynamometrů vyniká především jednoduchostí konstrukce a možností měření více složek sil najednou. Velikou výhodou může být v určitých případech i možnost měření bez nutnosti přívodu elektrické energie. Tyto dynamometry ale trpí nízkou

citlivostí, vysokými požadavky na těsnost hydraulického systému a velikou setrvačností, která znemožňuje jejich nasazení na dynamická měření. [3, 7, 8]



Obrázek 4 Princip hydraulického dynamometru [8]

Pneumatické dynamometry

Pneumatické dynamometry využívají vzduchu proudícího štěrbinou, měří se změna tlaku či průtoku. Hlavní součásti jsou tedy tryska a klapka, která v závislosti na deformaci (respektive působící síle) přivírá trysku, což právě způsobuje změny tlaku a průtoku. Mezi jejich výhody patří nízká cena, vysoká spolehlivost a citlivost, jednoduchost provozu a údržby. Tyto výhody pneumatického dynamometru nabízí možnost použití například ve výbušném prostředí. [3]

Elektrické indukční dynamometry

Jedná se systémy parametrické, což znamená, že jsou založeny na pouhé změně indukčnosti použitého magnetického obvodu, nikoliv na generování napětí či proudu. Jednoduše řečeno, měřená síla způsobí posun cívky/magnetického obvodu v magnetickém poli, což se projeví na změně indukčnosti. Tato změna je zaznamenána a převedena dle cejchu na velikost síly. Magnetické obvody těchto dynamometrů mohou mít různá uspořádání, například snímače s uzavřeným magnetickým obvodem. [3]

Elektrické kapacitní dynamometry

Elektrický kapacitní dynamometr je opět parametrický systém, využívá změny kapacity snímače v závislosti na působící síle. Principiálně je velice podobný s indukčním, jen je založen ne změně jiné fyzikální veličiny. Kapacitním snímačem může být deskový kondenzátor. Při nasazení v měření sil obrábění se využívá pouze takových kapacitních snímačů, které pracují na principu změny vzdálenosti mezi jednotlivými deskami kondenzátoru. Disponují velice dobrou citlivostí a nízkou

hmotností. Naopak trpí velkým rušením z okolí, což značně prodražuje měřicí techniku. Díky tomu se tyto přístroje nenasazují příliš často. [3]

Elektrické odporové dynamometry

Odporové dynamometry jsou rovněž představiteli parametrických snímačů. Využívání změny elektrického odporu snímačů na deformaci. Odporovými snímači jsou tenzometry, proto se odporové dynamometry často nazývají jako tenzometrické dynamometry. Tenzometr je deformovatelný proužek s odporovou dráhou, který se lepí na deformovaný element. Při tlakovém namáhání dochází ke zkrácení odporové dráhy, a tudíž zvětšení průřezu vodiče, což má za následek snížení elektrického odporu. Naopak při natahování odporové dráhy neboli tenzometru se průřez vodiče zmenšuje a elektrický odpor zvětšuje. Tenzometry mohou být různého typu, z pohledu materiálu se používají kovové a polovodičové. [3]

Kovové tenzometry se vyrábějí nejčastěji ze slitiny mědi a niklu, přesněji konstantanu, tento materiál má velký měrný odpor – rezistivitu. Z technologického hlediska se rozlišují kovové tenzometry na drátkové, fóliové a napařované. Drátkové tenzometry mají odporový drátek o průměru 0,01 až 0,05 milimetru uspořádaný ve formě mřížky, tato „odporová dráha“ je nalepena na tenké izolační folii z papíru či pryskyřice. Na zkoumanou součást se samotný tenzometr připevňuje acetátovým nebo pryskyřicovým lepidlem. Drátkové tenzometry mají malý rozptyl odporů, deformační citlivosti a teplotních součinitelů, díky čemuž lze v aplikacích s více tenzometry částečně vyloučit vlivy rušení. Díky této skutečnosti jsou hojně využívány. [3]

Fóliové tenzometry se vyrábějí jiným postupem, měřicí mřížka připomíná tištěný spoj. I postup výroby je velice obdobný. Tloušťka fólie měřicí mřížky se pohybuje v rozmezí od 0,012 do 1,015 mm. Oproti drátkovým tenzometrům vykazují větší přesnost a stabilitu. Tyto vlastnosti jsou zajištěny především necitlivostí ke stranovému namáhání, poměrně velkému možnému proudovému zatížení, lepšímu spojení měřicí mřížky se základní fólií a také lepším převodem deformace na mřížku. [3]

Nejsofistikovanějšími kovovými tenzometry jsou tenzometry napařovací. Tyto tenzometry se vyrábějí přímým napařováním jednotlivých vrstev (izolační

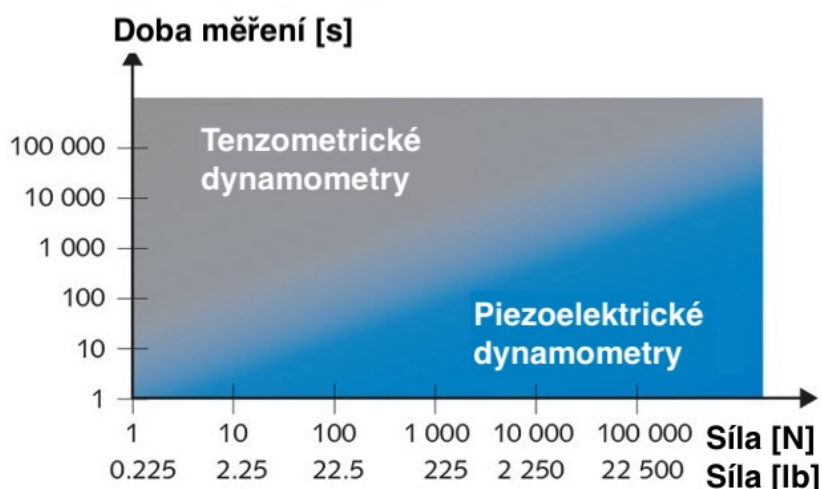
vrstva, vrstva pro spojovací a napájecí sekci a samotná odporová mřížka/dráha) na povrch deformované součásti. [3]

Alternativou ke kovovým tenzometrům jsou tenzometry polovodičové, ale vzhledem k pracné výrobě jsou jejich ceny značně vysoké. Vyrábějí se nejčastěji z příměsových polovodičů. Tenzometr je vyroben ze slabého polovodičového pásku, materiál je polovodičový monokrystal, který při deformaci velice mění měrný elektrický odpor. Měření odporových změn v tenzometrech se provádí nejčastěji potenciometricky nebo s využitím můstkového zapojení. [3, 9]

Piezoelektrické dynamometry

Piezoelektrické dynamometry jsou dynamometry generátorového typu, tedy vzniku elektrického náboje na deformovaném elementu. Velikost náboje je úměrná velikosti působící síly. Deformovanými materiály jsou především krystaly, nejčastěji se používají krystaly křemene, vhodné jsou i krystaly na bázi titaničitanu barnatého atd. Piezoelektrické dynamometry jsou doménou především švýcarské společnosti Kistler.

Nejpoužívanějšími dynamometry jsou piezoelektrické a tenzometrické, přibližně 80 % procent všech případů lze realizovat dynamometry založenými na těchto dvou principech. Piezoelektrické dynamometry jsou vhodné na dynamická měření. Tenzometrickým vyhovuje spíše statický režim. V obrázku č. 5 je graf, který ukazuje vhodnost tenzometru piezoelektrického nebo tenzometrického z pohledu zatěžující síla a doby měření. [4, 10]



Obrázek 5 Oblasti použití piezoelektrických a tenzometrických dynamometrů (přeloženo pro potřeby DP) [10]

2.3.5. Současná dynamometrie (moderní trendy/zajímavosti)

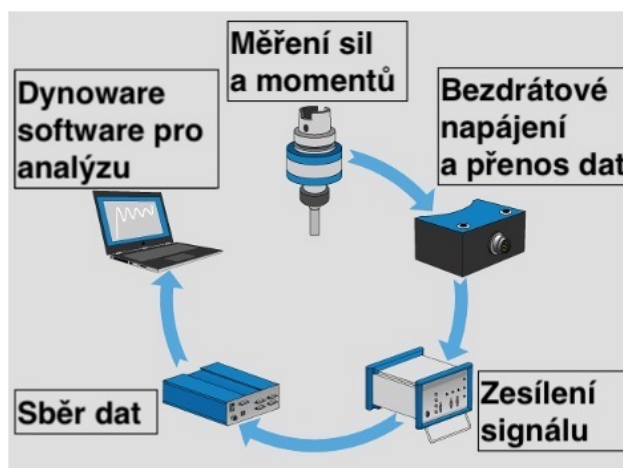
V současné době se v drtivé většině výzkumů používají dynamometry na bázi piezoelektrického jevu.

Mohou se objevit i dynamometry pracující na odlišných principech. Níže je například popsán rotační dynamometr se speciální konstrukcí deformačního členu, který využívá tenzometrického jevu. Tyto spíše nekonvenční způsoby/konstrukce jsou spíše akademickými řešeními. V průmyslových a inženýrských aplikacích stále dominují piezoelektrické dynamometry Švýcarské firmy Kistler.

Rotační dynamometr

Rotační dynamometry, zkráceně RCD, nachází uplatnění hlavně v měřeních, ve kterých je kinematika stroj-nástroj-obrobek poněkud složitější. To ale samozřejmě neznamená, že by nenašly uplatnění i v ostatních aplikacích. [12]

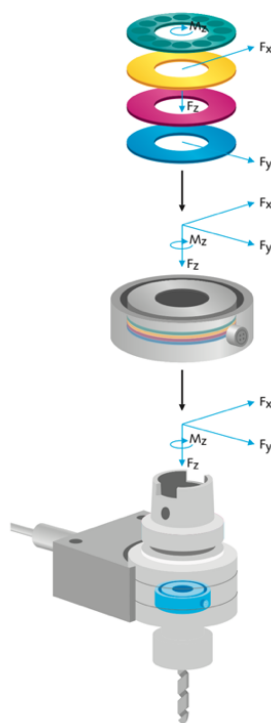
Konstrukčně jsou rotační dynamometry součástí upínací části obráběcího nástroje, nejčastěji jsou částmi držáků nástrojů. Při použití rotačního dynamometru je nutné efektivně přenášet měřená data z čidel k dalšímu zpracování. Jelikož se jedná o měřicí zřízení, tak přenos dat z rotujícího dynamometru mechanickou drátovou cestou (například sběrnými kartáčky/pásky) není nejlepší možnost. Velmi vhodnou a používanou metodou je bezdrátový přenos dat, v těsné blízkosti rotujících dynamometru se umísťují přijímače. Konstrukčně, nikoliv principiálně, se rotační dynamometry velice podobají elektromotorům, které obsahují rotační část – rotor a nepohyblivou část – stator. Na obrázku č. 6 lze vidět aparaturu měření, tedy od rotačního dynamometru, přes snímač, až samotné vyhodnocení. [12, 13]



Obrázek 6 Soustava pro měření piezoelektrickým rotačním dynamometrem (přeloženo pro potřeby DP) [14]

V oblasti rotačních dynamometrů je nejsilnější švýcarská společnost Kistler se svými piezoelektrickými rotačními dynamometry. Měřicí aparatura odpovídá obrázku výše. Konstrukce samotného rotačního dynamometru, samotného čidla, je zobrazena na obrázku č. 7. Čtyři barevné disky představují krystaly z piezoelektrických materiálů. Zelený slouží k měření krouticího momentu ve směru rotace nástroje/dynamometru, zbylé tři jsou použity k měření složek síly obrábění. V obrázku je rovněž vidět implementace piezoelektrické jednotky do držáku nástroje a způsob bezdrátové komunikace rotujícího držáku s dynamometrem a snímače. [13, 14]

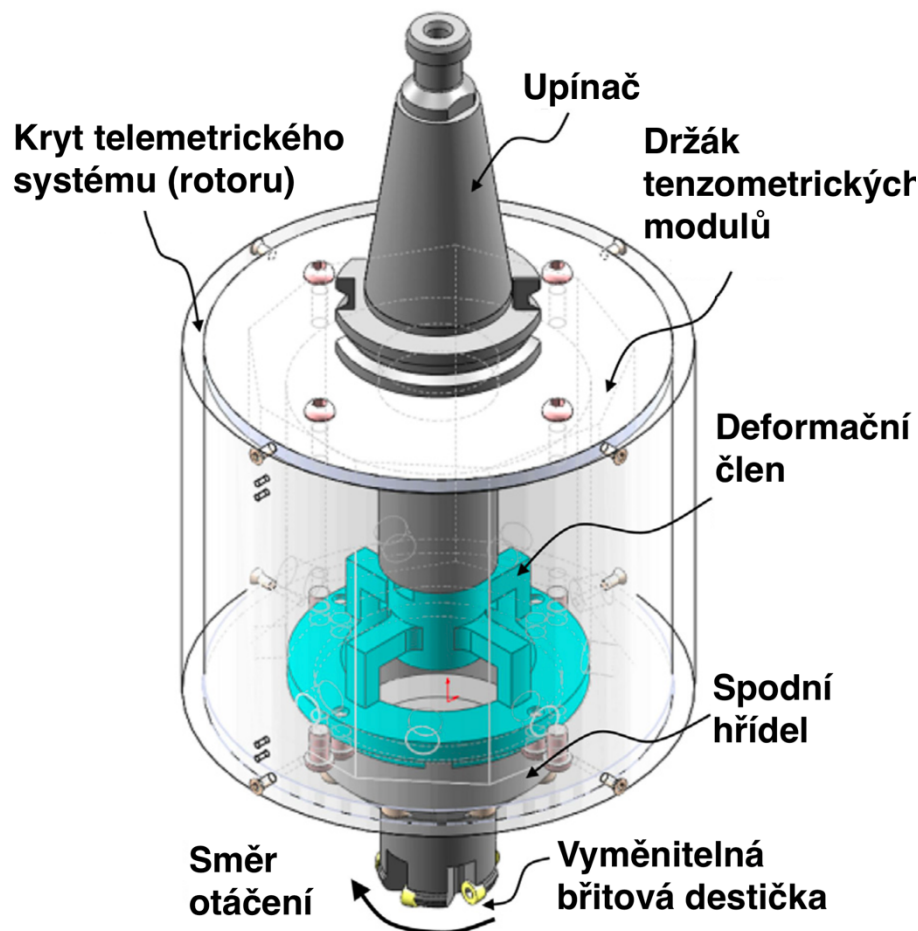
Typickým zástupcem piezoelektrického rotačního dynamometru jsou výrobky firmy Kistler, vyrábějí dvousložkové nebo čtyřsložkové varianty. Dvousložková varianta například 9125A dokáže měřit pouze moment M_z v rozsahu ± 50 Nm a osovou sílu F_z v rozsahu ± 3 kN. Zástupcem čtyřsložkové varianty je dynamometr 9170A, který měří moment M_z v rozsahu ± 150 Nm, osovou sílu od -20 do +20 kN a síly v rovině kolmé k ose rotace v rozsahu ± 5 kN. Použití těchto strojů je přípustnými pracovními otáčkami, v případě 9125A na 25000 ot./min., 9170A na 20000 ot./min. [15]



Obrázek 7 Konstrukce piezoelektrického rotačního dynamometru [12]

I když je segment rotačních dynamometrů doménou zařízení fungujících na piezoelektrickém principu, najdou se i řešení využívající jinou technologii. Zajímavým řešením je zařízení vzniklé společnou prací inženýrů asijských univerzit, konkrétně Malajsijské a Indonéské. Ve svém experimentu vhodně navrhli torzní člen rotačního dynamometru (v obrázku č. 8 zvýrazněn modře), který opatřili 24 tenzometry. Návrh torzního členu obnášel samozřejmě pevnostní výpočty a analýzy. Napájení tenzometrů a získávání z nich tížených dat vyřešili velice elegantně bezdrátovou metodou. Jde téměř o identické řešení, jako které používá firma Kistler u svých rotačních piezoelektrických dynamometrů. [13]

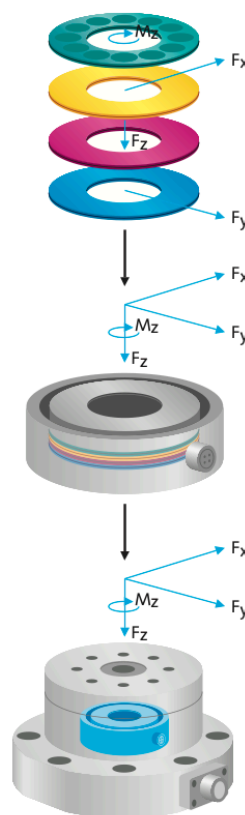
Experimentální zařízení zobrazené na obrázku č. 8 lze použít k měření síly obrábění do velikosti 3000 N, maximální otáčky jsou omezené hranicí 5000 ot/min. Dále na něm byla naměřena citlivost od $4,23 \cdot 10^{-4}$ do $8,53 \cdot 10^{-4}$ mV/N, výsledná chyba citlivosti se vešla pod 4,05 %. Dále inženýři z asijských univerzit na svém zařízení určili vlastní rezonanční frekvence, které vyšly 1050, 2079 a 450,9 Hz. [13]



Obrázek 8 Rotační dynamometr využívající tenzometrického principu (přeloženo pro potřeby DP) [13]

Vícesložkový stacionární dynamometr

Jde o dynamometry využívající piezoelektrického jevu, které obsahují více senzorů, díky čemuž zvládají měřit více silových či momentových složek (klidně 3 silové a 3 momentové). Typickým přístrojem této konstrukce je čtyřsložkový vrtací dynamometr 9272 od firmy Kistler. Dynamometr 9272 dokáže měřit osovou sílu vrtání F_z v rozsahu -5 až 20 kN, krouticí moment kolem osy rotace vrtáku M_z zvládá měřit v hodnotách ± 200 Nm. Síly F_x a F_y , tedy síly v rovině kolmé k ose vrtáku umožňuje měřit od -5 do +5 kN. Konstrukci lze vidět v obrázku č. 9. [15]



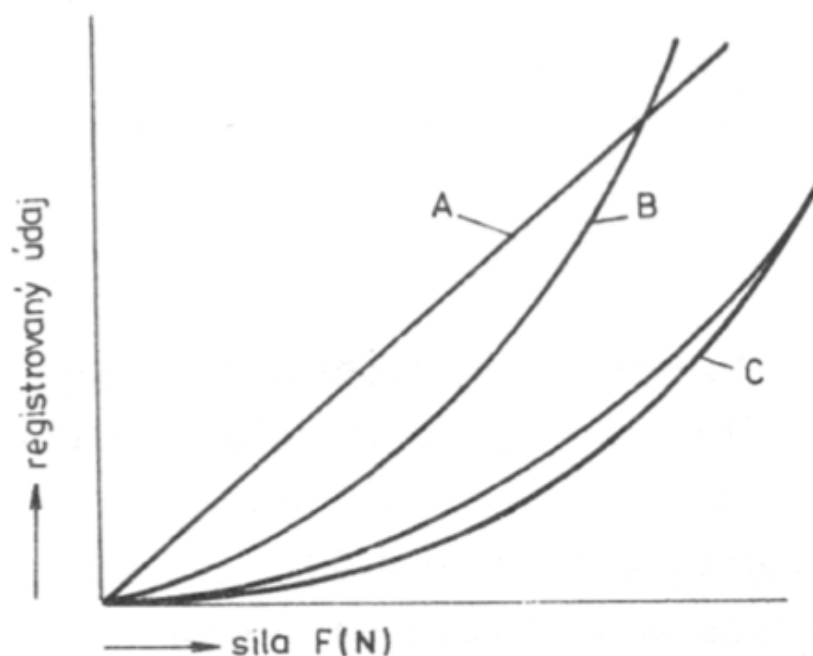
Obrázek 9 Konstrukce 4složkového vrtacího dynamometru [12]

2.3.6. Kalibrace dynamometrů

Dynamometry se musí před použitím nejprve kalibrovat neboli ocejchovat. Jedná se o proces, jehož podstatou je vyjádřit vztah mezi známými vstupními a měřenými výstupními hodnotami, respektive dojde k porovnání výstupních údajů dynamometrů a odpovídající měřené síly/měřeného momentu. Pro zaručení požadované přesnosti měření se kalibrace provádí periodicky, jelikož se odchylky měřicích přístrojů mohou časem měnit. [3, 15]

Průběh kalibrace je takový, že při spojitém nebo přírůstkovém zatěžování dynamometru na požadovanou hodnotu dochází k odečítání výstupních hodnot, poté nastává obdobným způsobem odlehčování. U přírůstkového způsobu se může při odlehčování volit větší inkrement. [15]

Výstupem kalibrace je grafická závislost vstupní veličiny, například v mA či mV, na skutečné zatěžující síle. Příklady kalibračních křivek je možno vidět na obrázku č. 10, kde křivka A představuje lineární závislost síly a údajů z dynamometru, křivka B představuje závislost nelineární. Křivka C znázorňuje závislost s hysterezí, kterou způsobují různé hodnoty registrovaných údajů dynamometrů při stejné síle při zatěžování a odlehčování. [3, 15]



