

**Dynamická obrobiteľnosť kovů a plastů
při broušení a frézování**

**Dynamic workability of metals and plastics
when grinding and milling**

Bc. Aleš Popelka

Diplomová práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Aleš POPELKA
Studijní program: N 3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení
Téma práce: Dynamická obrobiteľnosť kovů a plastů při broušení
a frézování

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte studium literatury z oblasti teorie a technologie obrábění
2. Definujte dynamickou obrobiteľnosť platů při broušení a frézování
3. Určete vliv technologických podmínek na obrobiteľnosť plastů
4. Porovnejte výsledky experimentů při broušení a frézování

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Kocman, K., Prokop, J.: Technologie obrábění. CERM Brno, 2004

Buda, J., Bekés, J.: Teória obrábania. Alfa Bratislava, 1979

Vasilko, K.: Analytická teória trieskového obrábania. COFIN Prešov, 2007

Vigner, M. aj.: Obrábění. SNTL Praha 1984

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Imrich Lukovics, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

19. února 2008

Termín odevzdání diplomové práce:

23. května 2008

Ve Zlíně dne 29. ledna 2008

doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá dynamickou obrobiteľnosťí kovů a plastů broušením a frézováním.

Při broušení se použilo tří brousících kotoučů a zkoumal se vliv struktury kotouče a technologických podmínek na řezné síly. Měřila se zde také drsnost povrchu.

Frézovalo se tříbřitým nástrojem o o 10 mm, se změnou hloubky řezu a i zde se měřily jak řezné síly, tak i drsnost povrchu. Výsledky se zpracovávaly a následně vynášely do grafů.

Klíčová slova: dynamická obrobiteľnosť, broušení, frézování, plasty, kovy, obrábění

ABSTRACT

Presented diploma thesis focuses of dynamic workability metals and plastics when grinding and milling.

During grinding was examined the structure disk influence onto cutting force by using three grinding disks. The surface roughness was measured too.

Material was milled with three cutting edge milling cutter 10mm diameter. The cutting force and surface roughness were measured with change of cutting depth. Results were compiled and represented into graphs.

Keywords: dynamic workability, grinding, milling, plastics, metals, cutting

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své diplomové práce panu Doc. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval v průběhu vypracování celé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc při měření.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně, 23. 5. 2008

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 OBRÁBĚNÍ	11
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY PROCESU OBRÁBĚNÍ.....	11
1.2 NÁSTROJ.....	13
1.3 VZNIK TŘÍSKY	13
1.3.1 Plastické deformace v oblasti tvoření třísky při ortogonálním řezání	15
1.3.2 Primární plastické deformace.....	15
1.3.3 Sekundární plastické deformace	16
1.4 PRÁCE ŘEZÁNÍ A MĚRNÝ ŘEZNÝ ODPOR	17
1.4.1 Práce řezání	17
1.4.2 Měrný řezný odpor.....	18
1.5 TEPelné JEvy PŘI OBRÁBĚNÍ.....	19
1.5.1 Tepelná bilance řezného procesu	20
1.5.2 Teplota řezání	21
2 BROUŠENÍ	23
2.1 TEORIE BROUŠENÍ	23
2.1.1 Tvorba třísky při broušení	23
2.1.2 Základní metody broušení	24
2.2 TECHNOLOGIE BROUŠENÍ.....	26
2.2.1 Strojní broušení.....	26
2.2.2 Strojní časy	32
2.2.3 Dosahovaná přesnost a jakost povrchu	34
2.3 BROUŠÍCÍ NÁSTROJ.....	35
2.4 ŘEZNÉ SÍLY A VÝKON PŘI BROUŠENÍ.....	37
3 FRÉZOVÁNÍ	41
3.1 TEORIE FRÉZOVÁNÍ	41
3.1.1 Sousedné frézování	42
3.1.2 Nesousedné frézování	43
3.2 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ.....	44
3.2.1 Výkon při frézování	44
3.2.2 Dosahovaná přesnost a jakost povrchu	45
3.2.3 Řezné podmínky a strojní čas	46
3.3 FRÉZY.....	46
3.3.1 Typy fréz	47
3.4 ŘEZNÉ SÍLY PŘI FRÉZOVÁNÍ	53
3.4.1 Síly působící na zubu frézy.....	53

3.4.2	Obvodová síla při válcovém frézování	54
4	OBROBITELNOST, ŘEZIVOST NÁSTROJE.....	59
4.1	OBROBITELNOST	59
4.1.1	Obrobitelnost ocelí.....	60
4.1.1.1	Vliv chemického složení.....	60
4.1.1.2	Vliv mikrostruktury.....	61
4.1.2	Obrobitelnost plastů	62
4.2	ŘEZIVOST NÁSTROJE.....	63
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	64
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	65
6	BROUŠENÍ, FRÉZOVÁNÍ, MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU A MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL.....	66
6.1	BRUSKA BRH 20.03 F.....	66
6.2	FRÉZKA FC 16 CNC	67
6.3	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	68
6.3.1	Charakter povrchu	68
6.3.2	MITUTOYO SJ - 301.....	72
6.4	MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL.....	73
7	OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY.....	74
7.1	KOVOVÉ MATERIÁLY.....	74
7.1.1	Ocel 12 050	74
7.1.2	Ocel 14 109	74
7.1.3	Ocel 16 420	74
7.1.4	Ocel 17 027	75
7.1.5	Ocel 19 436	75
7.1.6	Dural	75
7.1.7	Měď	76
7.1.8	Titan.....	76
7.2	POLYMERY	76
7.2.1	Polyethylen (PE)	76
7.2.2	Polyamid (PA)	77
7.2.3	Polykarbonát (PC)	77
7.2.4	Polytetrafluorethylen (PTFE)	77
7.2.5	Polyoxymethylen (POM).....	78
7.2.6	Polyvinylchlorid (PVC)	78
8	BROUŠENÍ.....	79
8.1	BROUŠENÍ – KOTOUČ A 99 K 80 9 V	79
8.1.1	Vliv hloubky řezu na řezné síly u kovů	79
8.1.2	Vliv hloubky řezu na řezné síly u polymerů.....	81
8.1.3	Vliv hloubky řezu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů	82
8.1.4	Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u kovů.....	83
8.1.5	Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u polymerů	84

8.1.6	Vliv rychlosti posuvu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů.....	86
8.2	BROUŠENÍ – KOTOUČ A 99 K 80 13 V	87
8.2.1	Vliv hloubky řezu na řezné síly u kovů	87
8.2.2	Vliv hloubky řezu na řezné síly u polymerů.....	88
8.2.3	Vliv hloubky řezu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů	90
8.2.4	Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u kovů.....	91
8.2.5	Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u polymerů	92
8.2.6	Vliv rychlosti posuvu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů.....	94
8.3	BROUŠENÍ – KOTOUČ A 99 60 J 12 V.....	95
8.3.1	Vliv hloubky řezu na řezné síly u kovů	95
8.3.2	Vliv hloubky řezu na řezné síly u polymerů.....	96
8.3.3	Vliv hloubky řezu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů	98
8.3.4	Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u kovů.....	99
8.3.5	Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u polymerů	100
8.3.6	Vliv rychlosti posuvu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů.....	101
8.4	Vliv struktury brousícího kotouče na řezné síly	103
8.4.1	Porovnání brousících kotoučů – vliv hloubky řezu na řezné síly.....	103
8.4.2	Porovnání brousících kotoučů – vliv rychlosti posuvu na řezné síly.....	104
8.5	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	106
9	FRÉZOVÁNÍ.....	108
9.1	Vliv hloubky řezu na řezné síly	108
9.1.1	Program pro frézování se změnou hloubky řezu	108
9.1.2	Vliv hloubky řezu na řezné síly u kovů	109
9.1.3	Vliv hloubky řezu na řezné síly u polymerů.....	112
9.1.4	Vliv hloubky řezu na řezné síly – srovnání oceli 12 050 a PA při sousledném a nesousledném frézování.....	115
9.2	Vliv hloubky řezu na jakost povrchu	116
9.2.1	Vliv hloubky řezu na jakost povrchu – nesousledné frézování.....	116
9.2.2	Vliv hloubky řezu na jakost povrchu – sousledné frézování	118
9.2.3	Porovnání drsnosti Ra při nesousledném a sousledném frézování – ocel 12 050 a PVC	120
	ZÁVĚR	121
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	124
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	126
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	130
	SEZNAM TABULEK	134
	SEZNAM PŘÍLOH	135

ÚVOD

Dříve se kovy zpracovávaly převážně kováním a slévárenskou technologií. Teprve až v 19. a 20. století dosáhla svého rozmachu technologie obrábění a od té doby stojí v popředí ve zpracování materiálů vůbec.

Hned po soustružení je druhým nejdůležitějším způsobem obrábění frézování. Hlavní pohyb zde koná nástroj, který má zuby buď na obvodě nebo na čele a nebo zároveň na obou těchto plochách. Touto metodou obrábění můžeme zhotovit jak rovinné, tak i tvarové plochy.

Broušení je ve své podstatě frézování s tím rozdílem, že zuby tvoří zrna, která jsou v broušícím kotouči statisticky nahozena. Tímto způsobem obrábění dosahujeme výrobků ve vysoké přesnosti a jakosti.

Průmyslová výroba si žádá stále větší požadavky na vlastnosti svých výrobků, větší efektivitu práce a lepší ekonomické zhodnocení celého výrobního procesu. Pro uspokojení těchto nároků se hledají a vyvíjejí nové materiály. V posledních letech se stále více používají polymery. Jejich rozšíření je zajištěno díky svým vlastnostem jako jsou odolnost proti korozi, nízká hmotnost aj. Tato skutečnost nás vede k tomu, abychom se zabývali jejich zkoumáním a možnostmi zpracování.

Nesmíme ovšem zapomínat na kovy, které jsou stále světově nejdůležitějším konstrukčním materiálem. Těchto materiálů se užívá v celé řadě odvětví, např. v nástrojařské výrobě, stavebnictví či letectví. Proto je nutné zdokonalovat stávající zpracovatelské technologie a zkoumat vlastnosti kovů.

Pro třískové metody obrábění je jedna z nejdůležitějších technologických vlastností materiálů jejich obrobiteľnost. Obrobiteľnost nám charakterizuje vhodnost materiálu k obrábění. Čím lépe se bude daný materiál obrábět, tím budou výrobní časy nižší, dojde k energetické úspoře, produktivita práce se zvýší a cena výrobku půjde dolů. Ovšem pojem obrobiteľnost nelze vztáhnout pouze k samotnému obráběnému materiálu, ale i k vhodnému řeznému prostředí, řezným materiálům a v neposlední řadě i ke geometrii nástroje. Proto je důležité volit vhodné řezné podmínky.

Do budoucna se dá očekávat vzrůstající spotřeba polymerů, stejně jako předpokládáme, že obrábění bude mít ve výrobě své místo.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBRÁBĚNÍ

1.1 Základní pojmy procesu obrábění

Obrábění je technologický proces, kterým vytváříme povrchy obrobku určitého tvaru, rozměru a jakosti odebráním částic nebo oddělováním částí materiálu pochody mechanickými, elektrickými, chemickými apod., popř. jejich kombinací.

Řezání je obrábění pochody mechanickými tj. odebráním částic nebo oddělování částí materiálu břitem řezného nástroje ve tvaru třísky.

Obrobek je obráběný nebo již obrobený předmět.

Obráběná plocha je část povrchu obrobku odstraňovaná obráběním.

Obrobená plocha je plocha obrobku vzniklá obráběním.

Plocha řezu (řezná plocha) je plocha obrobku vznikající těsně za břitem nástroje

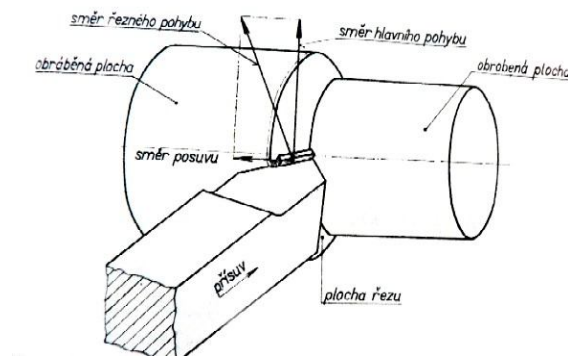
Aby nastal proces řezání, tj. oddělení částí materiálu z výchozího polotovaru (z obrobku), musí se nástroj pohybovat proti obrobku určitou rychlostí po určité dráze, která podle druhu obrábění je přímka (hoblování, protahování), šroubovice (podélné soustružení, vrtání), cykloida (frézování, rovinné broušení) atp.

Tento tzv. řezný pohyb vykonává buď nástroj (vrtání), nebo obrobek (hoblování), anebo oba současně (soustružení, frézování). Zpravidla je tento pohyb výslednicí dvou pohybů – pohybu hlavního (točivý pohyb obrobku při soustružení, frézy při frézování, vrtáku při vrtání) a posuvu (přímočarý pohyb nástroje ve směru osy obrobku při podélném soustružení, přímočarý pohyb obrobku při frézování, přímočarý pohyb vrtáku ve směru jeho osy při vrtání atp.).

Tyto pohyby můžeme definovat takto:

řezný pohyb je relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem. Tímto pohybem se uskutečňuje obrábění (řezání);

hlavní pohyb je složka řezného pohybu, která se shoduje se základním obráběcího stroje. Koná jej buď nástroj, nebo obrobek. Může být točivý, přímočarý nebo složený;



Obr. 1 Obráběná plocha, obrobená plocha,
plocha řezu [16]

posuv je pohyb nástroje nebo obrobku, který spolu s hlavním pohybem umožňuje obrábění. Zpravidla se koná ve směru kolmém na směr hlavního pohybu buď plynule nebo přerušovaně;

posuv plynulý je posuv konaný nepřerušovaně současně s hlavním pohybem točivým;

posuv přerušovaný je posuv konaný po přetrzích před pracovním zdvihem (v úvratích), tj. v době, kdy se hlavní pohyb nekoná;

řezná rychlost je rychlost řezného pohybu. Obvykle se však počítá s rychlostí pohybu hlavního. Označuje se v_c a udává se buď v m/min, nebo v m/s. Při rotačních pohybech se vypočte podle rovnice

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m / min]} \quad (1)$$

kde D je průměr obrobku nebo nástroje v mm,

n – otáčky obrobku nebo nástroje za minutu;

rychlost (velikost) posuvu je dráha, kterou vykoná břit nástroje proti obrobku ve směru posuvu za jednotku času, za jednu otáčku obrobku apod.

Dalším pohybem, který je součástí pracovního cyklu obrábění, netvoří však složku řezného pohybu je přísuv, který definujeme takto:

přisuv je pohyb nástroje nebo obrobku, kterým se nastavuje nástroj do pracovní polohy;

hloubka řezu je vzdálenost mezi plochou obráběnou a obrobenou, měřená kolmo na obrobenou plochu. Označujeme ji písmenem t [mm]. [16]

1.2 Nástroj

Nástroj umožňuje realizaci řezného procesu. Z geometrického hlediska je nástroj identifikován svými prvky, plochami, ostřím a rozměry ostří.

Těleso – část nástroje, na které jsou přímo vytvořené nebo upevněné elementy ostří.

Stopka – část nástroje určena pro upnutí.

Upínací díra – souhrn vnitřních ploch tělesa nástroje, určených pro nastavení a upnutí nástroje.

Osa nástroje – teoretická přímka využívaná při výrobě, ostření a upnutí nástroje. Obecně je osa středová čára stopky nebo upínací díry nástroje.

Řezná část – funkční část nástroje, která obsahuje prvky tvořící třísku. Patří sem ostří, čelo a hřbet. V případě vícezubého nástroje má každý zub svou řeznou část.

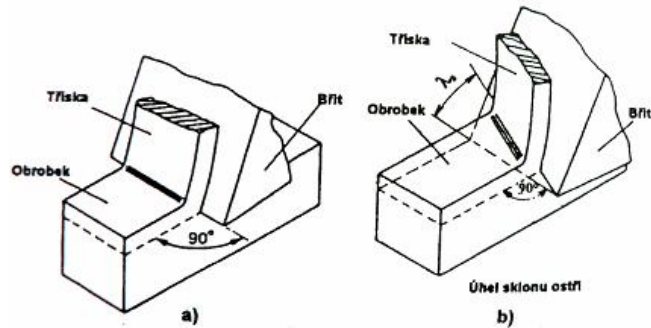
Základna – plochý prvek stopky nástroje, který je zpravidla rovnoběžný nebo kolmý k základní rovině nástroje. Slouží pro umístění a orientaci nástroje při jeho výrobě, kontrole a ostření. Ne všechny nástroje mají určenou základnu.

Břit – prvek řezné části nástroje ohraničený čelem a hřbetem nástroje. Může být spojen s hlavním i vedlejším ostřím. [10]

1.3 Vznik třísky

Řezný proces se realizuje v obráběcím systému stroj, nástroj, obrobek, nástroj, přičemž prioritním výstupem jsou parametry obrobené plochy. Z tohoto hlediska má zvláštní význam problematika identifikovaného mechanismu tvoření třísky.

Řezný proces se může realizovat jako ortogonální nebo obecné řezání – obr.2.



Obr. 2 Realizace řezného procesu

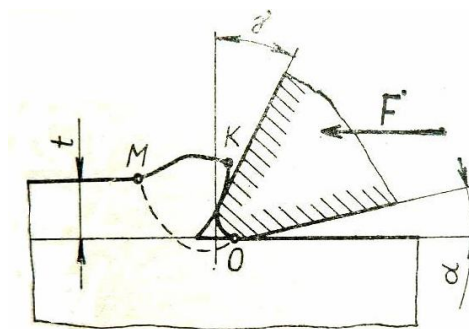
a – ortogonální řezání; b – obecné

řezání [10]

Při ortogonálním řezání je ostří kolmé na směr řezného pohybu a daná problematika se řeší v rovině (zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby, protahování).

Při obecném řezání je třeba danou problematiku řešit v prostoru (podélné soustružení, vrtání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici). [10]

Podstatou řezání při obrábění je oddělování částic materiálu v podobě třísek. Břit nástroje je silou F vtlačován do povrchové vrstvy t , která musí být z obrobku odstraněna. Rychlost pohybu řezného nástroje je určena řeznou rychlostí a síla, kterou se břit nástroje do vrstvy vtlačuje, je řezná síla. [19]



Obr. 3 Schéma vzniku třísky [14]

U krystalických látek dochází při vnikání břitu nástroje do obrobku k plastické deformaci obráběného materiálu a vzniká tříška tvářená. U nekrystalických látek se odděluje tříška křehkým lomem nebo štěpením, nedochází k plastické deformaci a vzniklá tříška je netváře-

ná. Většinu technických materiálů, které se v technické praxi obrábějí, tvoří materiály krystalické, zejména kovy. Teoretické a experimentální studie se u těchto materiálů provádí zpravidla pro případ ortogonálního řezání. [10]

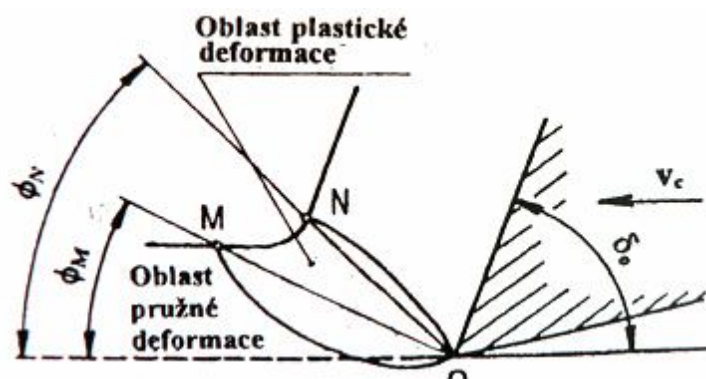
1.3.1 Plastické deformace v oblasti tvoření třísky při ortogonálním řezání

Při řezném procesu dochází v oblasti tvoření třísky k pružným a následně plastickým deformacím v odřezávané vrstvě; před břitem nástroje – primární plastické deformace a v povrchových vrstvách třísky ve styku s čelem nástroje – sekundární plastické deformace. [10]

1.3.2 Primární plastické deformace

Při relativním pohybu nástroje vůči obrobku působí na odebíranou vrstvu materiálu vnější zatížení, které v této vrstvě vyvolává napětí.

Pokud napětí nepřestoupí mez úměrnosti deformovaného materiálu, odebíraná vrstva se pružně deformuje. Zvýšením napětí nad mez pružnosti se materiál odřezávané vrstvy začíná plasticky deformovat a dochází k plastickému skluzu v určitých vhodně orientovaných krystalických plochách.- obr. 4.

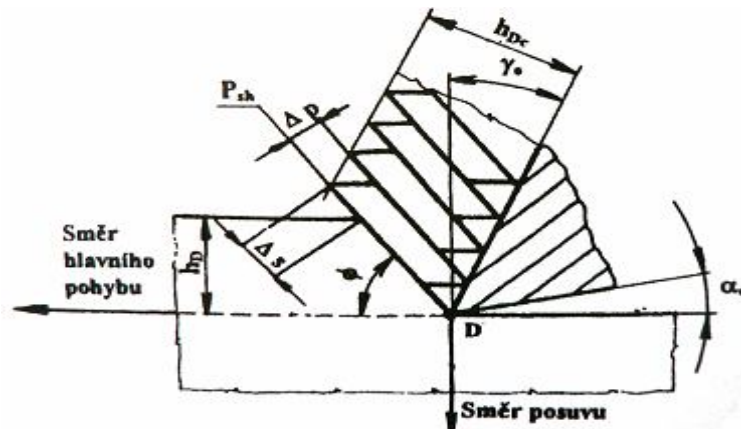


Obr. 4 Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě
MO – počátek plastických deformací; NO – konec
plastických deformací; δ_o - nástrojový ortogonální úhel
řezu ($\delta_o = \alpha_o + \beta_o$) [10]

Velikost a tvar oblasti OMN, jakož i stav napjatosti v této oblasti jsou značně proměnlivé a závisí na fyzikálních vlastnostech deformovaného materiálu, tj. na deformační a zpevňovací schopnosti obráběného materiálu, řezné rychlosti v_c , nástrojovém ortogonálním úhlu řezu δ_o a nástrojovém ortogonálním úhlu čela γ_o . [10]

1.3.3 Sekundární plastické deformace

Materiál vpravo od roviny stříhu P_{sh} je již tvářenou třískou, jak je naznačeno pro zjednodušený dvojrozměrný model ortogonálního řezání na obr.5.



Obr. 5 Zjednodušený model tvorby elementů třísky při ortogonálním řezání [10]

h_D – jmenovitá tloušťka řezu

h_{Dc} – tloušťka třísky

P_{sh} – rovina stříhu

Φ – úhel roviny stříhu

Δp – tloušťka elementu třísky

Δs – posunutí elementu třísky [10]

1.4 Práce řezání a měrný řezný odpor

1.4.1 Práce řezání

Obrábění je výsledkem funkce obráběcí soustavy stroj – nástroj – obrobek a funkční činnost soustavy se projevuje odřezáváním materiálu z obrobku. Na odříznutí vrstvy materiálu, tj. na její přeměnu v třísku, musíme vynaložit určitou práci. Velikost práce řezání závisí hlavně na průřezu třísky a je ovlivněna mechanickými vlastnostmi materiálu a řeznou rychlostí.

Celková práce A vynaložena na řezání se skládá ze čtyř složek:

$$A = A_d + A_t + A_e + A_p, \quad (2)$$

kde A_d je práce plastických deformací,

A_t – práce tření,

A_e – práce pružných deformací,

A_p – práce disperzní.

Práce plastických deformací A_d je význačnou složkou práce řezání, zejména u houževnatých a tvárných materiálů. Práce A_d se spotřebuje na plastické deformování obráběného materiálu, třísky i obrobku. [19]

Velikost této složky práce řezání závisí na řezných podmínkách, druhu obráběného materiálu a na geometrii řezného nástroje a tvoří 40 až 80 % celkové práce řezání. [12]

Je nejmenší při obrábění křehkých materiálů, kdy vznikají nejmenší plastické deformace. Práce plastických deformací se mění v teplo. [19]

Práce tření A_t se dělí na dvě složky, a to na práci tření na čele nástroje A_{t1} a na práci tření na hřbetu nástroje A_{t2} . Práce tření je v závislosti na druhu obráběného materiálu 5 až 35 % celkové práce řezání.

Jelikož složky práce řezání A_e a A_p jsou malé a lze je zanedbat, můžeme psát v jednodušší formě:

$$A = A_d + A_{t1} + A_{t2} = F_c \cdot v \left[J \cdot \text{min}^{-1} \right] \quad (3)$$

Práce pružných deformací A_e je spotřebována na pružné deformace, které vytváří břit nože v obráběném materiálu (tvoří 5 až 10 % celkové práce řezání). Tato složka práce řezání se mění v teplo. [12]

Práce disperzní A_p se spotřebuje na přemístění určitého množství molekul z vnitřní části obráběného materiálu na jeho povrch. Práce A_p způsobuje disperzi čili rozdrobením materiálu zvětšení jeho povrchu. [19]

Obě složky A_e a A_p lze pro určení práce zanedbat. Celková práce řezání závisí, jak bylo uvedeno, na řezných podmínkách a na mechanických vlastnostech obráběného materiálu. Měřítkem vlivu řezných podmínek je tzv. měrná práce řezání e . Je to celková práce A pro konkrétní řeznou dráhu, vztažená na úběr materiálu 1 mm^3 . [12]

$$e = \frac{A}{V} \left[\text{J} \cdot \text{mm}^{-2} \right] \quad (4)$$

V je objem odebraného materiálu, $V = a \cdot b \cdot c \text{ [mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$

1.4.2 Měrný řezný odpor

Velikost řezného odporu, který nástroj překonává při řezání, určují především fyzikální vlastnosti materiálu obrobku a velikost průřezu odřezávané vrstvy materiálu – průřez třísky. Ovlivňují jej však také ostatní řezné podmínky – tvar průřezu třísky, geometrie břitu, řezné prostředí atd.

Tyto faktory mají také největší vliv na velikost hlavní složky řezného odporu, resp. řezné síly – na složku F_c . Poměr této síly a průřez třísky je definován jako měrný řezný odpor - p .

$$p = \frac{F_c}{S} \left[\text{kp} \cdot \text{mm}^{-2} \right] \quad (5)$$

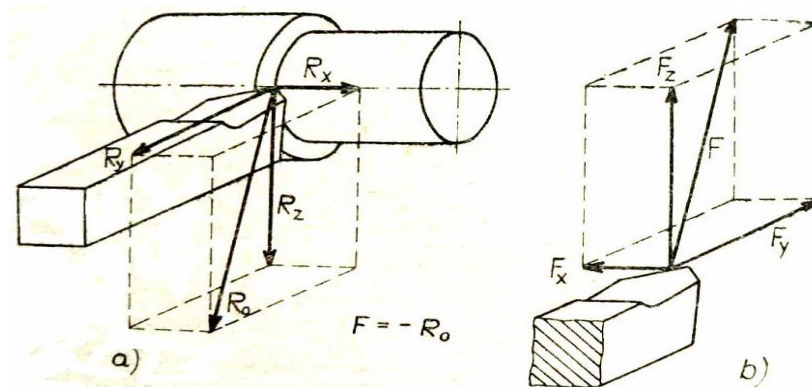
($S = a \cdot b \text{ [mm}^2]$, pro soustružení $S = s \cdot h \text{ [mm}^2]$).

Známe – li velikost měrné řezné síly pro daný případ obrábění (určitý materiál obrobku a určité řezné podmínky), můžeme pro všechny způsoby obrábění a průřez třísky $S \text{ [mm}^2]$ určit velikost tangenciální řezné síly z rovnice

$$F_c = p \cdot S \left[\text{kp} \right] \quad (6)$$

Měrná řezná síla není pro určitý obráběný materiál konstantní, mění se s použitými řeznými podmínkami. [17]

Řezná síla musí být teoreticky v rovnováze s řezným odporem R_o materiálu obrobku ($F = -R_o$), avšak má opačný smysl.



Obr. 6 Složky řezného odporu a řezných sil při soustružení [19]

Výsledný řezný odpor se rozkládá do tří složek na sebe kolmých (obr.a), které působí na nástroj různě velkými silami R_x , R_y , R_z . Složky řezného odporu musí odpovídat složkám řezné síly F_f , F_p , F_c (obr.b) a naopak k odřezávání vrstvy materiálu z obrobku může dojít pouze tehdy, když složky řezné síly na nástroji překonají složky řezného odporu materiálu. Pro uskutečnění procesu obrábění musí tedy být řezné síly větší než řezné odpory, takže [19]

$$(F_f + F_p + F_c) > -(R_x + R_y + R_z) = F > -R_o \quad (7)$$

1.5 Tepelné jevy při obrábění

Vznik třísky při obrábění a její odvod z místa řezu je doprovázen vznikem určitého množství tepla. Ke vzniku tepla dochází transformací vynaložené práce. V teplo se přeměňuje téměř veškerá práce vynaložená na proces řezání, s výjimkou práce pružných deformací a práce utajené. Podíl těchto dvou složek na celkové vynakládané práci je poměrně malý a nepřesahuje 5%. Ve většině případů (vysoká tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek, velmi intenzivní deformace odřezávané vrstvy) představují práce pružných deformací a práce utajená

(spotřebovaná na deformaci mřížky a vytvoření nových povrchů) maximálně 2 % celkové práce řezání. Zbytek, tj. minimálně 98 % se transformuje v teplo. [17]

Celkové množství tepla, které vznikne při obrábění za jednotku času, označujeme jako tepelný výkon řezání a lze ho vypočítat podle rovnice

$$Q = \frac{A}{J} \cdot q = \frac{F_c \cdot v}{J} \cdot q [\text{kcal} / \text{min}] \quad (8)$$

kde J je mechanický ekvivalent tepla [$J = 427 \text{ kpm/kcal}$],

q – součinitel určující podíl z celkové práce řezání, přeměněný v teplo [$q = 0,8$ až $0,99$],

F_c –tangenciální složka řezné síly [kp],

v – řezná rychlost [m/min].

Teplo při obrábění má značný vliv na řezání, neboť vzniklé teplo zahřívá obrobek, třísku a nástroj na teploty, které jsou značně rozdílné. Tyto teploty mají vliv na jakost obrobku i na přesnost obrobku a působí nepříznivě na nástroj. Velká teplota zmenšuje stálost tvrdosti břitů nástroje, takže se zhoršují jeho řezné schopnosti a trvanlivost břítu nástroje. [19]

1.5.1 Tepelná bilance řezného procesu

Teplo řezného procesu Q_e vzniklé při odebrání určitého množství materiálu je přibližně rovné práci řezného procesu E_e , takže $Q_e \approx E_e$.

$$Q_e = Q_{pd} + Q_\gamma + Q_\alpha [J] \quad (9)$$

Q_{pd} – teplo vzniklé v oblasti plastických deformací při tvoření třísky [J]

Q_γ – teplo vzniklé v oblasti zření třísky po čele nástroje [J]

Q_α – teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje po přechodové ploše obrobku [J]

Vzniklé teplo řezného procesu Q_e je odváděno do jednotlivých prvků obráběcího systému:

$$Q_e = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} [J] \quad (10)$$

Q_t – teplo odvedené třískou [J]

Q_o – teplo odvedené obrobkem [J]

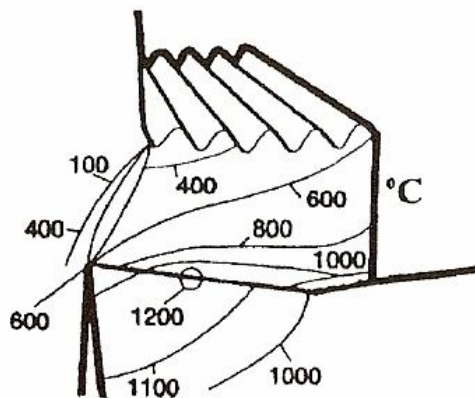
Q_n – teplo odvedené nástrojem [J]

Q_{pr} – teplo odvedené řezným prostředím [J]

Podíl jednotlivých odváděných složek tepla řezného procesu do třísky, obrobku, nástroje a prostředí závisí na tepelné vodivosti materiálů obrobku a nástroje, na řezných podmínkách (především řezné rychlosti), řezném prostředí (způsobu chlazení a mazání) a na geometrii břitu řezného nástroje. Největší část tepla vzniklého při obrábění je v ideálním případě odváděna ze zóny řezání třískou. [10]

1.5.2 Teplota řezání

Teplota v zóně řezání je závislá hlavně na kontaktu třísky a nástroje, na velikosti řezných sil a třecích procesech mezi materiálem obrobku a břitem nástroje. Příklad teplotního pole obrobku, třísky a nástroje je na obr.7.