Obrázek 10 Kalibrační křivky dynamometrů [3]

Při kalibraci je pro zachování vypovídajících hodnot nutné dodržovat patřičnou kázeň a technologické podmínky. Například teplota se velice podepisuje na věrnosti kalibrace. Na teplotě závisí teplotní roztažnost mechanických součástí, či struktura a vlastnosti elektrotechnických součástek měřicích obvodů. Nejhůře se na kalibraci nepodepisuje absolutní velikost teploty, nýbrž její proměnnost. Gradienty teploty mají přímý vliv na kvalitu výsledné kalibrace. Na kalibraci piezoelektrických dynamometrů má vliv i relativní vlhkost, jelikož právě ta může ovlivňovat vlastnosti elektronických součástek, především pak kapacitu kondenzátorů používaných v zesilovačích a zdrojích měřicích obvodů. [15]

2.3.7. Problematika vlastních frekvencí dynamometrů

Chování dynamometrů z hlediska chvění a vlastních frekvencí téměř jednoznačně určuje jejich použitelnost. Při konstrukci dynamometru výrobci balancují mezi vysokou tuhostí a na druhé straně kompaktními rozměry a malou hmotností. Větší rozměry mohou představovat vyšší tuhost, ale naopak zase větší setrvačné síly při dynamických měřeních. Požadavek použitelnosti při vyšších frekvencích se klade hlavně na rotační dynamometry v kombinaci s malými nástroji, jelikož pro dosažení adekvátní řezné rychlosti je nutno vyvodit daleko vyšší otáčky vřeten, než jsou používány u nástrojů s rozměry většími. Vlastní frekvence dynamometru mají přímý vliv na přesnost měření. Existuje několik dynamometrů pro spolehlivé měření řezných sil při vysokých frekvencích, jde převážně o dynamometry s piezoelektrickým a tenzometrickým principem. [17]

Vlastní frekvence dynamometrů by měly být co největší. Pro dosažení potřebné přesnosti a důvěryhodnosti měřených údajů se uvádí, že by vlastní frekvence dynamometru měla být třikrát až pětkrát vyšší než budící frekvence soustavy při měření řezných sil. K velkým problémům dochází u mikroobrábění, při kterém mohou otáčky vřetene dosahovat až 100 000 ot./min. Zde je pak poněkud obtížné hledat vhodný dynamometr, který splňuje podmínku pro frekvenci vlastních kmitů. Použitelnost lze zvýšit nasazením různých korekčních postupů či nástrojů. Problém vlastních frekvencí se rovněž projevuje u vícesložkových dynamometrů. Při nízkých frekvencích dochází k ovlivnění jednotlivých složek dynamometrů jen zřídka. Naopak při velice dynamických měřeních svou nezávislost ztrácejí. [18, 19]

2.4. Matematický popis dynamiky procesu řezání/simulace

Existuje několik metod popisu silových účinků a simulací řezných procesů. Tyto metody se mezi sebou liší především ve složitosti aplikace a věrnosti simulovaných procesů. Typickými metodami jsou: [20]

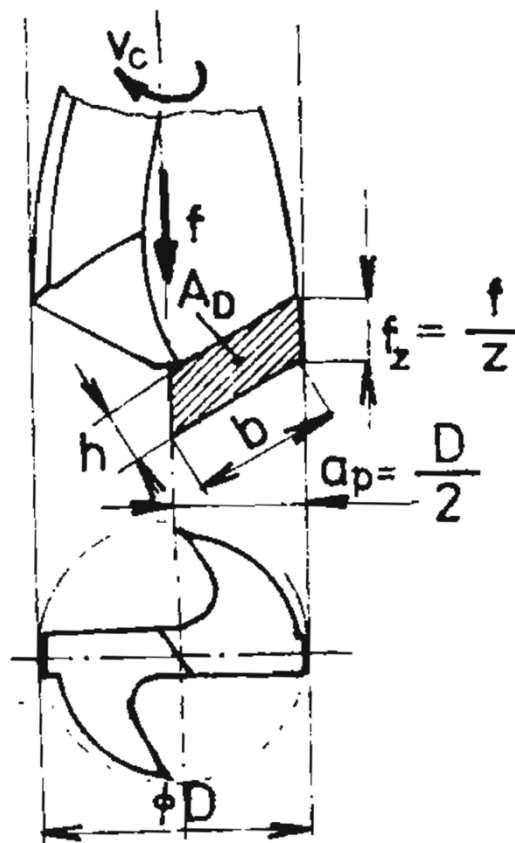
- Využití MKP/FEM (metody konečných prvků/finite element method) simulačních řezného procesu. Jednoduché a základní simulace lze provést ve 2D, náročnější, respektive věrnější simulace mohou být prováděny v trojrozměrném prostoru 3D.

- Metoda umělých neuronových sítí, jedná se o proces strojového učení a zapamatování a následného využití těchto poznatků k predikci velikosti sil na základě vstupních parametrů jako jsou například posuvová a řezná rychlost.
- Popis pomocí měrné řezné síly a plochy odřezávané vrstvy. Na tomto principu je založeno několik vztahů. Jednou možností, tou nejjednodušší, je určení měrné řezné síly odhadem. Další, podstatně přesnější, vztahy jsou založené na matematických modelech (mocninných, lineárních, polynomických).
- Popis pomocí empirických vztahů. [20]

Důkladněji zde bude rozebrána problematika určování řezných sil pomocí empirických vztahů, jelikož se jedná o metodu s poměrně věrnými dosahovanými výsledky. Další podrobněji rozebranou metodou bude metoda založená na ploše odřezávané vrstvy v kombinaci s měrnou řeznou silou určenou odhadem, ta zde bude uvedena především kvůli její jednoduchosti. Pro zjednodušení budou obě metody popsány na dvoubřitém šroubovitém vrtáku, na složitějších nástrojích by ovšem odvození probíhalo obdobně.

Určování řezné/tangenciální síly pomocí měrné řezné síly a obsahu plochy odřezávané vrstvy odhadem

Pro tuto metodu je nezbytné správně určit plochu odřezávané vrstvy. Odvození bude znázorněno pro vrtání dvoubřitým šroubovitým vrtákem při vrtání do plného materiálu, tedy bez předvrtání. V obrázku č. 11 je znázorněn odečet plochy odřezávané vrstvy, schéma je zjednodušeno zanedbáním příčného břitu. Představa je tedy taková, že ostří zasahuje až k ose vrtáku, to lze udělat pouze při takto přibližném výpočtu. Problematika příčného břitu je daleko složitější, především kvůli tomu, že tento břit nevytváří třísku, nýbrž materiál obrobku plasticky deformuje a hrne pod hlavní břity. Tento plasticky deformovaný materiál je přetvořen ve třísku právě až hlavními břity. [1]



Obrázek 11 Průřez odřezávané vrstvy [32]

Plocha odřezávané vrstvy jedním břitem vrtáku se určí pomocí vztahu (5).
[1, 21]

$$A_D' = b_D \cdot h_D = a_p \cdot \frac{f}{2} = \frac{D \cdot f}{4} \quad (5)$$

Dále je potřeba určit měrnou řeznou sílu k_c , která se spočítá podle vztahu (6), tedy součinem meze pevnosti obráběného materiálu R_m a konstanty odpovídající dané technologii. V případě vrtání se tento koeficient pohybuje od 3 do 6. [1, 20]

$$k_c = (3 \sim 6) \cdot R_m \quad (6)$$

Výsledná řezná síla F_c se určí dle rovnice (7). Je to za předpokladu, že celková řezná síla je součtem jejich příspěvků od jednotlivých, v tomto případě, dvou břitů.
[1]

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot 2 \cdot A_D' \quad (7)$$

Sice se jedná o velice jednoduchou metodu, ale svými výsledky se značně odklání od experimentálně zjištěných hodnot, tudíž dnes nenachází velké uplatnění. Jsou znázorněny pouze vztahy vedoucí k výpočtu tangenciální složky. Výpočet osové

složky je v této metodě realizován pouhým přepočtem z řezné složky pomocí koeficientu, což výsledek opět výrazně odklání od reality. U pasivní složky se předpokládá, že bude při dodržení symetrie vrtáku nulová, jelikož se příspěvky od obou břitů vzájemně vykompenzují. K dosažení uspokojivějších výsledků metodou založenou na tomto principu je nutné pro určení řezných sil použít jeden z matematických modelů. [20]

Určování sil pomocí empirických vztahů

Tento způsob určování sil řezání vychází z principu empirických vztahů. Musí dojít ke zkoumání obráběcího procesu, tedy naměření sil v závislosti na řezných podmínkách. Interval řezných podmínek nemusí být nutně co nejširší. Měl by ovšem být v takovém rozsahu, aby došlo k registraci takových řezných podmínek, které nejvíce ovlivňují velikost sil. Díky těmto naměřeným údajům lze poté sestavovat empirické rovnice/vztahy včetně potřebných exponentů. [20]

Vztahy jsou odvozeny pro dvoubřítý šroubovitý vrták. To s sebou nese fakt, že pokud je vrták správně naostřený, tak jsou síly na obou břitech stejně veliké. Důsledkem je nulová výsledná pasivní síla, jelikož její obě složky z jednotlivých břitů mají stejnou velikost, ale působí opačným směrem. Empirické vztahy se proto pro pasivní sílu při vrtání dvoubřítým šroubovitým vrtákem nedefinují, určují se pouze vztahy pro F_c a F_f . [21, 22]

Pro vrtání jsou tedy rovnice ve tvaru: [21, 22]

$$F_c = C_{F_c} \cdot D^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad (8)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot D^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \quad (9)$$

kde:

- konstanty C_{F_c} a C_{F_f} vyjadřují vliv obráběného materiálu,
- exponenty x_{F_c} a x_{F_f} vyjadřují vliv průměru vrtáku,
- exponenty y_{F_c} a y_{F_f} vyjadřují vliv posuvu na otáčku,
- D značí průměr vrtáku,
- f vyjadřuje posuv na otáčku. [21, 22]

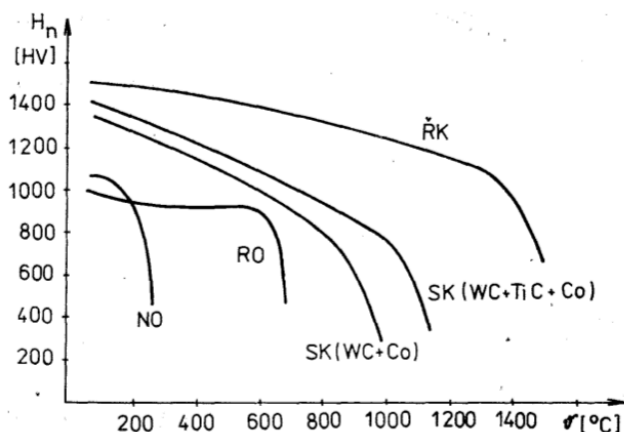
Za pomoci takto vyjádřených empirických vzorců lze následně odvodit empirický vztah pro výpočet krouticího momentu M_k k ose vrtáku, který je způsoben řeznou silou F_c . [1, 22]

$$M_k = 2 \cdot \frac{F_c}{2} \cdot \frac{D}{4} = \frac{1}{4} \cdot C_{F_c} \cdot D^{(x_{F_c}+1)} \cdot f^{y_{F_f}} \quad (10)$$

Výhodou této metody jsou o něco věrnější výsledky než u metody předchozí. Bohužel jsou ale vykoupeny velice časově náročnými experimenty. Jakási nevýhoda tkví například v obtížném zachycení vlivu opotřebení nástroje. Dalším možným nedostatkem může být, že hodnoty exponentů lze v literatuře dohledat pouze pro určité materiály a často jen pro vztahy upravené pro technologii soustružení. [20]

3. Teplota a tepelné jevy při vrtání

Měření teplot a tepelných bilancí při obrábění, respektive vrtání je výhodné z několika důvodů. Znalost teplotních a tepelných charakteristik samozřejmě dále určuje a determinuje proces obrábění. Jedním z vyloženě zjevných důvodů je například nutnost znalosti teploty obrábění z hlediska použitelnosti nástrojových materiálů. U některých nástrojových materiálů dochází se zvyšující se teplotou k postupnému poklesu tvrdosti. Jiné materiály ztrácí svoji tvrdost skokově. Na obrázku č. 12 lze pozorovat závislosti tvrdostí jednotlivých materiálů na teplotě. NO představuje nástrojové oceli, RO rychlořezné oceli, u obou dochází k téměř skokovému poklesu tvrdosti. Naopak u slinitých karbidů SK a řezné keramiky ŘK je mírný pokles tvrdosti pozorovatelný v celém rozsahu teplot. Tyto materiály však ale také při přiblížení se k jejich limitním teplotám vykazují podstatně intenzivnější pokles tvrdosti, jaký lze pozorovat u NO a RO. [1, 23]

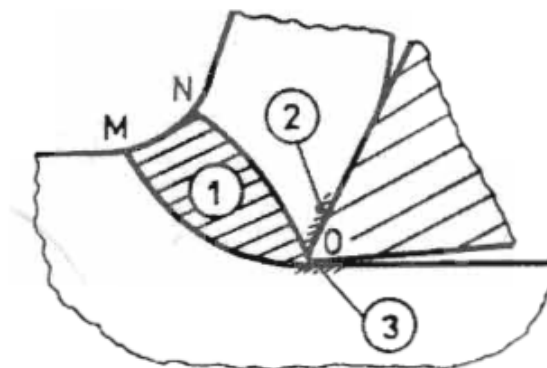


Obrázek 12 Závislost tvrdosti řezných materiálů na teplotě [23]

3.1. Teplu při vrtání

Množství tepla a hlavně jeho „pohyb“ je nezbytné sledovat z hlediska určování řezných parametrů, nástrojů, volby stroje atd. Do obráběcího stroje nejčastěji vstupuje elektrická energie, ta se v elektromotorech transformuje na energii mechanickou. Téměř veškerá mechanická energie/práce se při vzniku třísky převede na teplo, z celkové mechanické práce je to přibližně 98 %. Zbylá 2 % energie se spotřebují při elastické deformaci, nebo se přemění na práci utajenou, tedy práci k deformaci mřížky a vytvoření nových povrchů. Z mechanické energie generované elektromotorem se její část spotřebuje na ztráty ve vedeních a převodech obráběcího stroje. Jedná se tedy opět o převod na tepelnou energii. [3, 24]

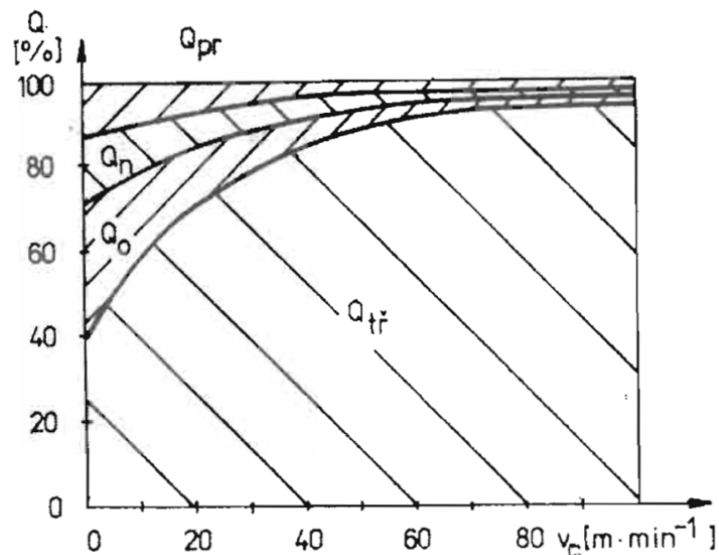
Zdroji tepla při obrábění jsou všechny tři oblasti plastické deformace, v obrázku č. 13 jsou tyto oblasti znázorněny. Oblast MNO označená 1 odpovídá oblasti primární plastické deformace, 2 odpovídá sekundární oblasti a 3 představuje oblast terciální plastické deformace. Teplo vznikající v oblasti 1 je z práce deformační, teplo v oblastech 2 a 3 je způsobeno třením, v oblasti 3 navíc plastickou deformací. Nejvíce tepla vzniká v oblasti 1, následuje oblast 2, nejméně tepla vzniká v oblasti 3. [3, 23, 24]



Obrázek 13 Oblasti plastických deformací [23]

Teplo vzniklé obráběním se v průběhu procesu dostává do čtyř složek. Těmito čtyřmi složkami jsou tepla odvedená do třísky, nástroje, obrobku, či do řezného prostředí. Teplo se do těchto čtyř složek dostává kondukcí nebo konvekcí, tedy vedením nebo prouděním. Při nízkých řezných rychlostech do každé složky odchází řádově desítky procent celkového tepla. Se zvyšující se řeznou rychlostí ale jednoznačně začíná převládat teplo odvedené do třísky, suma zbývajících tří tepel činí jednotky až nízké desítky procent z celkového tepla. Tento jev lze pozorovat na

obrázku č. 14. Tohoto trendu lze využít například kurčitému tepelnému neovlivňování, případně alespoň minimalizaci tepelných toků do nástrojů a obrobků. Je ale zapotřebí brát v potaz, že se vzrůstající řeznou rychlostí roste množství vzniklého tepla. Obrázek tedy určuje pouze poměrná množství „putující“ do jednotlivých složek. Představa, že se při vyšších řezných rychlostech dostane do nástroje, obrobku nebo prostředí menší množství tepla, je tedy mylná. [3, 23, 24]



Obrázek 14 Podíl jednotlivých tepelných složek v závislosti na řezné rychlosti [23]

Celkové teplo v soustavě by mělo přibližně odpovídat součinu řezné složky síly řezání, řezné rychlosti a doby obrábění. Rovnice (11) vyjadřuje bilanci tepla. [3]

$$Q = F_c \cdot v_c \cdot t = Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_{tř} + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad (11)$$

kde je:

- Q celkové teplo,
- F_c řezná složka síly řezání,
- v_c řezná rychlost,
- t čas obrábění,
- Q_1 teplo vnikající v oblasti primární plastické deformace,
- Q_2 teplo vnikající v oblasti sekundární plastické deformace,
- Q_3 teplo vnikající v oblasti terciální plastické deformace,
- $Q_{tř}$ teplo odvedené do třísky,
- Q_o teplo odvedené do obrobku,
- Q_n teplo odvedené do nástroje,
- Q_{pr} teplo odvedené do prostředí. [1, 3, 23, 24]

Rozložení celkového tepla do jednotlivých složek je velice podstatná problematika, jelikož vzniklé teplo negativně působí na řezné nástroje, ovlivňuje pēchování, zpevňování a vlastnosti materiálu obrobku. Dále také značně ovlivňuje podmínky tření na hřbetě a čele nástrojů. [3, 24]

3.1.1. Parametry ovlivňující vznik tepla

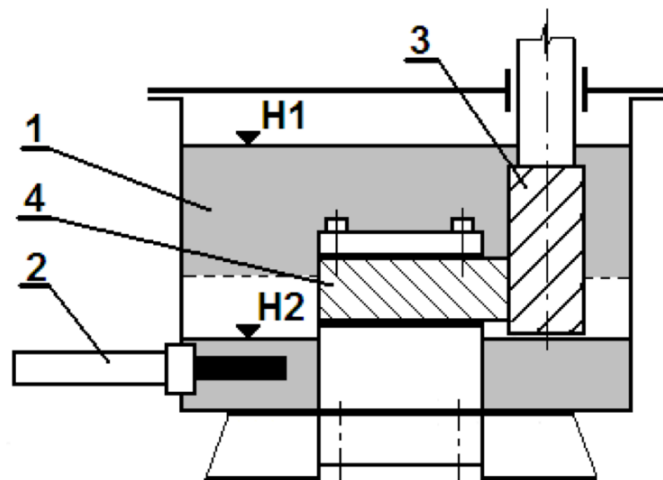
Obecně lze říci, že teplo vznikající při obrábění je funkcí především materiálu obrobku, geometrie nástroje a řezných podmínek. Zvyšující se řezná rychlost v_c s sebou přináší nárůst množství generovaného tepla. Obdobně jsou na tom i ostatní řezné podmínky. Se zvyšující se rychlostí posuvu a hloubkou řezu opět roste množství vzniklého tepla. Posuv a hloubka řezu ale ovšem nemá tak silný vliv jako řezná rychlost. Úhel nastavení nemá přímo vliv na velikost vzniklého tepla. S jeho růstem klesá velikost břitu v záběru, což má za následek větší tepelné namáhání nástroje. Se zvětšujícím se úhlem řezu δ_o roste intenzita plastické deformace, především v oblasti primární plastické deformace dochází opět k nárůstu vznikajícího tepla. Dalším parametrem výrazně ovlivňujícím množství vznikajícího tepla je úhel hřbetu α_o , jde tedy o problematiku v oblasti terciální plastické deformace. Se zmenšujícím se úhlem hřbetu α_o se zvětšuje styčná plocha mezi nástrojem a obrobkem. Tím se zvětšuje práce tření, což zvětší množství vznikajícího tepla. [24]