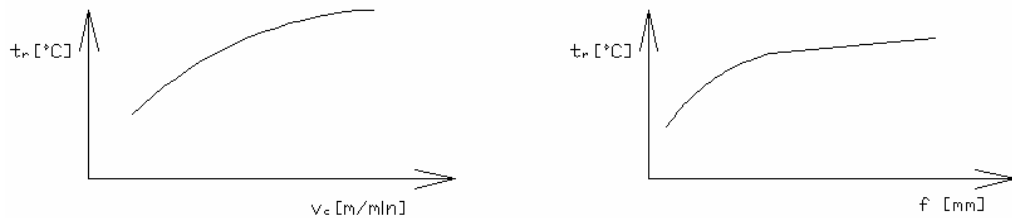


Obr. 7 Teplotní pole obrobku, třísky a nástroje při ortogonálním řezání – příklad [10]

Při obrábění nízkými řeznými rychlostmi je maximální teplota na špičce nástroje, při obrábění vyššími řeznými rychlostmi je maximální teplota v určité vzdálenosti od ostří nástroje.

Teplota řezání t_r závisí na materiálu obrobku, řezném materiálu, geometrii nástroje, řezných podmínkách a řezném prostředí.

Obecné trendy teploty řezání t_r [°C] na řezné rychlosti v_c a posuvu jsou na obr.8.



Obr. 8 Závislost obecných trendů teploty řezání na řezné rychlosti a posuvu při soustružení [10]

Teplota řezání t_r může být vyjádřena empirickým vztahem

$$t_r = C_t \cdot a_p^{x_t} \cdot f^{y_t} \cdot v_c^{z_t} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11)$$

C_t – konstanta

x_t, y_t, z_t – exponenty

Konstanta C_t vyjadřuje vliv materiálu obrobku a materiálu nástroje. Pro soustružení jsou přibližné hodnoty exponentů $x_t = 0,1$; $y_t = 0,25$; $z_t = 0,4$. [10]

Závěr: Obrábění je technologií, kdy oddělujeme materiál z povrchu obrobku pomocí mechanických, elektrických, chemických aj. postupů, případně jejich kombinací. Aby došlo k oddělení materiálu z obrobku musíme dodat určitou práci. Tato práce se skládá ze čtyř složek – práce plastických deformací, práce tření, práce pružných deformací a práce disperzní. Obráběný materiál při řezání vykazuje určitý řezný odpor. Tento odpor musíme překonat, aby vůbec k obrábění došlo, tzn., že řezná síla musí být větší, než je řezný odpor. Při obrábění dochází ke vzniku určitého množství tepla. Toto teplo vzniká přeměnou vynaložené práce na úběr materiálu. Tento jev nám ovlivňuje kvalitu a přesnost obrobku.

2 BROUŠENÍ

Broušení se používá zejména pro obrábění součástí s vyššími požadavky na přesnost rozměrů a tvarů a jakost povrchu. S rozvojem výkonných brousících nástrojů a strojů se význam broušení rozšiřuje z původní oblasti dokončovacích operací také na produkční obrábění. [10]

Podle typu brousícího nástroje se rozlišují tyto druhy broušení:

1. Vázaným pevným brusivem, což jsou zrna brusiva stmelená pojivem do tvaru kotouče, brousícího tělíska, segmentu, brousícího kamene či nástroje jiného tvaru, nebo zrna přilepená k pružnému podkladu, kdy řezný nástroj je ve tvaru brousícího pásu.
2. Volným brusivem – při využití zrn ve formě prášku pro broušení kapalinou, ultrazvukem nebo jiným podobným způsobem obrábění tvrdých materiálů. [14]

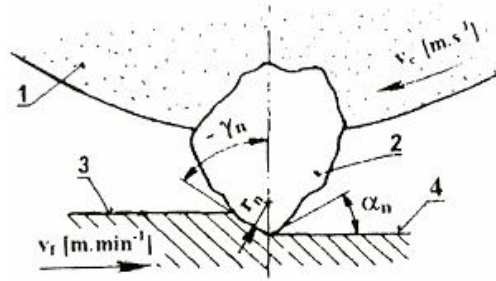
2.1 Teorie broušení

2.1.1 Tvorba třísky při broušení

Broušení jako obráběcí metoda je charakterizováno specifickými podmínkami tvorby třísky a vzniku obrobeného povrchu. V důsledku velkých plastických deformací a vnějšího i vnitřního tření se určitá část třísky ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapky kovu nebo shoří (jiskření). Model záběru vázaného zrna brusiva je na obr. 9.

Jednotlivá brousící zrna mají nepravidelný geometrický tvar, vysokou tvrdost, odolnost proti teplotě, nepravidelné poloměry zaoblení ostří r_n řádu několika tisícín milimetrů.

Brousící zrna mají zpravidla negativní úhel čela γ_n a poměrně velký úhel hřbetu α_n . Za řeznou rychlost při broušení se považuje obvodová rychlost brousícího kotouče, která je vzhledem k ostatním metodám obrábění relativně vysoká. Rychlost posuvů obrobku nebo kotouče mají na rychlost řezného pohybu v_e zanedbatelný vliv. [10]



Obr. 9 Model záběru brousícího zrna

v_c – řezná rychlost; v_f – posunová rychlost; γ_n – normální úhel čela; α_n – normální úhel hřbetu; r_n – poloměr zaoblení ostří; 1 – brousící kotouč; 2 – brousící zrna; 3 – obráběná plocha; 4 – obrobená plocha [10]

2.1.2 Základní metody broušení

Brousící proces se uskutečňuje různými metodami, které se definují pro vhodná kritéria. Příslušné technologické charakteristiky se k těmto metodám vztahují.

Podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření se rozlišuje:

- rovinné broušení (výsledkem je rovinná plocha),
- broušení do kulata (výsledkem je rotační povrch),
- tvarovací broušení (broušení závitů, ozubených kol apod.),
- kopírovací broušení (broušení s řízenou změnou posuvu, NC stroje),
- broušení tvarovými brousícími kotouči (profil brousícího kotouče určuje konečný profil obrobku).

Podle aktivní části brousícího kotouče se specifikuje:

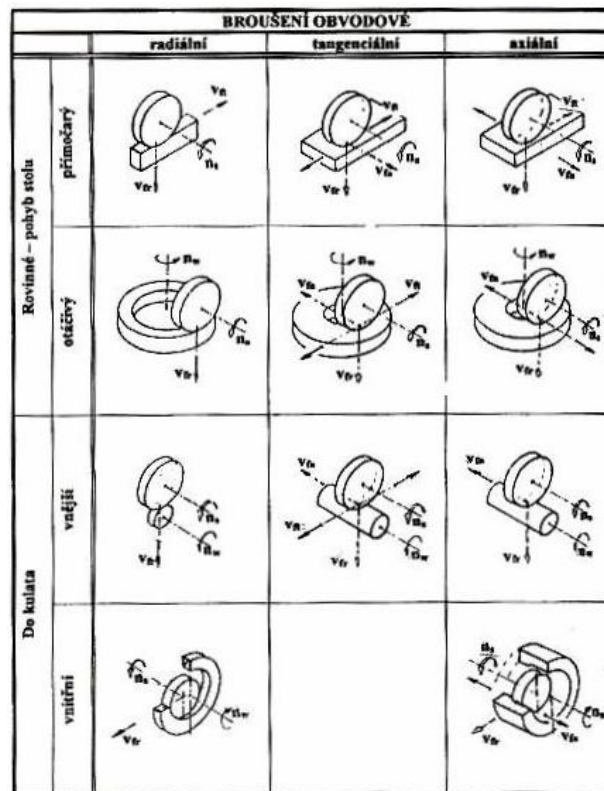
- obvodové broušení (broušení obvodem kotouče),
- čelní broušení (broušení čelem kotouče kolmým k jeho ose).

Podle vzájemné polohy brousícího kotouče a obrobku se charakterizuje:

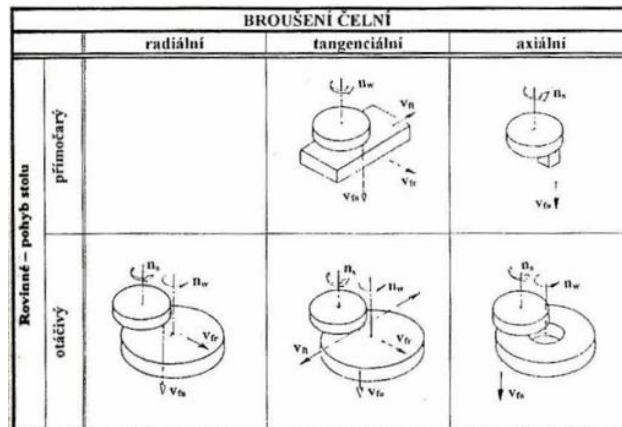
- vnější broušení (broušení vnějšího povrchu obrobku),
- vnitřní broušení (broušení vnitřního povrchu obrobku).

Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousícímu kotouči (termínem „stůl“ se označuje pohyblivá část brousícího stroje vzhledem k jeho základu, na stůl brusky se upevňuje obrobek nebo brousící vřeteník) se definuje:

- axiální broušení (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče),
- tangenciální broušení (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D),
- radiální broušení (hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě D je radiální vzhledem ke kotouči),
- obvodové zápachové broušení (posuv stolu je plynulý radiální),
- čelní zápachové broušení (posuv stolu je plynulý axiální). [10]



Obr. 10 Vybrané způsoby obvodového broušení [10]



Obr. 11 Vybrané způsoby čelního broušení [10]

2.2 Technologie broušení

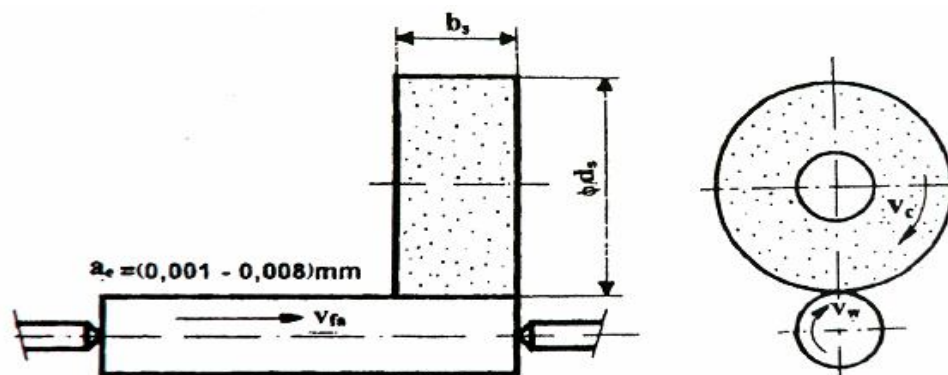
2.2.1 Strojní broušení

Při strojním broušení se při volbě rezných podmínek rozlišují tyto způsoby: [21]

Obvodové broušení do kulata vnějších ploch

a) Broušení axiální

Broušení s podélným (axiálním) posuvem se používá zejména při broušení dlouhých součástek. Obrobek se otáčí mezi hroty a koná současně posunový pohyb rovnoběžný s osou obrobku, popř. obrobek koná jen pohyb otáčivý a nástroj posunový podél osy obrobku – obr. 12.



Obr. 12 Schéma obvodového broušení s podélným (axiálním) posuvem [10]

Obvodová rychlost brousícího kotouče (= řezná rychlost) v_c :

Ocel (25 – 35) m.s⁻¹

Litina 25 m.s⁻¹

Obvodová rychlost obrobku v_w :

Ocel (15 - 20 m.min⁻¹) - na hrubo, (8 - 15) m.min⁻¹ - na čisto

Litina (15 - 22 m.min⁻¹) - na hrubo, (12 – 16) m.min⁻¹ - na čisto

Axiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku f_a :

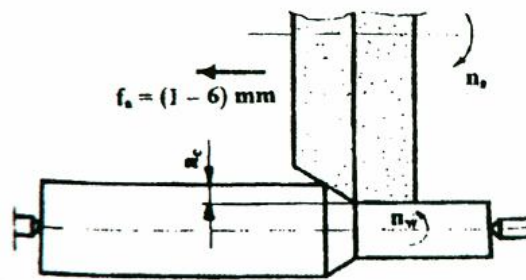
Ocel (0,6 – 0,8) b_s - hrubování, (0,2 – 0,4) b_s - na čisto

Litina (0,75 – 0,85) b_s - hrubování, (0,3 – 0,5) b_s - na čisto

Zvlášť jemné broušení (0,1 - 0,2) b_s

b) Broušení hloubkové

Broušení kotoučem nastaveným na rozměr (hloubkové broušení) je metoda broušení, kdy se celý přídavek obrousí za jeden podélný zdvih stolu s malou axiální rychlostí posuvu – obr.13.



Obr. 13 Princip hloubkového broušení [10]

Tato metoda broušení patří mezi nejproduktivnější. Používá se při malých přídavcích na broušení.

Výhodou je, že větší část odebíraného materiálu odřeže malé množství brousících zrn a ostatní zrna vyjiskřují.

Používá se hodnota pracovního (radiálního) záběru $a_c = (0,1 - 0,4)$ mm.

Výkon při hloubkovém broušení je o (25 - 75) % vyšší než při axiálním broušení.

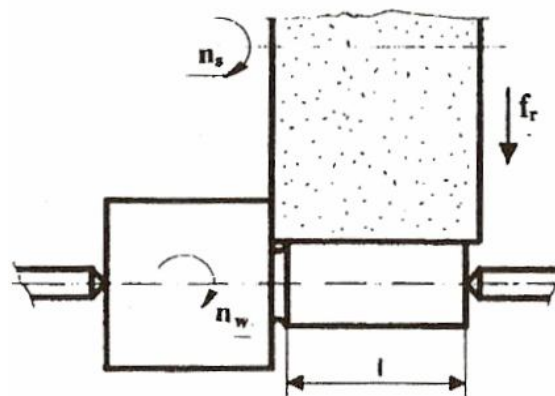
Pro zlepšení podmínek hrubovacích zrn se na brousícím kotouči vytvoří kuželové zkosení.

Při velkých přídavcích se kotouč vytvaruje stupňovitě.

Řezná rychlost v_c a obvodová rychlost otáčení obrobku v_w je stejná jako při broušení s podélným posuvem. [10]

c) Broušení radiální

Podmínkou aplikace radiálního (zapichovacího) broušení je tuhý obrobek, zpravidla do maximální délky 350 mm – obr.14. Výkon broušení je o (40 – 80) % vyšší, než u axiálního broušení.



Obr. 14 Princip zapichovacího broušení [10]

Při hrubém broušení se volí radiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku

$$f_r = (0,0025 - 0,0075) \text{ mm,}$$

a při broušení na čisto

$$f_r = (0,001 - 0,005) \text{ mm.}$$

Řezná rychlost v_c a rychlost otáčení obrobku v_w je stejná jako při axiálním broušení. [10]

d) Bezhruté broušení

Při bezhrutém broušení se používá:

Obvodová rychlost brousícího kotouče	30 až 35 m.s ⁻¹ ,
Obvodová rychlost podávacího kotouče	0,3 až 9 m.s ⁻¹ ,
Přísuv podle materiálu a posuvu	0,005 až 0,30 mm.min ⁻¹ ,

Tab. 1 Volba brousícího kotouče pro broušení vnějších rotačních ploch [21]

Broušený materiál	Jakost brousícího kotouče
Ocel	
uhlíková měkká kalená	A 99-A 96 32-35 M-N V
uhlíková kalená do 1200 MPa	A 99-A 98 32-35 L-M V
nástrojová legovaná nekalená do 63 HRC	A 97 P 32-16 J-L 9-10 V
nástrojová legovaná kalená přes 63 HRC	A99, A98, A97 P 32-16 J-K 9-12 V
slitinová chromniklová	A 99, A 98 25 J-K V
slitinová chrommolybdenová	A 99 25-16 J-K V
korozivzdorná měkká austenitická - nemagnetická	C 49, A 98 32-25 J-L V
korozivzdorná martenzitická magnetická	A 97 P, A 98 32-25 J-L V
Slinuté karbidy	C 49 40-32 J-L V
	C 49 25-10 J-K V
Litina	
litina šedá	C 48-49 40-32 K-M V
litina tvrzená	C 48-49 32-25 J-L V
Hliník	C 48-49 40-25 J-9 V
Mosaz	C 48-49 40-25 I-L V

Zrnitost brousícího kotouče se volí též podle jeho průměru, podle průměru obrobku, podle požadované drsnosti povrchu atd. [21]

Broušení děr

Při obrábění vnitřních rotačních ploch rozeznáváme dva případy:

- obrobek se otáčí,
- obrobek je nehybný.

Do druhého způsobu zařazujeme planetové broušení. Brousící kotouč koná planetový pohyb i podélný posuv.

Jinak se u broušení vnitřních ploch předpokládají stejné pohyby jako u broušení vnějšího.

Rámcové směrnice pro broušení děr:

- Obvodová rychlost brousícího kotouče je:
Pro materiály houževnaté 25 až 30 m.s⁻¹
Pro materiály křehké 18 až 25 m.s⁻¹
Obvodová rychlost obrobku 15 až 35 m.min⁻¹
- Posuv je 3 šířky brousícího kotouče na 1 otáčku obrobku.
- Brousící kotouč má být co největší, asi 3 až 4/5 broušeného otvoru.
- Podle možnosti se má brousit s použitím řezné kapaliny. [21]

Rovinné broušení

Rovinné plochy se brousí obvodem nebo čelem brousícího kotouče [10].

Obrobek koná posuv přímočarý nebo otáčivý, v některých případech posuv koná nástroj. Zrnitost a tvrdost brousícího nástroje se volí podle velikosti styčné plochy mezi kotoučem a obrobkem. Všeobecně platí, že čím větší je styčná plocha, tím má být brousící kotouč měkčí a hrubší.

Obvodová rychlost brousícího kotouče se volí:

u materiálů houževnatých 25 až 32 m.s⁻¹

u materiálů křehkých 18 až 25 m.s⁻¹

Pro rovinné broušení obvodem kotouče se volí řezné podmínky podle tab.2 a druh kotouče podle tab.3. Pro rovinné broušení čelem kotouče jsou uvedeny rámcové směrnice pro volbu řezných podmínek v tab.4. a pro volbu kotouče v tab.5. [21]

Tab. 2 Směrné hodnoty řezných podmínek pro rovinné broušení obvodem kotouče [21]

Podélný vratný pohyb stolu:	
měkká ocel	10 až 18 m.min ⁻¹
tvrdá ocel	8 až 12 m.min ⁻¹
litina	10 až 15 m.min ⁻¹
Příčný posuv:	
při broušení na hrubo	2/3 až 4/5 šířky kotouče
při broušení na čisto	1/2 až 2/3 šířky kotouče
při zvlášť jemném broušení	1/10 až 1/5 šířky kotouče
Přísuv na zdvih:	
při broušení na hrubo	0,015 až 0,040 mm
při broušení na čisto	0,005 až 0,015 mm
Kruhový pohyb stolu:	
při broušení na hrubo obvodová rychlost	20 až 60 m.min ⁻¹
při broušení na čisto obvodová rychlost	40 až 60 m.min ⁻¹
Přísuv na zdvih:	
při broušení na hrubo	0,005 až 0,015 mm
při broušení na čisto	0,005 až 0,010 mm

Tab. 3 Volba kotouče pro rovinné broušení obvodem

kotouče [21]

Broušený materiál	Jakost brousícího kotouče
Ocel	
uhlíková měkká, nekalená	A 99 40-32 I-K V
uhlíková kalená a legovaná	A 98, A 99 40-25 I-K V A 99 40 J 13 V
rychlořezná měkká	A 99 40-32 I-K V
rychlořezná kalená	A 98, A 99 40-32 H-J V
korozivzdorná	A 99 40-25 H-J V

Tab. 4 Směrné hodnoty řezných podmínek pro rovinné broušení čelem kotouče [21]

Rychlost stolu:	
při broušení na hrubo	4 až 12 m.min ⁻¹
při broušení na čisto	2 až 3 m.min ⁻¹
Přísuv v úvratí stolu na zdvih:	
při broušení na hrubo	0,015 až 0,040 mm
při broušení na čisto	0,005 až 0,001 mm
při broušení na kruhovém stole se volí obvodová rychlost stolu	10 až 40 m.min ⁻¹
Přísuv:	
broušení na hrubo	0,015 až 0,030 mm na otáčku
broušení na čisto	0,005 až 0,002 mm na otáčku

Tab. 5 Volba kotouče pro rovinné broušení čelem [21]

Broušený materiál	Jakost brousících nástrojů	
	kotouče prstencové nebo hrncové	segmenty
Ocel uhlíková měkká uhlíková kalená	A 99 63-40 J-K V A 98, A 99 63-32 I-J V	A 99 63-40 J-K V A 98, A 99 63-32 I-J V
legovaná rychlořezná měkká rychlořezná kalená	A 99 63-32 H-K V A 99 63-25 H-I V	A 99 63-32 H-K V A 99 63-25 G-I V
korozivzdorná	A 98, A 99 50-40 G-I V	A 98, A 99 50-40 I-K V
Šedá litina	C 49 80-32 I-K V	C 48 40-32 J-K V

U širšího kotouče a většího průměru se volí zrnitost hrubší a tvrdost měkkčí, u užšího kotouče se volí tvrdost poměrně vyšší.

Při broušení čelem hrncovitého nebo segmentového kotouče se volí průměr brousícího kotouče obvykle větší, než šířka broušené plochy. Brousící kotouč se na konci každého zdvihu přisouvá do záběru.

Plocha styku kotouče s obrobkem je velká, volí se proto rychlost pohybu stolu menší, než při broušení obvodem kotouče. [21]

2.2.2 Strojní časy

Broušení vnější, mezi hroty, vnitřní broušení a rovinné broušení obvodem kotouče

Potřebný čas pro uvedené způsoby broušení je dán vztahem:

$$t_{AS} = \frac{L \cdot (i + i_v)}{n \cdot f} [\text{min}] \quad (12)$$

kde $i = \frac{a}{n}$... pro broušení válcových ploch

$i = \frac{a}{h \cdot \frac{B}{f_{pr}}}$... pro rovinné broušení

L ... je délka broušené plochy, zvětšená o náběh a přeběh [mm]

B ... šířka broušené plochy u rovinného broušení [mm]

- i ... počet záběrů
- i_v ... počet vyjiskřovacích záběrů
- f ... posuv na jednu otáčku broušeného dílce [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ dílce]
 u rovinného broušení $f = f_{pr}$ [mm/zdvih , příp. $\text{mm}/2\text{zdvih}$]
 je-li příčný posuv vždy za jeden dvojjdvih (ve vzorci pro výpočet t_{AS} musí být pak $2i$)
- n ... otáčky broušeného dílce [min^{-1}], příp. počet zdvihů za minutu u rovinného broušení [min^{-1}]
- a ... přídavek na broušení [mm]
- h ... hloubka broušení [mm]
- f_{pr} ... příčný posuv u rovinného broušení [mm/zdvih], příp. [$\text{mm}/2\text{zdvih}$] [9]

Broušení bezhroté – průchozí

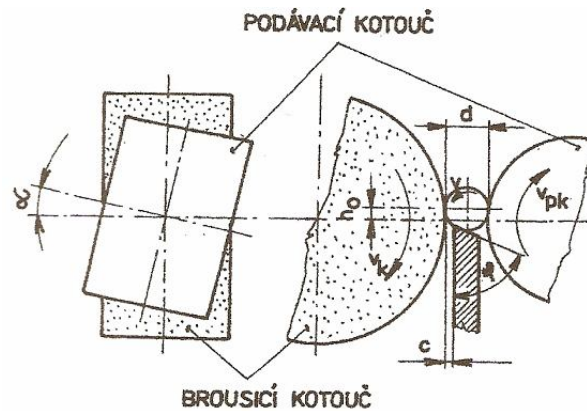
Pro výpočet t_{AS} je možno použít vzorce:

$$t_{AS} = \frac{L}{f_{Min} \cdot k} [\text{min}] \quad (13)$$

$$f_{Min} = 10^3 \cdot v_p \cdot \sin \alpha [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

- kde L ... je celková délka dílce [mm]
- f_{Min} ... podélný posuv dílce [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
- v_p ... obvodová rychlost podávacího kotouče [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
- α ... sklon osy podávacího kotouče (obr.15)
- k ... součinitel osového skluzu; volí se podle hmotnosti dílce viz. tabulka [9]

Hmotnost dílce [kg]	do 0,03	přes 0,03 do 1,00	přes 1,00 do 3,00	přes 3,00 do 10,00
Součinitel skluzu k	0,95	0,91	0,87	0,8



Obr. 15 Schéma bezhrotého broušení [9]

2.2.3 Dosahovaná přesnost a jakost povrchu

Tab. 6 Dosahované parametry přesnosti obroběných ploch pro abrazivní metody obrábění [10]

Metoda obrábění		Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
		střední	rozsah	střední	rozsah
Vnější rotační plochy	Broušení hrubování	10	9 až 11	1,6	0,8 až 3,2
	dokončování	5	5 až 6	0,4	0,2 až 0,6
	jemné	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,4
	Lapování normální	4	3 až 4	0,1	0,05 až 0,2
	jemné	2	1 až 2	0,05	0,012 až 0,05
	Superfinašování				
	dokončovací	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,4
	jemné	3	2 až 4	0,1	0,025 až 0,1
Vnitřní rotační plochy	Vnitřní broušení hrubování	9	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	dokončování	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	jemné	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
	Honování hrubování	7	6 až 8	0,4	0,2 až 0,8
	dokončování	6	5 až 7	0,2	0,1 až 0,2
	jemné	4	3 až 5	0,1	0,05 až 0,1
Lapování	dokončování	4	3 až 5	0,2	0,01 až 0,4
	jemné	3	1 až 3	0,05	0,012 až 0,05
Rovinné plochy	Broušení hrubování	10	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	dokončování	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	jemné	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
	Lapování dokončování	4	3 až 5	0,2	0,1 až 0,4
	jemné	3	1 až 3	0,05	0,012 až 0,05

2.3 Brousící nástroj

Je to řezný nástroj, který se skládá ze zrn brusiva smolených v celek pojivem. Může mít tvar kotouče, brousícího tělíska, segmentu, pásu s pružným podkladem atd. [14]

V rámci brousících nástrojů představují největší rozsah brousící kotouče. [10]

Základní tvary brousících kotoučů jsou na obr. 16, způsob jejich označování v tab. 7.

Brousící kotouče — ploché ČSN 22 4510		— hrncovitě a velkou dírou ČSN 22 4561	
— ploché Průměr 1 000 až 2 000 mm ČSN 22 4515		— mískovitě ČSN 22 4552	
— s jednostranným vybráním ČSN 22 4520		— kuželovitě ČSN 22 4560	
— na ostření vrtáků ČSN 22 4521		— na ostření nožů žacího stroje ČSN 22 4562	
— se zkošeným vybráním ČSN 22 4522		— talířovitě ČSN 22 4580	
— prstencové ČSN 22 4530		— talířovitě na broušení ozubených kol ČSN 22 4582	
— jednostranně zkošené ČSN 22 4540		— na frézy na dřevo ČSN 22 4581	
— oboustranně zkošené ČSN 22 4541		Podávací kotouče pro bezhrtá brusky ČSN 22 4524	
— zaoblené ČSN 22 4542		Řezací a drážkovací kotouče ČSN 22 4513	
— hrncovitě ČSN 22 4550		Řezací kotouče na kámen ČSN 22 4590	

Obr. 16 Základní tvary brousících kotoučů a tělísek [21]

Tab. 7 Způsob označování brousících kotoučů [21]

Tvrдость	L	velmi měkká měkká střední tvrdá velmi tvrdá zvlášť tvrdá	G, H I, J, K L, M, N, O P, Q, R, S T, U V, Z
Sloh (struktura)	8	velmi hutný hutný polohutný pórovitý velmi pórovitý zvlášť pórovitý	1, 2 3, 4 5, 6 7, 8 9, 10 11, 12, 13
Pojivo	V	keramické silikátové magnezitové šelakové pryžové umělá pryskyřice	V S O E R B
Ostatní doplňující znaky	S	speciální keramické pojivo vyztužovací složka impregnace sírou impregnace parafínem mezni pracovní obvodová rychlost elastický brousící nástroj brousící kotouče ztužené proti bočnímu namáhání	V 27 F S P C 45*) E 1 Flex

A 99 25 L 8 V 350 x 40 x 127 ČSN 22 4510

Poznámka:

*) Doplňující znak mezní pracovní obvodové rychlosti je vynechán u brousících kotoučů, jež nepřekračují 30 resp. 25 m.s⁻¹ při broušení v ruce a 35 resp. 30 m.s⁻¹ při broušení strojním.

Obchodní značky: kotouče z umělého korundu Elektrik, kotouče z karbidu křemíku Karborundum.

350 – vnější průměr (mm)

40 – šířka (mm)

127 – průměr upínacího otvoru (mm).

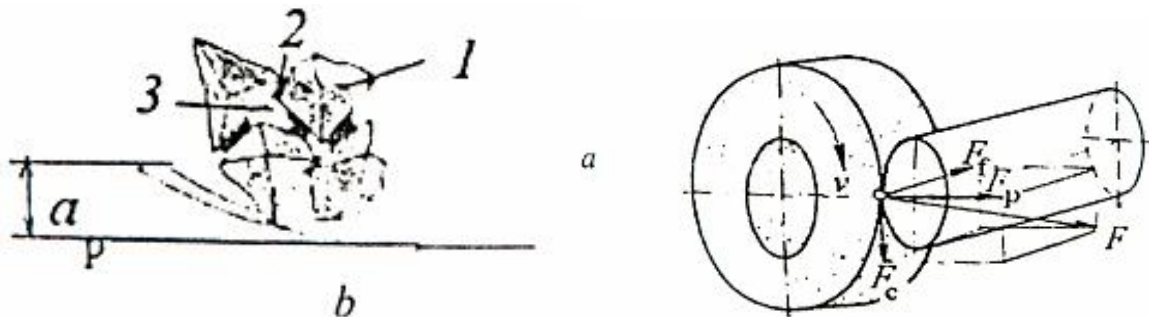
ČSN 22 4510 – číslo normy udávající tvar kotouče [21]

2.4 Řezné síly a výkon při broušení

Při broušení působí na brousící kotouč odstředivé a řezné síly. Protože řezné síly jsou vzhledem k odstředivým silám malé, při úvahách o pevnosti brousícího kotouče se zanedbávají.

Na obráběnou součástku působí výsledná síla F , která je součtem elementárních sil od jednotlivých zrn. Rozkládá se do tří složek, podle obr. 17.:

- tangenciální síla F_c ,
- radiální síla F_p ,
- axiální síla F_f .



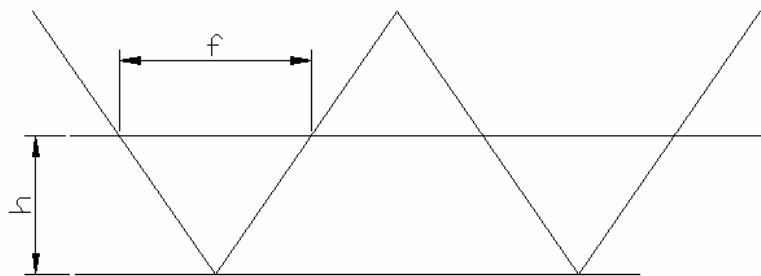
Obr. 17 Rozklad řezné síly při válcovém broušení (a), záběr jednotlivého brousícího zrna (b). 1 – brusné zrno, 2 – pojivo, 3 – póry [20]

Tyto složky se používají na výpočet:

- výkonu na vřeteně kotouče a obrobku (síla F_c),
- tuhosti soustavy stroj – obrobek – nástroj, přesnosti obrábění (síla F_p),
- výkonu na posuv (síla F_f).

Když brousící zrna mají záporné úhly čela, můžeme předpokládat, že řezná síla F_p bude vždy větší, než síla F_c . Experimentální měření potvrzují, že radiální síla F_p je o 1,5 – 3-krát větší než řezná síla F_c . Síla F_f je o dost menší než síla F_c . Přitom řezná síla při broušení je součtová síla elementárních sil, kterým působí na materiál jednotlivá brousící zrna. Přitom jednotlivé zrna zasahují do rozdílné hloubky, proto jsou elementární síly značně rozdílné.

Plocha průřezu řezu má složitý tvar, na rozdíl od obrábění nástrojem s definovanou geometrií. Proto pro výpočet bereme podstatně zjednodušené schéma profilu brousícího kotouče podle obr. 18. [20]



Obr. 18 Zjednodušená plocha průřezu řezu při broušení [20]

Řezné síly při broušení je možné určit analytickým výpočtem. Zde se vychází z určení skutečného průřezu odřezávaného kovu jedním brusným zrnem S_z , z počtu současně zabírajících zrn z , ze zvolené hloubky řezu a_p , zrnitosti a struktury kotouče.

Potom

$$S_z = h_z \cdot \frac{b}{2} \quad (14)$$

kde h_z je výpočtová hodnota hloubky odebrané vrstvy,

b – šířka řezné části zrna [1]

Řezná síla na jedno zrno

$$F_{1c} = k_b \cdot h_z \cdot \frac{b}{2} \quad (15)$$

kde k_b je měrná řezná síla při broušení. [20]

Řezná síla na obvodě brousícího kotouče F_c při z zrn v záběru bude:

$$F_c = F_{1c} \cdot z = k_b \cdot h_z \cdot \frac{b}{2} \cdot z [kp] \quad (16)$$

Hodnoty k_b kolísají v rozmezí 3500 až 20000 kp.mm⁻². Tyto hodnoty podstatně převyšují hodnoty analogických veličin při soustružení, frézování a vrtání, kde – jak víme – nepřevyšují 450 kp.mm⁻². Tyto vysoké hodnoty k_b se při broušení objasňují tím, že průřez odebraných třísek je tady velmi malý. Hloubka řezu nepřevyšuje několik mikrometrů. [1]

Velikost měrné řezné síly při broušení není konstantní, ale mění se s rychlostí brousícího kotouče a obrobku. Proto se v závislosti od těchto rychlostí mění i řezné síly F_c a F_f .

Matematickým zpracováním experimentálních údajů byla pro rotační broušení stanovena závislost

$$F_c = C_{F_c} \cdot v_s^{0,7} \cdot f^{0,7} \cdot a_p^{0,6} \quad (17)$$

kde C_{F_c} je konstanta (při broušení kalené oceli je 22, nekalené oceli 21, litiny 20)

v_s – obvodová rychlost broušené součásti, m.min⁻¹,

f – podélný posuv na otáčku, mm,

a_p – hloubka řezu (příčný posuv na jeden dvojzdvih), mm. [20]

Řeznou sílu je možné vyjádřit v závislosti od obvodové rychlosti brousícího kotouče v_k , m.s⁻¹. Pro obrábění oceli platí:

$$F_c = 25 \cdot \frac{v_s}{v_k} \cdot a_p^{0,53} \cdot f^{0,53} \quad (18)$$

Výpočtem řezné síly F_c podle uvedených vzorců lze získat jen přibližnou představu o její velikosti.

Výkon potřebný pro broušení kotoučem

$$P_k = \frac{F_c \cdot v_k}{102} [kW] \quad (19)$$

a výkon potřebný na otáčení součástky

$$P_s = \frac{F_c \cdot v_s}{60 \cdot 102} [kW] \quad (20)$$

I když jsou řezné síly při broušení malé, výkon v důsledku vysokých rychlostí kotouče je velký. Výkon potřebný na otáčení součásti P_s je v porovnání s výkonem P_k velmi malý. [1]

Závěr: Broušení je technologií, při které používáme nástroj s nedefinovanou geometrií. Jako nástroje se nejčastěji používá brousícího kotouče. V tomto nástroji jsou zrna brusiva statisticky uspořádána a jsou spojena pomocí pojiva. Kvalita obrobeného povrchu touto technologií je vysoká s vysokou přesností. Stejně jako u frézování není řezná síla konstantní. Zde se mění s rychlostí brousícího kotouče a také s rychlostí obrobku.

3 FRÉZOVÁNÍ

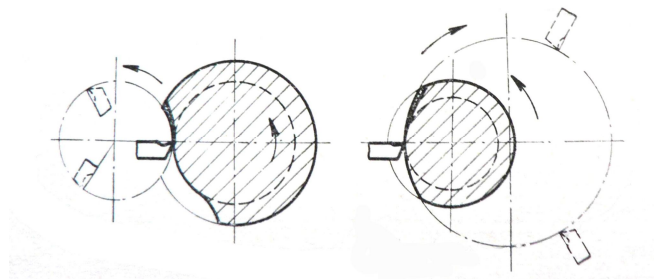
3.1 Teorie frézování

Frézování je po soustružení nejpoužívanější metoda obrábění, při kterém každý břit – zub víceklínového nástroje odebírá třísku. Nástroj – fréza vykonává hlavní pohyb, vedlejší pohyb – posuv zpravidla vykonává obrobek. Úběr materiálu při frézování je přerušovaný, řezný klín po vyjetí ze záběru se uchyluje až do nového záběru. Frézováním se vyrábí rovinné a tvarové přímkové plochy. Podle způsobu záběru frézy do materiálu obrobku rozeznáváme frézování válcové, čelní a okružovací.

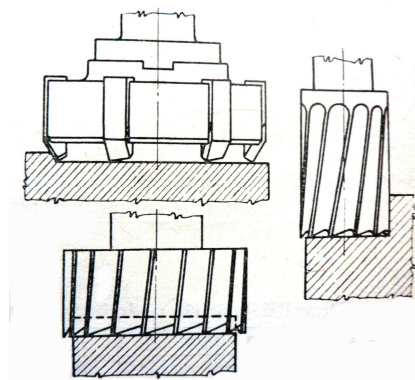
Při válcovém frézování se odebírá z obrobku tříška břity uspořádanými po obvodě frézy. Směr posuvu je kolmý k ose frézy. Výsledný řezný pohyb, tj. dráha břitu nástroje vzhledem k obrobku, je prodloužená cykloida, vytvořená otáčivým pohybem břitu nástroje a podélným, přímočarým pohybem obrobku. Podle směru posuvu obrobku vzhledem k směru otáčení frézy rozeznáváme frézování sousledné a nesousledné.

Při čelním frézování je osa frézy kolmá k frézované ploše, z níž se oddělují třísky břity na čele. Může však fréza (stopková) oddělovat i třísky břity na obvodu, případně jen na obvodu. Pak je opracovávaná plocha rovnoběžná s osou frézy a podle jejího tvaru to může být buď plocha rovinná nebo tvarová.

Při okružovacím frézování se vícebřítý nástroj (např. několikanožová hlava) otáčí vně obrobku, který se rovněž otáčí. Tím můžeme vytvořit frézováním rotační plochy válcové i tvarové. Nejčastěji se používá na výrobu závitů. [13]



Obr. 19 Okružovací frézování [10]



Obr. 20 Čelní frézování [13]

3.1.1 Sousedné frézování

Pohybuje-li se v okamžiku záběru posunová složka hlavního pohybu v témže smyslu jako posuv, jedná se o frézování sousledné.

Sledujeme-li ostří nástroje v jeho relativním pohybu vzhledem k obrobku, je to při sousledném frézování zkrácená cykloida. [5]

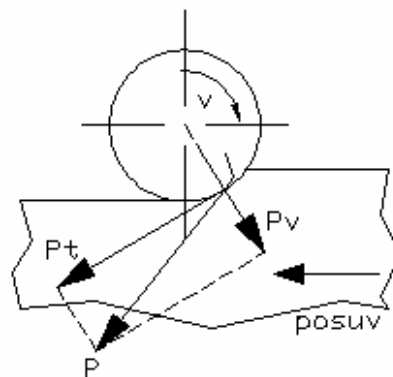
Tloušťka třísky je v tomto případě při záběru zubu maximální a zmenšuje se do nuly při výběhu zubu z materiálu. Tento způsob záběru frézy má mnoho předností před frézováním nesousledným. Výsledná řezná síla směřuje do materiálu, což umožňuje zmenšit upínací síly, zmenšuje se náchylnost frézy a frézovacího trnu ke chvění a do určité míry se i zlepšuje jakost frézované plochy. Další předností je možnost použít větších posuvů na zub při nezměněné hodnotě trvanlivosti, a tím dosáhnout vyšší produktivity frézování. Hospodárný úběr je možno při sousledném frézování zvýšit o 100% proti frézování nesouslednému.

Nevýhodou sousledného frézování je značný silový ráz při záběru každého zubu do materiálu. Dá se však odstranit použitím fréz se šikmými zuby. Sousedné frézování není vhodné pro obrábění obrobků s tvrdým a znečištěným povrchem (ocel na odlitky, odlitky se zapečeným pískem apod.). Vzhledem k většímu výkonu a posuvu musí se při sousledném frézování používat frézy s menším počtem zubů a větším stoupáním šroubovice.

Sousledně lze frézovat pouze na zvlášť k tomu upravených strojích. Při sousledném frézování působí pasivní odpor pracovního stolu v opačném směru, než složka řezné síly působící ve směru posuvu. Proto by u normálních frézek docházelo při sousledném frézování k opakovanému přerušování pohybu. Při vyjetí zubu frézy ze záběru převáží pasivní odpor pracovního stolu a jeho pohyblivého mechanismu složku řezné síly působící ve směru posu-

vu. Tím se přesune vůle matice pohybového šroubu na druhý bok závitů, což vede na zlomek vteřiny k zastavení podélného posuvu a k rázům v pohybovém mechanismu podélného posuvu frézky.

Předpokladem pro použití sousledného frézování je proto vymezení vůle v matici pohybového šroubu. To lze uskutečnit různým způsobem. Například dvěma maticemi pohybového šroubu, z nichž jedna je pevně spojena se stolem a druhá přesuvná pákovým zařízením v opačném směru působení pasivních odporů. Jiná konstrukce má dva vodící šrouby, jeden pravochoďový, druhý levochoďový. Vůli lze také vymežit hydraulickým přídatným zařízením. [16]



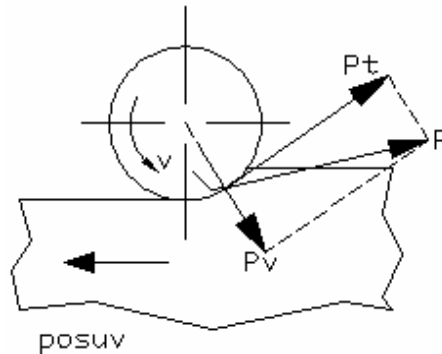
Obr. 21 Sousledné frézování [16]

3.1.2 Nesousledné frézování

Pohybuje-li se v okamžiku záběru břít proti směru posuvu, mluvíme o nesousledném frézování.

Sledujeme-li ostří nástroje v jeho relativním pohybu vzhledem k obrobku je při nesousledném frézování dráha výsledného pohybu prodloužená cykloida. [5]

Břit každého zubu frézy začíná v tomto případě odebírat materiál od minimální tloušťky, která se zvětšuje až do určitého maxima. Poněvadž ostří zubu frézy není ve skutečnosti ostrá hrana, nýbrž zaoblená ploška o poloměru 8 až 30 μm , začne břit odřezávat materiál, až tloušťka třísky dostoupí určité velikosti. Do té doby břit materiál pouze stlačuje. Tímto stlačování materiálu se jednak zhoršuje jakost obrobené plochy, jednak také se zvětšuje intenzita opotřebování břítů frézy. Nevýhodou tohoto způsobu frézování je také, že řezná síla směřuje nahoru, což má nepříznivý vliv na způsob upnutí obrobku. [16]



Obr. 22 Nesousledné frézování [16]

3.2 Technologie frézování

3.2.1 Výkon při frézování

Výkon frézování měřený objemem odfrézovaného materiálu závisí na obrobitelnosti frézovaného materiálu, na druhu frézy a na výkonu motoru frézky.

Měrný výkon U_m [cm^3/min], tj. úběr materiálu dosahovaný výkonem 1 kW, bývá v těchto hodnotách:

Tab. 8 Měrný výkon [16]

	$s_z = 0,06 \text{ mm}$		$s_z = 0,25 \text{ mm}$	
	frézy ostré	frézy tupé	frézy ostré	frézy tupé
ocel $\sim 50 \text{ kp/mm}^2$	$14 \text{ cm}^3/\text{min}$	$7,5 \text{ cm}^3/\text{min}$	$23,5 \text{ cm}^3/\text{min}$	$15 \text{ cm}^3/\text{min}$
ocel 51 až 80 kp/mm^2	$13 \text{ cm}^3/\text{min}$	$7,0 \text{ cm}^3/\text{min}$	$22 \text{ cm}^3/\text{min}$	$14 \text{ cm}^3/\text{min}$
ocel 81 až 100 kp/mm^2	$12 \text{ cm}^3/\text{min}$	$6,5 \text{ cm}^3/\text{min}$	$20 \text{ cm}^3/\text{min}$	$11 \text{ cm}^3/\text{min}$
litina 170 až 190 HB	$25 \text{ cm}^3/\text{min}$	$9,5 \text{ cm}^3/\text{min}$	$34 \text{ cm}^3/\text{min}$	$22 \text{ cm}^3/\text{min}$
litina 191 až 210 HB	$21 \text{ cm}^3/\text{min}$	$8,0 \text{ cm}^3/\text{min}$	$31 \text{ cm}^3/\text{min}$	$20,5 \text{ cm}^3/\text{min}$

Potřebný efektivní výkon motoru:

$$N = \frac{t \cdot b \cdot s_{\min}}{1000 \cdot U_m} [\text{kW}] \quad (21)$$

kde t je hloubka odfrézované vrstvy materiálu v mm

b – šířka frézované plochy v mm,

s_{\min} – posuv za minutu [16]

3.2.2 Dosahovaná přesnost a jakost povrchu

Tab. 9 Dosahovaná přesnost a jakost povrchu [16]

	IT	R_a [μm]
při frézování válcovými frézami		
hrubování do délky ploch 300mm	10 až 12	6,3 až 25,0
hrubování do délky ploch 1200mm	11 až 13	6,3 až 25,0
práce na čisto do délky ploch 300mm	9 až 11	1,6 až 6,3
práce na čisto do délky ploch 1200mm	9 až 12	1,6 až 6,3
při frézování frézovacími hlavami		
hrubování do délky ploch 300mm	10 až 13	6,3 až 25,0
hrubování do délky ploch 1200mm	11 až 13	6,3 až 25,0
práce na čisto do délky ploch 300mm	6 až 10	1,6 až 3,2
práce na čisto do délky ploch 1200mm	8 až 11	1,6 až 3,2
jemné frézování	7 až 8	0,8 až 1,6

Výkon i jakost frézované plochy se zvětšuje použitím řezných kapalin. Při použití řezných kapalin se třísky na břit nenalepují, což zlepšuje jakost obrobenej plochy.

Drsnost povrchu frézované plochy závisí na házení břitů, na velikosti posuvu s_z , na řezné rychlosti, na stupni otupení frézy a jejím průměru.

$$R_{MAX} = \frac{s_z^2}{8 \left(R \pm \frac{s_z z}{\pi} \right)} [\mu\text{m}] \quad (22)$$

kde R je poloměr frézy [mm]

z – počet zubů frézy

Znaménko + ve jmenovateli platí pro frézování nesousledné, znaménko – pro frézování sousledné. [16]

3.2.3 Řezné podmínky a strojní čas

Určování řezných podmínek je složitější než u obrábění s jednobitovými nástroji. Řezná rychlost se volí podle obráběného materiálu, druhu materiálu nástroje, poměrné délky záběru (proti celkové otáčce stroje) a podle druhu chlazení. Musí se přihlížet i k průměru frézy, počtu břitů, hloubce záběru a k posuvu.

Řezný čas:

$$t_s = \frac{L}{s_{\min}} [\text{min}] \quad (23)$$

kde L je celková dráha frézy i s přeběhy, které jsou při čelním frézování o něco větší než

poloměr frézy; při obvodovém frézování o něco menší, podle hloubky řezu;

s_{\min} - posuv za minutu. [5]

3.3 Frézy

Řezný nástroj, užívaných na frézkách, se nazývá frézou. Těleso frézy je obvykle válcové, otáčí se kolem své osy a má na obvodě stejnosměrně rozdělené zuby, zabírající postupně do materiálu.

Frézy se rozdělují podle těchto vlastností:

1. Frézy jsou buď celistvé (zuby tvoří s tělesem frézy jeden celek) nebo s vyměnitelnými zuby (zuby jsou vsazeny do příslušných zářezů nebo otvorů v tělese frézy, v nichž jsou vhodným mechanickým způsobem připevněny).

2. Frézy mají břity s ostřím buď přímým (rovnoběžným s osou otáčení frézy) nebo šroubovým, (břity jsou skloněny pod úhlem, nazvaným úhlem sklonu ostří zuby).

3. Frézy bývají buď: a) nástrčné (pro upnutí na trn)
- b) se stopkou (pro vsunutí do konce větvena frézky)
 - c) se zapuštěnou dosedací plochou
4. Frézy jsou buď pravořezné nebo levořezné a s pravou nebo levou šroubovicí.

Směr řezu zjistíme, hledíme-li na frézu, upnutou ve frézce, směrem od větvena. Pravořezná fréza vyžaduje otáčení větvena ve směru hodinových ručiček, levořezná fréza proti směru hodinových ručiček. Podle toho mluvíme pak o pravém nebo levém řezu.

Směr stoupání šroubovice určíme, hledíme-li na zuby nebo zubové drážky frézy od větvena. Stoupají-li zuby doprava, je směr šroubovice pravý, stoupají-li doleva je směr šroubovice levý. [7]

3.3.1 Typy fréz

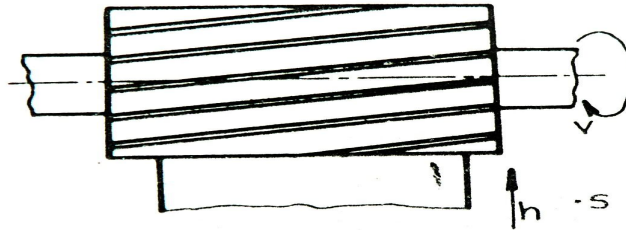
Válcové frézy

Jejich zuby jsou uspořádány pouze na obvodu válcové plochy. Vyrábějí se v nejrůznějších průměrech a šířkách.

Válcové frézy se rozdělují do těchto skupin:

- a) Lehké válcové frézy. Nepřesahuje-li jejich šířka 20 mm, jsou jejich zuby rovné (rovnoběžné s osou frézy). Frézy širší, než 20 mm mívají šroubové ozubení o úhlu sklonu ostří zubu asi 25°. Těchto fréz se užívá pro lehké řezy. Nejsou však dost vhodné pro běžné frézovací práce, neboť mají příliš mnoho zubů a nedostatečný prostor pro vývin třísky.
- b) Těžké válcové frézy. Zhotovují se pouze o větších šířkách. Jejich zuby mají větší úhel sklonu ostří zubu než 25°, avšak nepřesahující asi 45°. Těžké válcové frézy mají méně zubů než lehké válcové frézy a nazývají se též „frézami s hrubými zuby“. Těžké válcové frézy jsou určeny pro velký odběr materiálu. Se zřetelem na menší počet zubů umožňuje širší zubní mezera dostatečný prostor pro vývin třísky.

Válcové frézy s úhlem sklonu ostří zubu 45° až 60° nebo ještě větším, nazýváme šroubovými frézami. Šroubová fréza se stopkou se velmi dobře osvědčuje při kopírovacím frézování.



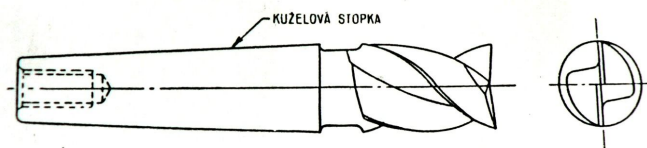
Obr. 23 Válcová fréza se zuby ve šroubovici [13]

Čelní válcové frézy

Tyto frézy mají bříty nejen na obvodu válcové plochy, ale také na jedné čelní ploše. Kromě nástrčných válcových čelních fréz, mají všechny druhy těchto fréz stopku, sloužící jednak k upnutí a jednak k unášení frézy. Užívá se jich pro frézování ploch, profilů a k zapouštění.

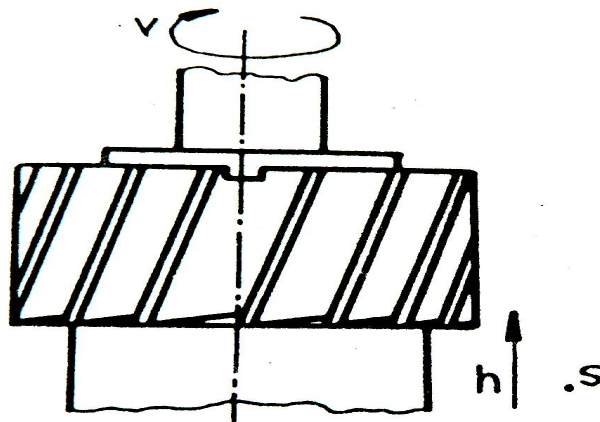
Rozdělují se na:

- Čelní válcové frézy se stopkou
- Čelní válcové frézy dvoubřité (drážkovací)



Obr. 24 Normální dvoubřítá drážkovací fréza [7]

- a) Nástrčné čelní válcové frézy mají zuby na obvodu válcové plochy a na jedné čelní ploše. Nemají stopku, nýbrž vrtání. Nástrčných čelních válcových fréz se s výhodou užívá k plošnému frézování dvou navzájem kolmých povrchů.

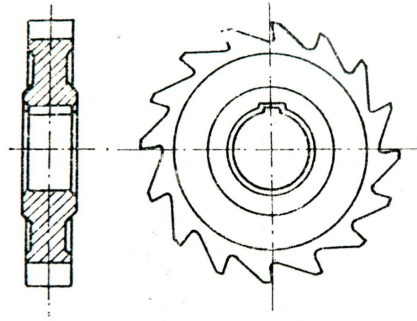


Obr. 25 Nástrčná čelně – válcová fréza [13]

Kotoučové frézy

Kotoučové frézy mají zuby na obvodu válcové plochy a také na jednom nebo na obou čelech. Nasazují se na trn. Tyto frézy se vyrábějí v několika druzích:

- a) Frézy jednostranné mají břity na obvodu válcové plochy a na jednom čele. Hodí se pro plošné frézování v těch případech, kde je zapotřebí, aby řezala pouze jedna čelní strana frézy.
- b) Frézy oboustranné jsou poměrně úzké a mají zuby na obvodu válcové plochy a na obou čelech. Užívá se jich při frézování drážek a pro různá plošná frézování.
- c) Dělené nastavitelné frézy se západkovými zuby se skládají ze dvou oboustranných kotoučových fréz, tvořících ve skutečnosti jednu frézu se západkovými zuby. Zmíněné frézy jsou zvláště výhodné pro přesné frézování mělkých nebo středně hlubokých drážek.
- d) Frézy se střídavými zuby jsou úzké kotoučové frézy, jejichž zuby mají pravidelně vystřídáný směr šroubovice. Aby se ulehčil chod frézy a zabránilo se poškození předmětu, jsou boky zubů vybrány a pouze za ostřím je ponechána malá část zubu v jeho plné tloušťce. Frézy se střídavými zuby jsou výhodné pro řezání klínových a jiných drážek.



Obr. 26 Kotoučová fréza [7]

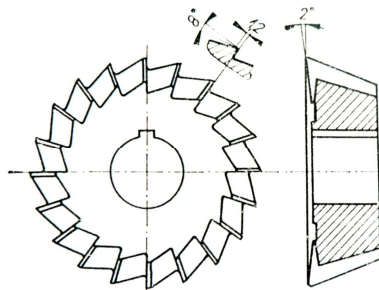
Okružní pily na kov

Okružní pily na kov jsou tenké kotoučové frézy se slabě vybranými (vydutými) bočními stěnami k ulehčení chodu a k zabránění nadměrného tření nástroje o kov. Mají obvykle větší počet zubů než normální kotoučové frézy stejného průměru. Užívá se jich k rozřezávání a k frézování hlubokých, úzkých drážek.

Úhlové frézy

Tyto frézy mají tvar kuželového kotouče a užívá se jich k frézování rybin, zářezů, drážek, jemných drážek, zubů výstružníků apod. Zhotovují se ve dvou provedeních:

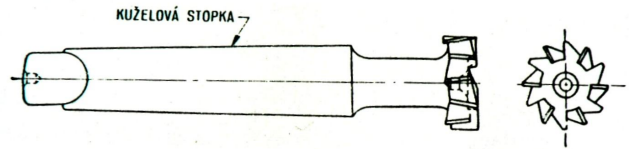
- a) Jednostranné úhlové frézy. Zubové břity jsou skloněny kuželovitě na jednu stranu. Zubové břity jsou většinou provedeny také na čele frézy.
- b) Oboustranné úhlové frézy. Zubové břity jsou skloněny kuželovitě na obě strany ve tvaru „V“.



Obr. 27 Úhlová fréza [7]

Frézy na drážky T

Jsou to speciální frézy se stopkou, výhodné pro frézování rozšířeného dna drážek T. Tyto frézy mají přímé nebo střídavé zuby na obvodě a na obou čelech.



Obr. 28 Normální fréza na drážky T [7]

Frézy na drážky pro Woodruffovy klíny

Frézy na drážky pro Woodruffovy klíny jsou malé drážkovací frézy, podobného provedení jako válcové nebo kotoučové frézy. Frézy menších velikostí mají přímé zuby pouze na obvodě a pro ulehčení řezu jsou v bocích vybrány. Frézy větších průměrů mají střídavé zuby jak na obvodě, tak i na čelech.

Tvarové frézy

Tvarové frézy mají obvykle zakřivený zubní obrys a užívá se jich k frézování rozličných tvarů. Rozdělují se do dvou skupin:

- a) Jednoduché tvarové frézy mají nepravidelný tvar nebo profil zubů, jinak jsou však podobné válcovým frézám. Zhotovují se buď jako celistvé, nebo s vyměnitelnými zuby. Jejich použití se omezuje pouze na frézování jednoduchých tvarů, neboť je obtížné dodržet při jejich ostření stálou přesnost profilu.
- b) Podsoustružené tvarové frézy se zhotovují jako celistvé. Zuby podsoustružených tvarových fréz mají buď radiální čelo (úhel čela = 0°), nebo čelo skloněné v určitém úhlu (úhel čela). Dále mívají zuby buď přímé (rovnoběžné s osu otáčení), nebo šroubovitě. Úhel sklonu ostří zubu bývá obvykle 5° až 10° .

Pro běžnou produkční práci, kde jakost ofrézovaného povrchu má podružný význam, užívá se fréz s přímými zuby. Frézy se šroubovitými zuby dávají zase lepší jakost povrchu a řezou hladce, takže se jimi dá frézovat při vyšších rychlostech.

Letmé frézy

Letná fréza je jednobřítý řezný nástroj, zasazený do trnu. Břit může být vybroušen do libovolného tvaru. Letmých fréz se převážně užívá v pokusných dílnách a nářadovněch.

Frézy s vyměnitelnými zuby

Téměř veškeré druhy fréz se dají upravit pro vsazené zuby (nože). Tyto frézy se zhotovují s válcovým tělesem z levné oceli. Do tohoto tělesa se vyříznou zářezy nebo drážky pro vsazení zubů (nožů). Toto provedení umožňuje rychlou výměnu zubů, jakož i jejich seřízení po opotřebení. Dále to poskytuje možnost použití zubů z rozličných druhů materiálu, jako je např. z rychlořezné oceli nebo ze slinutého karbidu. Výhoda fréz s vyměnitelnými zuby tkví také v tom, že není třeba vyřadit celou frézu, jestliže se náhodou nějaký zub zlomí nebo jinak poškodí. Rozličné druhy fréz s vsazenými zuby patří do těchto skupin:

- a) Čelní frézy (frézovací hlavy) jsou nejužívanějšími frézami s vyměnitelnými zuby a jsou zvláště účinné při plošném frézování širokých povrchů. Pokud tyto frézy nepřesahují průměr 150 mm, nasazují se na kuželové stopky a nazývají se nástrčnými čelními válcovými frézami s vyměnitelnými zuby. Je-li jejich průměr větší, než 150 mm, upínají se přímo na konec vřetena frézky a nazývají se prostě frézovacími hlavami.
- b) Válcové frézy s vyměnitelnými zuby jsou dlouhé válcové frézy velkého průměru. Zuby jsou vsazeny do šroubových drážek ve válcovém tělese frézy a jsou upevněny klíny a šrouby. Aby se usnadnilo lámání třísky na menší částičky, bývají řezné hrany zubů opatřeny vruby (zářezy).

Čelní frézy (frézovací hlavy) celistvé, s destičkami natvrdo připájenými

Čelní frézy (frézovací hlavy) zhotovují se také tím způsobem, že se na zuby frézy, jež jsou v jednom celku s tělesem, připájí natvrdo řezné destičky. Takové frézy mívají obvykle

menší počet zubů než frézy z rychlořezné oceli. Takto konstruovaná fréza je pak tužší a má lepší řezný účinek. [7]

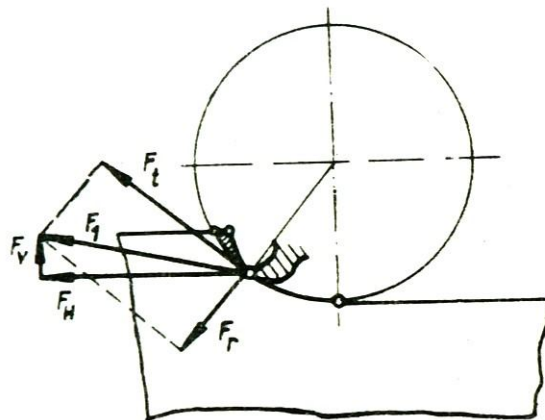
3.4 Řezné síly při frézování

Při frézování se mění průřez třísky, čím se mění i řezné síly. Velikost řezných sil závisí také na počtu zubů v záběru a na nich okamžité plochy. Výsledný řezný odpor je potom součtem řezných odporů projevující se na jednotlivých zubech. [3]

3.4.1 Síly působící na zubu frézy

Řezné síly, kterými působí zub válcové frézy na materiál, si můžeme představit jako dvě síly:

1. Obvodová síla F_c , která je tangenciální k dráze pohybu řezné hrany po kružnici.
2. Radiální síla F_{cN} , která směřuje ze středu této kružnice



Obr. 29 Schéma rozkladu sil působící na zub válcové frézy [3]

Výslednice těchto sil F_a se rozkládá na dvě složky – horizontální sílu F_f a vertikální sílu F_{fN} . Pokud má fréza šikmé nebo šroubové zuby, působí na zubu v osové směru ještě síla F_o , která se silou F_a dává výslednou sílu F .

Podobný rozklad sil můžeme udělat i pro práci s čelními frézami, a to jak při symetrickém, tak i nesymetrickém frézování.

Nejdůležitější řeznou silou je obvodová síla F_c , která vykonává práci na odřezání třísky. Podle ní se vypočítá jednak efektivní výkon P_c , stejně se počítají uzly mechanismu hlavního pohybu. Osová síly F_O působí tlakem na axiální ložiska vřetena frézovacího stroje a na upínací přípravky pro obrobek a zatěžuje matici příčného posuvu a vedení stroje.

Radiální síla F_{cN} působí tlakem na ložiska vřetena – vytváří doplňující moment tření. Přitom ohýbá trn frézy a je důležitým faktorem při výpočtu složitěho namáhání (ohyb od radiální síly a krut od obvodové síly).

Horizontální složka F_f zatěžuje mechanismus posuvu frézovacího stroje. Podle její velikosti se dimenzují uzly posunového mechanismu a elementy upínání obrobku a přípravků.

Vertikální složka F_{fN} namáhá konzolu frézovacího stroje ohybem. Boční síla F_x vyvolává tření v podélném vedení stolu.

Uvedené složky řezných sil se nejčastěji stanovují pokusně dynamometry speciální konstrukce.