3.2. Měření tepla při vrtání

V experimentech se množství tepla měří v kalorimetrech, tedy izolovaných soustavách. Měření tepla spočívá v předávání tepla z obrábění do celé soustavy kalorimetru, po vyrovnání teplot se měří teplota lázně (kapaliny v kalorimetru). Bilance tepla se provádí podle kalorimetrické rovnice, dílčí tepla se určují z rozdílů počátečních a koncových teplot, hmotnostní a tepelných kapacit. Podle výšky hladiny kapaliny v kalorimetru dochází k měření celkového tepla v soustavě, nebo pouze tepla odvedeného do třisek. Ustálenou teplotu uvnitř kalorimetru, tj. v kapalině v kalorimetru je zapotřebí měřit co nejpřesněji. Dále je vhodné do lázně kalorimetru umístit nějaké míchací zařízení, aby se zajistila stejná teplota v celém objemu kapaliny. Míchací zařízení tedy urychluje dobu ustalování počátečních a koncových teplot. Samozřejmě nastávají problémy s dokonalostí izolace soustavy, k určitým ztrátám dochází především stěnami kalorimetru a v upnutí. Ztráty

představují rozdíl tepla změřeného kalorimetrem a tepla, které vychází z celkové práce řezání. [3]

Na obrázku č. 15 je znázorněn kalorimetr pro frézování, pro případ vrtání by bylo schéma analogické. V obrázku č. 15 jsou znázorněny 2 hladiny kapaliny, jsou označeny H1 a H2. V konfiguraci s hladinou H1 dochází k měření celkového tepla v soustavě. Naopak nastavení s hladinou H2 slouží pouze k měření tepla odvedeného do třísek. Součástka označená číslem 2 je teploměr, 4 značí obrobek, 3 obráběcí nástroj, v tomto případě stopkovou frézu. [3]



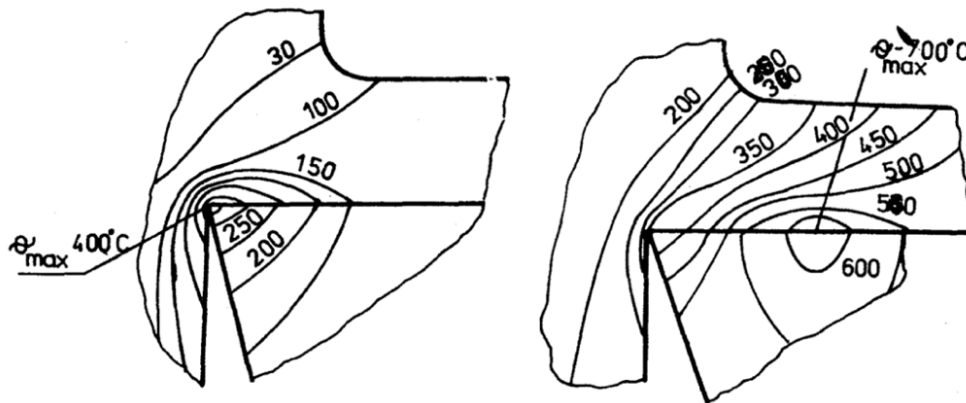
Obrázek 15 Schéma kalorimetru při frézování [3]

3.3. Teplota řezání/vrtání

Teplota řezání velice úzce souvisí s teplem při řezání. Teploty jsou zkrátka dalším vypovídajícím a určujícím parametrem procesu řezání. Obvykle se pod pojmem teplota řezání rozumí střední hodnota teploty mezi stykovými plochami nástroje a obrobkem, značí se Θ či Θ_s . Střední hodnota je pochopitelně nižší než maximální hodnota teploty řezání. Měření střední teploty řezání je ale výrazně jednodušší záležitostí než stanovování teplotního pole. Znalost velikosti teplot, popřípadě i teplotních polí, je důležitá především na hřbetě a čela nástroje. Znalost je nezbytná především, jako tomu je i u tepla, z hlediska opotřebení a použitelnosti nástrojů. Teploty styku třísky a čela nástroje mohou dosahovat velice vysokých teplot, v maximech až 1200 °C. [1, 23, 24]

Rozdíl mezi maximy a minimy teplot v teplotních polích nástrojů může v případě čela dostavovat až 450 °C. V případě hřbetu nástroje se rozdíl mezi maximální a minimální teplotou může pohybovat od 100 do 300 °C. Rozložení teplot

je navíc závislé na velikosti řezné rychlosti. S rostoucí řeznou rychlostí se maximum teploty řezání posouvá dále od ostří nástroje. Při nízkých rychlostech je přitom maximum přímo na ostří. Příklad teplotního pole v soustavě nástroj, obrobek a tříška je znázorněn na obrázku č. 16. V levé části obrázku je znázorněno schéma uplatňující se při nižších řezných rychlostech. Pravá část obrázku popisuje teplotní pole vznikající při vyšších hodnotách řezné rychlosti. [1, 3]



Obrázek 16 Teplotní pole nástroje a obrobku pro nízké v_c (vlevo) a vysoké v_c (vpravo) [1]

Teplotní pole lze určovat/měřit dnes už především bezdotykovými metodami, tedy hlavně termovizemi. Starší metodou, dříve hojně využívanou, je použití teploměrných barev, tužek či kříd. Jedná se o teplocitlivé látky, které při dosažení určité teploty mění svoji barvu nebo vlastnosti. Tyto látky na nástroji nebo obrobku v podstatě vykreslí místa se stejnou teplotou, vytvoří jakési izotermy. [25]

3.4. Měření teploty při vrtání

Pro měření teplot při vrtání nebo obecně obrábění je k dispozici celá řada metod. Mohou to být metody dotykové, ale i bezdotykové. V případě dotykových je to nejčastěji nějaká variace termočlátku, tedy využití principu termoelektrického jevu. Jedná se o značně dynamické měření, z toho důvodu je použití měřicích zařízení s velkou setrvačností vyloučeno. Není zde téměř prostor pro použití například bimetalových teploměrů, či teploměrů s hydraulickým sloupcem.

3.4.1. Měření teploty pomocí termočláneků

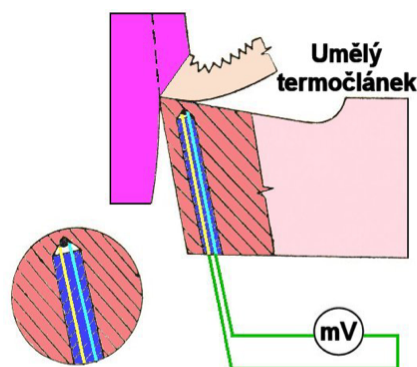
Termočlánek je zařízení využívající principu termoelektrického jevu. Jedná se o dva různé druhy vodivě spojených kovových vodičů. Materiály pólů termočlátku musí být kovy s různými termoelektrickými potenciály. Termočlánek

tvorí 2 spoje, jeden je měřicí, druhý slouží jako reference. V termočláncu je využito Seebeckova jevu (termoelektrického), tedy generování elektrického napětí v závislosti na rozdílu teplot mezi oběma spoji. Závislost mezi generovaným napětím a teplotou může být často nelineární, hodnoty generovaného napětí jsou v řádu milivoltů. Pokud se jedná o komerčně dostupný termočlánek konkrétního typu, tak má zpravidla svoji cejchovní křivku. Pro speciálně vyráběné termočlánky (umělé, poloumělé a termoduo) musí být stanovena tzv. cejchovní křivka, která odpovídá použitým materiálům. Termočlánky zvládají měřit teplotu v rozmezí -200 až 2000 °C, zpravidla s přesností měření pohybující se od $\pm 0,5$ do ± 4 °C. Výhodou termočlánců je jejich jednoduchá konstrukce, robustnost, nízká cena, rychlá odezva a malá velikost. [26]

Hojně využívaným kovem pro použití v termočláncích je konstantan, tedy slitina niklu a mědi. Konstantan je například vhodný v kombinaci se železem. Při využití v obrábění se rozlišuje několik principů, jedná se termočlánky přirozené, umělé, poloumělé, či termodua. [25, 26]

Umělý termočlánek

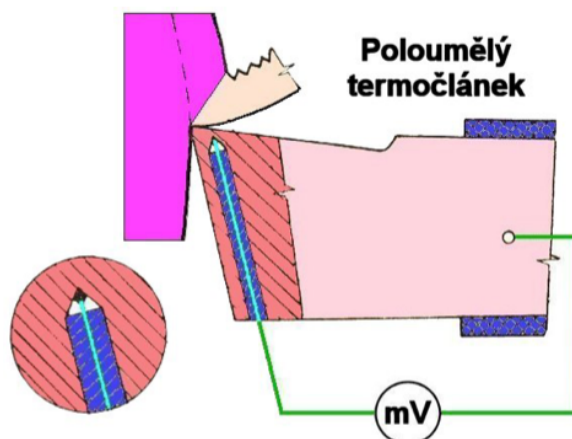
Použití umělého termočláncu v obrábění spočívá v umístění měřicího spoje termočláncu v dutině nástroje, jak je vidět v obrázku č. 17. Měřená teplota je samozřejmě nižší, než která je v místě styku nástroje a obrobku. Nevýhodou je nutnost extrapolace teploty řezání. Je proto žádoucí, aby dutina v nástroji sahala co možná nejbližší k místu styku nástroje s obrobkem. Jakási výhoda tkví v jednoduchosti použití, především v tom, že existuje pouze jedna cejchovní křivka i při obrábění různých materiálů. V principu lze podobným způsobem měřit teplotu i v obrobku. V případě monolitního nástroje dochází k jeho znehodnocení pro další použití, umělý termočlánek je spíše vhodný pro nástroje s VBD. [3, 25]



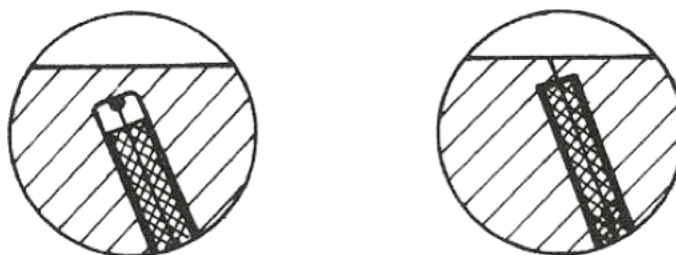
Obrázek 17 Ukázka použití umělého termočláncu při soustružení [24]

Poloumělý termočlánek

Poloumělý termočlánek je principiálně velice podobný termočlátku umělému, opět vyžaduje dutinu nebo zde i průchozí díru v nástroji (případně v obrobku) pro svoje umístění. Pro poloumělý termočlánek existují dvě konfigurace. První varianta má stejnou dutinu jako umělý termočlánek, na dně dutiny je přivařen jeden vodič, druhým vodičem je samotný nástroj. Zde nedochází k plnému využití potenciálu poloumělého termočlátku. V druhé konfiguraci je nástrojem vedena průchozí díra. Izolovaný vodič je vyveden nástrojem až k místu styku nástroje s obrobkem. Odcházející tříška tvoří vodivé spojení mezi břitem nástroje a „prostrčeným“ vodičem. Úplně stejně lze takto vodiče umístit do obrobku, kde dojde k vodivému spojení díky plastické deformaci, a následně měřit teplotu v odřezávaných vrstvách. V obou konfiguracích poloumělého termočlátku je nutné, aby nástroj s obrobkem byl vzájemně elektricky izolován, vychází to z principu termočlátku. Obrázky č. 18 a 19 popisují princip poloumělých termočládků, modrá barva v obrázku č. 18 představuje elektrické izolanty. V obrázku č. 19 lze pozorovat rozdíl mezi oběma typy poloumělých termočládků. [3, 25]



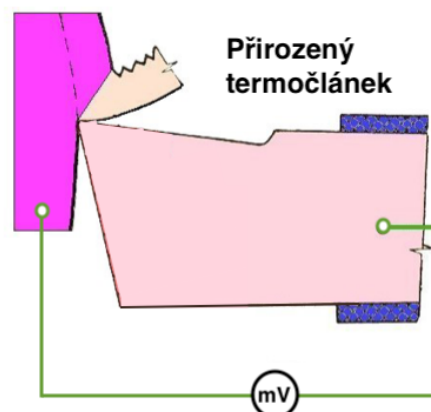
Obrázek 18 Princip poloumělého termočlátku při soustružení [24]



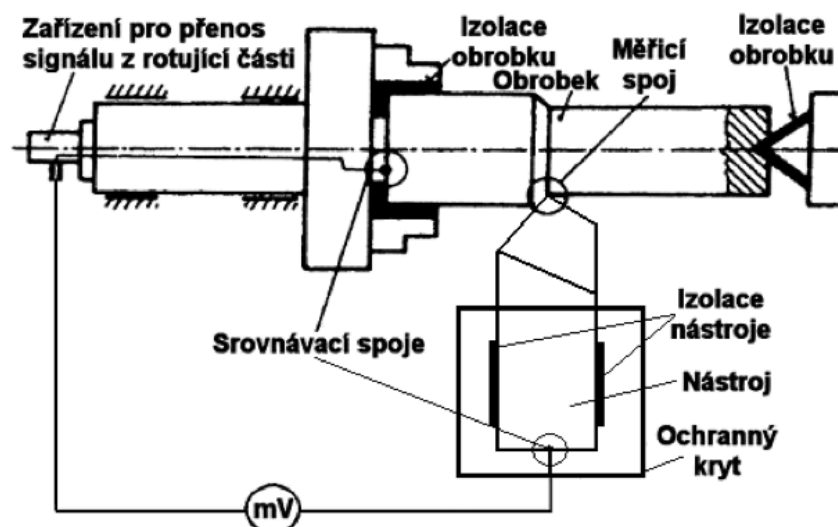
Obrázek 19 Dvě varianty použití poloumělého termočlátku [3]

Přirozený termočlánek

Přirozený termočlánek pro svoji funkci nevyužívá drátové vodiče. Nástroj a obrobek zde představují vodiče, jejich stykové plochy měřicí spoj. Plocha styku nástroje a obrobku je konečně velká, generované napětí odpovídá střední teplotě stykových ploch. Dochází k měření teploty řezání v tom smyslu, v jakém je definována, tedy průměrné teplotě na stykových plochách nástroje a obrobku. Opět je zde nutnost vzájemné izolace nástroje a obrobku, stejně jako v případě poloumělého termočláneku. Schéma přirozeného termočláneku lze vidět na obrázcích č. 20 a 21. Vhodná je navíc ještě vzájemná izolace obrobku a obráběcího stroje, jak je vidět na obrázku č. 21. Dojde díky tomu ke zvýšení přesnosti a spolehlivosti. Velkou nevýhodou je nutnost cejchování pro různé kombinace materiálů nástrojů a obrobků. [3, 24, 25]



Obrázek 21 Princip přirozeného termočláneku (upraveno pro potřeby diplomové práce) [24]

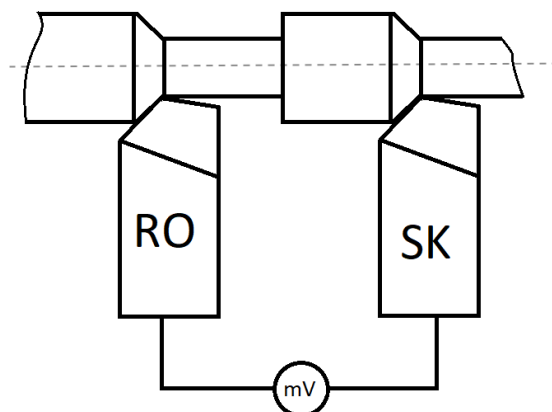


Obrázek 20 Detailní schéma přirozeného termočláneku při soustružení [3]

Princip přirozeného termočlánu může najít uplatnění i moderních adaptivně řízených strojů. Tyto stroje mohou v závislosti na výstupních údajích přirozeného termočlánu upravovat řezné podmínky. Toto uplatnění je možné díky velice dynamické schopnosti měření termočlánu. [24, 25]

Termoduo

Metoda termoduo je založená na současném záběru dvou nástrojů se stejnými řeznými podmínkami a stejnou geometrií do jednoho obrobku. Materiál nástrojů musí být odlišný. Dva nástroje z různých materiálů v podstatě tvoří termočlánek. Využití termodua mírně odstraňuje nedostatky předchozích metod. Stále se využívá termoelektrického jevu, avšak není zde nutná kalibrace pro jakoukoliv kombinaci materiálů nástroj-obrobek. Cejchování se provede pro kombinaci nástrojů z dvou různých nástrojových materiálů. Díky této kalibraci lze měřit teplotu řezání v jakémkoliv elektricky vodivém materiálu bez další kalibrace. Princip metody je popsán na obrázku č. 22. [3, 25]



Obrázek 22 Příklad termodua při soustružení [25]

Existuje jakási modifikace termodua v podobě dvou různých materiálů obráběných jedním nástrojem. Princip je takový, že dva materiály s různým chemickým složením jsou izolovaně upnuty do stroje. Jsou izolovány od stroje, ale navíc i vzájemně mezi sebou. Následně je zapotřebí zaručit, aby obrábění probíhalo na rozhraní obou obráběných materiálů. Tato metoda je daleko vhodnější pro technologii vrtání. Klasické termoduo nachází uplatnění především v soustružení. [3]

U obou principů termodua je nutné počítat, popřípadě se je snažit omezit, s parazitními termočlány. Ty vznikají v rozhraní těl nástrojů a pájených, nebo

vyměnitelných břitových destiček. Dalším zdrojem je u metody se dvěma obráběnými materiály špatné vzájemné odizolování polotovarů, a také špatné odizolování obrobků od celé soustavy. Omezení těchto parazitních vlivů velice zpřesňuje výsledky měření. [3]

3.4.2. Měření teploty pomocí termistorů

Termistory jsou součástky, jejichž charakteristickou vlastností je změna odporu odpovídající změně teploty. Závislost odporu jednotlivých materiálů na teplotě má různý charakter. Typicky jde o lineární či exponenciální charakteristiky. V návaznosti na chemickém složení má závislost elektrického odporu termistoru na teplotě rostoucí, nebo klesající charakter. V případě termistorů používaných v procesu obrábění je žádoucí „strmá“ závislost odporu na teplotě, tudíž že již malá změna teploty způsobí velkou změnu elektrického odporu. Tuto vlastnost nabízejí polovodičové termistory, které oproti kovovým disponují přibližně desetinásobnou rychlostí změny odporu na teplotě. Z tohoto důvodu se v oblasti obrábění používají výhradně polovodičové termistory. [3, 26]

Termistory vynikají velikou citlivostí a malými rozměry, respektive hmotností, tudíž se hodí pro dynamická měření. Konstruktivně jsou nejčastěji ve formě malých kuliček, typicky s průměrem od 0,2 do 3 mm. Zvládají měřit malé rozdíly teplot při velkých rychlostech jejich změny. Termistory dosahují vysokých přesností měření, v maximech až $\pm 0,05$ °C. Jejich nedostatky tkví v použitelnosti, která se uvádí přibližně od -80 do 150 °C, a jejich časové nestálosti. [3, 26]

3.4.3. Bezdotykové měření teploty

Bezdotykové měření teplot je založeno na principu měření a zpracování elektromagnetického záření vyzařovaného měřeným tělesem. Bezdotykové měření teploty se často nazývá jako termometrie. Využívané elektromagnetické záření je z intervalu infračerveného (IR) záření. Typické hodnoty vlnových délek infračerveného záření používaných v termometrii nabývají od $0,14$ do $15 \mu\text{m}$. Infračervené záření vyzařují všechna tělesa s teplotou větší než 0 K. U sledovaného IR záření těles se vyhodnocuje především zářivý tok včetně jeho směru a spektrálního složení, jelikož právě tyto vlastnosti IR záření přímo závisí na teplotě měřeného tělesa. [26, 27, 28]

Pro teoretický popis procesu při vyzařování se používá idealizovaný nástroj, který se nazývá absolutně černé těleso. Jde o objekt z kvantové fyziky, který se chová jako ideální pohlcovač záření, ale zároveň i jako ideální zářič. Zářivý tok lze popsat základními zákony používanými v kvantové fyzice. Mezi tyto zákony patří Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon, Stefan-Bolzmannův zákon a Kirchhoffovy zákony týkající se emisivity. [27, 28]

Skutečná tělesa se ovšem nechovají jako ideální černé těleso, hovoří se o skutečných či šedých tělesech. Oproti černým tělesům šedá/skutečná tělesa vyzařují a pohlcují méně. Tato vlastnost je zahrnuta v spektrální emisivitě neboli jakémisi „korekčním“ koeficientu. Vychází se z intenzity vyzařování černého tělesa ze Stefan-Bolzmannova zákona, který je ovšem doplněn o emisivitu. Hodnota emisivity pro černé těleso nabývá hodnoty 1. Pro reálná tělesa se pohybuje v intervalu od 0 do 1, přičemž vždy dosahuje hodnoty menší než 1. Například pro bílý matný papír při teplotě povrchu 20 °C a vlnové délce 7 až 14 μm nabývá hodnoty 0,93. [27, 28]

Bezdotykové měření teploty není všespásné, nabízí řadu nevýhod, ale rovněž disponuje spousty pozitivními vlastnostmi. Nejvýznamnějšími přednostmi IR měřičů teploty jsou: [29]

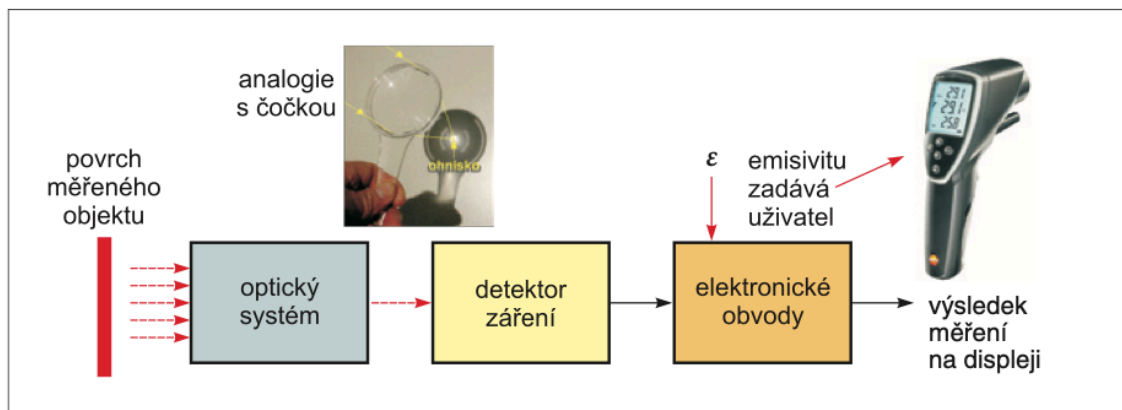
- Rychlost měření,
- Měření pohybujících se objektů,
- Měření na životu nebezpečných a vzdálených zařízeních (součásti pod vysokým elektrickým napětím),
- Měření vysokých teplot, až 3000 °C,
- Měření bez ovlivnění měřeného objektu.
- Odpadá riziko poničení a kontaminace měřeného tělesa. [29]

Výše zmíněné výhody IR měřících přístrojů rovněž doplňuje i několik negativních parametrů:

- Bod nebo plocha měření musí být viditelné, tudíž lze měřit pouze povrchové teploty. Například znečištění prostředí prachem či kouřem snižuje přesnost měření.
- Znalost emisivity jednotlivých měřených materiálů. Lze znát tabulkou hodnotu, nebo je nutno určit pomocí několika

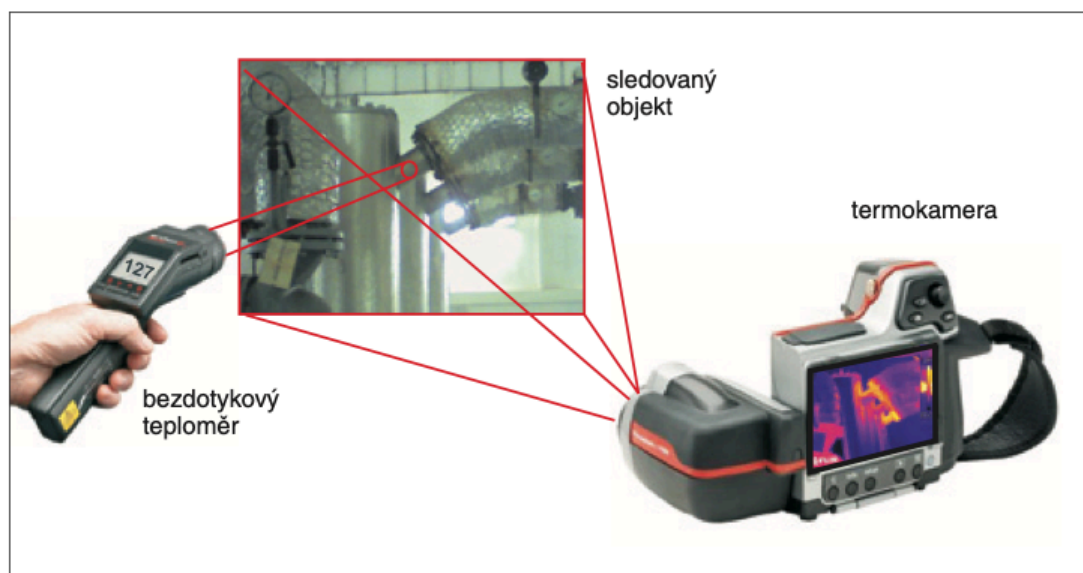
různých metod (např. porovnání teploty předmětu s teplotou získanou jiným způsobem měření, plastová samolepka se známou emisivitou atd.). [29]

Měření bezdotykovým teplotním měřidlem je pro případ IR teploměru znázorněno v blokovém schéma v obrázku č. 23.



Obrázek 23 Princip měření bezdotykovým teploměrem (blokové schéma) [30]

Principiálně existují 2 typy přístrojů založených na bezdotykovém měření teplot pomocí IR záření. Termokamery jsou přístroje měřící určitou oblast, jakýsi mrak bodů. Pyrometry (bezdotykové teploměry) měří teplotu vybraného „bodu“.
[28, 30]



Obrázek 24 Znázornění rozdílu mezi termokamerou a bezdotykovým teploměrem [27]

Bezdotykové IR teploměry (pyrometry)

Pyrometr je zařízení měřící teplotu v jednom „bodě“ na povrchu měřeného objektu. Bodem se myslí malá plošná oblast na povrchu objektu, nejčastěji disponuje

kruhovým tvarem. Jejich hlavní výhoda oproti termokamerám tkví v jejich nižší pořizovací ceně. Pro usnadnění a urychlení práce se zaměřováním často pyrometry disponují laserovým zaměřovačem. [27, 29, 30]

Pyrometry se rozdělují podle oblasti spektra IR záření používané k měření teploty na: [3, 30]

- Širokopásmové (úhrnné, radiační),
- Úzkopásmové (pásmové, fotoelektrické),
- Poměrové,
- Monochromatické. [3, 28, 30]

Širokopásmové pyrometry využívají veškerého vyzařovaného tepelného záření v širokém spektru vlnových délek. Toto tepelné záření je následně přes optickou soustavu soustředěno na tepelný detektor, kterým nejčastěji bývá termočlánek nebo termistor. Činnost detektoru a optiky by měla být nezávislá na vlnové délce. Teplota se následně vyhodnocuje na základě Stefan-Bozmanova zákona. Nejpřesněji tyto přístroje fungují pro měření teploty, kdy se emisivita blíží hodnotě 1. Dále je potřeba zaručit dopadání pouze tepelných paprsků zářiče. Zdrojem chyb může být sluneční záření v podobě denního světla. [3, 30]

Úzkopásmové pyrometry představují nejběžnější provedení IR teploměrů. Jejich název napovídá, že pracují v úzkém rozmezí vlnových délek. Tento interval vlnových délek odpovídá účelu použití pyrometru. Šíří pásma určuje optika pyrometru, různé filtry a také spektrální citlivost použitého fotoelektrického čidla. Fotoelektrická čidla nesou rovněž název kvantové senzory, mezi taková zařízení patří fotonky, fotočlánky, fotodiody, fotorezistory a fototranzistory. Oproti tepelným detektorům použitých v širokopásmových pyrometrech zvládají tyto součástky výrazně rychleji reagovat na změny teploty a zároveň pro ně není problém měřit teplotu i velice malých objektů. Oproti širokopásmovým pyrometrům je zde rozdíl v použitém zákoně z kvantové mechaniky pro určení měřené teploty. Úzkopásmové přístroje vycházejí z podstaty Planckova zákona. Typické použití v obrábění je pro měření teploty povrchu třísky a obrobku a na měření teploty na břitu nástroje. Jejich předností je rovněž to, že je lze nasadit i v oblastech, kde je mezi pyrometrem a měřeným objektem například „znečistění“ vodní párou či oxidem uhličitým a podobně. [3, 28, 30]

Termokamery

Termokamery neboli termovize jsou zařízení pro bezdotykové měření a plošné pozorování (ve 2D) teplotních polí objektů. Dnešní podoba termokamer je například CCD/CMOS kamera s možností zpracování IR záření, dokonce ji lze nalézt i v několika chytrých mobilních telefonech. Výstupem z termovize je termogram, tj. obrázek s několika stupni šedi nebo s barevným spektrem. Jednotlivé barvy z barevného spektra/stupně šedi určují příslušnou teplotu v teplotním poli sledovaného záběru. [3, 28, 30]

Pracují na stejném principu jako IR teploměry. IR teploměr obsahuje pouze jeden detektor, dnešní termokamery využívají tzv. maticové detektory, tedy matice/soustavy obsahující vysoký počet jednotlivých detektorů. Dřívější typy termokamer fungovaly na principu rozkladu obrazu do jednotlivých bodů, tyto systémy byly velice složité. Díky vývoji maticových detektorů se od těchto složitých systémů upustilo. [30]

Stejně jako pyrometry využívají termokamery tepelné detektory nebo kvantové fotonové senzory. K zajištění adekvátní přesnosti je nutné znát korekční koeficienty a emisivitu, nebo provést kalibraci. [30]

Přesnost měření bezdotykovými přístroji a jejich parametry

Přesnost měření termokamerou i pyrometrem se odvíjí od přesnosti nastavené emisivity a případných dalších korekčních koeficientů. Typická přesnost dnešních termokamer a pyrometrů je ± 2 °C nebo ± 2 % k/z naměřené hodnotě/y, vždy ale platí větší z obou hodnot. Dražší a zároveň dokonalejší přístroje umí pracovat s přesností ± 1 °C nebo ± 1 %, přičemž opět platí vyšší hodnota. Nejmenší rozlišitelná změna teploty dnešních přístrojů se pohybuje od 0,3 do 1 K. Krom přesnosti existuje celá řada dalších důležitých parametrů obou přístrojů, pro obě zařízení je to typicky spektrální a teplotní rozsah. U termokamer přibývá rozlišení detektoru, snímkovací frekvence, způsob zaostřování, či minimální zaostřovací vzdálenost. [27, 30]

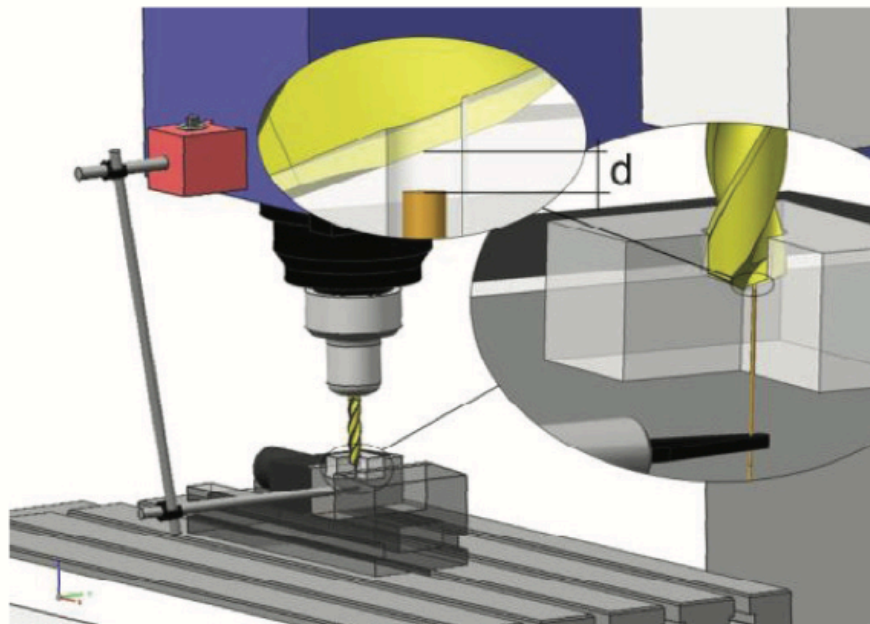
3.4.4. Měření teploty – zajímavosti

Zajímavostí v oblasti měření teploty při obrábění je například způsob měření teploty břitu vrtáku během vrtání popsany v článku z 45. konference CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012. Zde švédští inženýři prezentovali svoji

metodu měření teploty řezání na břit vrtáku. Vytvořili speciální koncepci skládající se z pyrometrů a optických vláken doplněných o potřebnou mechanickou aparaturu v podobě držáků, příchytek a ramen. [31]

Měření provedli za pomoci optických vláken umístěných v obráběném materiálu. Vlákna byla umístěna v obrobku 3 a 6 mm od osy rotace vrtáku, přičemž byly použity spirálovité vrtáky ze dvou různých karbidů o průměrech 12 mm. Otvory pro optická vlákna byly vytvořeny vodním paprskem. Optická vlákna byla dále napojena na pyrometry. Pro bezpečné upnutí vrtáků použili hydraulické sklíčidlo. Vrtání probíhalo na obrobkách z nástrojové oceli SS2244-4, Inconelu 718, slitině Ti6-4 a na kompozitu z epoxidu s uhlíkovými vlákny. Experiment probíhal při různých řezných rychlostech a posuvech na otáčku pro každý materiál. Pro tři kovové materiály naměřili adekvátní hodnoty v obou pozicích od osy rotace vrtáku, z nich vytvořili příslušné závislosti. Pro každou polohu provedli měření třikrát, výstupem bylo zjištění, že hodnoty naměřené v poloze 6 mm od středu vrtáku vykazují daleko větší konzistentnost než hodnoty měřené v poloze 2 mm od osy vrtáku. Tuto variabilitu odůvodňují jinými podmínkami plastické deformace v polohách blíže ke středu, další zdůvodnění mají v klesající velikosti řezné rychlosti směrem k ose vrtáku. Dále uvádí, že snižování v_c směrem k ose vrtáku s sebou nese možné plastické přetvoření otvorů pro optická vlákna, což v důsledku může zmenšit plochu pro záření a následně ovlivnit měření. Pro případ kompozitního materiálu se k výsledkům nedopracovali, což si vysvětlují nízkou teplotou řezání pohybující se kolem 200 °C, což je teplota na spodní hranici rozlišitelnosti jimi použitého pyrometru. Princip celého měření je znázorněn na obrázku č. 25. [31]

Závěrem autoři uvádí, že tuto jejich metodu lze využít pro zjišťování teploty na břitu nástrojů, avšak pro dosažení adekvátních výsledků je nutné použít důkladnou počítačovou analýzu. [31]



Obrázek 25 Schéma měření teploty na břitu vrtáku za pomoci pyrometrů a optických vláken [31]

3.5. Matematický popis tepelných jevů při obrábění

K matematickému popisu teploty řezání se nejčastěji používá empirického vzorce, ve kterém jsou obsaženy nedůležitější řezné parametry. Vliv neboli míra účinku jednotlivého řezného parametru je obsažena v hodnotě jeho exponentu. [1, 23]

Teplota řezání představuje střední hodnotu teplot v místech styku nástroje a obroku. Lze ji vyjádřit následujícím vztahem (12): [1, 23]

$$\Theta = C_{\Theta} \cdot a_p^{x_{\Theta}} \cdot f^{y_{\Theta}} \cdot v_c^{z_{\Theta}} \quad (12)$$

kde:

- C_{Θ} je empirická konstanta,
- x_{Θ} , y_{Θ} , z_{Θ} jsou empirické exponenty vyjadřující vliv jednotlivých řezných parametrů. [1, 23]

Empirické exponenty v pořadí x_{Θ} , y_{Θ} , z_{Θ} obvykle dosahují hodnot 0,1; 0,25 a 0,4. Z toho je zřejmé, že nejvíce teplotu řezání ovlivňuje řezná rychlost, nejméně pak hloubka řezu. [1, 23]

S teplotou řezání souvisí opotřebení nástroje, náklady na obrábění a také volba optimálních řezných podmínek. Díky tomu lze tento vztah pro empirické vyjádření teploty řezání aplikovat jako jeden ze vstupních předpokladů při optimalizaci řezných podmínek. [23]

4. Praktická část – experiment

Praktická část diplomové práce je věnována monitorování řezného procesu vrtání z hlediska dynamometrie. Byly zkoumány velikosti posuvových/osových sil F_f a řezných momentů M_c při vrtání monolitními karbidovými vrtáky povlakovanými TiAlN do plného materiálu obrobku z titanové slitiny Ti-6Al-4V.

Vzhledem k nízkému součiniteli teplotní vodivosti titanové slitiny byl experiment proveden s chlazením procesní kapalinou. Jako procesní kapalina byl použit vodný roztok kapaliny Synergy 735. Následně bylo pro porovnání chování při řezném procesu uskutečněno několik měření v suchém prostředí, tj. bez procesních kapalin.

V průběhu měření byly pozorovány jednotlivé vrtáky pod mikroskopem z hlediska opotřebení. Toto měření bylo prováděno hlavně kvůli vyloučení vlivu opotřebení na měřené hodnoty. V konfiguraci bez chlazení byl patrný rychlý a intenzivní charakter opotřebování nástrojů.

4.1. Použité vybavení

Celý experiment byl proveden s vybavením Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie Fakulty strojů Českého vysokého učení technického v Praze.

4.1.1. Obrobek

Jako obrobek byl použit polotovár součástky pro leteckou aplikaci. Materiálem obrobku byla titanová slitina Ti-6Al-4V. Jedná se o nejrozšířenější a nejpoužívanější slitinu titanu. Chemické složení lze pozorovat v tabulce č. 1. [33, 34]

Tabulka 1 Chemické složení titanové slitiny Ti-6Al-4V [33]

Ti-6Al-4V	Ti	Al	V	C	N	O	H	Fe
Obsah prvku [%]	87,6 - 91	5,5 - 6,75	3,5 - 4,5	Max. 0,08	Max. 0,05	Max. 0,2	Max. 0,015	Max. 0,4

Tato slitina byla vyvinuta především pro použití v leteckém průmyslu. Vzhledem ke svým dobrým mechanickým vlastnostem byla rozšířena ve

zdravotnictví, ale i dalších odvětvích průmyslu, mezi něž patří automobilový, námořní či chemický. Mezi pozitivní vlastnosti se řadí především výborný poměr modulu pružnosti vůči hustotě, korozní odolnost a použitelnost slitiny do 400 °C. Přehled podstatných mechanických a fyzikálních vlastností je vyobrazen v tabulce č. 2. Velmi zásadní fyzikální vlastností je nízká tepelná vodivost titanu, která má v případě obrábění značný vliv na opotřebení nástrojů. [33, 34]

Tabulka 2 Fyzikální a mechanické vlastnosti titanové slitiny Ti-6Al-4V [33]

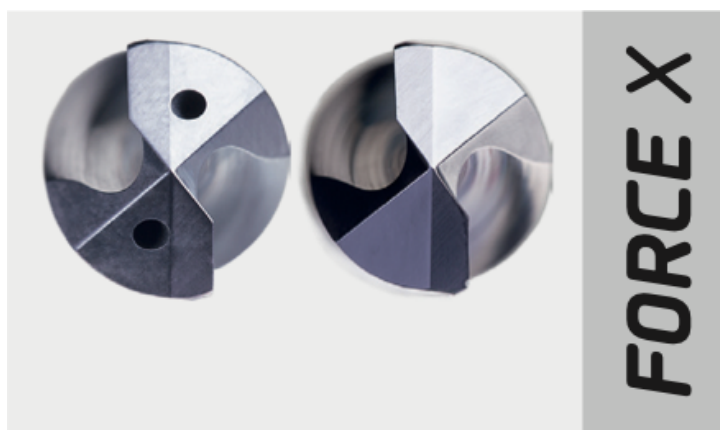
Veličina	Hodnota veličiny
Teplota tání T_m [°C]	1674
Hustota ρ [kg/m ³]	4430
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Min. 828
Mez pevnosti R_m [N/mm ²]	Min. 895
Modul pružnosti v tahu E [N/mm ²]	105 000 – 120 000
Tažnost A [%]	Min. 10



Obrázek 26 Obrobek upnutý v dynamometru

4.1.2. Nástroje

Pro experiment byly použity monolitní dvoubřité vrtáky ze slinutých karbidů FORCE X DRILL 3XD od českého výrobce Dormer Pramet. Jednalo se o úplně nové vrtáky ve 100% kondici, během experimentu se ověřovalo opotřebením světelným mikroskopem. Materiálem vrtáků je slinutý karbid. Řezná část těchto vrtáků je opatřena PVD povlakem TiAlN. Tyto nástroje mají speciální geometrii ostří, obě hlavní ostří jsou specificky zalomená. Příčné ostří navíc prakticky přechází v bod, jak je vidět v obrázku č. 27. Této geometrie výrobce dosahuje díky nasazení slinutých karbidů jako materiálu nástrojů. Vrcholový úhel mají nabroušený na 140°. Vrtáky použité v experimentu měly použitelnost pro vrtání hloubek v jednom kroku rovnajících se trojnásobku jejich průměru a nedisponovaly vnitřními otvory pro přívod procesní kapaliny. K realizaci experimentu byly zvoleny průměry 8, 10 a 12 mm. Charakteristika vrtáků je přehledně zobrazena v tabulce č. 3. [35]