3.4.2 Obvodová síla při válcovém frézování

Poměr obvodové síly k průřezu odebrané vrstvy je měrný řezný odpor. Hloubka odebrané vrstvy se po délce frézování mění, takže se bude měnit i měrný řezný odpor. Okamžitá hodnota měrného řezného odporu bude:

$$k_f = C_\omega C_1 h_x^k \quad (24)$$

kde C_1 je konstanta, která vyjadřuje všeobecné podmínky frézování,

C_ω – koeficient, který vyjadřuje vliv úhlu sklonu šroubovice,

h_x – hloubka třísky v dané poloze zubu,

k – exponent, který závisí na vlastnostech obráběného materiálu, opotřebení zubu frézy a na řezné kapalině (obvykle je -0,2 až -0,4)

Pokud má fréza rovné zuby

$$F_c = k_f S_x$$

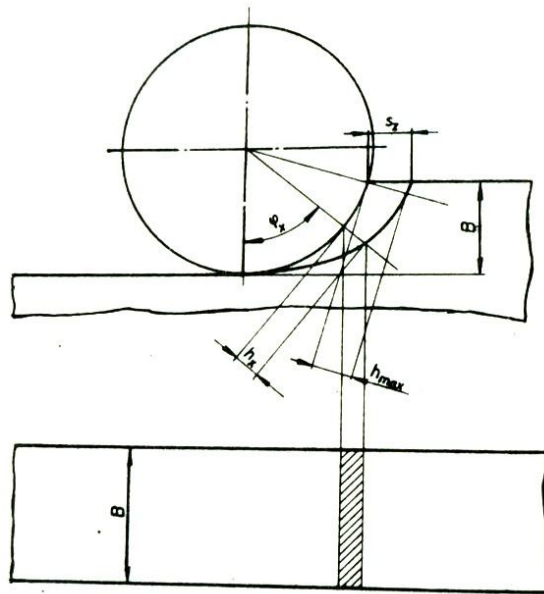
kde $S_x = h_x B$ je průřez třísky při dané poloze zubu, přičemž

$$h_x = s_z \sin \varphi_x$$

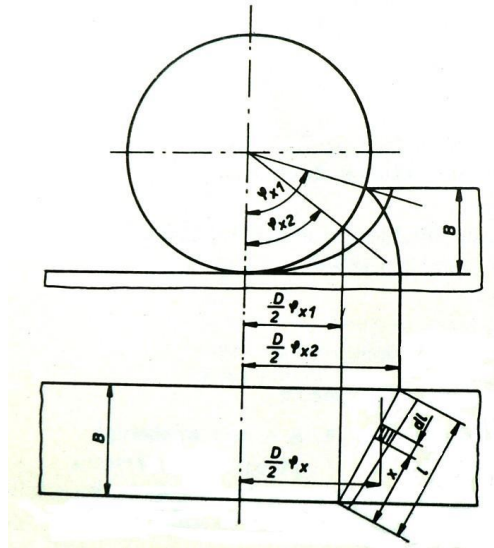
$$F_c = k_f S_x = C_\omega C_1 h_x^k h_x B = C_\omega C_1 h_x^{k+1} B = C_\omega C_1 (s_z \sin \varphi_x)^{k+1} B \quad (25)$$

Jestliže má fréza šroubové zuby, hodnota hloubky třísky se mění podle polohy jednotlivých bodů řezné hrany zubu. Obvodovou sílu můžeme stanovit integrováním. Na zubu frézy vymezíme nekonečně malý element dl . Síla na tomto elementu, kolmá na řeznou hranu, bude:

$$dF' = k_f h_x dl$$



Obr. 30 Schéma změny hloubky odebrané vrstvy na délce oblouku při frézování [3]



Obr. 31 Schéma pro výpočet obvodové síly při válcovém frézování [3]

avšak

$$dl = \frac{D}{2} d\varphi_x \frac{1}{\sin \omega}$$

Průmět síly dF' do směru obvodové síly je:

$$dF_c = dF' \cos \omega$$

a po dosazení

$$dF_c = \frac{D}{2} k_f h_x \cot g \omega d\varphi_x = \frac{D}{2} C_\omega C_1 s_z^{k+1} \sin^{k+1} \varphi_x \cot g \omega d\varphi_x$$

Úplnou hodnotu síly na zubu frézy je možné vyčíslit integrováním dF_t v hranicích úhlů pracovní části řezné hrany

$$F_c = \frac{D}{2} C_\omega C_1 s_z^{k+1} \cot g \omega \int_{\varphi_{x1}}^{\varphi_{x2}} \sin^{k+1} \varphi_x d\varphi_x \quad (26)$$

Podle poznatků o integraci trigonometrických funkcí

$$\int_{\varphi_{x1}}^{\varphi_{x2}} \sin^{k+1} \varphi_x d\varphi_x = \cos^k \frac{\varphi_0}{2} \frac{2^{k+2}}{k+2} \left(\sin^{k+2} \frac{\varphi_{x2}}{2} - \sin^{k+2} \frac{\varphi_{x1}}{2} \right)$$

kde φ_0 je velikost úhlu, který je mezi integračními intervaly.

Pokud k je záporné a malé ($k = -0,2 \div -0,4$) a úhel $\varphi_0/2$ je také poměrně malý, můžeme předpokládat, že

$$\cos^k \frac{\varphi_0}{2} \cong 1$$

Potom vzorec pro výpočet okamžité hodnoty obvodové síly na zubu frézy bude mít tvar

$$F_c = \frac{2^{k+2}}{k+2} \frac{D}{2} C_\omega C_1 s_z^{k+1} \cot g \omega \left(\sin^{k+2} \frac{\varphi_{x2}}{2} - \sin^{k+2} \frac{\varphi_{x1}}{2} \right) \quad (27)$$

Pokud je v záběru víc zubů, vzorec pro celkovou obvodovou sílu na fréze bude:

$$F_c = \frac{2^{k+2}}{k+2} \frac{D}{2} C_\omega C_1 s_z^{k+1} \cot g \omega \sum \left(\sin^{k+2} \frac{\varphi_{x2}}{2} - \sin^{k+2} \frac{\varphi_{x1}}{2} \right) \quad (28)$$

Vzorec pro kroutící momenty bude mít tvar

$$M = \frac{D}{2} \sum F_c [kp.mm] \quad (29)$$

a pro výkon na řezání

$$P_c = \frac{\sum F_c v_c}{102.60} [KW] \quad (30)$$

Rovnice pro výpočet je možné zjednodušit. Pro zjednodušení dostaneme strukturu rovnic pro výpočet obvodové síly a výkonu. Tvar těchto rovnic (při počtu zubů frézy z) je pro celkovou obvodovou sílu

$$F_c = C_{Fc} B_{S_z}^{y_{Ft}} t^{x_{Ft}} z D^{-q_{Fc}} [kp] \quad (31)$$

pro řezný výkon

$$P_c = C_c n B S_z^{y_{Pc}} t^{x_{Pc}} z D^{q_{Pc}} [kW] \quad (32)$$

Struktura rovnic pro obvodovou sílu a výkon je podobná i pro jiné druhy fréz – kromě tvarových. To má potom vzorec pro výpočet výkonu odlišnou strukturu.

Rovnice pro výpočet obvodové síly a výkonu pro čelní frézování se liší od rovnic pro výpočet těchto veličin při válcovém frézování tím, že obvodová síla a výkon se v závislosti od šířky frézování lineárně nemění, takže [3]

$$F_c = C_{Fc} B^{z_{Fc}} t^{x_{Fc}} s_z^{y_{Fc}} z D^{-q_{Fc}} [kp] \quad (33)$$

$$P_c = C_p B^{z_{Pc}} t^{x_{Pc}} s_z^{y_{Pc}} z D^{q_{Pc}} n [kW] \quad (34)$$

Závěr: Frézování je dynamickou technologií, kterou můžeme vyrábět rovinné, tvarové a válcové plochy. Rozeznáváme zde dva základní způsoby: frézování sousledné a frézování nesousledné. Frézování sousledné je výhodnější, z hlediska upínacích sil, kvality obrobeného povrchu a také vyšší produktivity. Při frézování můžeme dosáhnout přesnosti obrobené ploch IT 7 až 8 s drsností 0,8 až 1,6 [μm]. Řezná síla při frézování není konstantní, ale mění se s průřezem třísky.

4 OBROBITELNOST, ŘEZIVOST NÁSTROJE

4.1 Obrobitelnost

Obrobitelnost je technologická vlastnost daného materiálu, která charakterizuje jeho vhodnost k obrábění. Zahrnuje vliv mechanických a fyzikálních vlastností materiálu, chemického složení, tepelného zpracování, struktury a způsoby výroby polotovaru na kvalitativní, kvantitativní a ekonomické výsledky procesu řezání.

Obrobitelnost nelze vztáhnout jen k samotnému materiálu, protože závisí i na způsobu obrábění a řezných podmínkách. Teoretický pojem obrobitelnosti nelze tedy odloučit od pojmu řezivost nástroje, protože konečný ekonomický, energetický a kvalitativní výsledek obrábění závisí mimo uvedené charakteristiky materiálu obrobku také na fyzikálních vlastnostech břitu nástroje. [10]

Podle způsobu a rozsahu hodnocení rozlišujeme absolutní, relativní a komplexní vyjádření obrobitelnosti. Absolutní obrobitelnost je vyjádřena absolutní hodnotou příslušného ukazatele obrobitelnosti. Při relativním hodnocení obrobitelnosti porovnáváme vlastnosti určitého materiálu s vlastnostmi základního nebo etalonového materiálu a vztah vyjádříme převodovým číslem nebo indexem obrobitelnosti. Při komplexním hodnocení obrobitelnosti se snažíme jedním číselným ukazatelem vyjádřit několik technologických vlastností zkoumaného materiálu.

Materiál je tím lépe obrobitelný,

- čím vyšší je řezná rychlost při dané trvanlivosti břitu,
- čím větší je trvanlivost břitu při dané řezné rychlosti,
- čím menší je řezný odpor, měrný odpor a řezná práce, tj. čím je větší objemový součinitel odebraných třísek na 1 kW výkonu za 1 minutu,
- čím nižší je teplota řezání a čím je menší řezné teplo,
- čím menší je drsnost obrobeného povrchu,
- čím vyšší je přesnost obrobku.

Absolutní obrobiteľnosť môžeme rozlíšiť na tieto druhy:

- kinetická obrobiteľnosť,
- dynamická obrobiteľnosť,
- mikrogeometrická obrobiteľnosť.

Kinetická obrobiteľnosť

je stanovená na základe otupení rezného břitú.

Dynamická obrobiteľnosť

Rezná síla, krútiaci moment alebo výkon potrebný k úberu obráběného materiálu a rezné teplo jsou mírou dynamické obrobiteľnosti.

Mikrogeometrická obrobiteľnosť

Jakost obrobeného povrchu a přesnost lineárních rozměru závisí na mikrogeometrické obrobiteľnosti. [12]

4.1.1 Obrobiteľnosť ocelí

Chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti, struktura obráběného materiálu a způsob výroby polotovaru podstatně ovlivňují obrobiteľnosť. [1]

4.1.1.1 Vliv chemického složení

Jednotlivé prvky ovlivňují obrobiteľnosť oceli takto:

Uhlík. Se zvyšováním obsahu uhlíku se kinetická obrobiteľnosť při obráběni slinutými karbidy, keramickými reznými materiály a při hrubování rychlořeznými nástroji zhoršuje. Při obráběni na čisto nástroji z rychlořezné oceli se kinetická obrobiteľnosť se zvyšujícím obsahem uhlíku nejdříve zlepšuje, potom se zhoršuje.

Mikrogeometrická obrobiteľnosť s přírůstkem uhlíku se jednoznačně zlepšuje.

Dynamická obrobiteľnosť ocelí se zvětšením obsahu uhlíku zhoršuje.

Mangan. Působení manganu na obrobiteľnosť závisí podstatně na obsahu uhlíku. Se zvyšujícím obsahem manganu se kinetická i dynamická obrobiteľnosť zhoršuje, mikrogeometrická obrobiteľnosť se ale zlepšuje. Velmi špatná je kinetická obrobiteľnosť oceli s obsahem manganu asi 12 %.

Chrom má analogický vliv jako mangan.

Křemík. Se zvyšujícím obsahem křemíku roste brusný účinek obráběné oceli a kinetická obrobiteľnosť se zhoršuje.

Fosfor. Zapříčiňuje lámání třísky. Podstatně zlepšuje obrobiteľnosť při obsahu 0,1 %. Snižuje plasticitu oceli.

Síra. Podobně jako mangan a fosfor snižuje plasticitu oceli. S manganem tvoří sulfid (MnS), který zlepšuje obrobiteľnosť.

Olovo. Obsahem olova do 0,2 % nemění původní mechanické vlastnosti oceli, ale velmi zlepšuje kinetickou obrobiteľnosť. Ulehčuje vznik krátké křehké třísky.

Molybden, vanad, chrom (ve větším množství). Tyto prvky zvyšují pevnost a houževnatost ocelí, a proto zhoršují kinetickou a dynamickou obrobiteľnosť. Mikrogeometrickou obrobiteľnosť zlepšují.

Plyny. Často se ukazuje, že oceli s tím samým chemickým složením a strukturou mají jinou obrobiteľnosť. Analýza tohoto jevu ukázala, že příčina je v jiném obsahu plynu a kyslíčků resp. v jejich nerovnoměrném rozdělení v materiálu. [1]

4.1.1.2 Vliv mikrostruktury

Mikrostruktura ovlivňuje všechny kritéria obrobiteľnosti ocelí, ale ne stejnou měrou.

Kinetická obrobiteľnosť. Z porovnání hospodárných řezných rychlostí vyplývá, že nejlepší kinetickou obrobiteľnosť dostaneme při řezání oceli s feritickou strukturou. Podle zhoršující se kinetické obrobiteľnosti je možné sestavit toto pořadí dalších strukturních složek: jemný globulární perlit, hrubý globulární perlit, lamelární perlit, sorbitický perlit, sorbit, troostický sorbit.

Dynamická obrobiteľnosť je nejlepší, když je struktura složená z feritu a jemného lamelárního perlitu. Při hrubším lamelárním perlitu jsou řezné síly o něco větší. Ještě větší jsou při globulárním perlitu, sorbitu a největší hodnotu dosahují při rovnoměrně rozloženým jemným

globulárním perlitu. Relativní dynamická obrobitelnost kolísá v závislosti na struktuře oceli v mezích $\pm 20\%$.

Mikrogeometrická obrobitelnost. Při hodnocení vlivu struktury na mikrogeometrickou obrobitelnost je třeba rozlišovat tři pásma řezných rychlostí, používaných v praxi pro nástroje z rychlořezné oceli. Jsou to nízké (3 až 15 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$), střední (15 až 60 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) a vysoké (40 až 130 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$). V závislosti na struktuře největší drsnost dostáváme při lamelárním perlitu a feritu. Přitom, čím vyšší je obsah uhlíku, tím užší je pásmo kritických řezných rychlostí s nepřijatelně velkou drsností povrchu.

S klesajícím obsahem volného feritu klesá maximální výška nerovností. Proto s rostoucím obsahem uhlíku a legujících prvků se drsnost povrchu zlepšuje.

V některých případech se drsnost povrchu výrazně zhoršuje v oblasti malých řezných rychlostí. Na řezné ploše vznikají příčné trhliny. [1]

4.1.2 Obrobitelnost plastů

Podobně jako kovy, mají i plasty odlišné fyzikální a mechanické vlastnosti, a proto mají odlišnou obrobitelnost.

Všechny plasty mají špatnou vodivost. V procesu řezání je proto potřeba se postarat o odvádění tepla řezání.

Řezná hrana nástroje má být ostrá a lapovaná. Doporučují se použít malé, nebo i záporné úhly čela (0 až 20°) a poměrně velké úhly hřbetu (10 až 30°). Jako řezný materiál se doporučuje použít rychlořeznou ocel nebo slinuté karbidy, které mají velkou odolnost proti opotřebení.

Většina litých plastů se obrábí lehko. Jejich obrobitelnost závisí na druhu plniva. Látky s dřevěným, textilním nebo bavlněným plnivem se obrábí lehce, látky s minerálním plnivem se obrábí hůř.

Termoplasty mají většinou vyhovující obrobitelnost. Při práci s tupým nástrojem můžou změkknout nebo se rozetřít řezným nástrojem, některé druhy zase praskají.

Vrstvené plasty se obrábí zpravidla dobře. Mají i dostatečnou pevnost. Těžkosti působí obrábění sklotextilových, azbestových, azbestovo – bavlněných plastů. Je třeba je obrábět slinutým karbidem nebo diamantem.

Posuvy při obrábění plastů jsou poměrně malé – 0,05 až 0,25 mm.ot⁻¹. Větší posuvy se používají jen vyjimečně. Řezné rychlosti jsou v mezích 100 až 200 m.min⁻¹. [4]

4.2 Řezivost nástroje

Aby mohl řezný nástroj oddělovat v procesu řezání z obráběného materiálu třísku vnikáním jeho řezného klínu do obrobku, musí splňovat tyto požadavky:

- mít vyšší tvrdost než obráběný materiál,
- být odolný proti mechanickému a tepelnému namáhání,
- tvar břitu musí být jednoznačně určen veličinami (úhly a rozměry) tak, aby byl podle nich vyrobitelný a dal se po otupení obnovit ostřením. Soustava prvků, jímž je definována břitová část nástroje, se nazývá geometrie břitu. [8]

Závěr: Obrobitelnost je vlastnost daného materiálu a říká nám, jak dobře se bude daný materiál obrábět. Obrobitelnost můžeme rozdělit na několik druhů – absolutní, relativní a komplexní. Absolutní obrobitelnost se dále dělí na dynamickou, mikrogeometrickou a kinetickou. Obrobitelnost materiálů závisí na mnoha faktorech jako jsou mechanické vlastnosti, tepelné zpracování aj. Ovšem pojem obrobitelnost nelze odloučit od řezivosti nástroje.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

1. Studium obrobiteľnosti
2. Měření řezných sil při broušení a frézování
3. Měření drsnosti Ra
4. Vyhodnocení naměřených veličin
5. Grafické zpracování

6 BROUŠENÍ, FRÉZOVÁNÍ, MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU A MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL

6.1 Bruska BRH 20.03 F

K broušení vzorků bylo použito brusky BRH 20.03 F. Brusky BRH 20.00 představují stavebnicovou řadu rovinných brusek s horizontálním vřetenem a pravoúhlým stolem. Jsou určeny pro broušení rovinných a tvarových ploch součástek z ocelí, litiny a ostatních kovových materiálů, u kterých se vyžaduje dosažení vysoké přesnosti a kvality zpracování. Brouší se převážně obvodem brousícího kotouče. Broušené součástky podle svého tvaru mohou být upínané na elektromagnetickou desku a nebo přímo, či prostřednictvím vhodných upínačů na upínací plochu stolu.

Brusky 20.03 F pracují v uzavřeném automatickém pracovním cyklu. K řízení automatického cyklu je bruska vybavena číslicovou indikací NV 300E firmy FAGOR, která slouží k odměření dráhy svislého a příčného posuvu při práci v ručním režimu a řízení svislého posuvu v automatickém pracovním cyklu. [22]

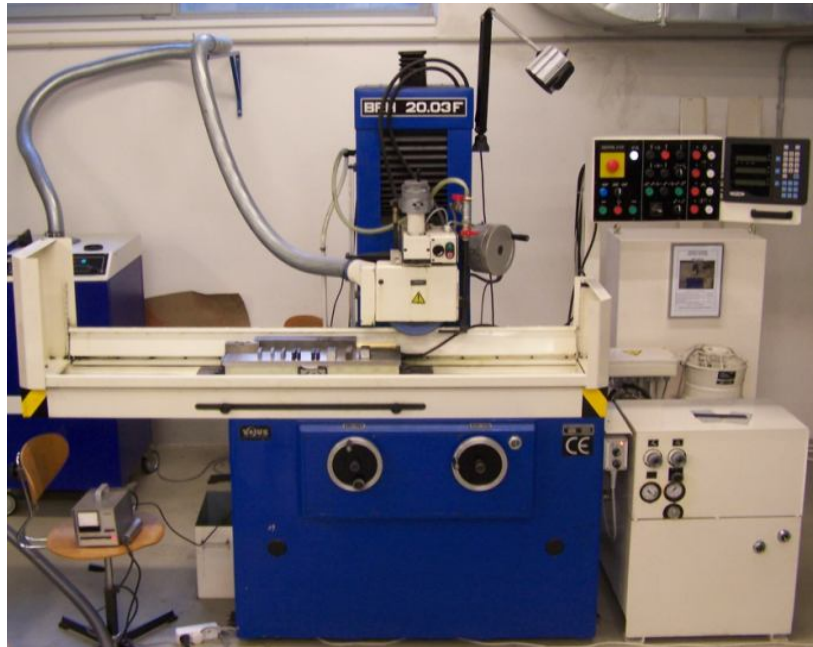
Technické parametry:

Pracovní plocha stolu: 200x630 mm

Rozměry brousícího kotouče: $\varnothing 250 \times 20 - 50 \times 76$ mm

Rychlost stolu plynule regulovatelná: 1-30 m.min⁻¹

Otáčky brousícího vřetena: 2550 min⁻¹



Obr. 32 Bruska BRH 20.03 F

6.2 Frézka FC 16 CNC

Frézování bylo prováděno na CNC frézovacím stroji FC 16 CNC. Tento obráběcí stroj je stolová frézka, která je řízená přes počítač. Pro frézování je možné užít nástroje s válcovou upínací stopkou do $\varnothing 10$ mm a nástrčné s upínacím průměrem 16 mm. Možno použít nástroje jak z rychlořezné oceli tak i ze slinutých karbidů, kvalitní a pečlivě naostřené. Běžně můžeme obrábět hliníkové slitiny a polymerní materiály vhodné pro třískové obrábění. Při užití šedé litiny (42 2425) je nutno uvažovat pouze o dokončovacím obrábění s malými úběry materiálu. [23]

Technické parametry:

Maximální otáčky vřetena: 3600 min^{-1}

Pracovní zdvih X, Y, Z: $300 \times 160 \times 350 \text{ mm}$

Posuv plynule X, Y, Z: $4\text{-}3000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Programovací jednotka $0,001 \text{ mm}$



Obr. 33 Frézka FC 16 CNC

6.3 Měření drsnosti povrchu

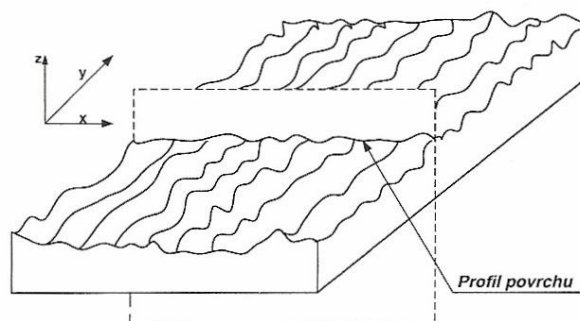
6.3.1 Charakter povrchu

Souřadnicový systém, ve kterém jsou definované parametry charakteru povrchu je pravoúhlý souřadnicový systém, ve kterém osy vytváří pravotočivý kartézský systém, kde:

osa X leží ve směru snímání a je shodná se střední čarou profilu,

osa Y nominálně leží taktéž na skutečném povrchu,

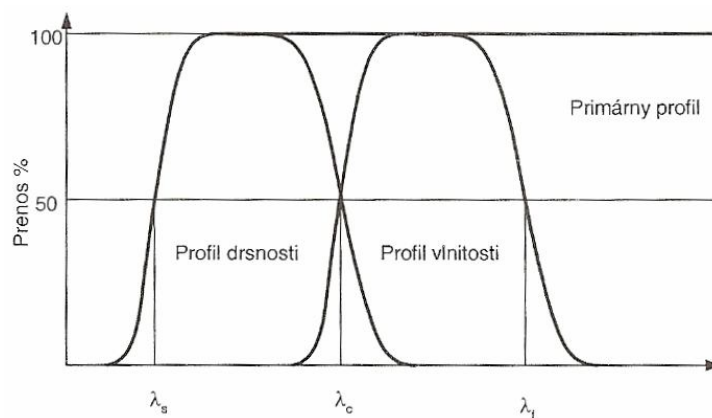
osa Z směřuje z materiálu ven do okolního prostředí



Obr. 34 Profil povrchu [15]

Filtr profilu – filtr, který rozděluje profily na profily s dlouhými vlnovými délkami a krátkými vlnovými délkami (STN EN ISO 11562:2000).

V přístrojích se používají tři filtry na měření parametru drsnosti, vlnitosti a primárního profilu. Všechny mají stejnou charakteristiku přenosu, definovanou ISO 11 562, ale různé mezní (základní) vlnové délky. [15]



Obr. 35 Přenosové charakteristiky pro profil drsnosti, vlnitosti a primární profil [15]

Střední čáry

Střední čára profilu drsnosti – čára profilu, ve které jsou potlačené dlouhé vlnové délky filtrem profilu λ_c .

Střední čára profilu vlnitosti – čára profilu, ve které jsou potlačené dlouhé vlnové délky filtrem profilu λ_f .

Střední čára primárního profilu – čára jmenovitého tvaru, určená z primárního profilu metodou nejmenších čtverců.

Základní délka l_p , l_r , l_w je délka ve směru osy X, která se používá na identifikaci nepravidelností, které charakterizují profil, který se hodnotí. Základní délky pro drsnost l_r a vlnitost profilu l_w jsou číselně stejné vlnovým délkám filtrů profilů λ_c a λ_f . Základní délka primárního profilu l_p se rovná vyhodnocované délce.

Vyhodnocovaná délka l_n – délka ve směru osy X, na které se vyhodnocuje profil. Vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu nebo víc základních délek. [15]

Geometrické parametry

P-parametr – parametr vypočítaný z primárního profilu

R-parametr – parametr vypočítaný z profilu drsnosti

W-parametr – parametr vypočítaný z profilu vlnitosti

Výstupek profilu – část profilu spojující jeho dva sousední průřezíky se střední čarou profilu, uvažovaná směrem ven z materiálu (z materiálu do okolního prostředí).

Prohlubenina profilu – část profilu spojující jeho dva sousední průřezíky se střední čarou profilu, uvažovaná směrem do materiálu (z okolního prostředí do materiálu).

Poloha osy X je totožná s polohou střední čáry profilu v rozsahu základní délky.

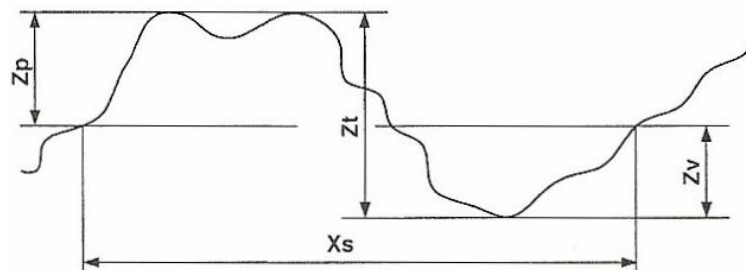
Hodnota souřadnice – $Z(x)$ – výška profilu v libovolné poloze x .

Výška výstupku profilu – Z_p – vzdálenost mezi střední čarou profilu a nejvyšším bodem výstupku profilu.

Hloubka prohlubeniny profilu – Z_v – vzdálenost mezi střední čarou profilu a nejnižším bodem prohlubeniny profilu.

Výška prvku profilu – Z_t – součet výšky výstupku a hloubky prohlubeniny prvku profilu.

Šířka prvku profilu – X_s – délka úseku střední čáry profilu obsahující prvek profilu. [15]



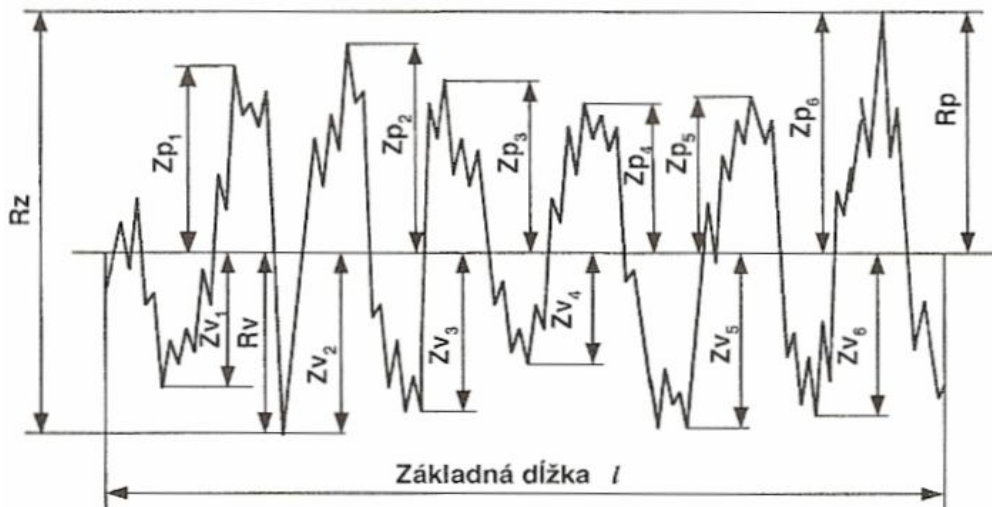
Obr. 36 Prvek profilu [15]

Amplitudové parametry (výstupek a prohloubenina):

výška největšího výstupku profilu – P_p , R_p , W_p největší výška výstupku profilu Z_p v rozsahu základní délky

hloubka největší prohlubeniny profilu – P_v , R_v , W_v největší hloubka prohlubeniny profilu Z_v v rozsahu základní délky

největší výška profilu – P_z , R_z , W_z součet největší výšky profilu Z_p a největší prohlubeniny profilu Z_v v rozsahu základní délky [15]



Obr. 37 Amplitudové parametry – R_p , R_v , R_z (výstupek a prohloubenina) [15]

Amplitudové parametry:

střední aritmetická úchylka posuzovaného profilu P_a , R_a , W_a – střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu $Z(x)$ v rozsahu základní délky,

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (35)$$

pro $l = l_p$, l_r nebo l_w

střední kvadratická úchylka posuzovaného profilu Pq, Rq, Wq – střední kvadratická hodnota odchylek profilu $Z(x)$ v rozsahu základní délky,

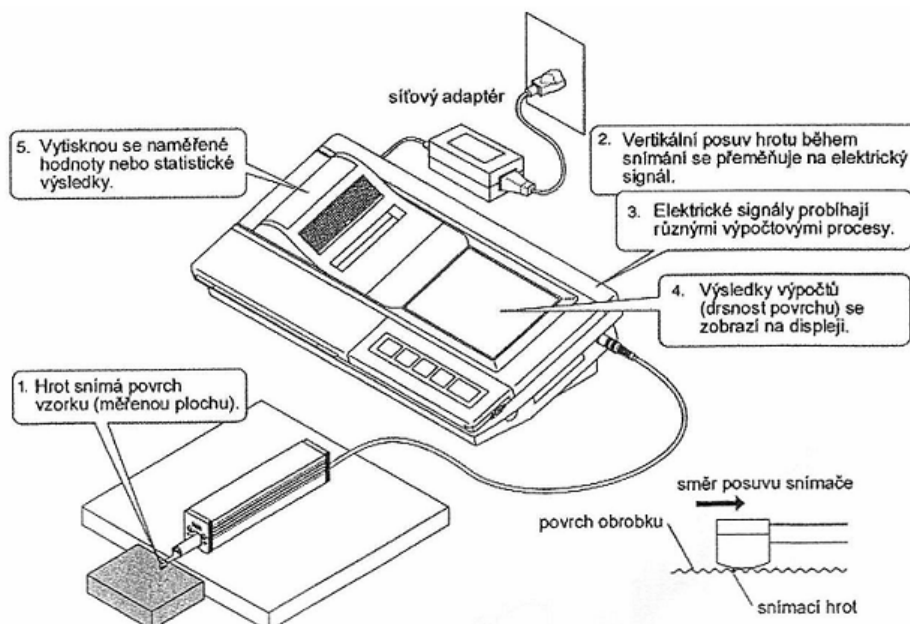
$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^2 dx} \quad (36)$$

pro $l = l_p, l_r$ nebo l_w [15]

6.3.2 MITUTOYO SJ - 301

Měření drsnosti povrchu bylo prováděno na přístroji MITUTOYO SJ – 301. Tento měřicí přístroj je určen na měření v dílenském prostředí. Svým snímacím hrotem dokáže měřit strukturu povrchu a charakterizovat ji za pomoci řady parametrů podle různých národních a mezinárodních norem. Výsledky měření se zobrazí digitálně a graficky na speciální na dotek citlivé ovládací obrazovce a pomocí vestavěné tiskárny se mohou vytisknout.

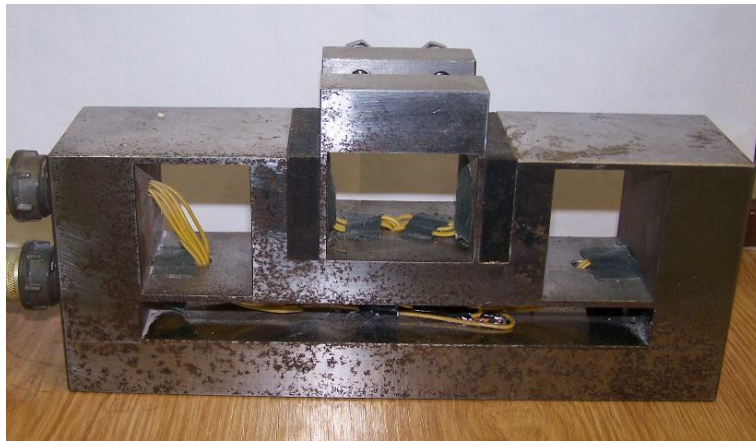
Snímací hrot tohoto přístroje zaznamenává i nejjemnější nepravidelnosti povrchu vzorku. Drsnost povrchu se vypočítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravidelnosti povrchu. Poloha snímacího hrotu vůči obrobku musí být zajištěna tak, aby posuv měření byl rovnoběžný s povrchem obrobku. [24]



Obr. 38 Přístroj na měření drsnosti povrchu – MITUTOYO SJ – 301 [24]

6.4 Měření řezných sil

Měření řezných sil při broušení a frézování bylo prováděno na dvousložkovém tenzometrickém dynamometru. Toto zařízení bylo upevněno na pracovní stůl brusky (frézky), na něj byly upnuty materiály určené k obrábění. Dynamometr byl pomocí kabelů připojen na měřicí systém Conmes Spider a ten propojen s počítačem, kde docházelo k zápisu naměřených dat.