Obrázek 27 Geometrie ostří použitých vrtáků (levá část obrázku, pravá část obrázku znázorňuje vrták FORCE X s otvory pro přívod procesní kapaliny) [35]

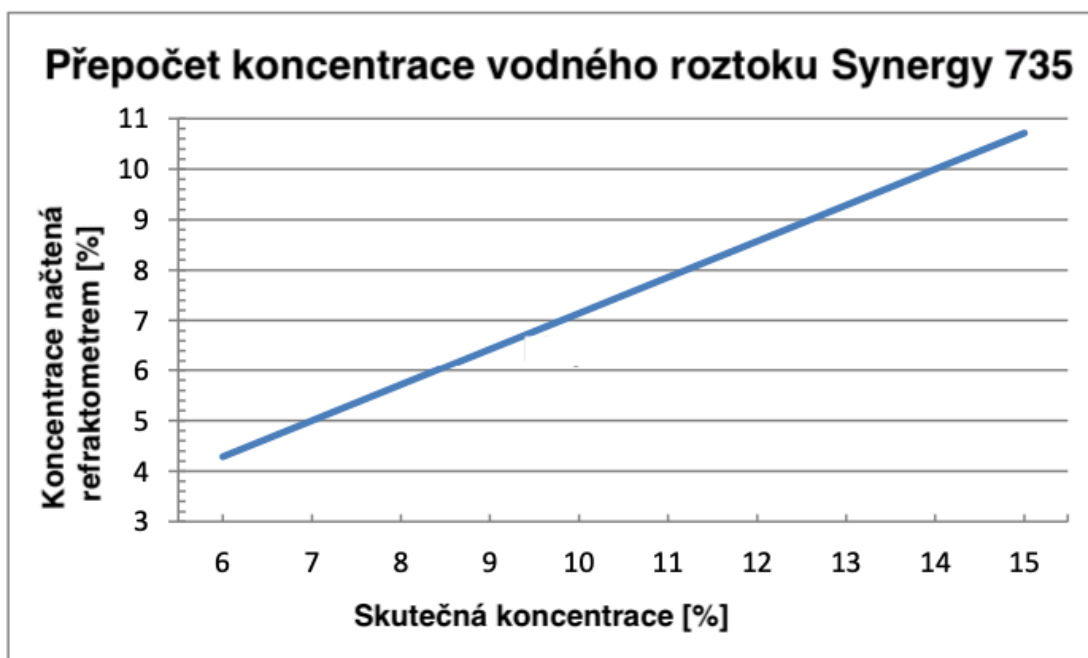
Tabulka 3 Vlastnosti použitých vrtáků DORMER PRAMET [35]

Parametr	Hodnota parametru		
Průměry D [mm]	8	10	12
Celková délka vrtáku L [mm]	66	89	102
Norma	DIN 6537 K		
Typ/provedení	R458		
Vrcholový úhel ε [°]	140		
Materiál	Monolitní karbid		
Povlak	PVD, TiAlN		

4.1.3. Procesní kapalina

Jako procesní kapalina byl použit vodný roztok bezolejové kapaliny Synergy 735 od švýcarského výrobce Blaser. Roztok netvoří na površích obroků skvrny, to je zapříčiněno neutrálním pH kapaliny Synergy 735. Další výhodou je její transparentnost, jenž nabízí perfektní kontrolovatelnost procesu obrábění. Disponuje výbornou filtrovatelností, limitem jsou částice s velikostí 1 μm . Nezpochybnitelnou předností je snášenlivost s lidskou kůží, bezzápachovost a velmi malá pěnivost připravených roztoků. Z pohledu životního prostředí je benefitem, že neobsahuje látky jako jsou baktericidy, bór, formaldehyd, síra či chlór. Lze ji použít pro obrábění slitin titanu, hliníku, ocelí, nerezových ocelí, kompozitních materiálů a řadu dalších. [36]

Použit byl desetiprocentní roztok této kapaliny. Přesný namíchaný poměr byl ověřen refraktometrem, který byl dodaný rovněž firmou Blaser. Vzorek připraveného roztoku pozorovaný refraktometrem vykazoval hodnotu parametru 7, což dle grafu v obrázku č. 28 skutečně odpovídá koncentraci 10 %. Korekční koeficient údaje z refraktometru je přibližně 1,4. [36]



Obrázek 28 Přepočet údaje z refraktometru na skutečnou koncentraci roztoku kapaliny Synergy 735 (přeloženo pro potřeby DP) [36]

4.1.4. Obráběcí stroj

Na provedení experimentu bylo použito tříosé frézovací centrum VMC 500 od českého výrobce MAS Kovosvit. Řezné podmínky a souřadnice vrtaných otvorů byly nastavovány v řídicím systému stroje na dílně. Vzhledem ke složitému tvaru obrobku, nutnosti zaznamenávání dynamometrických údajů a časné změně řezných podmínek nebyl použit komplexní G kód vytvořený CAM softwarem, který by obsahoval automatickou výměnu nástrojů společně s řeznými podmínkami. K upnutí jednotlivých nástrojů do vřetene stroje byly použity kleštinové upínače s kuželem ISO 40. Frézovací CNC centrum je zobrazeno na obrázku č. 29, jeho hlavní technické parametry v tabulce č. 4.



Obrázek 29 Frézovací centrum MAS Kovosvit VMC 500

Tabulka 4 Hlavní parametry tříosého frézovacího centra MAS Kovosvit VMC 500 [37]

Výrobce a typ stroje	MAS Kovosvit, VMC 500
Výkon P [kW]	3,7
Maximální otáčky vřetene n [ot./min]	6000
Upínání nástrojů	Kužel ISO 40
Maximální hmotnost obrobku m [kg]	350
Maximální rozsah posuvů X, Y, Z [mm]	500 x 500 x 500
Počet nástrojových pozic	21
Řídicí systém	Acramatic 2100

4.1.5. Dynamometrické vybavení

Použitou dynamometrickou aparaturu tvořily:

- čtyřsložkový dynamometru Kistler 9272,
- zesilovač signálu Kistler 5019,
- DAQ převodník signálu Kistler 5697A,
- notebook Fujitsu Siemens se softwarem Dynoware od firmy Kistler.

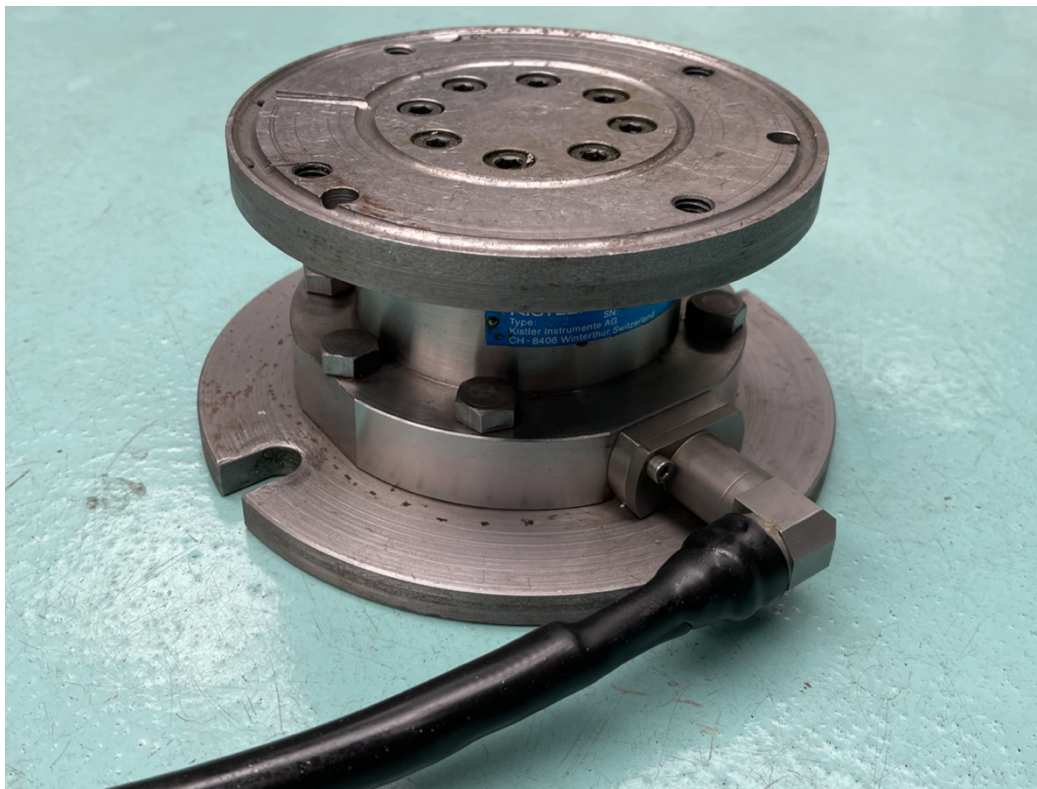
Parametry použitého čtyřsložkového vrtacího dynamometru jsou přehledně sepsány v tabulce č. 5, které sekunduje obrázek č. 30, v němž jsou znázorněny směry měřených sil a měřeného momentu. Použitý dynamometr včetně upínacích desek je zobrazen na obrázku č. 31. V obrázku č. 32 jsou zachyceny zbývající komponenty měřicí aparatury.

Tabulka 5 Technická data dynamometru Kistler 9272 [38]

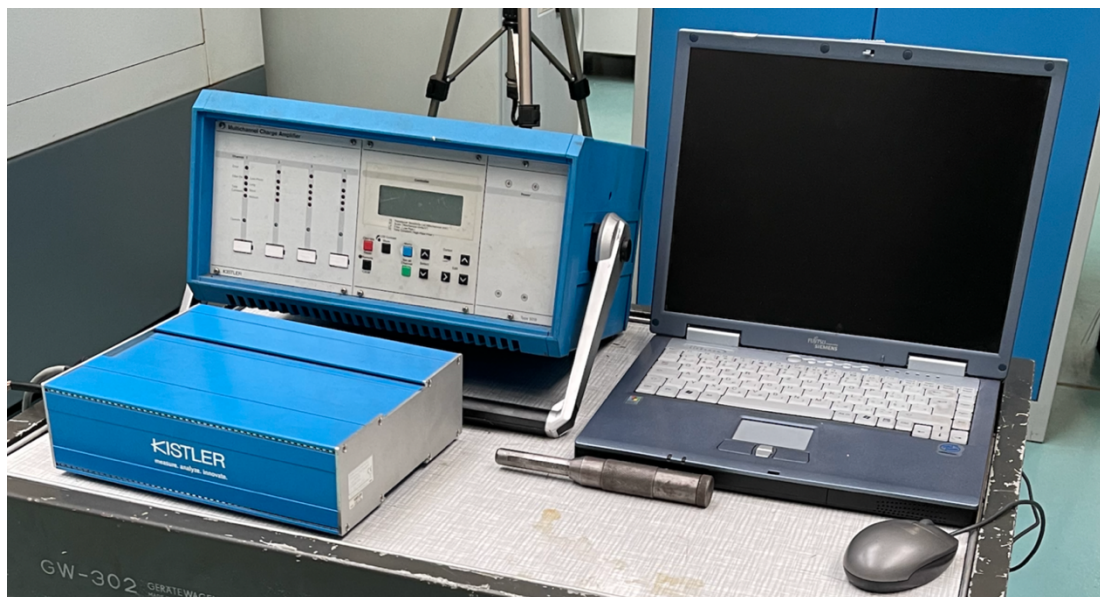
Parametr dynamometru	Hodnota parametru	
Měřicí rozsah [kN], [Nm]	F_x, F_y	-5 - 5
	F_z	-5 - 20
	M_z	-200 - 200
Vlastní frekvence f_n [kHz]	$f_n(x, y)$	3,1
	$f_n(z)$	6,3
	$f_n(M_z)$	4,2
Provozní teplota T [°C]	0 - 70	
Stupeň krytí dle EN60529	IP 67	
Hmotnost m [kg] (bez upínacích desek)	4,2	



Obrázek 30 Znárodnění směrů měřených složek dynamometru Kistler 9272 [38]

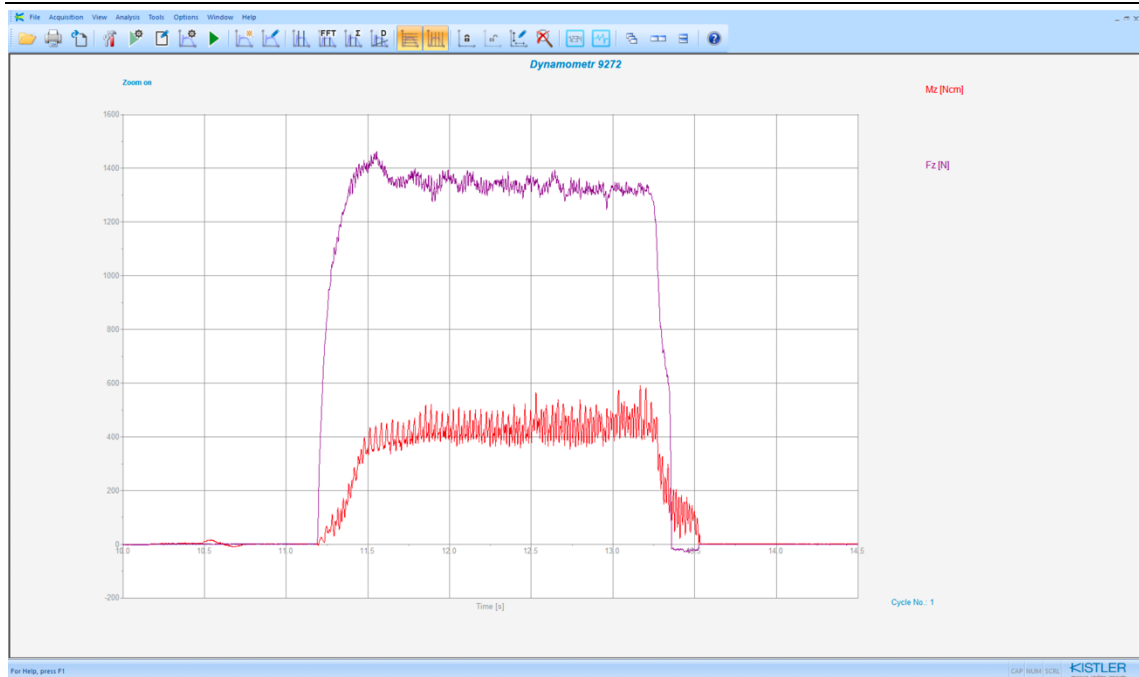


Obrázek 31 Dynamometr Kistler 9272 včetně upínacích desek



Obrázek 32 Dynamometrická aparatura (příslušenství dynamometru)

Na obrázku č. 33 je zachyceno prostředí programu Dynoware s měřenou posuvovou silou a řezným momentem pro 8 mm vrták s při $v_c=45\text{m/min}$. a $f=0,2\text{mm/ot}$. Jedná se o časové průběhy.



Obrázek 33 Prostředí programu Dynoware (časové závislosti F_r a M_c pro $D=8$ mm, $v_c=45$ m/min., $f=0,2$ mm/ot.)

4.1.6. Mikroskop

Mikroskop v experimentu sloužil pro kontrolu opotřebení jednotlivých vrtáků. Byl zvolen digitální mikroskop Keyence VHX- 6000. Toto pokročilé zařízení disponuje univerzálním zoomovacím objektivem VH-Z20R se zvětšením v rozsahu 20x až 200x (počítáno pro 15" monitor), 23" obrazovkou, rozsáhlými možnostmi digitálního zpracování obrazu a řadou dalších funkcí. Vrtáky byly na stolku mikroskopu umístěny za pomoci kleštin odpovídajících velikostí nebo s použitím prizmatického hranolu. [39]



Obrázek 34 Digitální mikroskop Keyence VHX-6000

4.2. Popis experimentu

4.2.1. Ověření hodnot dynamometru a kalibrace

Seznámení s dynamometrickou aparaturou, její kalibrace, zkoušky odečtu sil a momentů proběhly na sloupové vrtačce TOS VS32. Ke kalibraci a ověření hodnot byla použita závaží o hmotnostech 10 a 20 kg a ruční tlakový siloměr s rozsahem 0 až 60 N. Momentová složka byla ověřena zatížením páky s definovanou délkou ramene ručním siloměrem. Byly simulovány různé scénáře zatěžování a odlehčování. Po kalibraci následovala zkouška vrtání a odečtu sil. Pro tuto zkoušku byly použity vrtáky s průměry 5,5; 7,5 a 10 mm z rychlořezné oceli (HSS) v kombinaci s materiálem obrobku z oceli 12 050 dle ČSN 41 2050. Řezná rychlost byla u všech vrtáku zvolena přibližně na 10 m/min., přičemž byly využity posuvy 0,11; 0,18 a 0,28 mm/ot.

4.2.2. Schéma experimentu

Experiment byl proveden se třemi vrtáky o velikostech 8, 10 a 12 mm. Řezné rychlosti byly zvoleny na 15, 25, 35 a 45 m/min., posuvy se zvolily o velikostech 0,05; 0,1; 0,15 a 0,2 mm/ot. Pro všechny vrtáky byly zaznamenány průběhy posuvových sil a řezných momentů pro všechny kombinace řezných rychlostí a posuvů při vrtání s chladicí kapalinou. Tyto kombinace jsou přehledně znázorněny v tabulce č. 6. Po tomto prvním kole měření bylo na mikroskopu zkoumáno opotřebení nástrojů. Následně byly pro 12 mm vrták naměřeny některé kombinace posuvů a řezných rychlostí ještě jednou, aby se demonstroval vliv opotřebení. Poté bylo pro porovnání provedeno měření při vrtání bez chladicí kapaliny, opět pouze pro 12 mm vrták. Pro každou kombinaci se aritmeticky určily průměrné hodnoty sil a momentů z opakovaných měření.

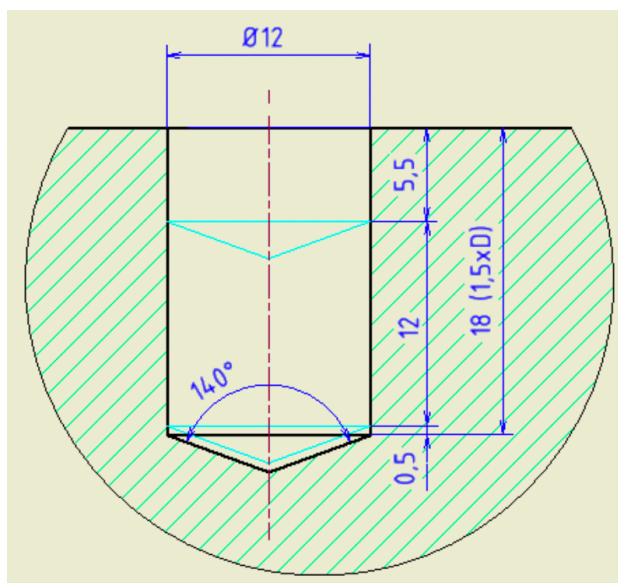
Tabulka 6 Kombinace měření

Průměry vrtáků D [mm]	Řezná rychlost v_c [m/min.]	Posuv f [mm/ot.]
8 10 12	15	0,05
		0,1
		0,15
		0,2
	25	0,05
		0,1
		0,15
		0,2
	35	0,05
		0,1
		0,15
		0,2
	45	0,05
		0,1
		0,15
		0,2

4.2.3. Princip odečtu hodnot z dynamometru

Z důvodu ustálení výstupních hodnot dynamometru byla zvolena hloubka vrtaných děr na 1,5 násobek průměrů jednotlivých vrtáků. Zkoumané průběhy osových, respektive posuvových sil a krouticích momentů měly různý charakter. Závislosti osových sil na čase měly ve většině případů charakter takový, že dosáhly maximální hodnoty, a potom vykazovaly téměř lineární pokles. V případě krouticích momentů byla rovněž patrná určitá variabilita hodnot. Pro zachování maximální věrnosti měření se vycházelo z hodnot v ustáleném stavu, tj. přibližně od zavrtání po téměř dno vrtaného otvoru. V obrázku č. 35 jsou světle modře znázorněny „krajní“ polohy vrtáku, jenž vymezují oblast odečítání pro případ vrtáku o průměru 12 mm.

V tabulce č. 7 je proveden „přepočít“ délkových rozměrů na časové, rovněž pouze pro ilustraci pro případ 12 mm vrtáku. Tyto časové intervaly již byly použity v programu Dynoware pro odečet sil a momentů.