Obr. 39 Dvousložkový tenzometrický dynamometr

7 OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY

7.1 Kovové materiály

7.1.1 Ocel 12 050

Oceli konstrukční třídy 12 jsou oceli ušlechtilé uhlíkové. Prakticky jsou rozděleny na oceli určené k cementování, k zušlechťování a pro povrchové kalení. [6]

Ocel 12 050 obsahuje 0,42 až 0,50 % C, dále obsahuje 0,50 až 0,80 % Mn, 0,17 až 0,37 % Si, 0,25 % Cr. Tato ocel se používá na větší ozubená kola, čepy, vřetena soustruhů, šrouby, hřídele, ojnice, klikové hřídele čerpadel, lisů parních strojů, vrtací tyče apod. [26]

7.1.2 Ocel 14 109

Oceli třídy 14 jsou oceli legované chromem, popř. ještě manganem a křemíkem. Mají nízký obsah C a až 1,3 % Cr. Používáme je na značně namáhané součásti motorových vozidel, všechny druhy ozubených kol, vačkové hřídele aj.

Ocel 14 109 patří do skupiny ocelí na valivá ložiska. Obsahují asi 1,0 % C, 0,8 až 1,6 % Cr a asi 1 % Mn pro zvýšení prokalitelnosti. Vyznačují se vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebení a vysokou pevností v tlaku. [6]

7.1.3 Ocel 16 420

Oceli třídy 16 jsou oceli legované niklem v množství od 1,0 do 5,0 %. Samotné oceli niklové ale nepoužíváme. Nikl je zde obsažen v kombinaci s chromem. Jsou dobře prokalitelné, některé až do průměru 140 mm. Dosahujeme u nich také vysoké meze kluzu a vysoké pevnosti při dostatečné houževnatosti. [6]

Ocel 16 420 obsahuje 0,14 % C, 0,27 % Si, 0,75 % Cr a 3,45 % Ni. Ocel Ni-Cr k cementování. Tvárnost za tepla dobrá, v žíhaném stavu dobře obrobitelná. Vhodná na velmi namáhané strojní součásti, určené k cementování s vysokou pevností a houževnatostí v jádře, např. hřídele, drážkové hřídele, ozubená kola. [25]

7.1.4 Ocel 17 027

Oceli třídy 17 jsou oceli konstrukční ušlechtilé, se zvláštními vlastnostmi. Podle vlastností dělíme oceli třídy 17 na korozivzdorné, žáruvzdorné, žárovevné a speciální. [6]

Ocel 17 027 je ocel korozivzdorná, chromová. Ocel je kalitelná, dobře tvárná za tepla a dobře obrobitelná. Užívá se jí v zušlechtěném stavu na součásti a armatury, pracující v prostředí páry, vody a kapalin, které nejsou podstatně agresivnější než voda, např. lopatky oběžných kol kompresorů, ventilové kroužky, písty, sedla, šrouby a matice. Oceli se nedoporučuje používat ve stavu žíhaném, v němž má nižší korozní odolnost. Svařitelnost obtížná. [25]

7.1.5 Ocel 19 436

Oceli třídy 19 jsou oceli nástrojové a dělí se na 2 skupiny – nástrojové oceli uhlíkové a na nástrojové oceli slitinové.

Ocel 19 436 patří do skupiny nástrojových ocelí slitinových – chromových. Obsahuje 1,80 až 2,05 % C, dále 0,20 až 0,45 % Mn, 0,20 až 0,45 % Si a 11,0 až 12,5 % Cr.

Vlastnosti této oceli jsou následující: dobrá řezivost, velmi vysoká pevnost v tlaku, nízká houževnatost, dobrá stálost rozměru při tepelném zpracování. Tato ocel se používá na vysoce namáhané a tvarově složité nástroje pro stříhání za studena, nástroje pro tváření, na řezné nástroje např. protahovací či protlačovací trny, nože, frézy pro menší řezné rychlosti atd. [26]

7.1.6 Dural

Dural je slitina slitina hliníku (93,7 %), mědi (4,3 %), hořčíku (1,4 %) a manganu (0,6 %). Dural je lehký, pevný (pevnost se zvyšuje tepelným opracováním a zušlechtováním), nepružný, velmi tuhý. Snadno se obrábí; spojuje se svařováním v ochranné atmosféře nebo lepením. Nedostatkem duralových slitin je neschopnost tlumit otřesy a pohlcovat rázy.

Dural se často používá v letectví nebo ve zdravotnictví (ortopedické hole, chodítka a jiné pomůcky). [27]

7.1.7 Měď

Čistá měď je kov červené barvy o měrné hmotnosti $8,9 \text{ g.cm}^{-3}$, tavná teplota je $1083 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro výbornou elektrickou a tepelnou vodivost a tvárnost za studena i za tepla je důležitým konstrukčním materiálem v elektrotechnice, tepelné technice, potravinářském a chemickém průmyslu. Přítomnost nečistot zhoršuje její vlastnosti.

Použití mědi je rozsáhlé. Asi 15 % její výroby se spotřebuje na stavbu zařízení potravinářského a chemického průmyslu a ve všeobecném strojírenství, zbytek na tvářené výrobky, jako jsou dráty, tyče, plechy, pásy, trubky a jen v malé míře na výrobu odlitků. [8]

7.1.8 Titan

K přednostem titanu a jeho slitin patří zejména nízká měrná hmotnost ($4,5 \text{ g.cm}^{-3}$ pro titan), vysoká tavná teplota ($1668 \text{ }^\circ\text{C}$ pro titan), vysoká měrná pevnost srovnatelná, případně i vyšší, s měrnou pevností ocelí i za teplot, kdy méně hmotné slitiny hořčíku nebo hliníku nemohou být použity (450 až $600 \text{ }^\circ\text{C}$). Významná je možnost konstrukčního použití i za teplot pod bodem mrazu a vysoká odolnost proti korozi. Nedostatkem titanu a slitin titanu jsou vysoké náklady na jejich výrobu a zpracování, vyplývající z obtížného obrábění, z nutnosti nákladného tavení a odlévání ve vakuu nebo v ochranné atmosféře argonu.

Titan jako konstrukční materiál se používá hlavně v chemickém, papírenském a textilním průmyslu. Zdravotní nezávadnost titanu je dovoluje jeho použití v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, v lékařství pro chirurgické nástroje, šrouby, protézy, v dentální technice pro zubní implantáty. Nízká měrná hmotnost spolu se značnou pevností je žádanou vlastností zejména v letectví, v raketové technice, v dopravě i jiných oborech. [18]

7.2 Polymery

7.2.1 Polyethylen (PE)

Vyrábí se polymerací ethylenu řadou technologických postupů. Rozdíly ve struktuře jednotlivých typů se nejvíce odrážejí v hustotě polymeru – proto se PE dělí na polyethylen o nízké hustotě – LDPE (low density polyethylene) a polyethylen o vysoké hustotě – HDPE (high density polyethylene).

Všechny typy PE mají vysokou krystaliniku. Tepelná odolnost není příliš vysoká – teplota tání se pohybuje v rozmezí 105 až 136 °C; zato vyniká mrazuvzdorností. PE má vysokou houževnatost a tažnost, je velmi dobře stálý vůči většině kyselin a zásad. Zcela odolává vodě. Obecně lze říci, že lineární HDPE má vyšší tuhost a pevnost, než rozvětvený LDPE.

PE se dodává ve formě různých polotovarů – fólií, desek, profilů apod. Pro dobré elektroizolační vlastnosti nachází PE použití v elektrotechnice (kabely apod.), dále jako protikorozní ochrana kovů, fólie v obalové technice a ve stavebnictví, k výrobě potrubí, hadiček a profilovaných materiálů. [2]

7.2.2 Polyamid (PA)

Typické polyamidy jsou v tuhém stavu ze 30 až 50 % krystalické a neprůhledné. Mechanické vlastnosti jsou závislé na typu PA, molekulové hmotnosti a obsahu vody. [2]

PA jsou pevné a houževnaté. Mají vysokou odolnost proti opotřebení a dobře tlumí rázy a chvění. Odolávají teplotám do 80 °C. Jsou porušovány kyselinami. Vysokou pevnost (200 N/mm²) a dobrou rozměrovou stabilitu má polyamid plněný skleněnými vlákny.

Z polyamidů se vyrábějí kluzná ložiska a ozubená kola pro provoz bez mazání, šrouby, pojistné matice, řemenice, kladky, kliky, závěsy, nerozbitné hračky. Rozšířené použití polyamidů je na vlákna od jemných textilií a rybářských vlasců až po struny. [6]

7.2.3 Polykarbonát (PC)

PC jsou transparentní s propustností světla až 85 %. Jsou dobře rozpustné v některých rozpouštědlech. Vynikají vysokou rázovou houževnatostí i za velmi nízkých teplot, dobrými elektroizolačními vlastnostmi, odolností proti UV-záření a malou nasákavostí. [2]

Polykarbonát je pevná, nerozbitná hmota, odolná do 120 °C. Hodí se na nerozbitné nádoby, kryty přístrojů a domácích strojů, injekční stříkačky, nehořlavé krabice pro filmy, kryty svorkovnic. Pro součásti více namáhané za vyšších teplot se plní skleněnými vlákny. Z polykarbonátu se vyrábějí také elektroizolační fólie pro použití za vyšší teploty. [6]

7.2.4 Polytetrafluorethylen (PTFE)

PTFE je obchodně nejdůležitějším fluoroplastem. PTFE je z velké části krystalický (93 až 97 %). Je nehořlavý a zdravotně nezávadný. Rozkládat se začíná až při asi 400 °C.

Vyazuje vynikající mrazuvzdornost, fólie jsou ohebné ještě při $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je extrémně odolný vůči povětrnostním vlivům.

PTFE je materiál používaný pro součásti potrubí, těsnění, čerpadel, jako antikorozi ochrany kovů apod. [2]

7.2.5 Polyoxymethylen (POM)

Pevný, tuhý, mimořádně houževnatý a rázuvzdorný, průhledný, odolný slabým kyselinám, benzínu, oleji, teplotě do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, neodolá zásadám a aromatickým uhlovodíkům; křehne při $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$. [11]

Používá se pro různé strojní části, např. nemazaná ozubená kola, vačky, kluzná ložiska, kladky, ventily a kohouty, šrouby a matice, součásti domácích a kancelářských strojů, tělesa čerpadel. Pro použití při větším namáháním se plní skleněnými vlákny. [6]

7.2.6 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid je jedním z nejdůležitějších termoplastů vůbec a výrobky z něj se používají prakticky ve všech průmyslových odvětvích. Připravuje se polymerací vinylchloridu. V průmyslu se používá způsob polymerace radikálovým mechanismem s využití technologií tzv. suspenzní, emulzní nebo blokové polymerace. Stupeň krystalinity je zde nízký (3 až 10 %). PVC začíná měknout kolem $85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Zpracovává se buď jako neměkčený na tvrdé výrobky ve formě tyčí, trubek, desek a jiného profilovaného materiálu, nebo s přísadou změkčovadel jako tzv. měkčený PVC na širokou škálu výrobků ve formě folií, hadic, měkkých profilů a past. [2]

8 BROUŠENÍ

Při broušení bylo použito tři brousících kotoučů, a sice A 99 K 80 9 V, A 99 K 80 13 V o rozměrech $\varnothing 250 \times 10 \times 76$ mm a kotouče A 99 60 J 12 V o rozměrech $\varnothing 250 \times 25 \times 76$ mm.

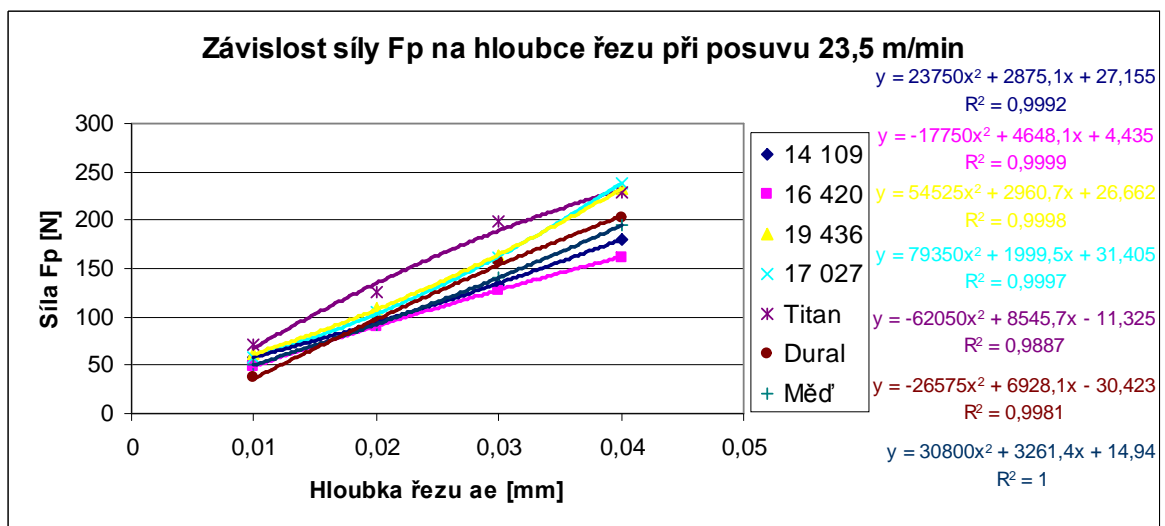
Celkem bylo broušeno 13 materiálů – 7 kovů a 6 polymerů. Rozměry obráběných materiálů byly $50 \times 50 \times 20$ mm, jen u ocelí 14 109, 16 420 a 19 436 byla velikost vzorků $50 \times 50 \times 10$ mm a u titanu byly rozměry $18 \times 50 \times 50$ mm.

Při broušení se měnila rychlost posuvu v hodnotách: 7 m/min, 12,5 m/min, 16,5 m/min a 23,5 m/min. Pro každou rychlost posuvu se brousilo ve 4 hloubkách řezu: 0,01 mm, 0,02 mm, 0,03 mm a 0,04 mm. Otáčky brousícího kotouče byly konstantní o velikosti 2550 min^{-1} , obrábění probíhalo bez chlazení.

Vyhodnocovaly se velikosti axiální řezné síly F_p a tangenciální řezné síly F_c v závislosti na hloubce řezu a rychlosti posuvu. Dále se při rychlosti posuvu 23,5 m/min a hloubce řezu 0,04 mm měřila drsnost povrchu obrobeného materiálu.

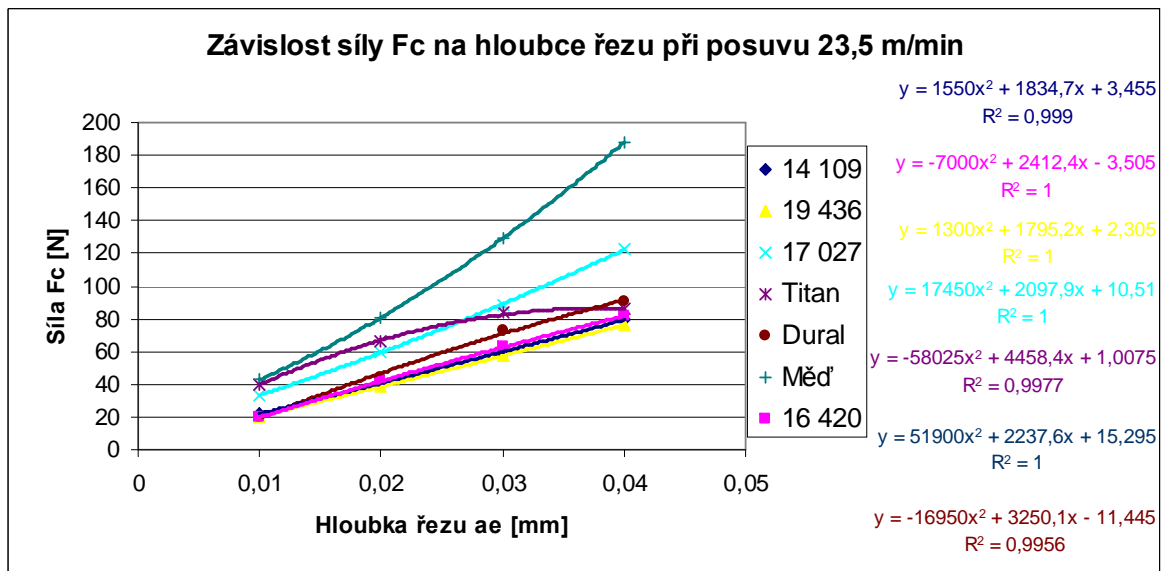
8.1 Broušení – kotouč A 99 K 80 9 V

8.1.1 Vliv hloubky řezu na řezné síly u kovů



Obr. 40 Závislost síly F_p na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

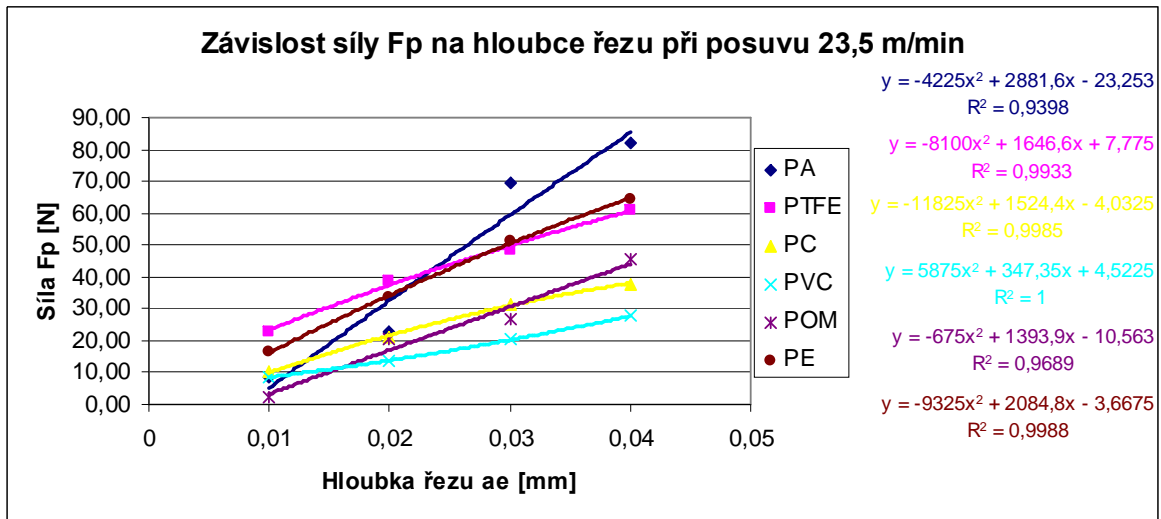
Z obr. 40 vyplývá, že s rostoucí hloubkou řezu roste axiální síla F_p , tzn. čím větší úběr materiálu, tím vyšší axiální síla F_p . Téměř v celém rozsahu hloubky řezu, byly naměřeny nejvyšší velikosti síly, ze všech kovových materiálů, u titanu a naopak nejnižší velikosti síly F_p vykazoval dural v nižších hloubkách řezu, ve vyšších pak ocel 16 420.



Obr. 41 Závislost síly F_c na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

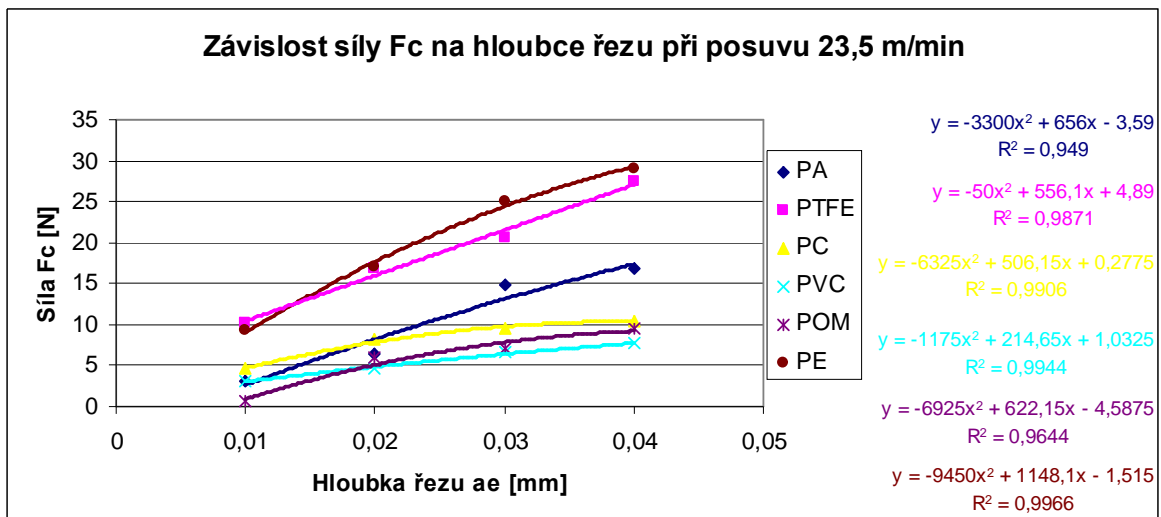
Z obr. 41 je zřejmý růst síly F_c v závislosti na hloubce řezu u všech kovových materiálů, tzn. čím větší úběr materiálu, tím vyšší tangenciální síla F_c . Nejvyšší velikosti této síly vykazovala měď, naopak nejnižší byly naměřeny u oceli 19 436.

8.1.2 Vliv hloubky řezu na řezné síly u polymerů



Obr. 42 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

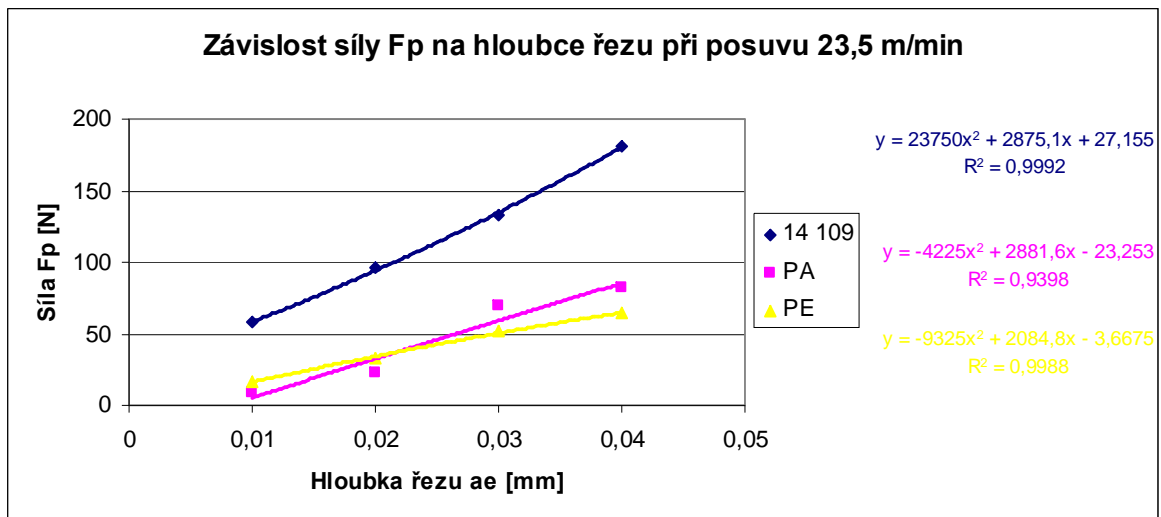
Ve všech případech závislosti síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min můžeme vidět rostoucí průběh síly Fp. Při menší hloubce řezu vykazoval PTFE nejvyšší síly Fp, přibližně od hloubky řezu 0,025 mm pak PA. Nejnižší velikosti síly Fp byly naměřeny u POM v menších hloubkách řezu, ve vyšších pak PVC.



Obr. 43 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

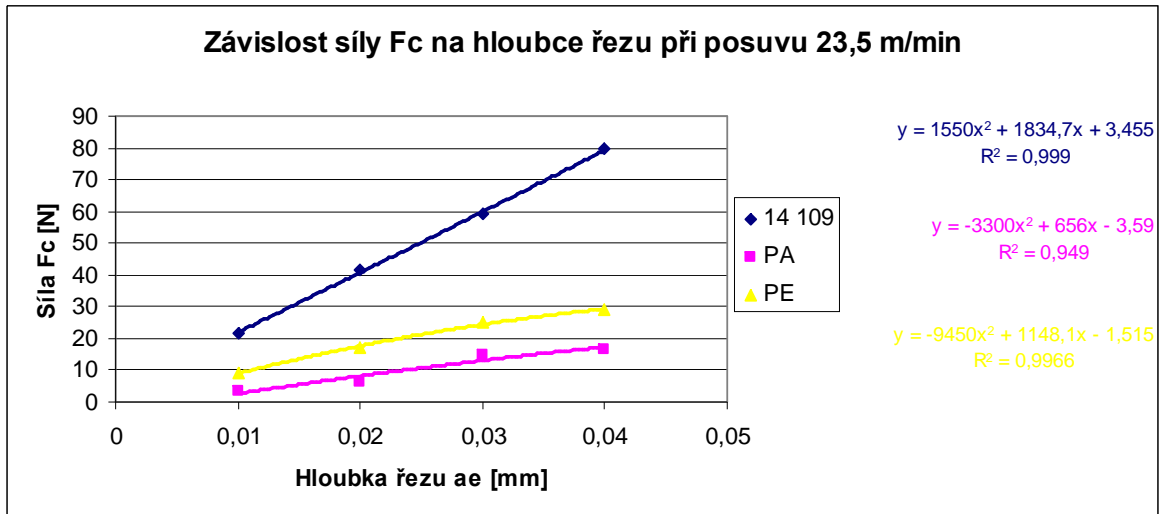
Z obr. 43 je patrný růst síly F_c u všech polymerních materiálů v závislosti na hloubce řezu. V tomto případě, téměř ve všech hloubkách řezu, byly nejvyšší hodnoty síly F_c naměřeny u PE, přibližně do hloubky řezu 0,015 mm vykazoval nejvyšší velikosti síly F_c PTFE. Nejnížší velikosti síly F_c byly naměřeny u POM do hloubky řezu přibližně 0,02 mm, odtud nejnížší hodnoty síly F_c vykazoval PVC.

8.1.3 Vliv hloubky řezu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů



Obr. 44 Závislost síly F_p na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

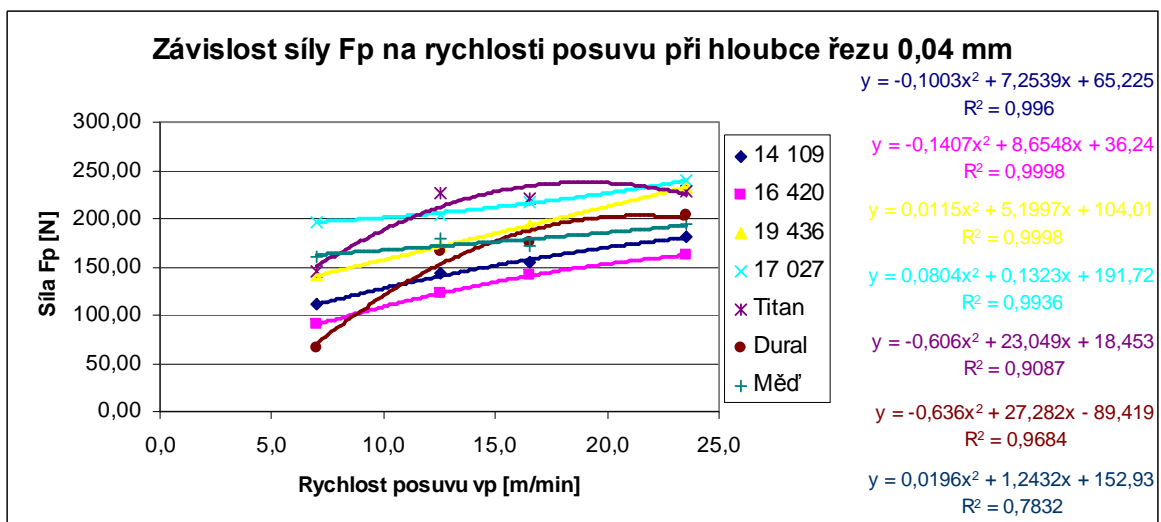
Z obr. 44 je patrný růst hodnot síly F_p u všech materiálů. Dále je zřejmé, že nejvyšší hodnoty síly F_p vykazovala ocel 14 109. U PA byly naměřeny nejnižší hodnoty této síly do hloubky řezu přibližně 0,02 mm, odtud pak nejnižší hodnoty síly F_p vykazoval PE.



Obr. 45 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

Při porovnání oceli 14 109 s PA a PE je vidět, že po celé hloubce řezu se zvyšují hodnoty síly Fc. Nejvyšší síly byly naměřeny u oceli 14 109 a naopak nejnižší u PA.

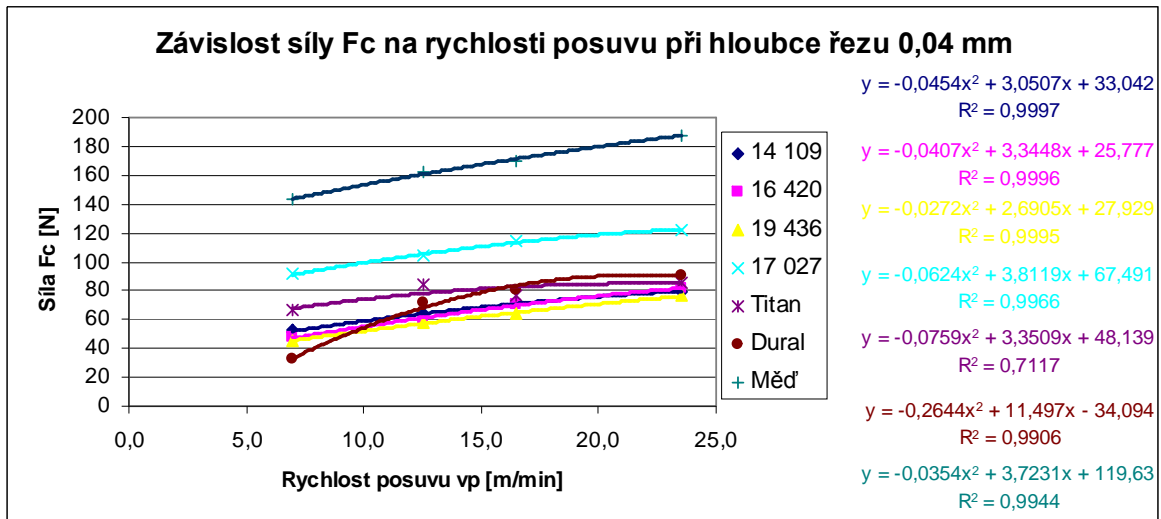
8.1.4 Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u kovů



Obr. 46 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

Z průběhu závislosti síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm je zřejmý růst velikosti síly Fp, v celém rozsahu posuvu, u všech materiálů, kromě titanu a duralu, u nichž

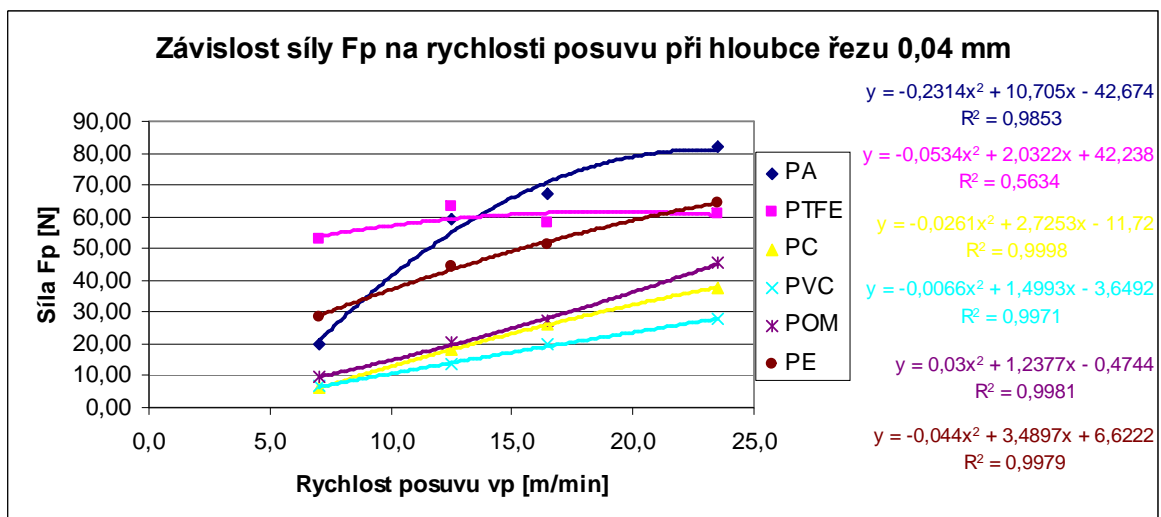
tyto hodnoty síly nejprve rostly a poté docházelo ke klesající tendenci. Klesání řezné síly F_p je způsobeno adhezními nálepy.