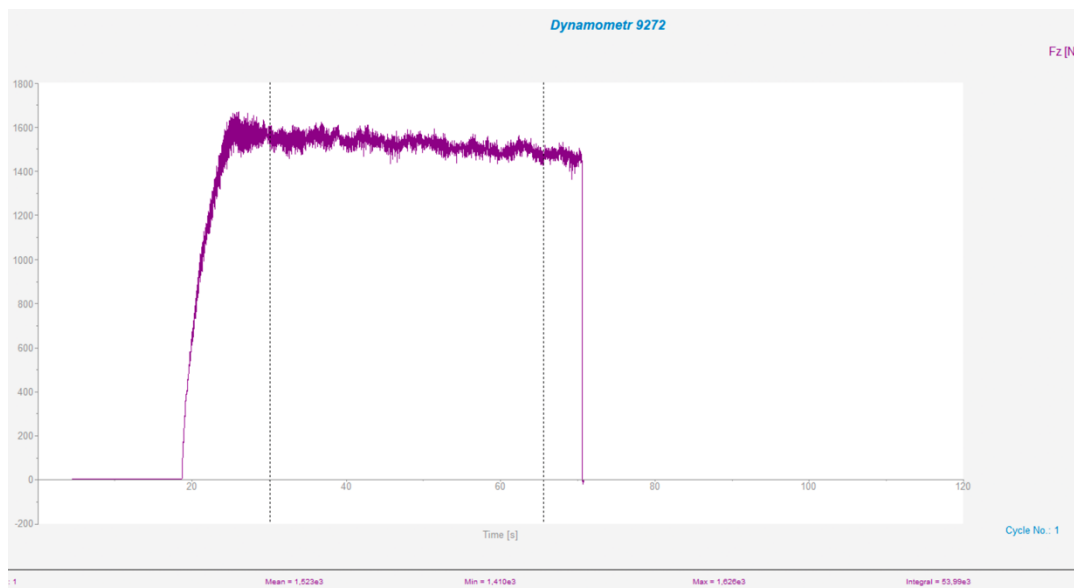


Obrázek 35 Znáznornění oblasti pro vyhodnocení sil a momentů pro případ 12 mm vrtáku

Tabulka 7 Přepočít délky oblasti pro odečet síly/momentu na čas na příkladu vrtáku 12 mm

Průměr vrtáku	Délka oblasti pro odečet síly/momentu	Řezná rychlost	Otáčky vřetene	Posuv na otáčku	Posuv minutový	Délka intervalu měření
[mm]	[mm]	[m/min]	[ot./min]	[mm/ot.]	[mm/min]	[s]
12	12	15	398	0,05	20	36
				0,1	40	18
				0,15	60	12
				0,2	80	9
		25	663	0,05	33	22
				0,1	66	11
				0,15	99	7
				0,2	133	5
		35	928	0,05	46	16
				0,1	93	8
				0,15	139	5
				0,2	186	4
		45	1194	0,05	60	12
				0,1	119	6
				0,15	179	4
				0,2	239	3

V programu Dynoware byl použit početní nástroj pro určování výstupních hodnot. Tento nástroj funguje tak, že uživatel určí hranice zleva a zprava, program následně mezi nimi počítá průměrnou hodnotu síly, respektive momentu. Vzdálenost těchto hranic pro vyhodnocení sil a momentů odpovídá vypočteným hodnotám v tabulce č. 7. Obrázek č. 36 znázorňuje odečet posuvové síly v programu Dynoware pro 12 mm vrták při řezné rychlosti 15 m/min. a posuvu na otáčku 0,05 mm/ot. V tomto obrázku je dále vidět, že vzdálenost mezi hranicemi je přibližně 36 sekund, jak bylo vypočteno v tabulce č. 7.



Obrázek 36 Znáornění odečtu síly F_z v programu Dynoware (vrták 12 mm, $vc=15$ m/min., $f=0,05$ mm/ot.)

4.3. Naměřené hodnoty

Nejprve byly opakovaně naměřeny hodnoty sil a momentů pro všechny kombinace řezných rychlostí a posuvů při obrábění s procesní kapalinou. Toto měření bylo provedeno se všemi velikostmi vrtáků, každý vrták vytvořil 32 otvorů s hloubkou 1,5 násobku svého průměru. Z opakovaných měření se určila průměrná hodnota. Výsledné posuvové síly a řezné momenty jsou zaznamenány v tabulkách č. 8 a 9.

Tabulka 8 Průměrné hodnoty posuvových sil při vrtání s procesní kapalinou

Ff [N]		Řezná rychlost [m/min.]			
Průměr vrtáku [mm]	Posuv [mm/ot.]	15	25	35	45
8	0,05	886	894	833	820
	0,1	1031	1004	998	1012
	0,15	1205	1170	1174	1190
	0,2	1399	1257	1335	1352
10	0,05	1184	1149	1106	1036
	0,1	1387	1370	1339	1331
	0,15	1558	1583	1533	1535
	0,2	1730	1799	1719	1713
12	0,05	1540	1519	1234	1232
	0,1	1729	1676	1416	1444
	0,15	1887	1552	1831	1566
	0,2	2111	1759	1839	2112

Tabulka 9 Průměrné hodnoty řezných momentů při vrtání s procesní kapalinou

Mc [Ncm]		Řezná rychlost [m/min.]			
Průměr vrtáku [mm]	Posuv [mm/ot.]	15	25	35	45
8	0,05	158	127	171	158
	0,1	254	293	234	169
	0,15	268	270	257	233
	0,2	357	342	358	433
10	0,05	324	257	298	267
	0,1	469	436	383	380
	0,15	552	459	589	511
	0,2	691	520	614	659
12	0,05	389	235	307	213
	0,1	598	602	389	332
	0,15	754	506	740	476
	0,2	878	621	592	895

Následovalo pozorování nástrojů pod mikroskopem, které ukázalo pouze ztrátu PVD povlaků v blízkosti ostří vrtáků. Následně na 12 mm vrtáku byla provedena měření pro demonstraci vlivu opotřebení nástroje, se kterým bylo vyvrtáno 32 otvorů v prostředí s procesní kapalinou. Byly naměřeny pouze některé kombinace posuvů a řezných rychlostí, viz tabulka č. 10.

Tabulka 10 Posuvové síly a řezné momenty pro 12 mm vrták po 32 otvorech vrtaných s procení kapalinou

Ff [N]		Řezná rychlost [m/min.]		Mc [N]		Řezná rychlost [m/min.]	
Průměr vrtáku [mm]	Posuv [mm/ot.]	15	45	Průměr vrtáku [mm]	Posuv [mm/ot.]	15	45
12	0,05	1557	x	12	0,05	444	x
	0,2	x	2030		0,2	x	835

V dalším kroku bylo realizováno měření při vrtání bez procesní kapaliny. Bez procesní kapaliny docházelo k výraznému nárůstu teploty a s ním souvisejícím opotřebením nástroje. Z tohoto důvodu bylo vrtání za sucha uskutečněno pouze pro vrták 12 mm a jen některé kombinace řezných rychlostí a posuvů. Naměřené síly a momenty jsou přehledně zaneseny v tabulkách č. 11 a 12.

Tabulka 11 Průměrné hodnoty posuvových sil při vrtání za sucha pro vrták 12 mm

Ff [N]		Řezná rychlost [m/min.]			
Průměr vrtáku [mm]	Posuv [mm/ot.]	15	25	35	45
12	0,05	1273	Nebylo měřeno		
	0,1	1458			
	0,15	1681			
	0,2	1950	1988	2062	2162

Tabulka 12 Průměrné hodnoty řezných momentů při vrtání za sucha pro vrták 12 mm

Mc [Ncm]		Řezná rychlost [m/min.]			
Průměr vrtáku [mm]	Posuv [mm/ot.]	15	25	35	45
12	0,05	576	Nebylo měřeno		
	0,1	744			
	0,15	951			
	0,2	986	1116	1215	1328

Na závěr experimentu bylo s již zřetelně opotřebovaným 12 mm vrtákem provedeno porovnávací měření. U tohoto vrtáku bylo pozorováno mírné vylomení ostří. Měření bylo opět realizováno na 12 mm vrtáku kvůli porovnání vlivu opotřebování vůči novému nástroji. Takto opotřebovaný vrták měl za sebou 32 odvrtných otvorů s procesní kapalinou a 14 otvorů na sucho. Naměřené hodnoty jsou v tabulce č. 13.

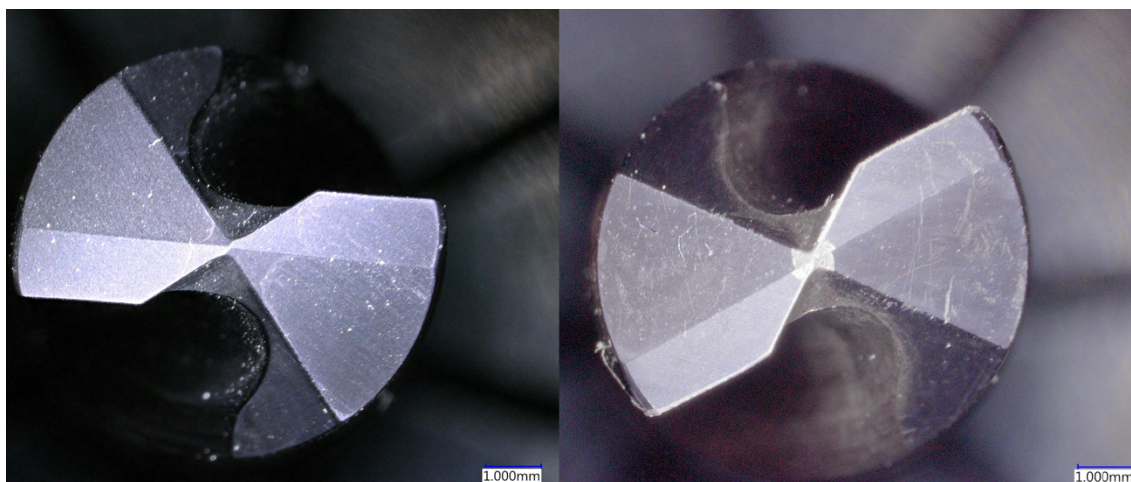
Tabulka 13 Síly a momenty pro opotřebovaný 12 mm vrták

Ff [N]		Řezná rychlost [m/min.]	Mc [N]		Řezná rychlost [m/min.]
Průměr vrtáku [mm]	Posuv [mm/ot.]	15	Průměr vrtáku [mm]	Posuv [mm/ot.]	15
12	0,05	1445	12	0,05	1193
	0,15	1884		0,15	1543

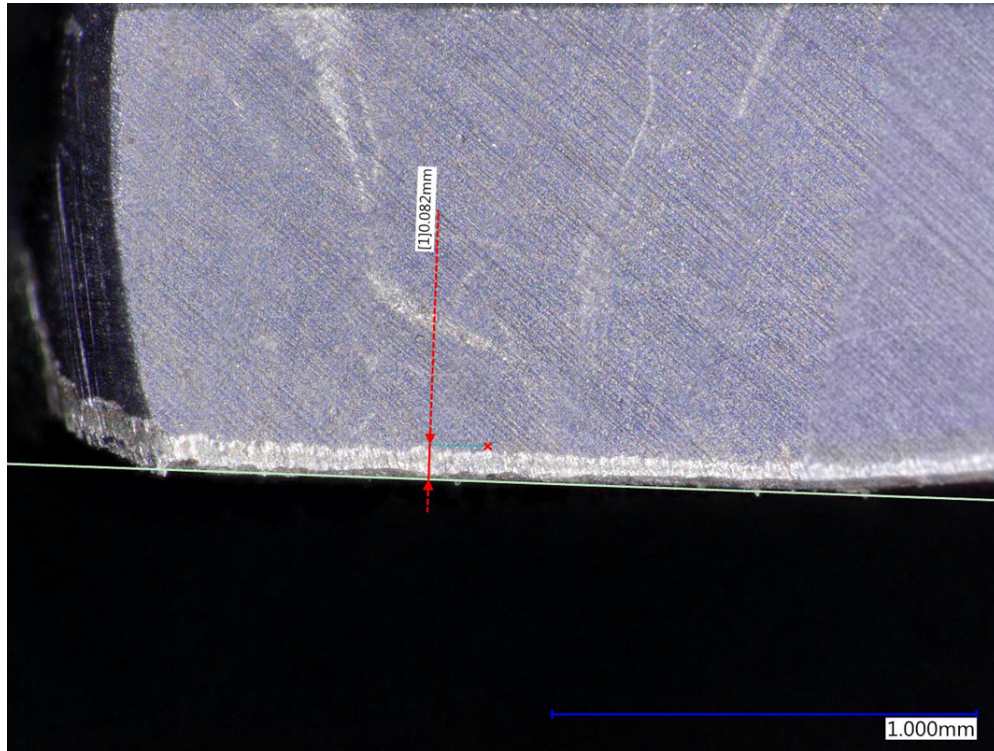
4.4. Výstupy a výsledky experimentu

4.4.1. Snímky z mikroskopu

Nástroje po vyvrtání 32 otvorů s procesní kapalinou pouze ztratily PVD povlak TiAlN na hřbetech u hlavních a příčného ostří, výraznější opotřebování u nich nebylo pozorováno. V obrázku č. 36 je porovnání nového 8 mm vrtáku a vrtáku použitého na 32 otvorů. Na obrázku č. 37 je na hlavním hřbetě odečteno opotřebování ostří, které vychází přibližně 82 μm . U zbylých dvou vrtáků byla pozorována obdobná velikost a charakter opotřebování.

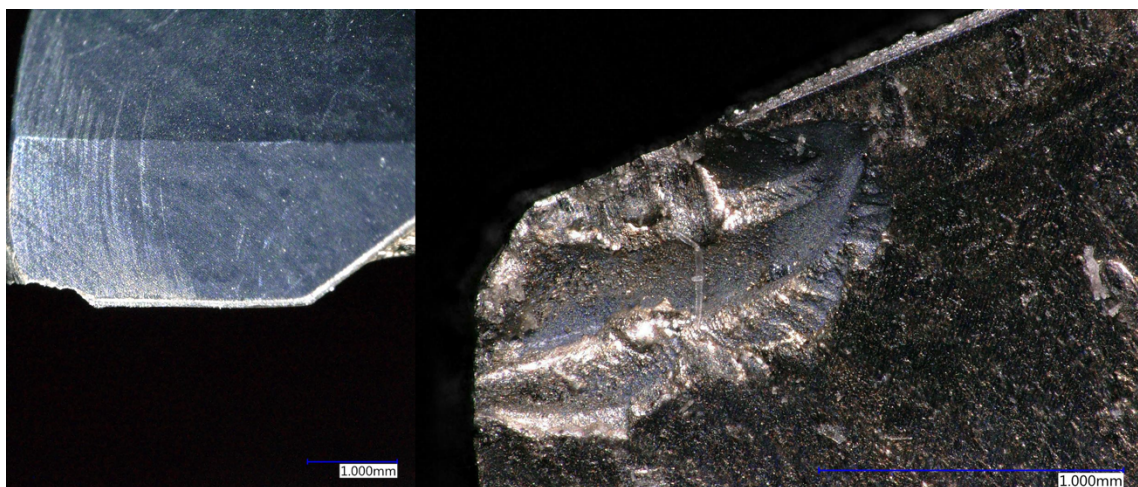


Obrázek 37 Porovnání nového (vlevo) a použitého (vpravo, 32 vyvrtaných děr s kapalinou) 8 mm vrtáku



Obrázek 38 Velikost opotřebení na hlavní hřbetě 8 mm vrtáku (po 32 otvorech)

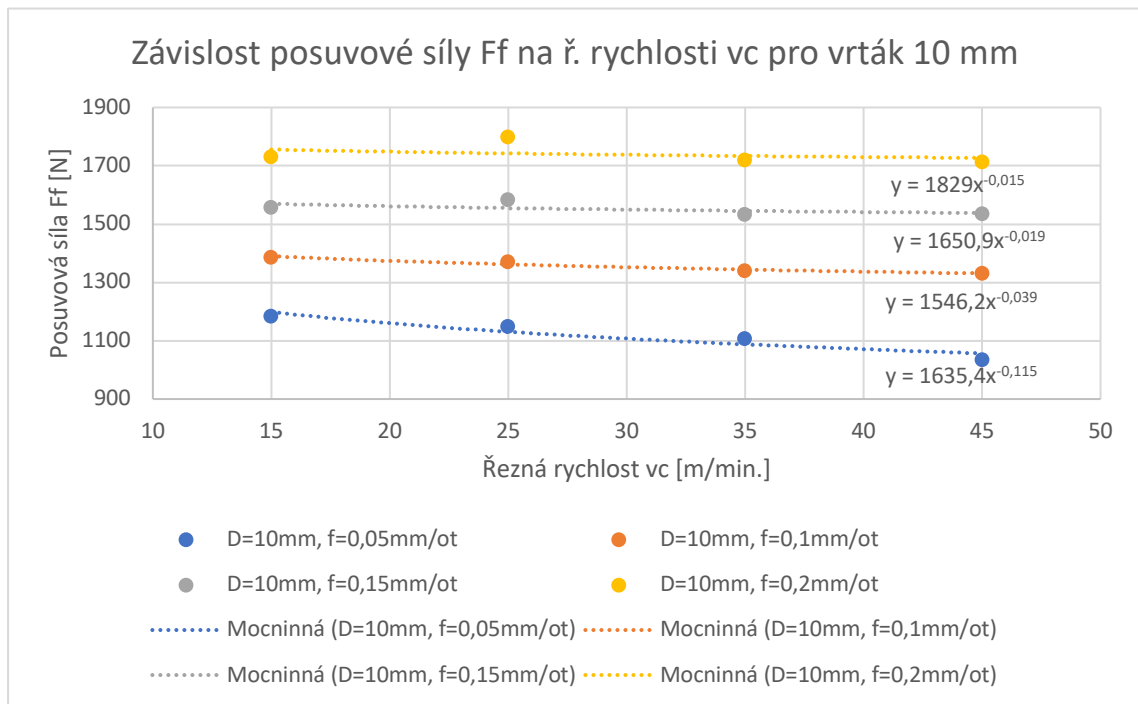
V dalším experimentálním měření byl používán pouze vrták o průměru 12 mm. Bylo s ním navíc vyvrtáno 14 otvorů bez použití procesní kapaliny, což se výrazně podepsalo na jeho stavu. Docházelo k intenzivnímu opotřebování PVD povlaku na hlavních a vedlejších hřbetech nástroje. Na jednom ostří došlo k vylomení špičky, špička druhého ostří zůstala neporušena. Pohled na vylomenou špičku z hlavního hřbetu je zachycen v obrázku č. 38 vlevo, jeho pravá část zachycuje pohled z čela.



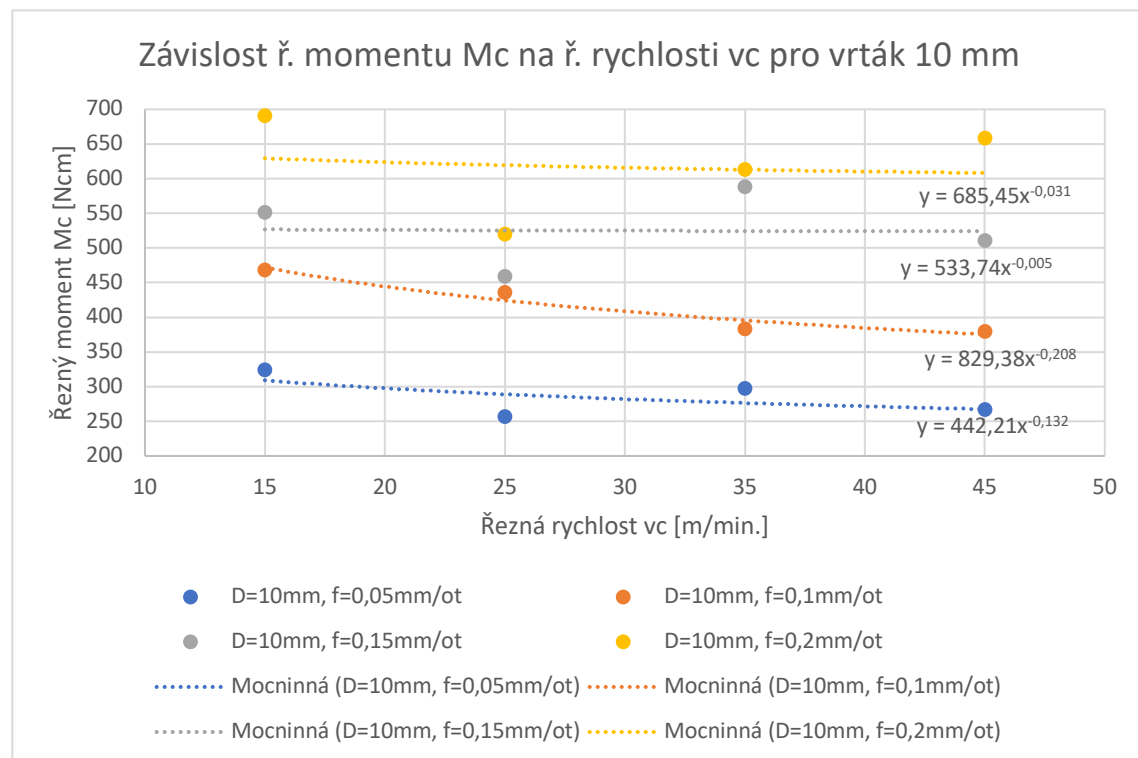
Obrázek 39 Vylomená špička ostří 12 mm vrtáku

4.4.2. Grafické závislosti

Nejprve byly vyhodnoceny závislosti posuvových sil a řezných momentů na řezné rychlosti, parametr posuvu zůstával konstantní. Na příkladu 10 mm vrtáku při vrtání s procesní kapalinou v obrázcích č. 40 a 41, lze tyto závislosti pozorovat.