Obr. 47 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

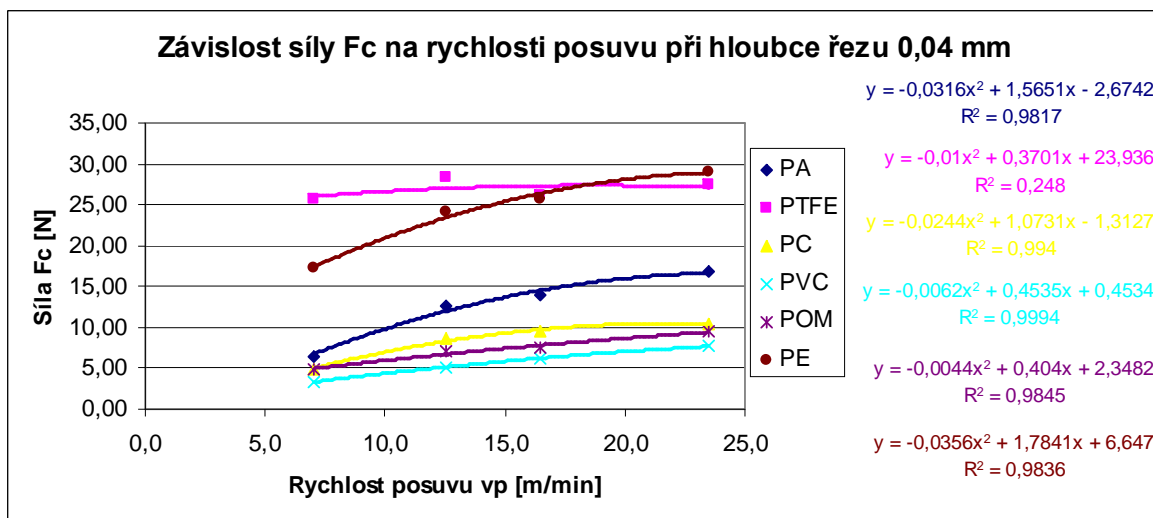
Z obr. 47 jsou patrné nejvyšší velikosti síly F_c , v celém rozsahu rychlosti posuvu, u mědi. Naopak nejnižší řezné síly F_c vykazoval dural, ale od rychlosti posuvu přibližně 10 m/min byl vystřídán ocelí 19 436.

8.1.5 Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u polymerů



Obr. 48 Závislost síly F_p na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

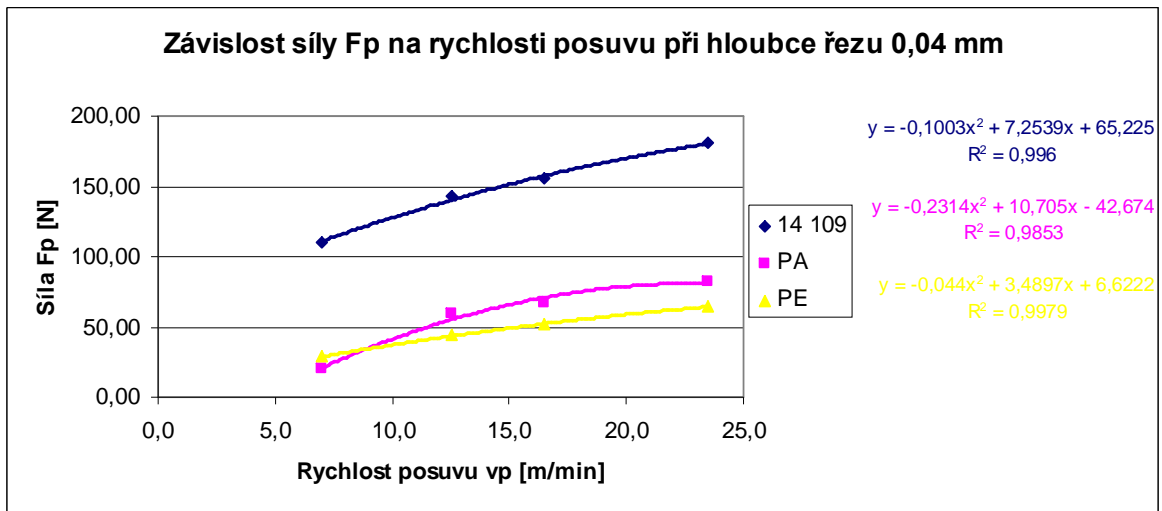
Z obr. 48 jsou zřejmé nejvyšší velikosti síly F_p u PTFE, do rychlosti posuvu přibližně 13 m/min, odtud pak je vystřídán PA. Nejnižší hodnoty síly v celé škále rychlosti posuvu byla naměřena u PVC.



Obr. 49 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

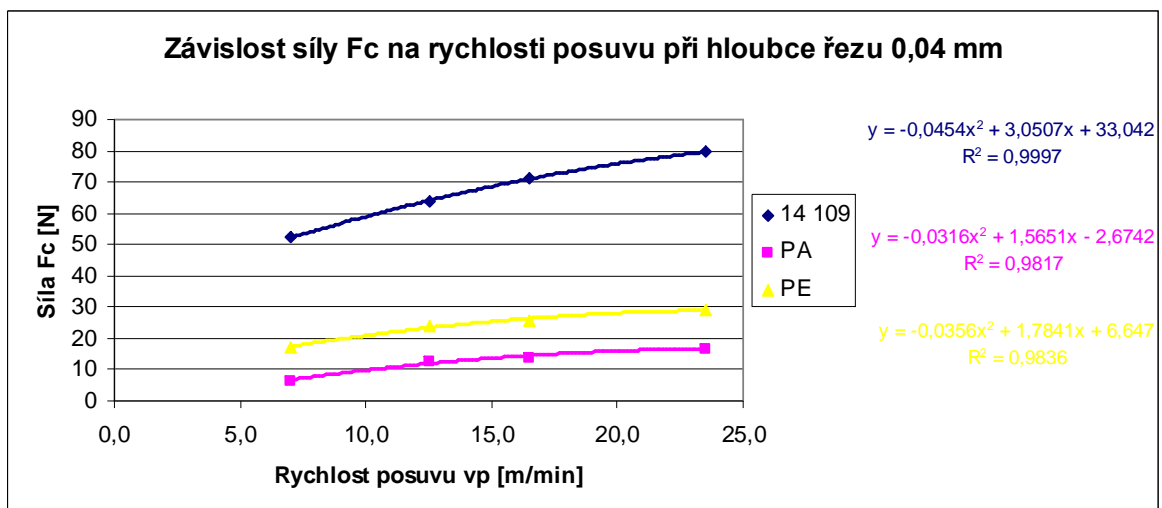
Z obr. 49 je vidět, že do rychlosti posuvu přibližně 18 m/min vykazuje nejvyšší velikosti řezné síly F_c PTFE, odtud pak PE. Nejnižší hodnoty síly F_c , v celém rozsahu rychlosti posuvu, byla naměřena u PVC.

8.1.6 Vliv rychlosti posuvu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů



Obr. 50 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

Z průběhu závislosti síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm vykazuje nejvyšší hodnoty síly Fp ocel 14 109. Naopak nejnižší velikosti řezné síly byly zaznamenány u PA, do rychlosti posuvu přibližně 8 m/min, odtud pak u PE.

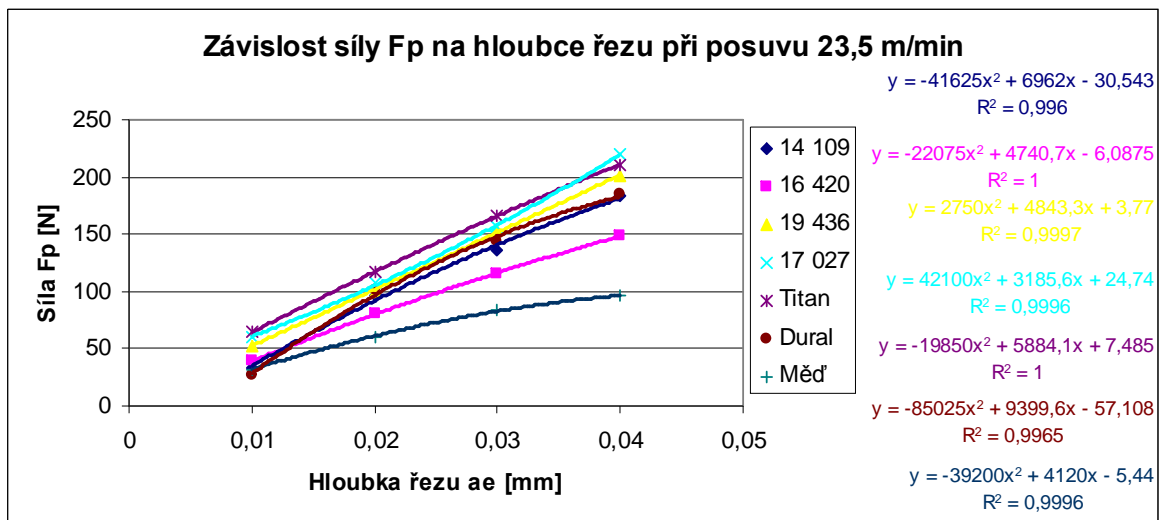


Obr. 51 Závislost síly Fc na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

Z obr. 51 jsou patrné nejvyšší velikosti síly F_c u oceli 14 109 v celém rozsahu rychlosti posuvu. Nejnižší průběh tangenciální síly v závislosti na rychlosti posuvu byl zaznamenán u PA.

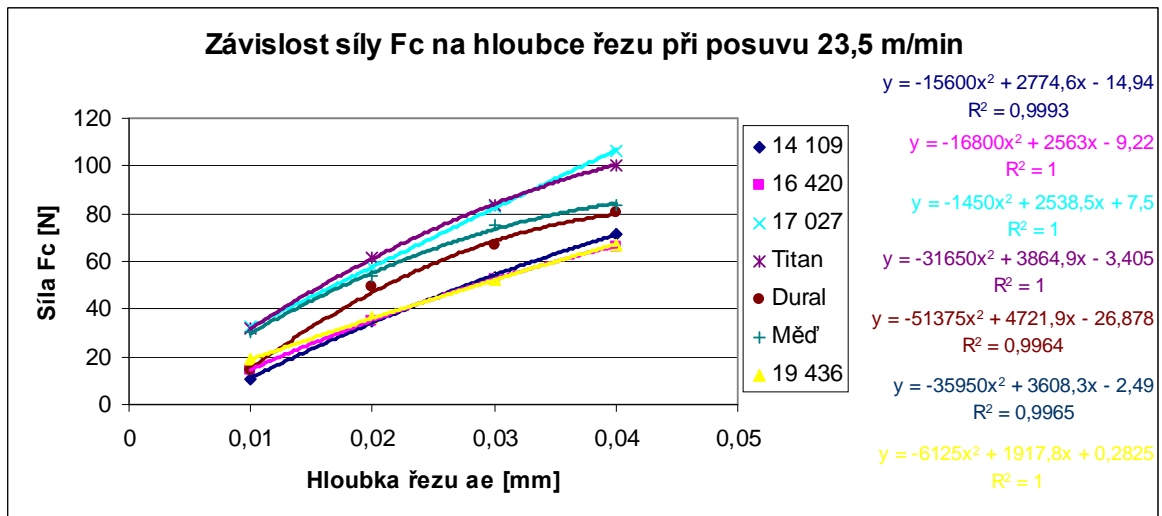
8.2 Broušení – kotouč A 99 K 80 13 V

8.2.1 Vliv hloubky řezu na řezné síly u kovů



Obr. 52 Závislost síly F_p na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

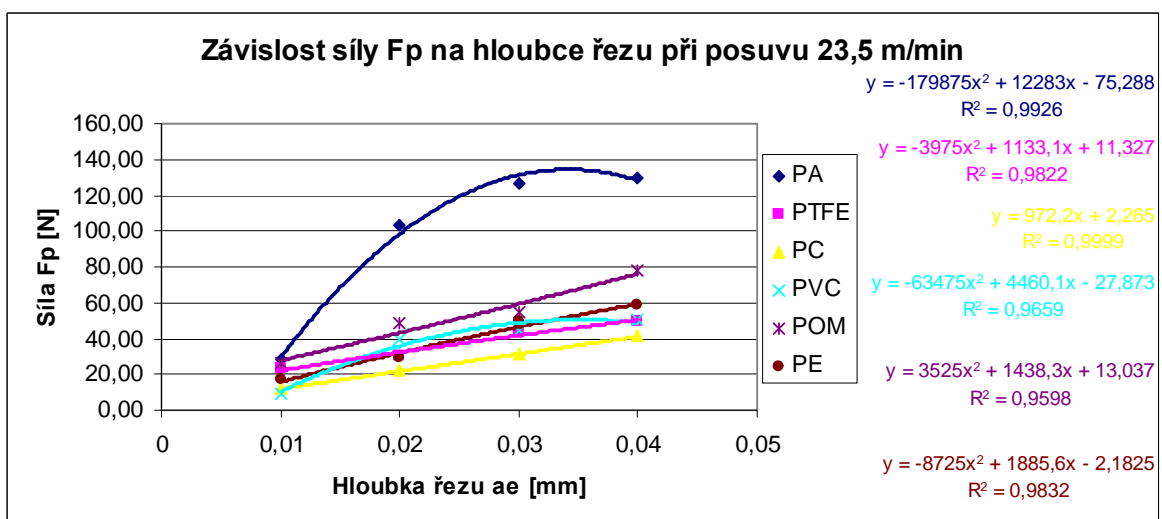
Z obr. 52 je zřejmý růst hodnoty síly F_p v závislosti na hloubce řezu. Nejvyšší hodnoty zde vykazoval titan, jen přibližně od hloubky řezu 0,035 mm, vykazovala nejvyšší velikosti síly F_p ocel 17 027, a naopak nejnižší měď.



Obr. 53 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

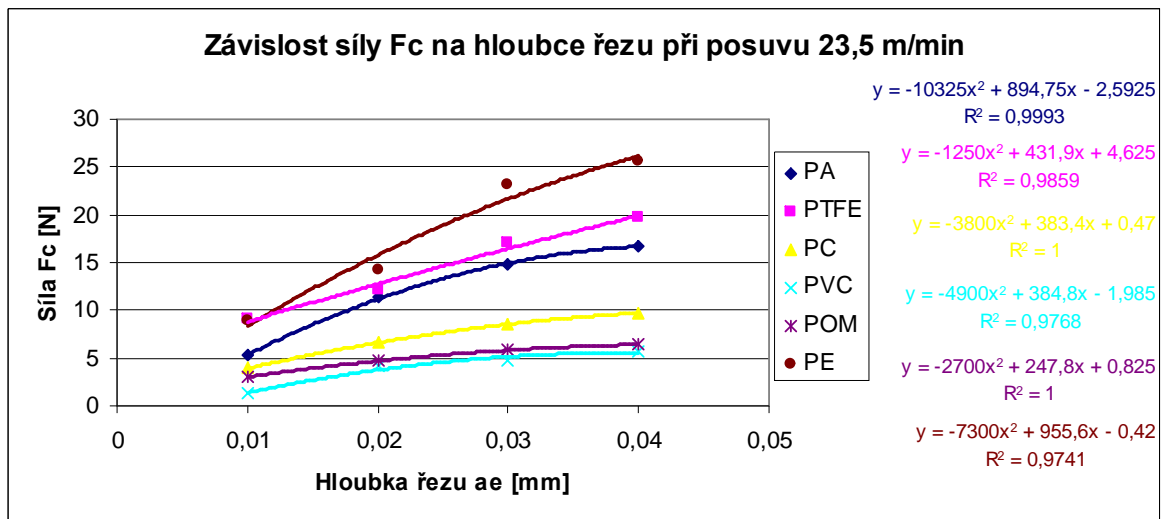
Z obr. 53 je patrný růst velikosti síly Fc v celém rozsahu hloubky řezu. Nejvyšší hodnoty síly zde dosáhl titan, teprve až od hloubky, přibližně 0,035 mm, byl vystřídán ocelí 17 027. Naopak nejnižší hodnoty zde byly naměřeny u ocelí 14 109, 19 436 a 16 420, které zde měnily své pořadí.

8.2.2 Vliv hloubky řezu na řezné síly u polymerů



Obr. 54 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

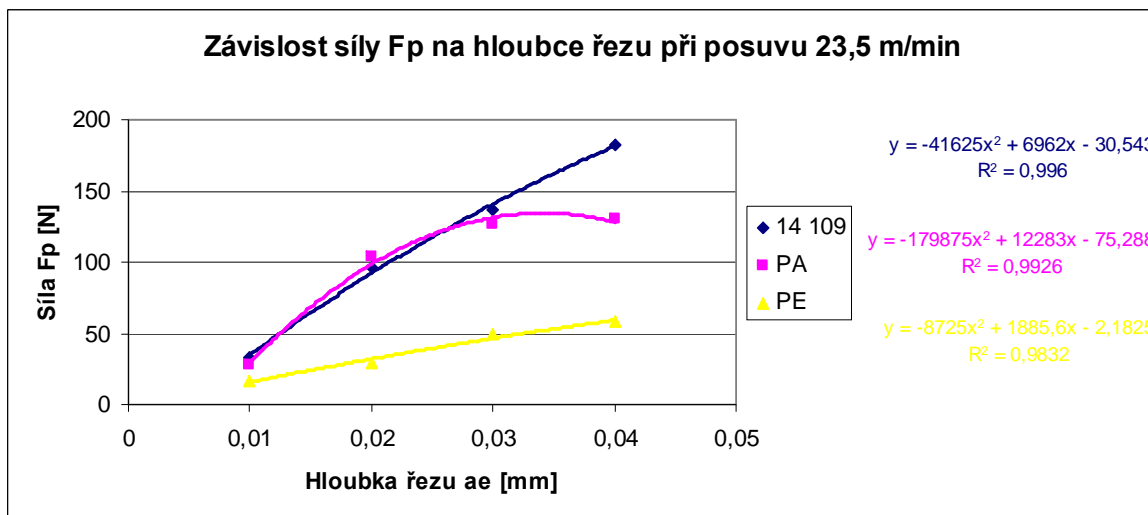
Z obr. 54 je vidět růst velikosti síly F_p téměř u všech polymerních materiálů. V případě PA a PVC ve vyšších hloubkách řezu dochází k poklesu hodnot síly F_p , způsobené pravděpodobně natavováním materiálu. Nejvyšší hodnoty síly F_p zde byly naměřeny u PA a naopak nejnižší u PC.



Obr. 55 Závislost síly F_c na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

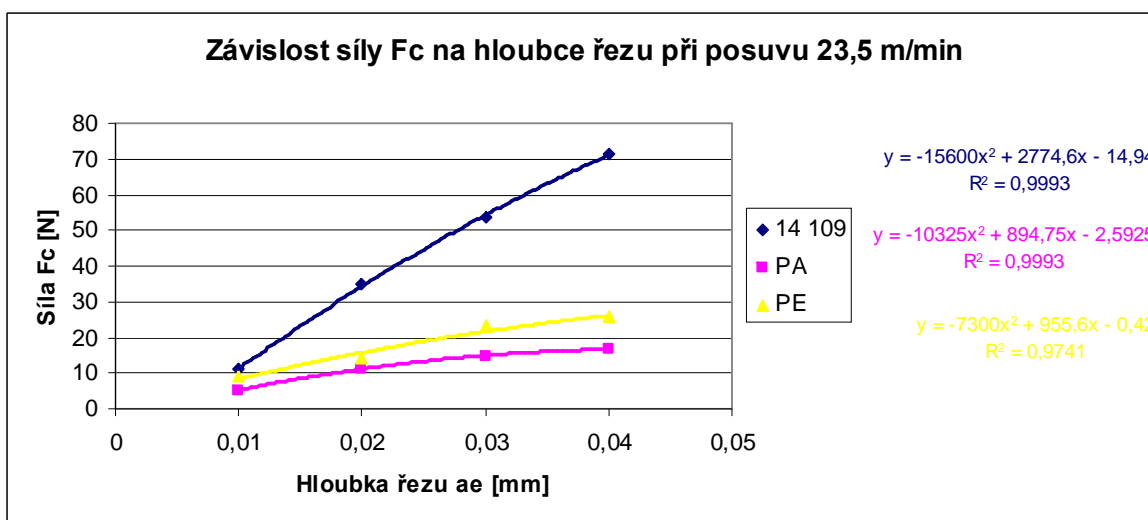
Ze závislosti síly F_c na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min je zřejmý růst hodnot síly F_c u všech polymerů. Nejvyšší hodnoty zde vykazuje PE a naopak nejnižší PVC.

8.2.3 Vliv hloubky řezu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů



Obr. 56 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

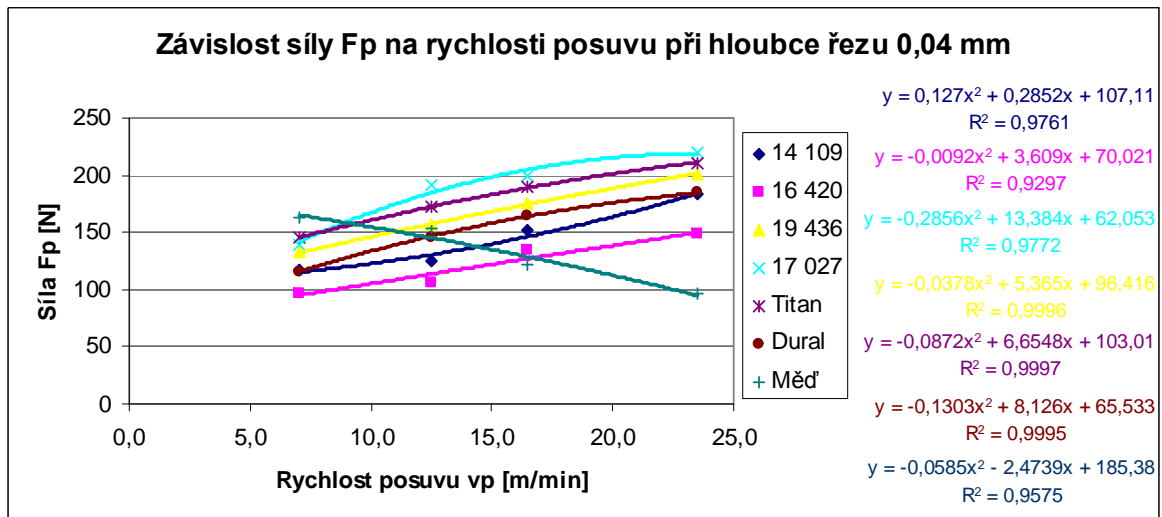
Z obr. 56 je patrné, že nejvyšší hodnoty síly Fp dosáhl PA a také ocel 14 109. V případě oceli 14 109 se jedná o nejvyšší hodnoty síly Fp při vyšších a při nižších hloubkách řezu. Naopak nejnižší velikosti síly Fp zde byly naměřeny u PE v celém rozsahu hloubky řezu.



Obr. 57 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

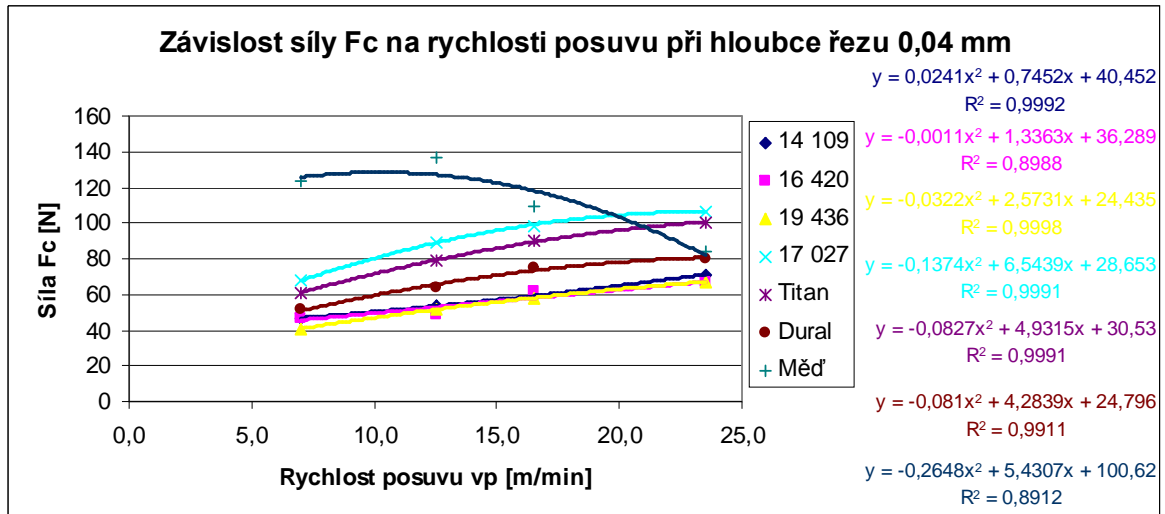
Z obr. 57 vyplývá růst velikosti síly F_c u všech materiálů v závislosti na hloubce řezu. Nejvyšší hodnoty síly F_c byly naměřeny u oceli 14 109 a naopak nejnižší u PA.

8.2.4 Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u kovů



Obr. 58 Závislost síly F_p na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

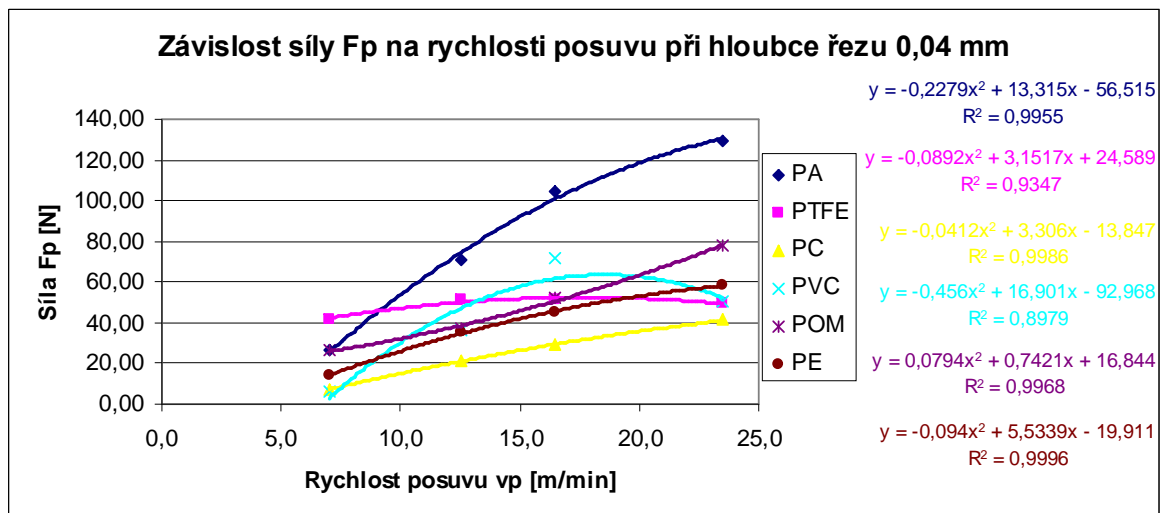
Z obr. 58 je vidět rostoucí průběh hodnot síly F_p v závislosti na rychlosti posuvu u všech kovových materiálů, kromě mědi. V případě mědi jde o klesající průběh, protože tento materiál "maže". Nejvyšší hodnoty síly F_p byly naměřeny u oceli 17 027 téměř v celém rozsahu rychlosti posuvu. Při nižší velikosti rychlosti posuvu vykazovala nejvyšší velikost této řezné síly měď. Naopak nejnižší hodnoty velikosti řezné síly F_p byly zaznamenány u oceli 16 420 a při vyšší rychlosti posuvu u mědi.



Obr. 59 Závislost síly Fc na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

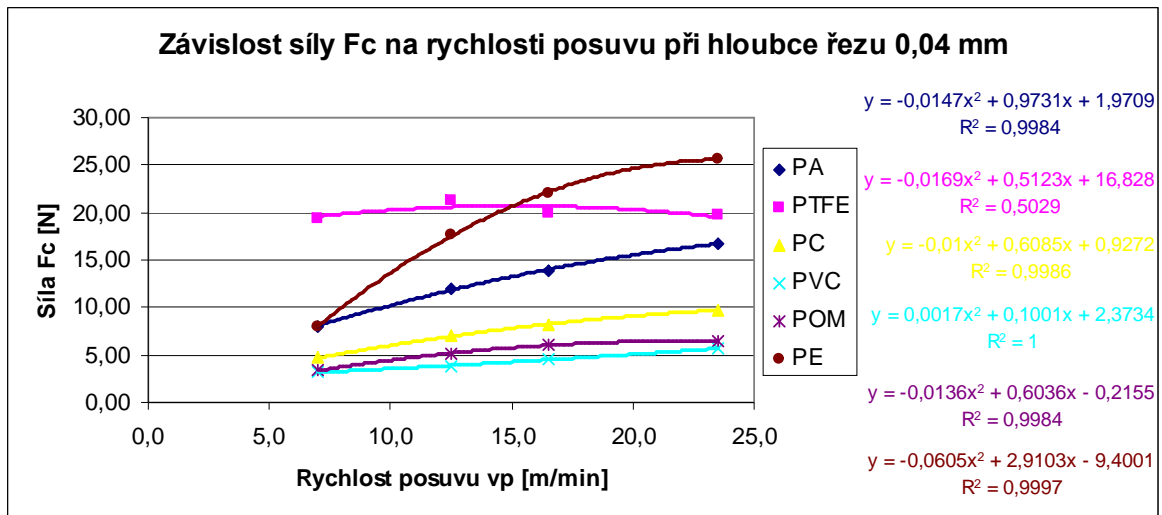
Z obr. 59 je zřejmé, že nejvyšší hodnoty řezné síly Fc vykazovala měď, do rychlosti posuvu přibližně 20 m/min, odtud pak ocel 17 027. Naopak nejnižší hodnoty řezné síly Fc jsou zřejmé u oceli 19 436 a 16 420, které mění svoje pořadí.

8.2.5 Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u polymerů



Obr. 60 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

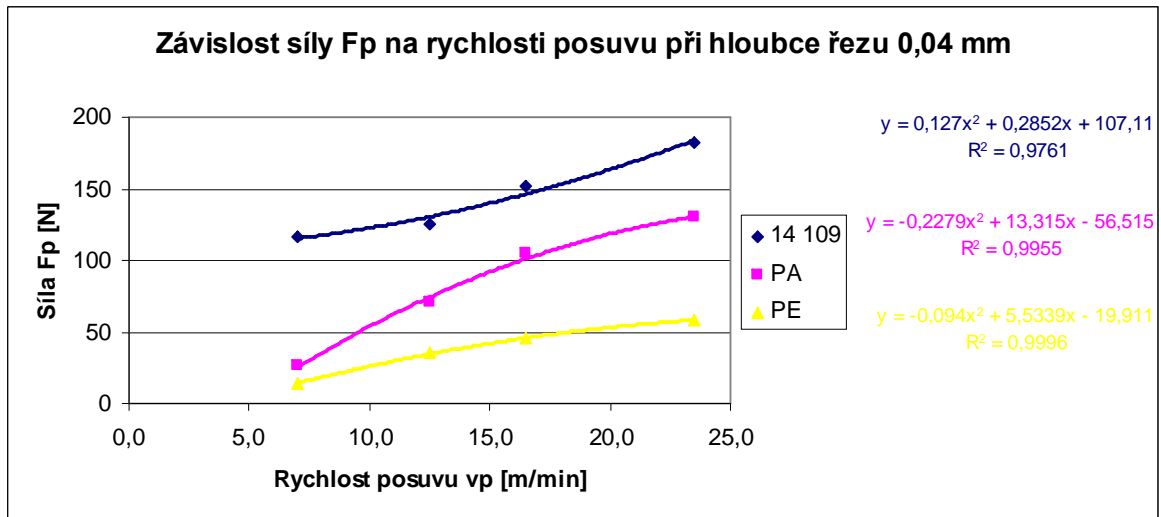
Z obr. 60 je vidět, že nejvyšší velikosti síly F_p vykazuje PA od rychlosti posuvu asi 8 m/min. Do této rychlosti posuvu byly nejvyšší hodnoty síly F_p zaznamenány u PTFE. Nejnižší hodnoty síly F_p vykazuje PC téměř v celém rozsahu velikosti rychlosti posuvu.