Obrázek 40 Závislost posuvové síly na řezné rychlosti pro 10 mm vrták

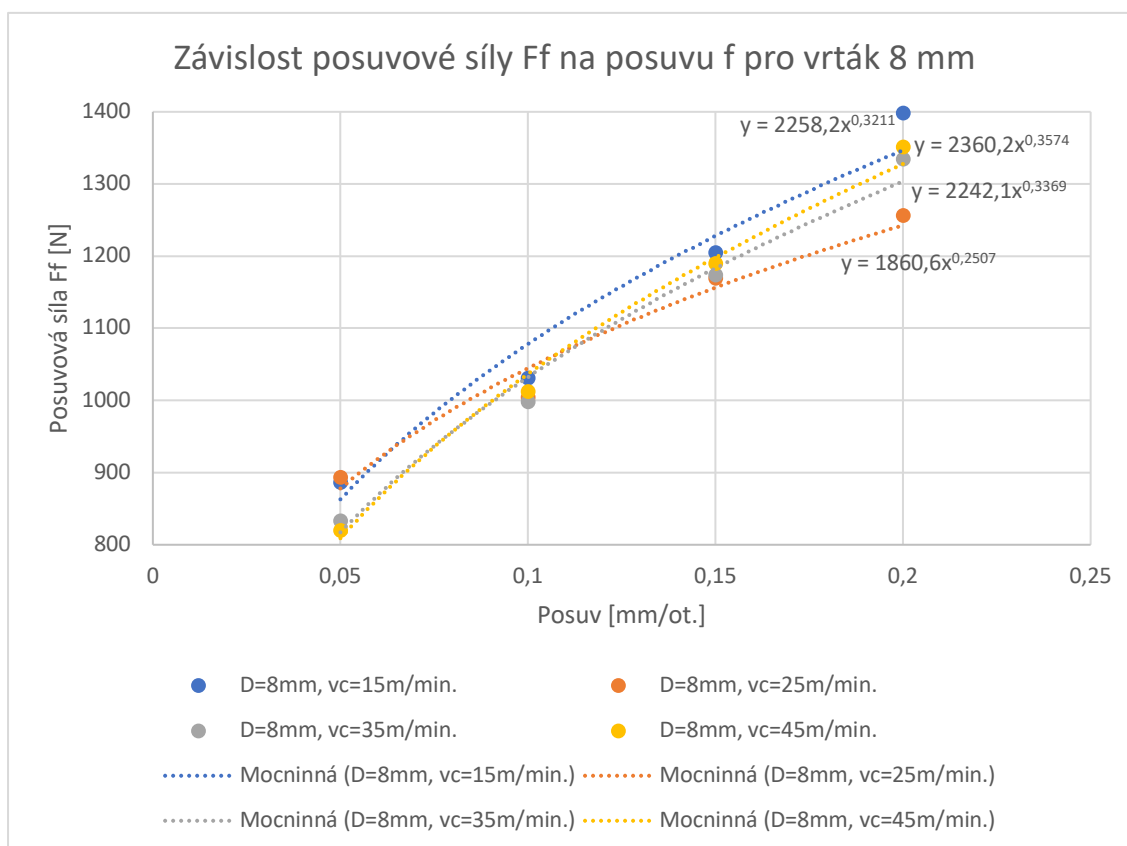


Obrázek 41 Závislost řezného momentu na řezné rychlosti pro 10 mm vrták

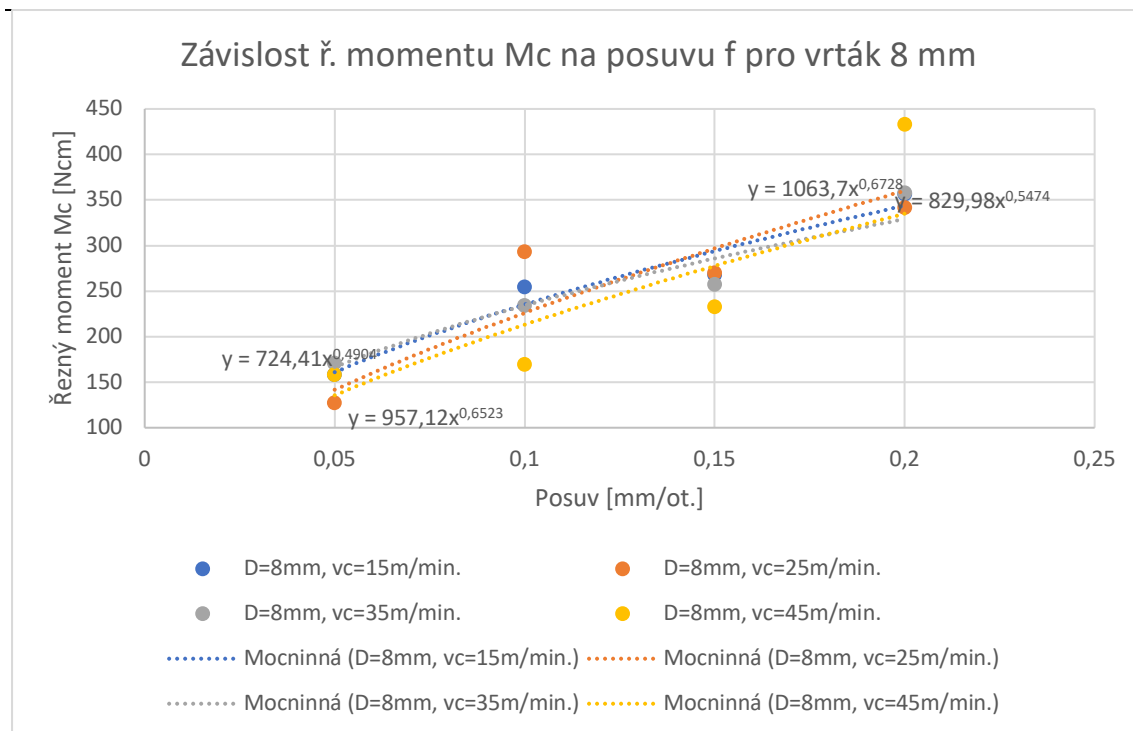
Průběhy sil a momentů korespondují s teorií, která tvrdí, že závislost sil na řezné rychlosti nemá příliš gradientní charakter. Vzdávající velikost řezné rychlosti má nepochybně vliv na velikost vznikajícího tepla v oblasti řezu, avšak její vliv na síly řezání není příliš silný. Hodnoty v grafech byly proloženy mocninnými funkcemi.

Závislosti posuvových sil a řezných momentů na posuvu vykazují rostoucí charakter, což opět odpovídá teorii. Dle grafu pro řezný moment v obrázku č. 43 by bylo vhodné přeměřit hodnoty pro posuv 0,1 mm/ot., kde je oproti ostatním posuvům patrná jejich výrazná variabilita. V obrázcích č. 42 a 43 byly použity průběhy pro vrták s průměrem 8 mm, hodnoty byly proloženy mocninnými funkcemi.

I když byly v obrázcích č. 40 až 43 pro představu vybrány závislosti pouze pro některé vrtáky, charaktery závislostí pro ostatní velikosti nástroje měly obdobný charakter. V grafech v obrázcích č. 42 a 43 se potvrzuje intenzivnější vliv posuvu oproti řezné rychlosti na složky síly řezání. Vliv lze posoudit dle předpisů mocninných funkcí uvedených u jednotlivých průběhů.

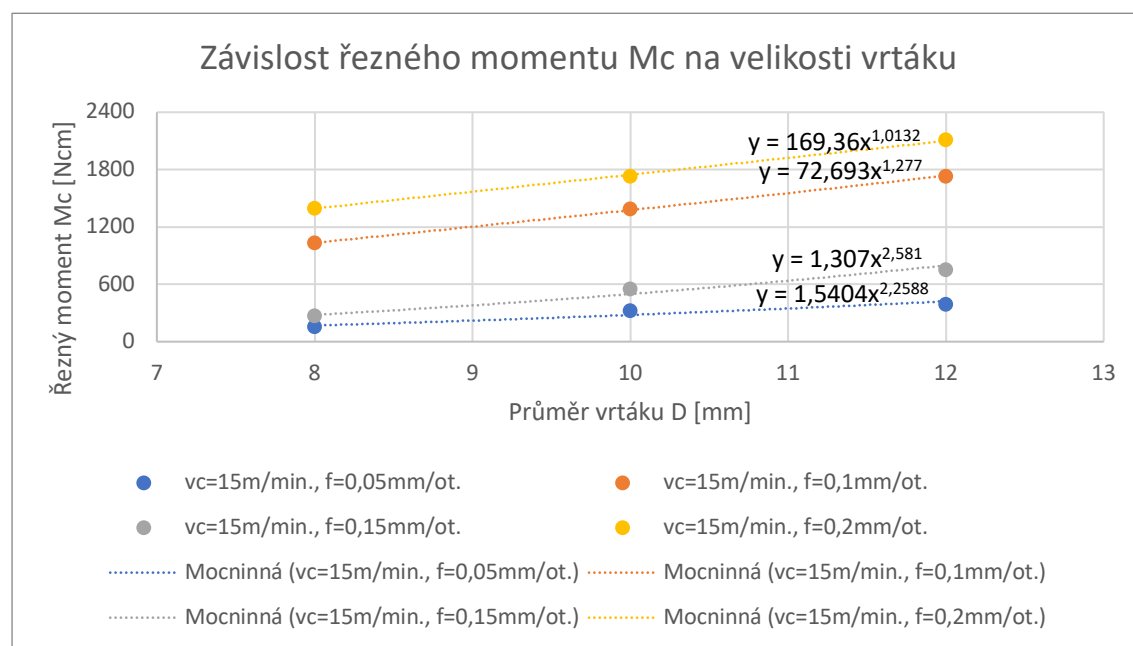


Obrázek 42 Závislost posuvové síly na posuvu pro 8 mm vrták



Obrázek 43 Závislost řezného momentu na posuvu pro vrták 8 mm

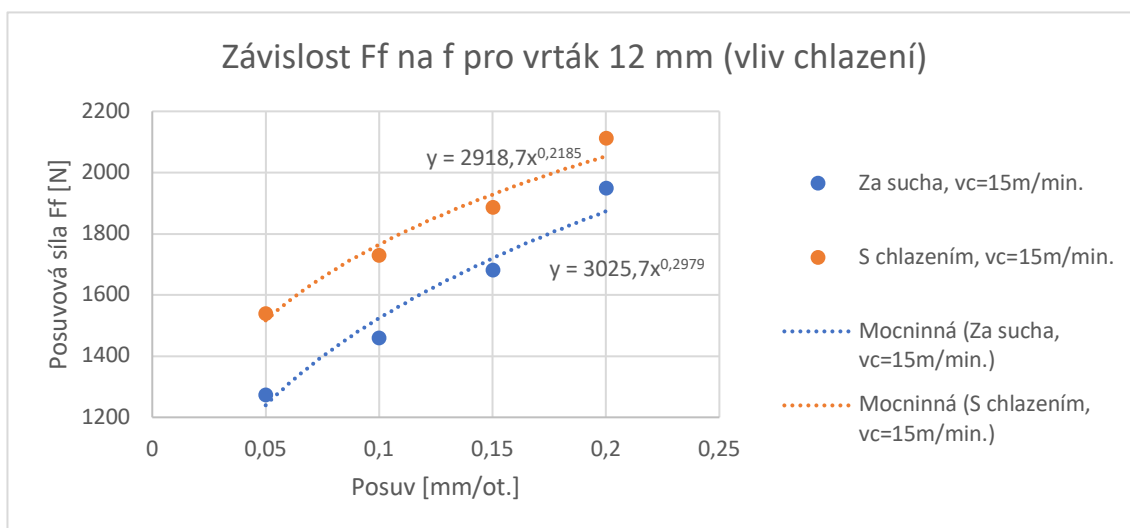
Velikost složek síly řezání silně závisí i na hloubce řezu, respektive průměru/poloměru vrtáku. Tento vliv lze demonstrovat obrázek č. 44, v němž je zobrazena závislost řezného momentu (který přímo souvisí s řeznou silou) na hloubce řezu. Graf je vytvořen při řezné rychlosti 15 m/min. a posuvech v rozsahu 0,05 až 0,2 mm/ot. s průměry vrtáků 8, 10 a 12 mm.



Obrázek 44 Závislost řezného momentu na hloubce řezu (průměru/poloměru vrtáku)

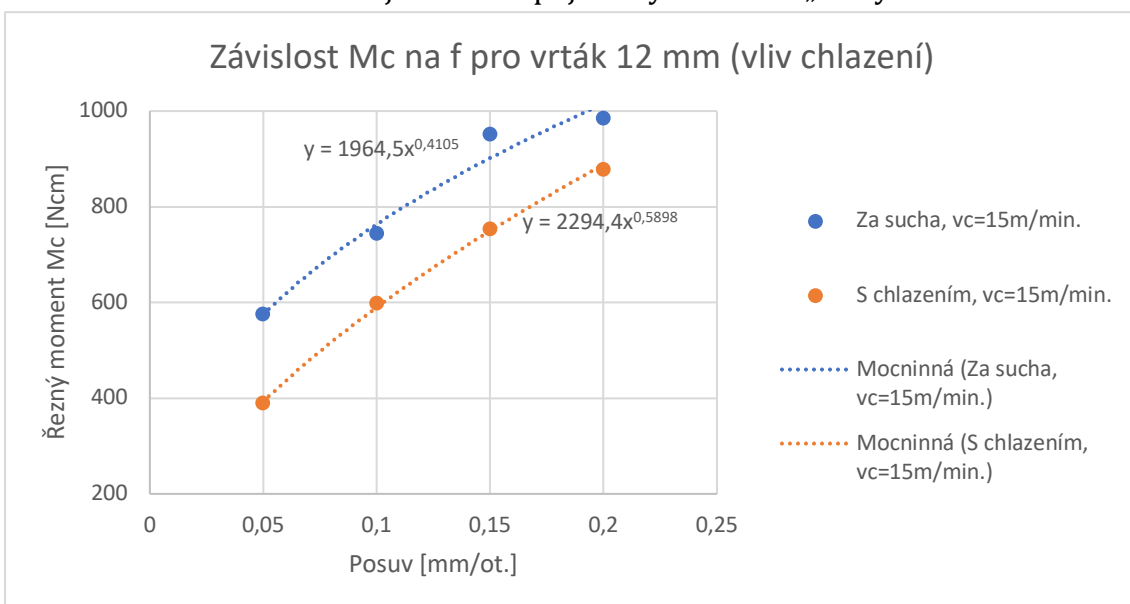
Závislosti v obrázcích č. 40 až 44 jsou při použití uvedených řezných parametrů s monolitními karbidovými vrtáky a titanovou slitinou TI-6Al-4V s použitím procesní kapaliny.

Součástí experimentu bylo porovnávací měření sil v procesu vrtání bez použití chladicího činidla v podobě vodného roztoku kapaliny Synergy 735. Měření za sucha bylo provedeno pouze k identifikaci vlivu chlazení. Posuvová síla za sucha vychází nižší viz obrázek č. 45, což je pravděpodobné způsobeno poklesem pevnosti obráběného materiálu.



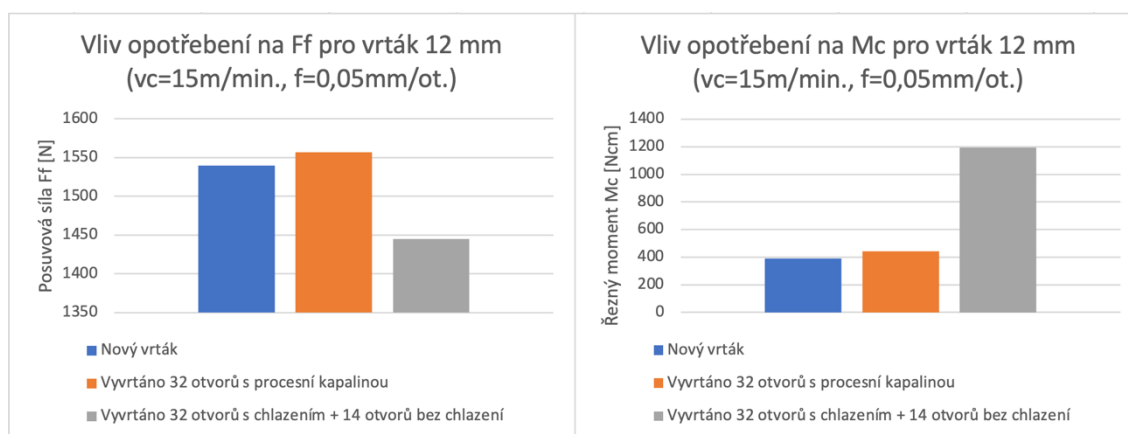
Obrázek 45 Vliv chlazení na velikost posuvové síly

Řezný moment za sucha vychází vyšší než při vrtání s chlazením, viz obrázek č. 46. To může být způsobeno špatným odvodem tepla, který má za následek rozměrové roztažení nástroje a s ním spojené vyšší tření o „stěny“ vrtaného otvoru.



Obrázek 46 Vliv chlazení na velikost řezného momentu

Porovnání sil vznikajících v procesu s opotřebenými vrtáky oproti vrtákům novým je zobrazeno v obrázku č. 47. Měření bylo provedeno pouze pro vrták s průměrem 12 mm při použití procesní kapaliny. Zde je důležité uvést, že se nejednalo o zkoušky trvanlivosti, šlo pouze o porovnání chování nástrojů v různém stupni opotřebení. V grafech je vidět úměrný nárůst posuvové síly a řezného momentu s rostoucím opotřebením nástroje. U nástroje opotřebeného i vrtáním za sucha, u kterého došlo k vylomení špičky jednoho břitu, je vidět zajímavá skutečnost. Vylomení špičky ostří pravděpodobně změnilo rozložení sil na břitech vrtáku. Z tohoto důvodu výrazně klesla posuvová síla, naopak řezný moment se téměř ztrojnásobil.



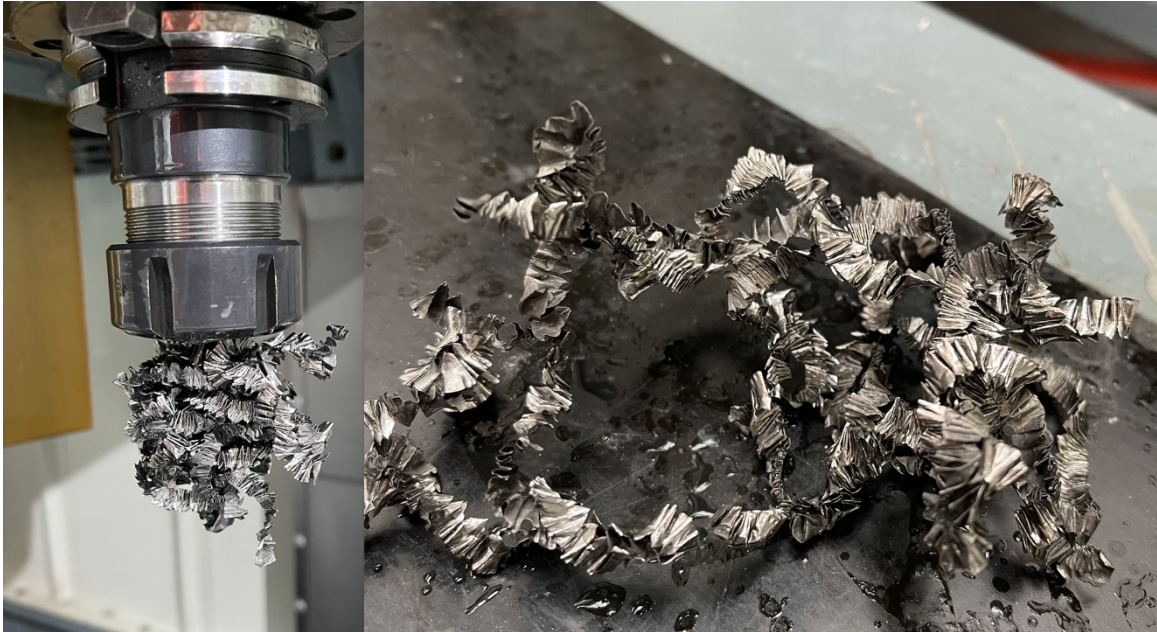
Obrázek 47 Vliv opotřebení 12 mm vrtáku na velikost posuvové síly a řezného momentu

Jak již bylo komentováno u všech předchozích grafů, experimentálně naměřené hodnoty až na některé výjimky odpovídají teorii. U některých mimořádných hodnot (hodnoty nezapadající do trendů závislosti) by bylo vhodné jejich přeměření.