Obr. 61 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

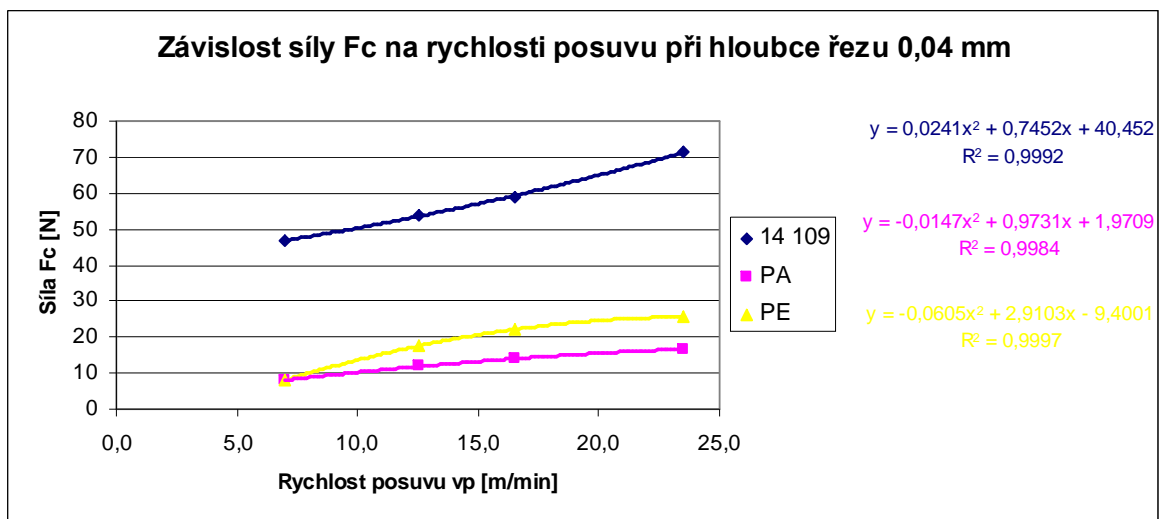
Z obr. 61 je zřejmé, že nejvyšší hodnoty síly F_c byly zaznamenány u PTFE do rychlosti posuvu přibližně 14 m/min, odtud pak nejvyšší hodnoty síly vykazuje PE. Naopak nejnižší hodnoty této síly byly naměřeny u PVC.

8.2.6 Vliv rychlosti posuvu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů



Obr. 62 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

Při porovnávání oceli 14 109, PA a PE je vidět, že u oceli byly naměřeny nejvyšší hodnoty síly Fp, dále následoval PA a PE. Z grafu je také patrný růst velikosti síly Fp v závislosti na rychlosti posuvu u všech materiálů.

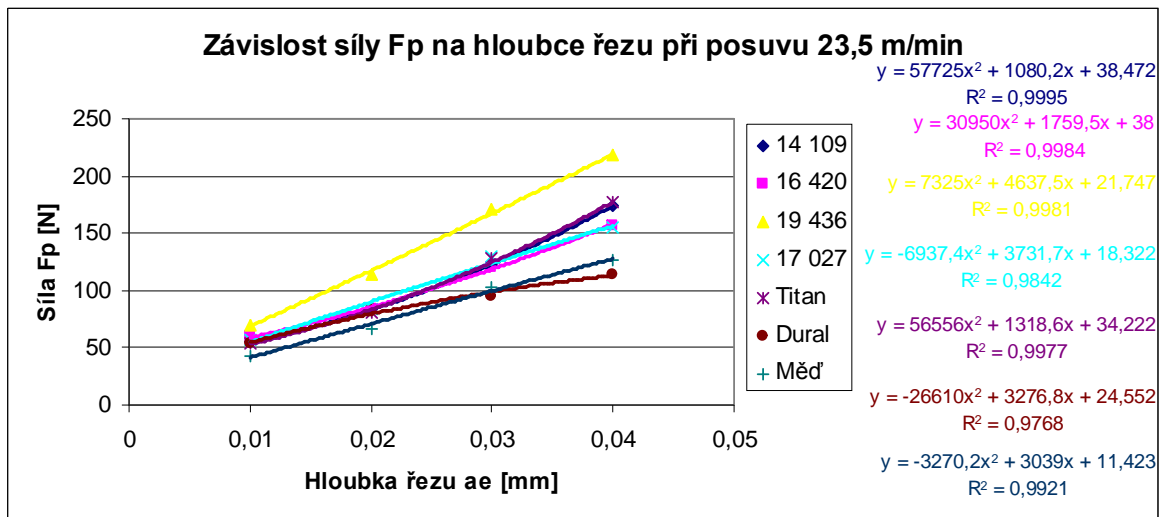


Obr. 63 Závislost síly Fc na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

Z obr. 63 je patrný růst hodnot síly F_c s rostoucí rychlostí posuvu. Ocel 14 109 zde vykazovala nejvyšší hodnoty této síly a naopak nejnižší byly zaznamenány u PA.

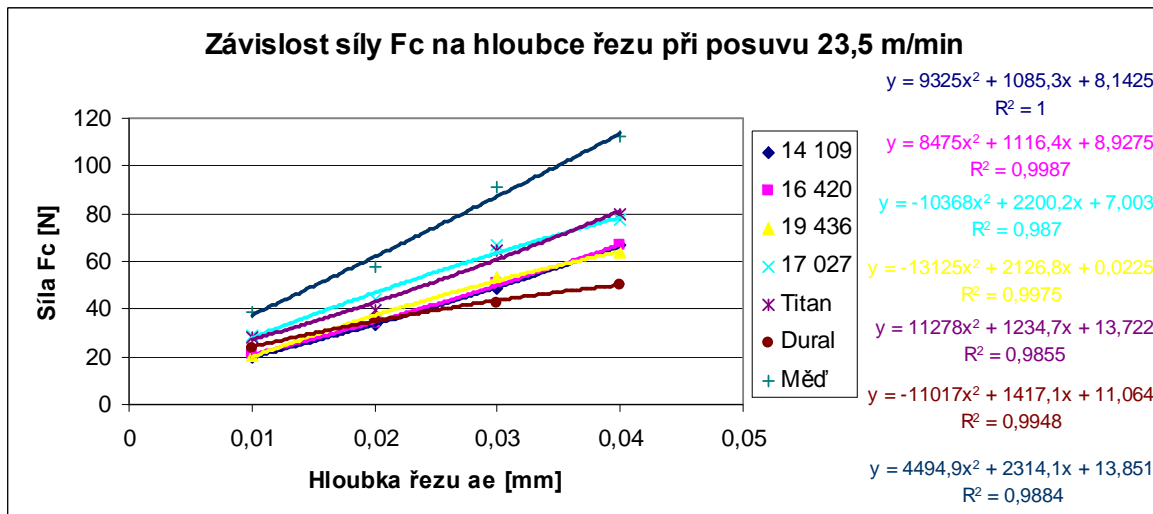
8.3 Broušení – kotouč A 99 60 J 12 V

8.3.1 Vliv hloubky řezu na řezné síly u kovů



Obr. 64 Závislost síly F_p na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

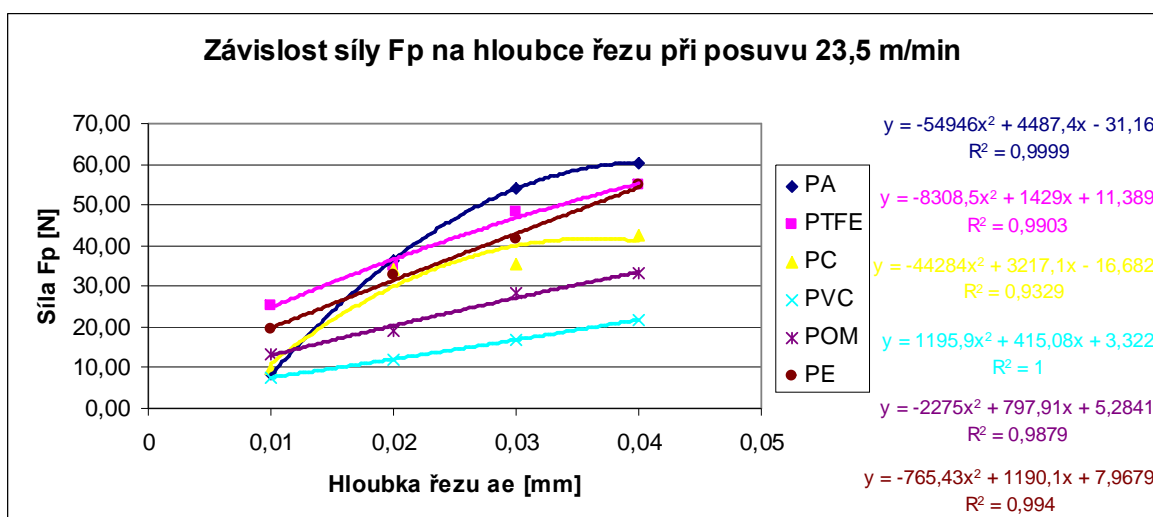
V této závislosti můžeme vidět, že síla F_p u kovů roste v závislosti na hloubce řezu. Nejvyšší hodnoty síly F_p byly zaznamenány u oceli 19 436 a naopak nejnižší u mědi do hloubky řezu 0,03 mm. Odtud pak nejnižší hodnoty síly F_p byly naměřeny u duralu.



Obr. 65 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

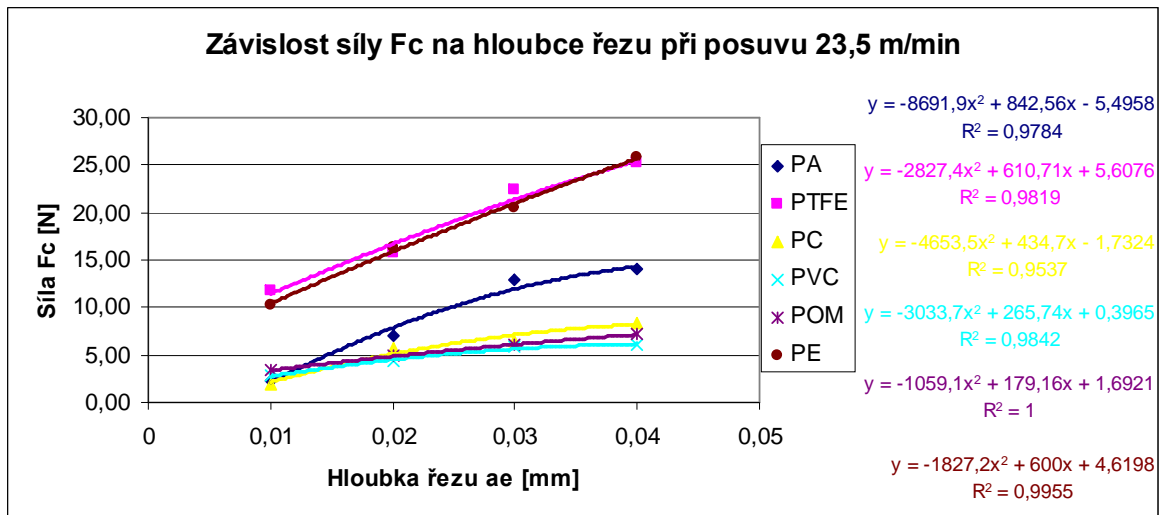
Z obr. 65 je patrný růst velikosti síly Fc v závislosti na hloubce řezu u všech vzorků. Nejvyšší hodnoty síly Fc vykazovala měď. Až do hloubky řezu, přibližně 0,025 mm, byly naměřeny nejnižší hodnoty řezné síly Fc u oceli 14 109. Od této hloubky řezu byla ocel 14 109 vystřídána duralem.

8.3.2 Vliv hloubky řezu na řezné síly u polymerů



Obr. 66 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

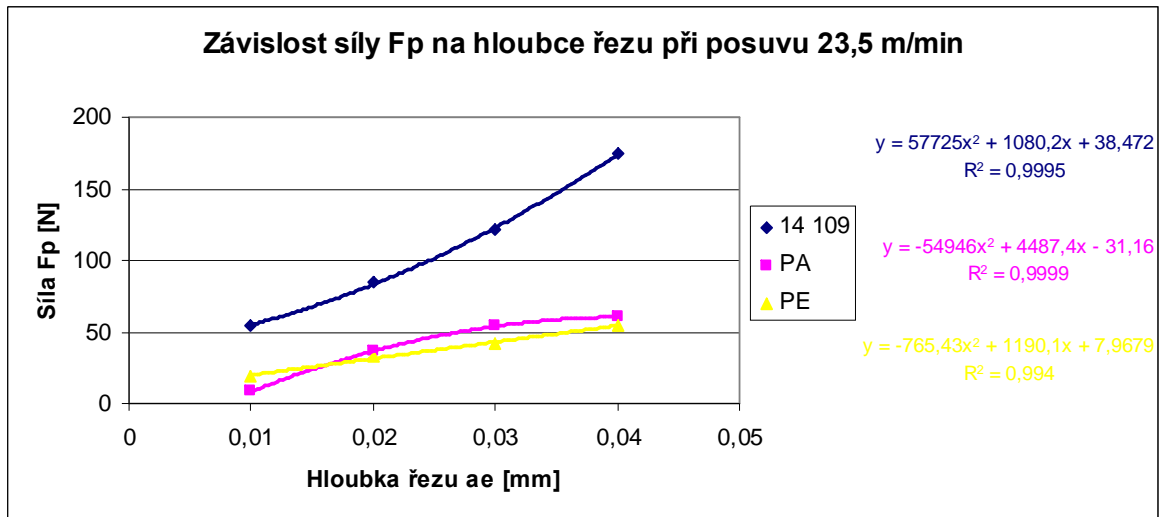
V závislosti síly F_p na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min je zřejmé, že nejvyšší hodnoty síly F_p byly naměřeny u PTFE do hloubky řezu asi 0,02 mm, odtud pak PTFE byl vystřídán PA. Naopak nejnižší hodnoty síly F_p byly naměřeny u PVC.



Obr. 67 Závislost síly F_c na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

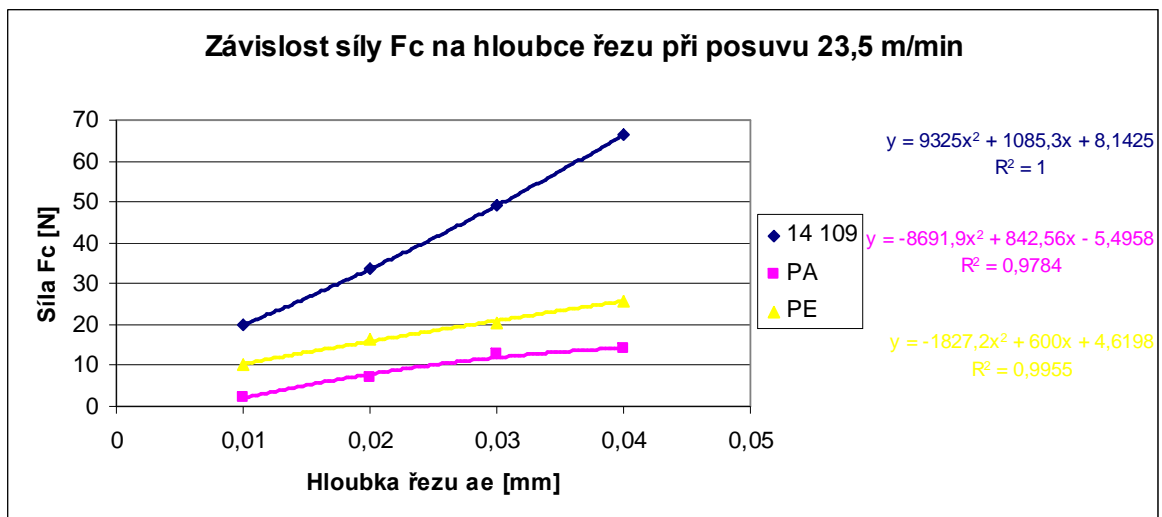
V této závislosti můžeme sledovat nejvyšší hodnoty síly F_c u PTFE téměř v celém rozsahu hloubky řezu. Nejnižší hodnoty síly F_c byly zaznamenány u PC do hloubky řezu asi 0,015 mm, odtud pak PC vystřídala PVC.

8.3.3 Vliv hloubky řezu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů



Obr. 68 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

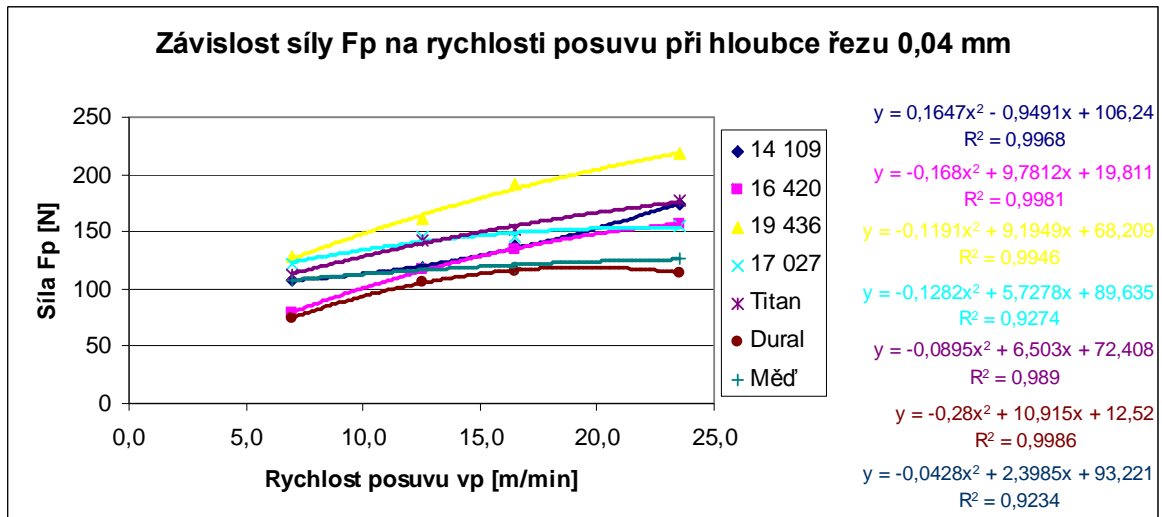
Z obr. 68 jsou vidět nejvyšší hodnoty síly Fp u oceli 14 109. Nejnižší velikosti síly Fp byly naměřeny u PA do hloubky řezu asi 0,017 mm, odtud pak PA byl vystřídán PE.



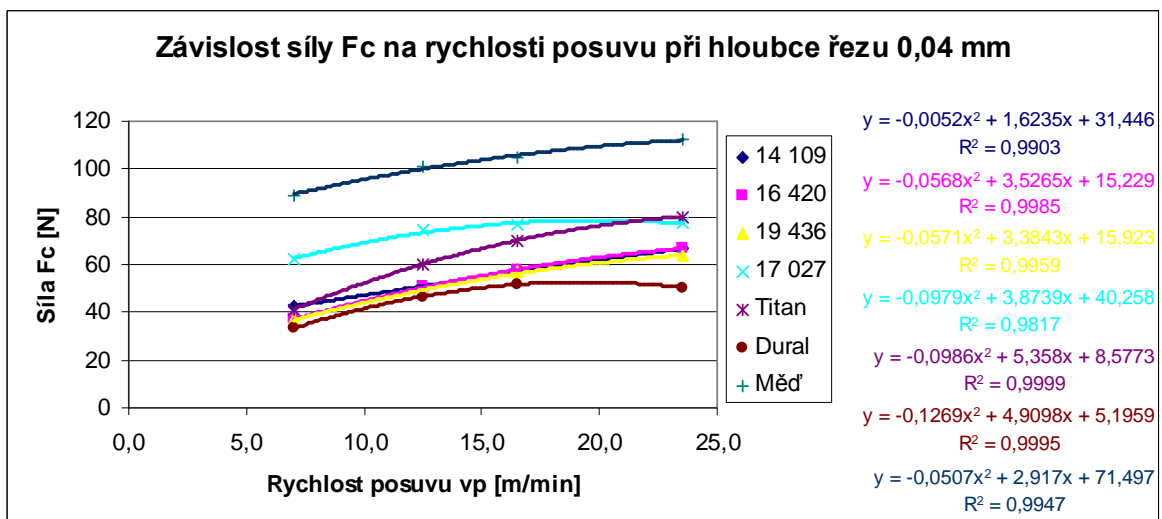
Obr. 69 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

Z obr. 69 jsou zřejmé nejvyšší velikosti řezné síly Fc u oceli 14 109, naopak nejnižší hodnoty síly Fc vykazoval PE.

8.3.4 Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u kovů

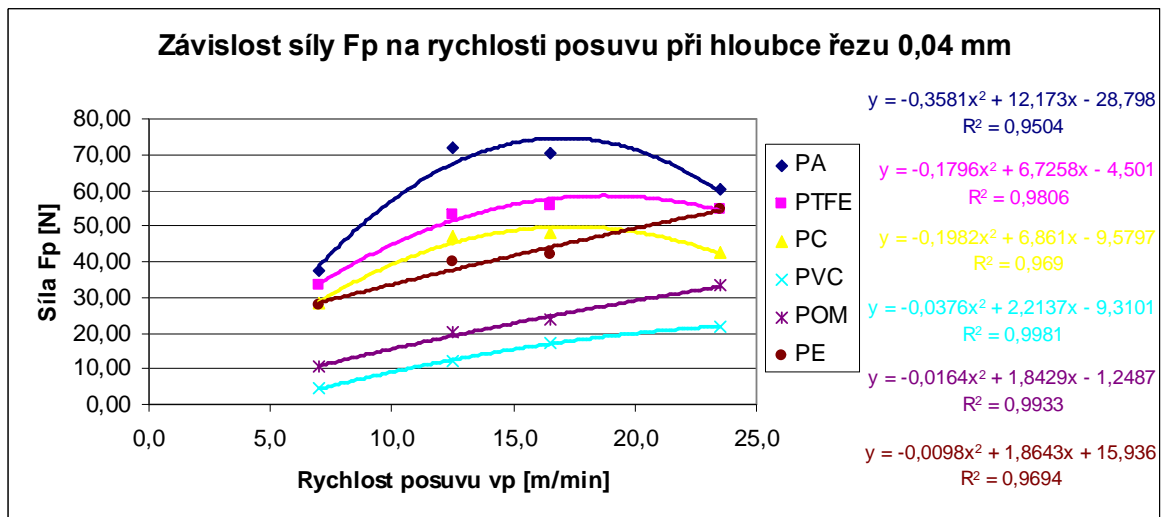
Obr. 70 Závislost síly F_p na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

Z obr. 70 jsou zřejmé nejvyšší velikosti síly F_p u oceli 19 436 a naopak nejnižší u duralu. V případě duralu dochází také, ve vyšších rychlostech posuvu, k poklesu síly F_p . Tento pokles je způsoben zřejmě ohřevem obráběného materiálu => pokles pevnosti materiálu.

Obr. 71 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

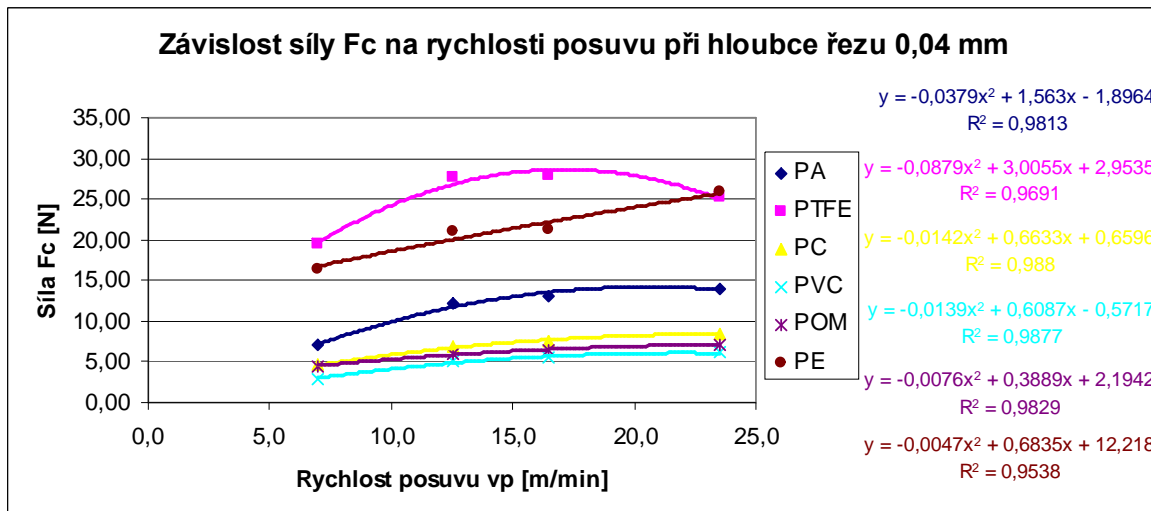
Z obr. 71 jsou patrné nejvyšší hodnoty síly F_c u mědi, naopak nejnižší u duralu. V případě duralu dochází také, ve vyšších rychlostech posuvu, k poklesu velikosti síly F_c . Tento pokles je způsoben zřejmě ohřevem obráběného materiálu => pokles pevnosti materiálu.

8.3.5 Vliv rychlosti posuvu na řezné síly u polymerů



Obr. 72 Závislost síly F_p na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

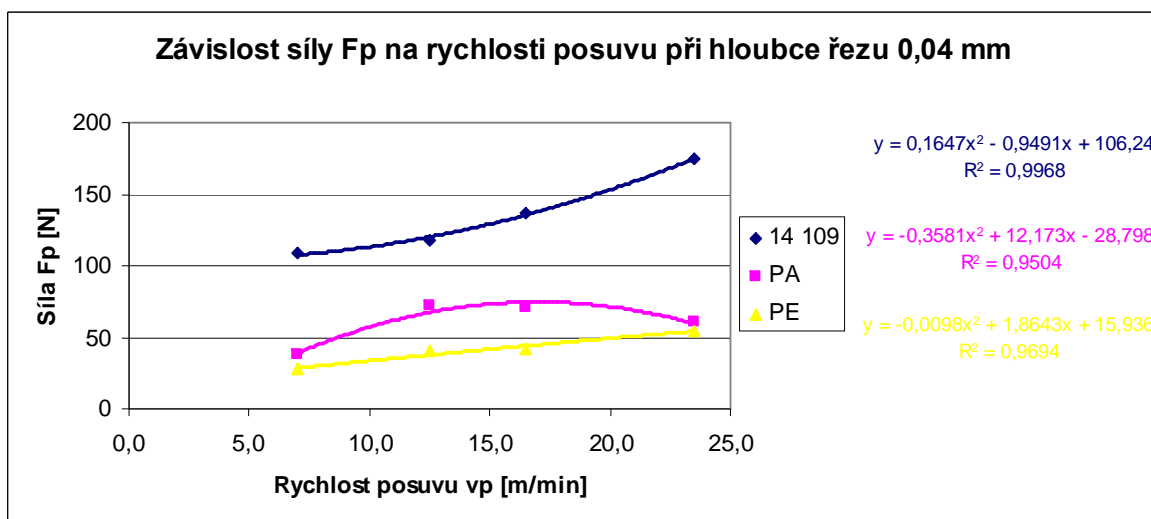
Z obr. 72 jsou patrné nejvyšší hodnoty síly F_p u PA, naopak nejnižší u PVC. V případě PA, PTFE a PC můžeme pozorovat zpočátku růst velikosti síly F_p a následný pokles, který je způsoben zřejmě natavováním těchto materiálů resp. tím, že materiál PTFE “maže”.



Obr. 73 Závislost síly Fc na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

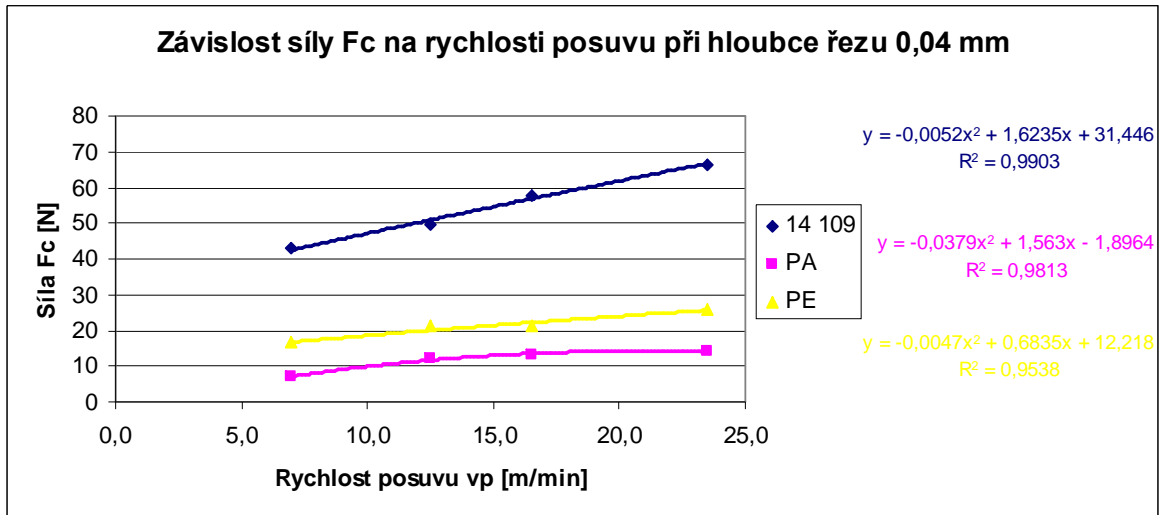
Z obr. 73 je vidět, že nejvyšší hodnoty řezné síly Fc vykazoval PTFE a naopak nejnižší PVC. U PTFE můžeme sledovat nejprve růst a později pokles velikosti síly Fc. Tento pokles je zřejmě způsoben tím, že tento materiál “maže”.

8.3.6 Vliv rychlosti posuvu na řezné síly – srovnání oceli a vybraných polymerů



Obr. 74 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

Z porovnání oceli 14 109, PA a PE je zřejmé, že nejvyšší hodnoty síly F_p vykazovala ocel, naopak nejnižší velikosti této síly byly naměřeny u PE a to v celém rozsahu rychlosti posuvu.



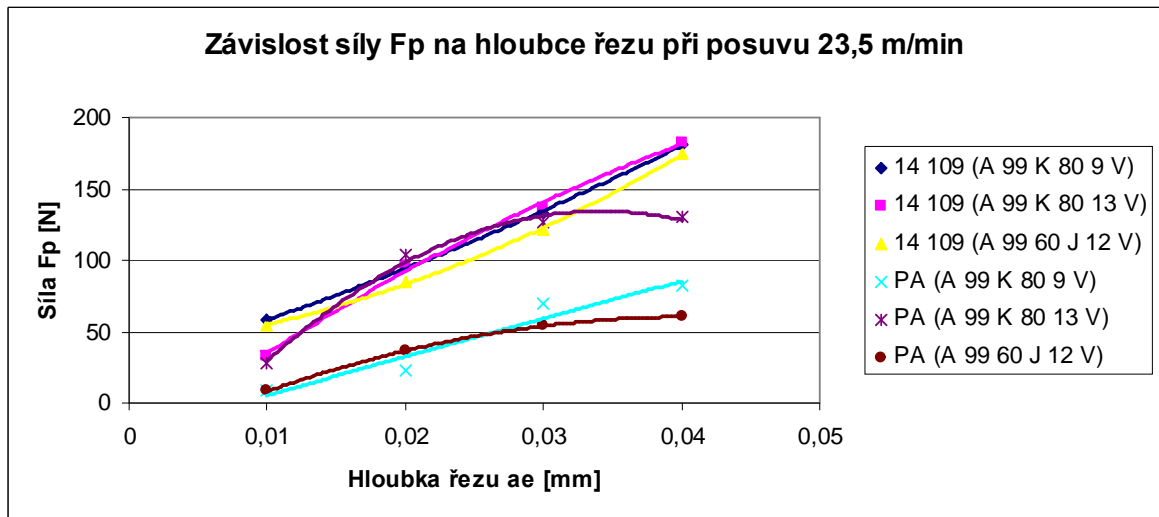
Obr. 75 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

Z obr. 75 je zřejmé, že nejvyšší hodnoty síly F_c vykazovala ocel 14 109, nejnižší PA v celém rozsahu rychlosti posuvu.

8.4 Vliv struktury brousícího kotouče na řezné síly

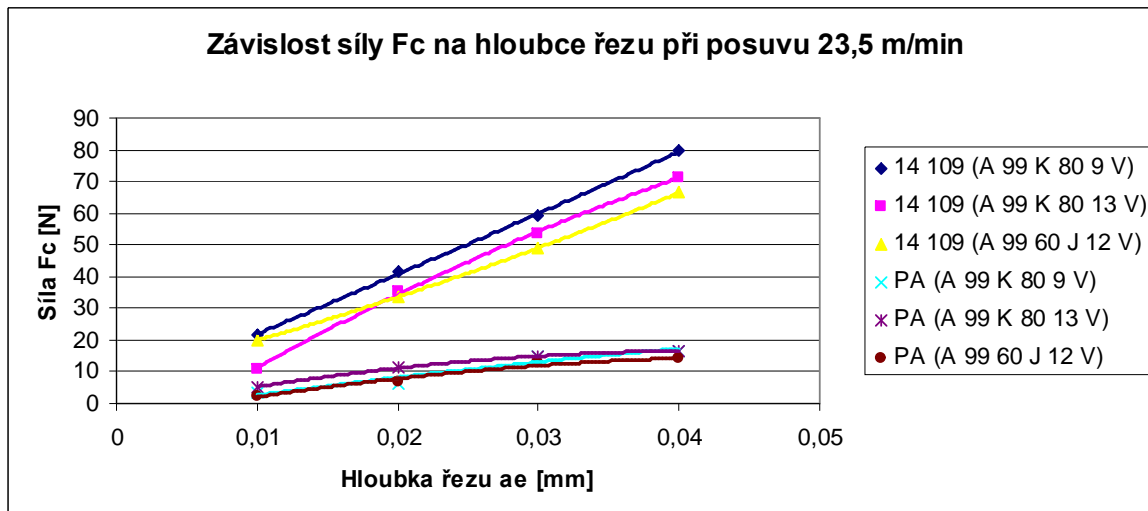
Při porovnávání vlivu struktury brousícího kotouče na řezné síly byl vybrán jeden zástupce kovů, v tomto případě ocel 14 109 a jeden materiál, který reprezentuje polymery, a sice PA.