4.4.3. Tvořené třísky

V průběhu experimentu byly pozorovány tvořené třísky. Především při posuvech 0,05 mm/ot. byl obráběcí proces jednoznačně mimo oblast vhodného utváření třísky OVU. Třísky měly stužkový charakter, dokonce docházelo k jejich namotávání na kleštinový upínač, kde tvořily jakési „klubko“. Zároveň u nich bylo díky špatnému odvodu z místa řezu pozorovatelné výrazné přetvoření. Třísky byly značně „zmačkané“. U větších hodnot posuvů již nebyl problém s oddělováním segmentů třísek. Třísky rovněž nebyly tak značně přetvořené, protože neměly problém s pohybem v drážkách vrtáků.

V obrázku č. 48 jsou zachyceny stužkové třísky namotané na kleštinovém upínači. Snímek byl pořízen po vrtání 12 mm vrtákem s chladicí kapalinou, řeznou rychlostí 35 m/min. a posuvem 0,05 mm/ot.



Obrázek 48 Třísky po vrtání 12 mm vrtákem s chladicí kapalinou (řezná rychlost 35 m/min., posuv 0,05 mm/ot.)

4.5. Shrnutí experimentální části

Experimentální měření do jisté míry korespondovalo s teorií. Potvrdilo se, že vliv řezné rychlosti na velikost složek síly řezání je prokazatelně nižší než vliv posuvu. Tento trend se potvrdil u všech tří průměrů vrtáků. Teorii neodporují ani průběhy sil a momentů v závislosti na hloubce řezu, respektive průměru vrtáku. Dle naměřených dat má největší vliv na velikost složek síly řezání hloubka řezu, v případě vrtání průměr či poloměr vrtáku. Za hloubkou řezu následuje s obdobně silným vlivem posuv. Nejmenší vliv na velikost sil prokazovala řezná rychlost.

Všechna měření byla provedena tak, aby nebyla výrazně ovlivněna opotřebením nástroje. Toto tvrzení dokazuje obrázek č. 47, kde je rozdíl ve velikosti sil a momentů mezi novým (modré sloupce) a 32 vyvrtanými otvory opotřebeným (oranžové sloupce) vrtákem prakticky minimální. V tomto obrázku je rovněž zajímavý trend u značně opotřebeného nástroje (šedé sloupce). Kvůli vylomené špičce jednoho ostří vrtáku, viz obrázek č. 39 pravděpodobně došlo ke změně poměru rozložení složek síly řezání. Tato úvaha vychází z poklesu posuvové síly, a naopak enormního nárůstu síly řezné, respektive řezného momentu. Je nutno podotknout, že s takto zničeným nástrojem bylo

provedeno pouze měření pro porovnání vlivu opotřebení. Nejednalo se o experimentální zjišťování trvanlivosti. Měření s opotřebovanými nástroji mělo pouze srovnávací charakter.

Za zmínku stojí chování PVD povlaku nástroje z TiAlN. Nástroj při vrtání s procesní kapalinou, a tedy i dobrým odvodem tepla, ztratil povlak pouze v blízkosti ostří na hlavních hřbetech nástroje. V případě vrtání za sucha docházelo k intenzivnějšímu opotřebování PVD povlaku. K opotřebování v blízkosti ostří na hlavních hřbetech nástroje přibývalo intenzivní opotřebování povlaku na vedlejších hřbetech. Tento jev si lze nejpravděpodobněji vysvětlit stahováním vrtáku vyvrtaným otvorem v souvislosti s tepelnou roztažností materiálu obrobku a nástroje.

Závislosti posuvových sil na čase měly mírně klesající charakter, jak je vidět na obrázcích č. 33 a 36. Tato skutečnost mohla být způsobena poklesem pevnosti materiálu díky špatnému odvodu tepla z místa řezu. Další, avšak ne příliš pravděpodobné (díky průběžné kontrole) zdůvodnění, by mohl být drift dynamometru.

Možnosti posunutí experimentu jsou rozhodně v měření rozšířeného intervalu řezných rychlostí, posuvů a velikostí vrtáků. Dále by byla samozřejmě možnost provést větší opakovanost měření, což by celé práci jistě prospělo. Zajímavé by rovněž bylo porovnání vrtáků s odlišnými nástrojovými geometriemi. Rozšíření intervalu řezných rychlostí a posuvů by mohlo sloužit i pro určení vhodných parametrů pro daný nástroj.

V experimentální části byla dána pozornost utváření třísek, které může mít vliv jak na kvalitu obrobené plochy, tak i na samotný řezný proces, včetně poškození nástrojů. Při vrtání nesmí být třísky podceňovány, především kvůli jejich ztíženému pohybu v drážkách vrtáku, což je hlavní problém při obrábění hlubokých otvorů.

Závěr

Experimentální měření bylo provedeno na stroji MAS Kovošvit VMC 500 s monolitními karbidovými povlakovanými vrtáky o průměrech 8, 10 a 12 mm. Jako materiál obrobku byla použita titanová slitina Ti-6Al-4V. Bylo použito dynamometrické vybavení od firmy Kistler, které se skládalo z vrtacího čtyřsložkového dynamometru 9272, DAQ převodníku, zesilovače signálu a softwaru Dynoware.

Na základě podrobného rozboru výsledků pro různé řezné rychlosti, posuvy a velikosti vrtáků byly vyhodnoceny hodnoty sil posuvu a řezných momentů. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí mocninných funkcí.

Testované vrtáky prokázaly schopnost obrábět titanovou slitinu při daných řezných podmínkách. V experimentu bylo provedeno porovnání vrtání s řeznou kapalinou s vrtáním za sucha. Při vrtání za sucha dosahovala posuvová síla nižších hodnot než při vrtání s použitím chladicí kapaliny, což mohlo být pravděpodobně způsobeno poklesem pevnosti obráběného materiálu. Naopak řezný moment při vrtání za sucha oproti režimu s chlazením vzrostl, což nejspíše zapříčinilo zvýšené tření vrtáku ve vrtaném otvoru díky teplotní roztažnosti.

Dle experimentu diplomové práce lze pro obrábění titanových slitin jednoznačně doporučit použití procesní kapaliny. Doporučení vychází z hlediska bezpečnosti procesu obrábění titanových slitin, navíc mají procesní kapaliny i pozitivní vliv na opotřebenost nástrojů. Opotřebenost při vrtání bez chlazení mělo podstatně větší dynamiku.

Experiment prokázal, že nejvyšší vliv na velikosti složek síly řezání má hloubka řezu a_p , respektive v případě vrtání průměr vrtáku. Následuje posuv f , nejnižší vliv na velikost sil má řezná rychlost v_c .

Pozorování opotřebenosti bylo prováděno pouze pro kontrolu, zda výsledky měření sil a momentů nejsou ovlivněny změnami na břitech nástrojů. Cílem práce nebyly dlouhodobé zkoušky s vyhodnocováním opotřebenosti a trvanlivosti nástrojů. Šlo pouze o verifikační měření a pozorování pod mikroskopem.

Doporučuji měření rozšířit především zvětšením intervalů řezných rychlostí a posuvů. Dále by bylo vhodné experiment rozvést o další materiály obrobku a nástrojů, na základě čehož by mohlo být provedeno přímé srovnání.

Cíl monitorování řezného procesu při vrtání byl v rešeršní části splněn rozbohem sil, teplot a tepla. Součástí rozboru bylo i zhodnocení současné měřicí techniky. Cíle experimentální části byly realizovány při vrtání monolitními karbidovými vrtáky do titanové slitiny.

Všechny cíle byly splněny, jak z hlediska experimentální, tak i teoretické části práce.

Seznam použité literatury

- [1] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha, 1990. Vysokoškolská skripta. České vysoké učení technické v Praze.
- [2] Silové poměry při procesu řezání, řezná síla a její složky. *ELUC* [online]. [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1196>
- [3] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012 [cit. 2020-10-21]. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [4] PROCHÁZKA, Luděk. SILOVÉ ZATÍŽENÍ FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ PŘI OBRÁBĚNÍ [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-10-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174391. DIPLOMOVÁ PRÁCE. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Aleš Polzer.
- [5] PERNIKL, Jan. *Monitorování procesu vrtání* [online]. Praha, 2015 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63663/F2-DP-2015-Pernikl-Jan-DP_2015_PerniklJan.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Pavel Zeman.
- [6] TRČKA, Tomáš, *ANALÝZA SILOVÉHO ZATÍŽENÍ STOPKOVÝCH FRÉZ S PCD S OHLEDEM NA JEJICH OSTŘENÍ* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148743. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.
- [7] NETOLICKÁ, Eliška. Parametry řezného procesu [online]. Praha, 2016 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66480/F2-BP-2016-Netolicka-Eliska-Experimentalni%20mereni%20parametru%20rezneho%20procesu.pdf?sequence>

=-1. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce
Vítězslav Rázek.

[8] HAVELKA, Oto. *Síla bude změřena* [online]. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/sila-bude-zmerena.html>

[9] VOJÁČEK, Antonín. *Polovodičové tenzometry - princip, provedení, použití, historie* [online]. 2006 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z:
<https://automatizace.hw.cz/clanek/2006111601>

[10] KISTLER. *Piezo vs. strain gauge* [online]. [cit. 2020-10-30]. Dostupné z:
<https://www.kistler.com/en/glossary/term/piezo-vs-strain-gauge/>

[11] KISTLER. *Measuring cutting forces in drilling operations* [online]. [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/glossary/term/measuring-cutting-forces-in-drilling-operations/>

[12] KISTLER. *Cutting Force Measurement: Precise Measuring Systems for Machining* [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z:
<https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-001e-05.14.pdf>

[13] RIZAL, Muhammad, Jaharah A. GHANI, Mohd Zaki NUAWI a Che Hassan Che HARON. Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling process. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2015, (52-53), 559-576 [cit. 2020-11-18]. ISSN 0888-3270. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.07.017>

[14] KISTLER. *Rotating dynamometers (RCD) to measure cutting forces directly on the cutting edge* [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z:
<https://www.kistler.com/en/applications/sensor-technology/cutting-force-measurement/rcd-rotating-dynamometers-to-measure-cutting-forces/>

[15] *Product Catalog: Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement* [online]. [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-002e-05.14.pdf>

[16] KISTLER. Cutting Force [online]. [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/glossary/term/cutting-force/>

[17] LYU, Yanlin, Muhammad JAMIL, Ning HE, Munish Kumar GUPTA a Danil Yurievich PIMENOV. Development and Testing of a High-Frequency Dynamometer for High-Speed Milling Process. *Machines* [online]. 2021, **9**(1) [cit. 2021-02-15]. ISSN 2075-1702. Dostupné z: doi:10.3390/machines9010011

[18] GIRARDIN, François, Didier REMOND a Jean-François RIGAL. High Frequency Correction of Dynamometer for Cutting Force Observation in Milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2010, **132**(3) [cit. 2021-02-15]. ISSN 1087-1357. Dostupné z: doi:10.1115/1.4001538

[19] TRASCHEL, R., J. STIRNIMANN, M. BLATTNER, B. BILL, R. THIEL, F. KUSTER a K. WEGENER. Effective Dynamometer for Measuring High Dynamic Process Force Signals in Micro Machining Operations. *Procedia CIRP* [online]. 2012, **1**, 558-562 [cit. 2021-02-15]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2012.04.099

[20] KOVALČÍK, Jaroslav. *Predikce silových parametrů řezného procesu při frézování* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/91031>. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce František Holešovský.

[21] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 2. část* [online]. Brno, 2004 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/jaro2011/DI3MK_STR3/um/TI_TO-2cast.pdf. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.

[22] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

[23] MÁDL, Jan et al. *Technologie obrábění. 1. díl*. Vyd. 2., přeprac. Praha: ČVUT, 2007. 80 s. ISBN 978-80-01-03752-2.

[24] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část [online]. 2003 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/DT3MK_STR3/um/TI_TO-1cast.pdf. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie

[25] KAFKA, Jindřich a Martin VRABEC. *Technologie obrábění: návody ke cvičení*. Vyd. 3. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. 121 s. ISBN 80-01-03434-8.

[26] DYER, Ian a Latha SRINIVASA. Measuring temperature. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*[online]. 2009, **10**(5), 256-260 [cit. 2021-03-16]. ISSN 14720299. Dostupné z: doi:10.1016/j.mpaic.2009.01.014

[27] *Automa: časopis pro automatizační techniku*. 20. FCC Public, únor 2014. ISSN 1210-9592.

[28] MATUŠKA, Tomáš. *Experimentální metody v technice prostředí*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. 200 s. ISBN 80-01-03291-4.

[29] GRUNER, Klaus-Dieter. Principles of Non-Contact Temperature Measurement. *The Queen's Observatory*[online]. Berlin: Raytek, 2003 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: http://www.astro.queensu.ca/~irwin/phy372/y2015/IR_thermometer_details.pdf

[30] *Automa: časopis pro automatizační techniku*. 20. FCC Public, duben 2014. ISSN 1210-9592.

[31] BENO, T. a U. HULLING. Measurement of Cutting Edge Temperature in Drilling. *Procedia CIRP* [online]. 2012, 3, 531-536 [cit. 2021-03-30]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2012.07.091

[32] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2002. 55 s. ISBN 80-01-02610-8.

[33] AZOM. Grade 5 Ti-6Al-4V Alloy (UNS R56200) [online]. 2013 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9299>

[34] NEONICKEL. Ti 6Al-4V (jakost 5): Titanium 6AL-4V (jakost 5) je slitina titanu, hliníku a vanadia, která se uplatňuje v mnoha aplikacích v celé řadě průmyslových odvětví. [online]. [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-titanu/ti-6al-4v-jakost-5/>

[35] DORMER PRAMET. *HIGH PERFORMANCE SOLID CARBIDE DRILLS* [online]. 2020 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://www.dormerpramet.com/downloads/dormer_force_catalog_en.pdf

[36] BLASER. *Synergy 735* [online]. 2019, (11735-02) [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.lastuamisnesteet.fi/wp-content/uploads/2019/12/Synergy-735-Esite.pdf>

[37] *Technologie obrábění: Používané CNC stroje* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <http://technologie.fs.cvut.cz/provide/obrabeni>

[38] KISTLER. Force: 4-Component Dynamometer For cutting force measurement in drilling [online]. 2005 - 2018 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/document/000-153e.pdf?callee=frontend>

[39] KEYENCE CORPORATION. Digitální mikroskop Řada VHX-6000: POKROČILÉ POZOROVÁNÍ S VYNIKAJÍCÍM VYUŽITÍM VHX. Mechelen, Belgie, 2017.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Znázornění jednotlivých složek síly obrábění při vrtání [1]	13
Obrázek 2 Druhý způsob značení složek síly obrábění [11].....	14
Obrázek 3 Schéma mechanického třmenového dynamometru [3]	20
Obrázek 4 Princip hydraulického dynamometru [8]	21
Obrázek 5 Oblasti použití piezoelektrických a tenzometrických dynamometrů (přeloženo pro potřeby DP) [10].....	23
Obrázek 6 Soustava pro měření piezoelektrickým rotačním dynamometrem (přeloženo pro potřeby DP) [14].....	24
Obrázek 7 Konstrukce piezoelektrického rotačního dynamometru [12]	25
Obrázek 8 Rotační dynamometr využívající tenzometrického principu (přeloženo pro potřeby DP) [13].....	26
Obrázek 9 Konstrukce 4složkového vrtacího dynamometru [12].....	27
Obrázek 10 Kalibrační křivky dynamometrů [3].....	28
Obrázek 11 Průřez odřezávané vrstvy [32]	31
Obrázek 12 Závislost tvrdosti řezných materiálů na teplotě [23]	33
Obrázek 13 Oblasti plastických deformací [23]	34
Obrázek 14 Podíl jednotlivých tepelných složek v závislosti na řezné rychlosti [23]	35
Obrázek 15 Schéma kalorimetru při frézování [3]	37
Obrázek 16 Teplotní pole nástroje a obrobku pro nízké v_c (vlevo) a vysoké v_c (vpravo) [1].....	38
Obrázek 17 Ukázka použití umělého termočlánku při soustružení [24]	39
Obrázek 18 Princip poloumělého termočlánku při soustružení [24].....	40
Obrázek 19 Dvě varianty použití poloumělého termočlánku [3]	40
Obrázek 20 Princip přirozeného termočlánku (upraveno pro potřeby diplomové práce) [24].....	41
Obrázek 21 Detailní schéma přirozeného termočlánku při soustružení [3]	41
Obrázek 22 Příklad termodua při soustružení [25]	42
Obrázek 23 Princip měření bezdotykovým teploměrem (blokové schéma) [30]....	45
Obrázek 24 Znázornění rozdílu mezi termokamerou a bezdotykovým teploměrem [27].....	45

Obrázek 25 Schéma měření teploty na břitu vrtáku za pomoci pyrometrů a optických vláken [31]	49
Obrázek 26 Obrobek upnutý v dynamometru	51
Obrázek 27 Geometrie ostří použitých vrtáků (levá část obrázku, pravá část obrázku znázorňuje vrták FORCE X s otvory pro přívod procesní kapaliny) [35]	52
Obrázek 28 Přepočet údaje z refraktometru na skutečnou koncentraci roztoku kapaliny Synergy 735 (přeloženo pro potřeby DP) [36].....	53
Obrázek 29 Frézovací centrum MAS Kovo slit VMC 500	54
Obrázek 30 Znázornění směrů měřených složek dynamometru Kistler 9272 [38] 55	
Obrázek 31 Dynamometr Kistler 9272 včetně upínacích desek.....	56
Obrázek 32 Dynamometrická aparatura (příslušenství dynamometru)	56
Obrázek 33 Prostředí programu Dynoware (časové závislosti F_f a M_c pro $D=8$ mm, $v_c=45$ m/min., $f=0,2$ mm/ot.)	57
Obrázek 34 Digitální mikroskop Keyence VHX-6000	57
Obrázek 35 Znázornění oblasti pro vyhodnocení sil a momentů pro případ 12 mm vrtáku.....	60
Obrázek 36 Znázornění odečtu síly F_z v programu Dynoware (vrták 12 mm, $v_c=15$ m/min., $f=0,05$ mm/ot.).....	61
Obrázek 37 Porovnání nového (vlevo) a použitého (vpravo, 32 vyvrtaných děr s kapalinou) 8 mm vrtáku.....	64
Obrázek 38 Velikost opotřebení na hlavním hřbetě 8 mm vrtáku (po 32 otvorech)	65
Obrázek 39 Vylomená špička ostří 12 mm vrtáku	65
Obrázek 40 Závislost posuvové síly na řezné rychlosti pro 10 mm vrták.....	66
Obrázek 41 Závislost řezného momentu na řezné rychlosti pro 10 mm vrták.....	66
Obrázek 42 Závislost posuvové síly na posuvu pro 8 mm vrták.....	67
Obrázek 43 Závislost řezného momentu na posuvu pro vrták 8 mm.....	68
Obrázek 44 Závislost řezného momentu na hloubce řezu (průměru/poloměru vrtáku).....	68
Obrázek 45 Vliv chlazení na velikost posuvové síly	69
Obrázek 46 Vliv chlazení na velikost řezného momentu	69

Obrázek 47 Vliv opotřebení 12 mm vrtáku na velikost posuvové síly a řezného momentu	70
Obrázek 48 Třísky po vrtání 12 mm vrtákem s chladicí kapalinou (řezná rychlost 35 m/min., posuv 0,05 mm/ot.)	71

Seznam tabulek

Tabulka 1 Chemické složení titanové slitiny Ti-6Al-4V [33]	50
Tabulka 2 Fyzikální a mechanické vlastnosti titanové slitiny Ti-6Al-4V [33].....	51
Tabulka 3 Vlastnosti použitých vrtáků DORMER PRAMET [35].....	52
Tabulka 4 Hlavní parametry tříosého frézovacího centra MAS Kovosvit VMC 500 [37].....	54
Tabulka 5 Technická data dynamometru Kistler 9272 [38].....	55
Tabulka 6 Kombinace měření	59
Tabulka 7 Přepočet délky oblasti pro odečet síly/momentu na čas na příkladu vrtáku 12 mm	60
Tabulka 8 Průměrné hodnoty posuvových sil při vrtání s procesní kapalinou.....	62
Tabulka 9 Průměrné hodnoty řezných momentů při vrtání s procesní kapalinou .	62
Tabulka 10 Posuvové síly a řezné momenty pro 12 mm vrták po 32 otvorech vrtaných s procení kapalinou	63
Tabulka 11 Průměrné hodnoty posuvových sil při vrtání za sucha pro vrták 12 mm	63
Tabulka 12 Průměrné hodnoty řezných momentů při vrtání za sucha pro vrták 12 mm	63
Tabulka 13 Síly a momenty pro opotřeбенý 12 mm vrták.....	64