8.4.1 Porovnání brousících kotoučů – vliv hloubky řezu na řezné síly



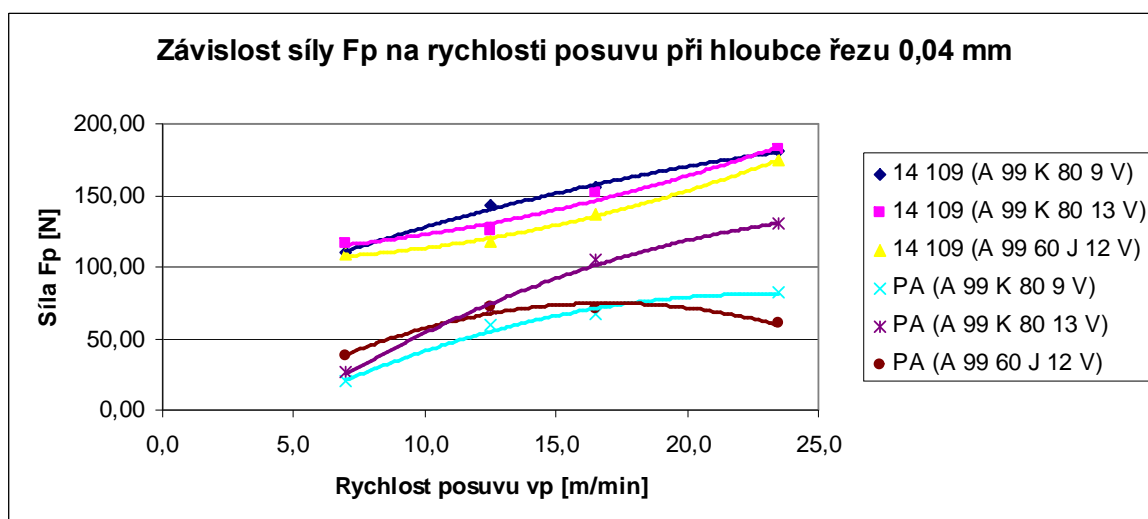
Obr. 76 Závislost síly F_p na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

Z obr. 76 je vidět, že největší hodnoty síly F_p u oceli vykazuje kotouč A 99 K 80 9 V do hloubky řezu přibližně 0,02 mm. Od této hloubky byly nejvyšší velikosti síly F_p naměřeny u brousícího nástroje A 99 K 80 13 V. Naopak nejnižší hodnoty síly F_p vykazuje kotouč A 99 K 80 13 V do hloubky řezu asi 0,018 mm, odtud nejnižší velikosti síly F_p byly naměřeny u brousícího nástroje A 99 60 J 12 V. V případě PA byly nejvyšší hodnoty síly F_p naměřeny u kotouče A 99 K 80 13 V. Naopak nejnižší hodnoty síly F_p vykazoval kotouč A 99 K 80 9 V do hloubky řezu přibližně 0,025 mm, odtud pak brousící nástroj A 99 60 J 12 V.

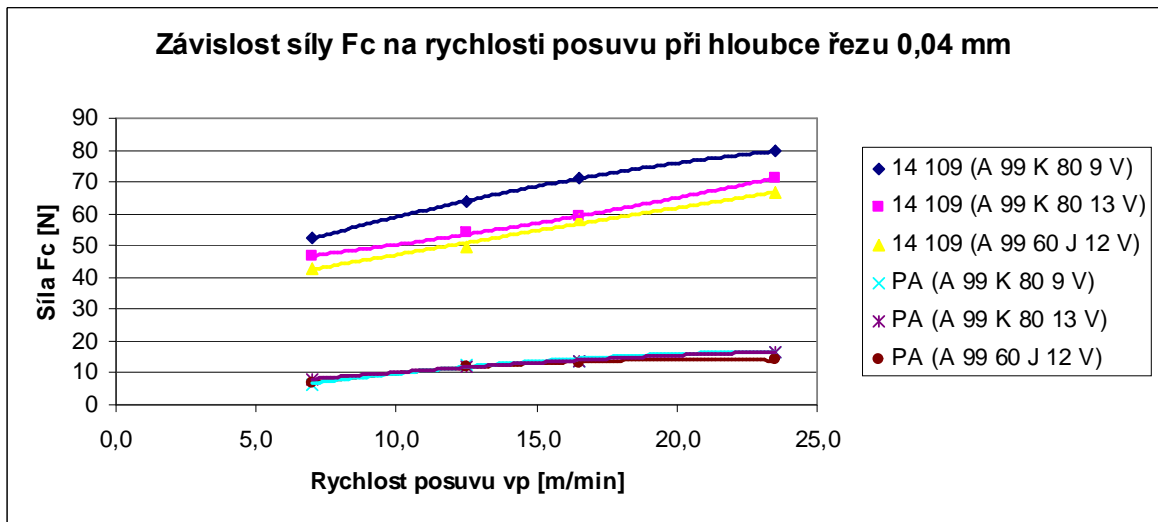
Obr. 77 Závislost síly F_c na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min

Z obr. 77 je zřejmé, že u oceli 14 109 vykazuje nejvyšší hodnoty síly F_c kotouč A 99 K 80 9 V. Naopak nejnižší velikosti síly F_c byly naměřeny u kotouče A 99 60 J 12 V téměř v celém rozsahu hloubky řezu, pouze do hloubky řezu asi 0,02 mm vykazuje kotouč A 99 K 80 13 V nižší hodnoty síly F_c . V případě PA byly nejvyšší hodnoty síly F_c naměřeny u kotouče A 99 K 80 13 V a nejnižší u brousícího nástroje A 99 60 J 12 V.

8.4.2 Porovnání brousících kotoučů – vliv rychlosti posuvu na řezné síly

Obr. 78 Závislost síly F_p na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

Z obr. 78 je zřejmé, že nejvyšší hodnoty síly F_p , u oceli 14 109, vykazoval brousící kotouč A 99 K 80 9 V. V případě PA je vidět, že do rychlosti posuvu asi 10 m/min vykazoval nejvyšší velikosti síly F_p brousící kotouč A 99 60 J 12 V, odtud pak brousící nástroj A 99 K 80 13 V. Naopak nejnižší hodnoty síly F_p byly naměřeny u brousícího kotouče A 99 K 80 9 V, do rychlosti posuvu asi 17 m/min, odtud pak u brousícího nástroje A 99 60 J 12 V.

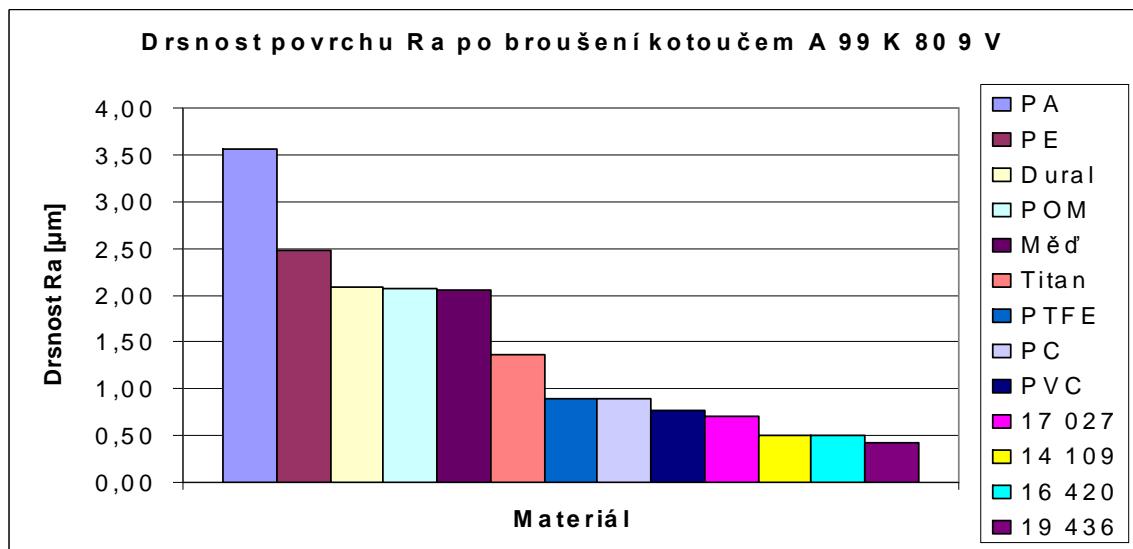


Obr. 79 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm

Z obr. 79 je zřejmé, nejvyšší hodnoty síly F_c u oceli 14 109 vykazuje brousící kotouč A 99 K 80 9V a naopak nejnižší A 99 60 J 12 V. U PA je vidět, že vliv struktury kotouče na průběh velikosti sil F_c je téměř stejný.

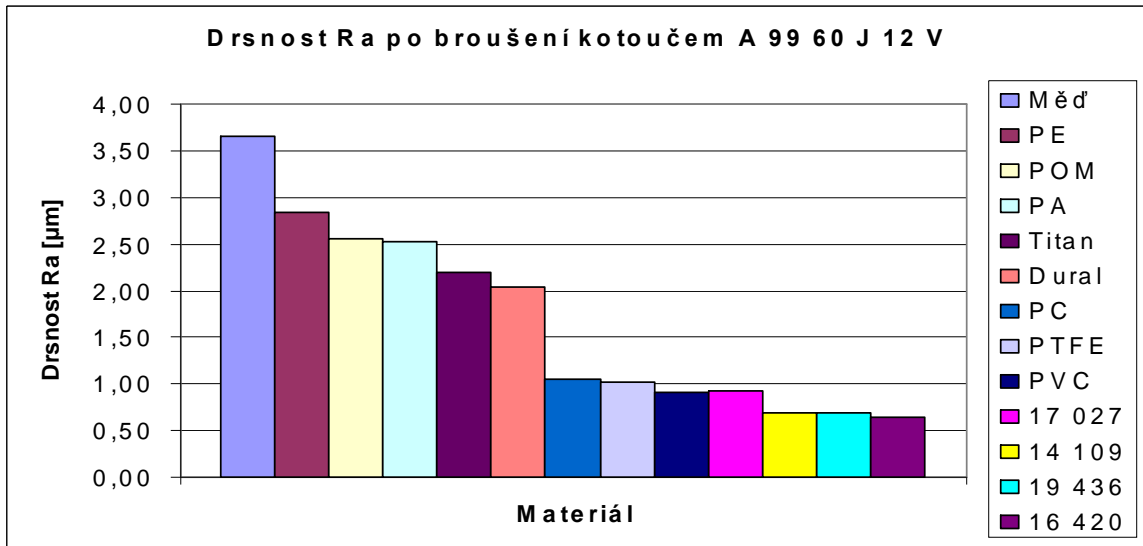
8.5 Měření drsnosti povrchu

Drsnost povrchu Ra se zde měřila po broušení rychlostí posuvu 23,5 m/min a hloubce řezu 0,04 mm.



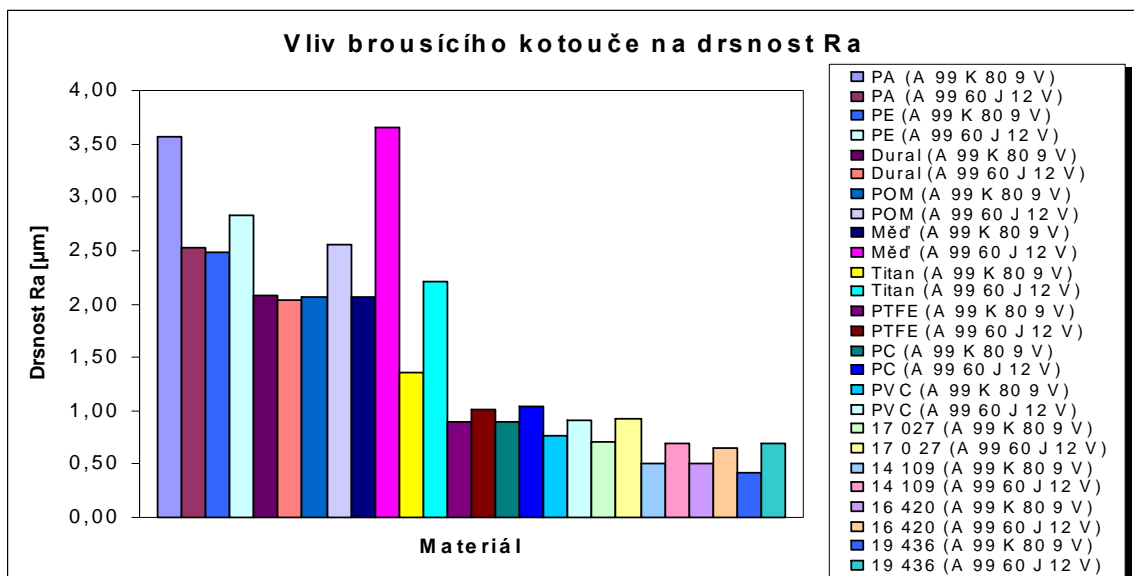
Obr. 80 Drsnost povrchu Ra po broušení kotoučem A 99 K 80 9 V

Z pohledu drsnosti Ra lze materiály seřadit – PA, PE, dural, POM, měď, titan, PTFE, PC, PVC a nakonec oceli 17 027, 14 109, 16 420 a 19 436.



Obr. 81 Drsnost Ra po broušení kotoučem A 99 60 J 12 V

Z pohledu drsnosti Ra lze materiály seřadit – měď, PE, POM, PA, titan, dural, PC, PTFE, PVC a nakonec oceli 17 027, 14 109, 19 436 a 16 420.



Obr. 82 Vliv brousícího kotouče na drsnost Ra

Z obr. 82 je patrné, že nižší drsnosti Ra vykazuje brousící kotouč A 99 K 80 9 V, pouze v případě PA a duralu je tomu naopak.

9 FRÉZOVÁNÍ

Frézovalo se pomocí frézy o \varnothing 10 mm. Experiment byl proveden na 9 materiálech, z toho byly 3 kovy a zbylé vzorky polymery, s rozměry 20x50x50 mm. Obrábělo se při konstantním posuvu 80 mm/min, řeznou rychlostí 14 m/min se změnou hloubky řezu, která byla v hodnotách 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm a 2 mm, sousledně a nesousledně. Stejně jako v případě broušení i tady se obrábělo bez chlazení.

Vyhodnocovaly se velikosti axiální řezné síly F_p a tangenciální řezné síly F_c v závislosti na hloubce řezu. Při frézování se také sledoval vliv hloubky řezu na drsnost povrchu obroběného materiálu.

9.1 Vliv hloubky řezu na řezné síly

9.1.1 Program pro frézování se změnou hloubky řezu

N05 G00 X-5 Y10 Z5

N10 G00 X-5 Y10 Z-2

N15 M03 S450

N20 G90

N25 G01 X60 Y10 Z-2 F80

N30 G00 X60 Y20 Z-2

N35 G01 X-5 Y20 Z-2 F80

N40 M05

N45 M30

Pozn. Uvedený program je sestaven pro hloubku řezu 2 mm

Seznam použitých funkcí a význam symbolů v programu:

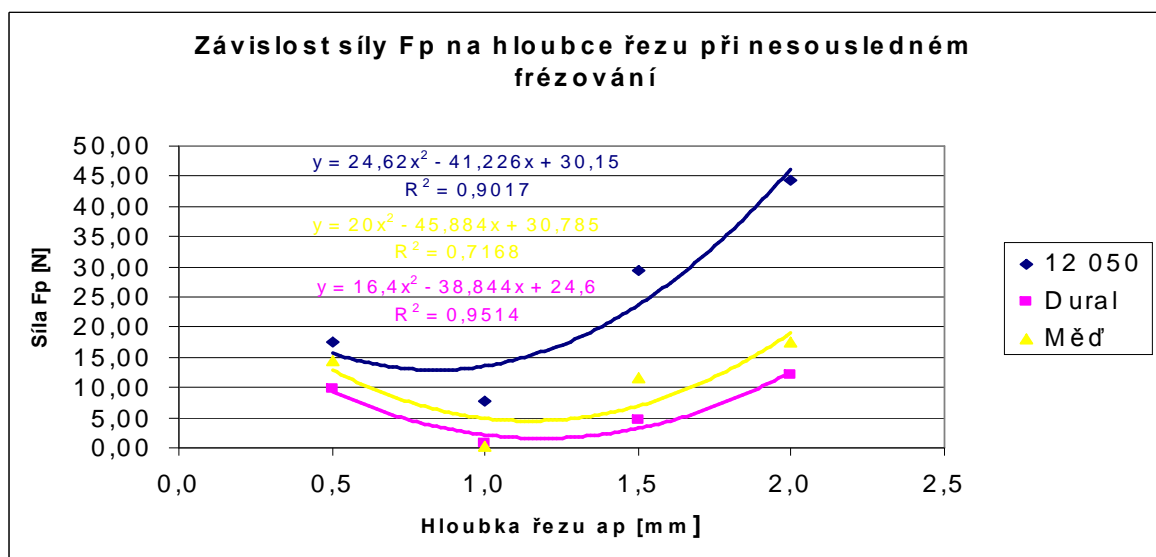
Tab. 10 Seznam funkcí v CNC programu

Funkce	Význam	Adresy
G00	Rychlé polohování (rychloposuv)	X, Y, Z
G01	Lineární interpolace	X, Y, Z, F
G90	Absolutní programování	
M03	Spouštění otáček vřetena doprava	
M05	Zastavení vřetena	
M30	Konec programu	

X, Y, Z – Souřadnice

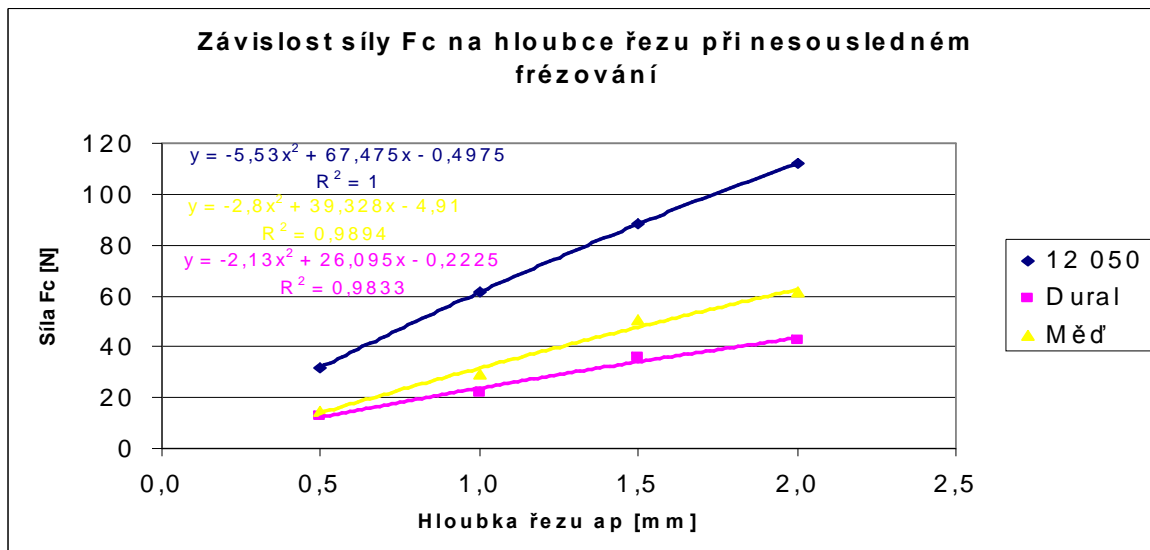
F – Rychlost posuvu

9.1.2 Vliv hloubky řezu na řezné síly u kovů

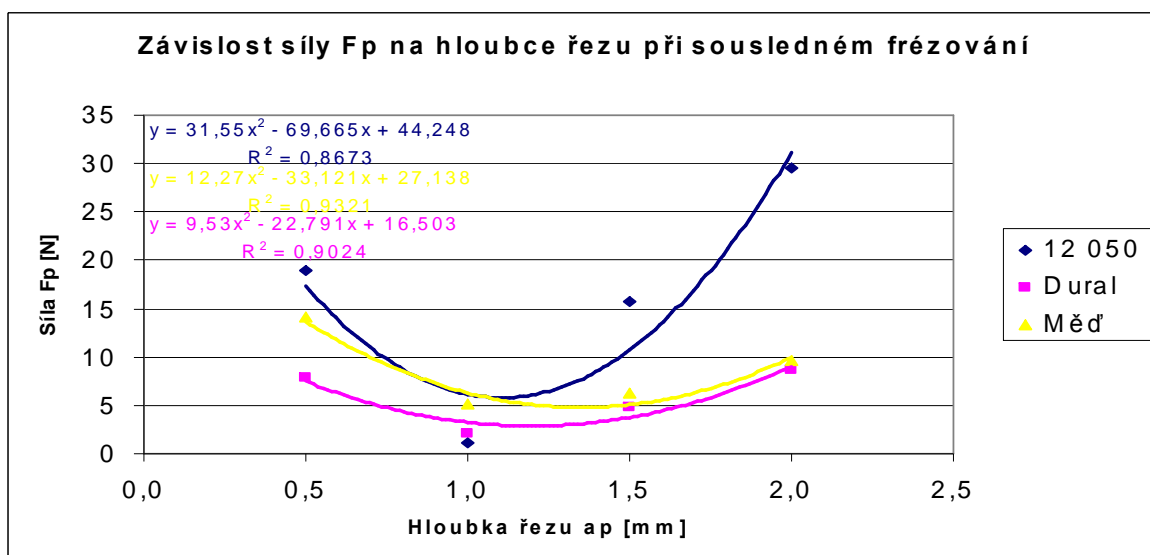


Obr. 83 Závislost síly F_p na hloubce řezu při nesousledném frézování

V závislosti síly F_p na hloubce řezu při nesousledném frézování je patrné, že nejvyšší hodnoty síly F_p jsou u oceli 12 050, následuje měď a dural. U všech těchto materiálů nejprve dochází k poklesu hodnoty síly F_p a následně k růstu do svého maxima. Pokles velikosti síly F_p je způsoben snížením tření mezi nástrojem a obrobkem.

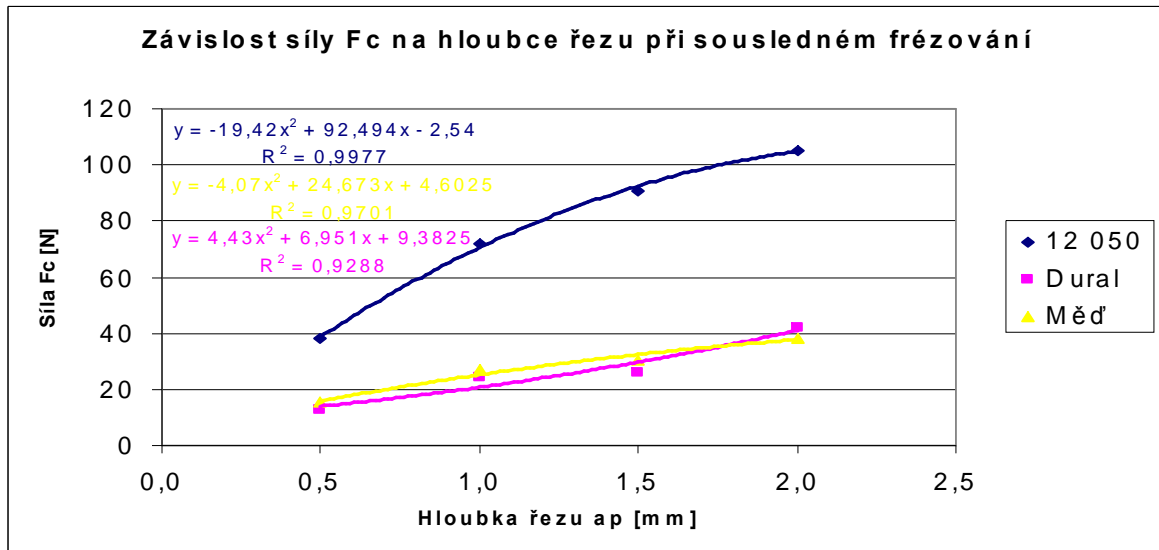
Obr. 84 Závislost síly F_c na hloubce řezu při nesousledném frézování

V závislosti síly F_c na hloubce řezu při nesousledném způsobu frézování je patrné, že velikosti síly F_c byly nejvyšší u oceli 12 050, následovala měď a dural. Průběh řezných sil je téměř lineární. Lze tedy konstatovat, že s rostoucí hloubkou řezu roste i velikost sil F_c .

Obr. 85 Závislost síly F_p na hloubce řezu při sousledném frézování

Nejvyšší hodnoty síly F_p jsou u oceli 12 050, naopak nejnižší byly naměřeny u duralu. U oceli nejprve velikost síly F_p klesá na své minimum a následně prudce roste do svého

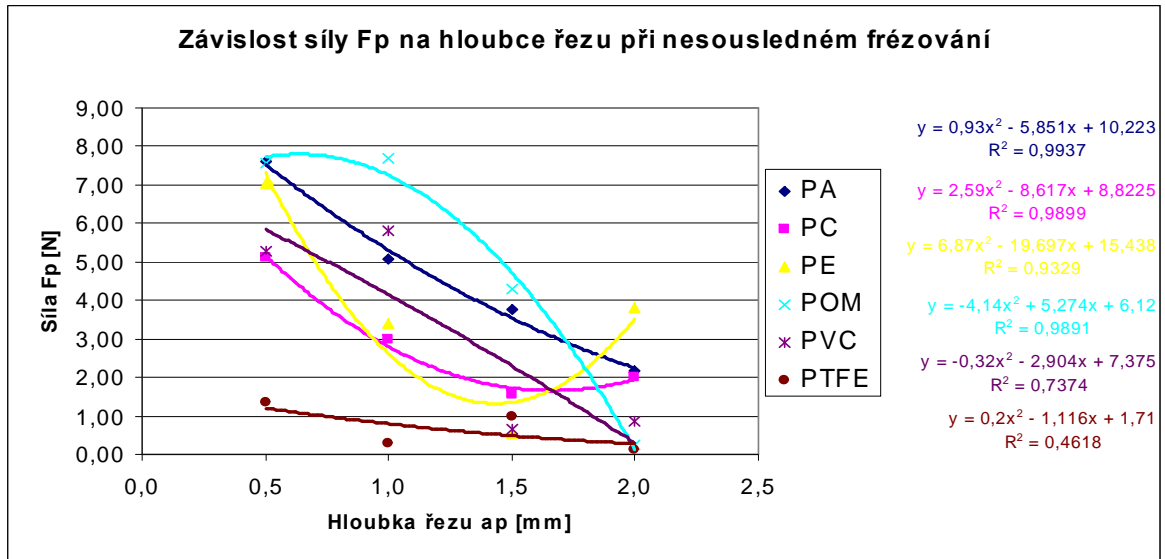
maxima. U duralu a mědi je tomu podobně jen s tím rozdílem, že maximum u těchto materiálů je v hloubce řezu 0,5 mm. Pokles velikosti síly F_p je způsoben snížením tření mezi nástrojem a obrobkem.



Obr. 86 Závislost síly F_c na hloubce řezu při sousledném frézování

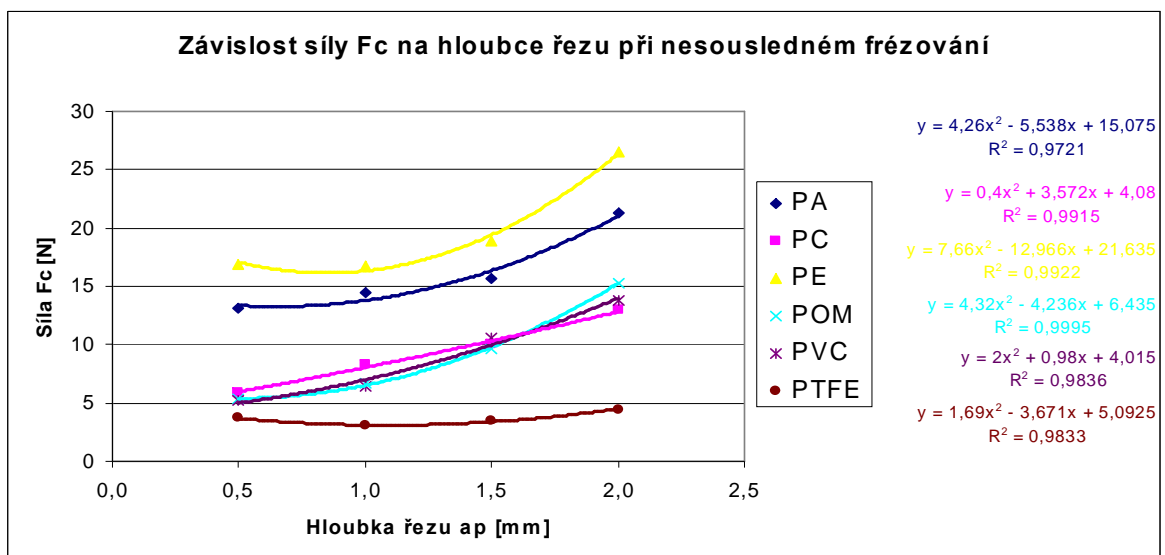
Podobně jako v případě závislosti síly F_c na hloubce řezu při nesousledném frézování, tak i zde lze konstatovat, že s rostoucí hloubkou řezu roste i velikost síly F_c .

9.1.3 Vliv hloubky řezu na řezné síly u polymerů



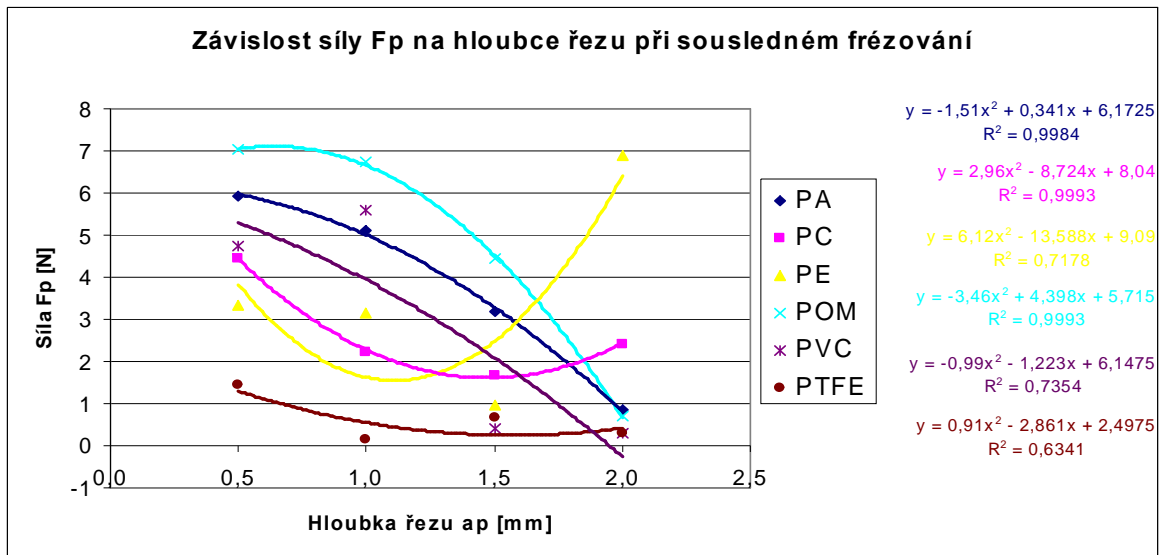
Obr. 87 Závislost síly Fp na hloubce řezu při nesousledném frézování

Z obr. 87 vyplývá, že čím vyšší bude hloubka řezu, tím nižší budou hodnoty síly Fp. Tento pokles je způsoben natavováním obráběného materiálu. U PC a PE dochází od hloubky řezu přibližně 1,5 mm, resp. 1,4 mm ke konci poklesu velikosti síly Fp a k následnému růstu. Tento růst je způsoben tím, že materiál se lepí na nástroj tzn. zvýší se tření.



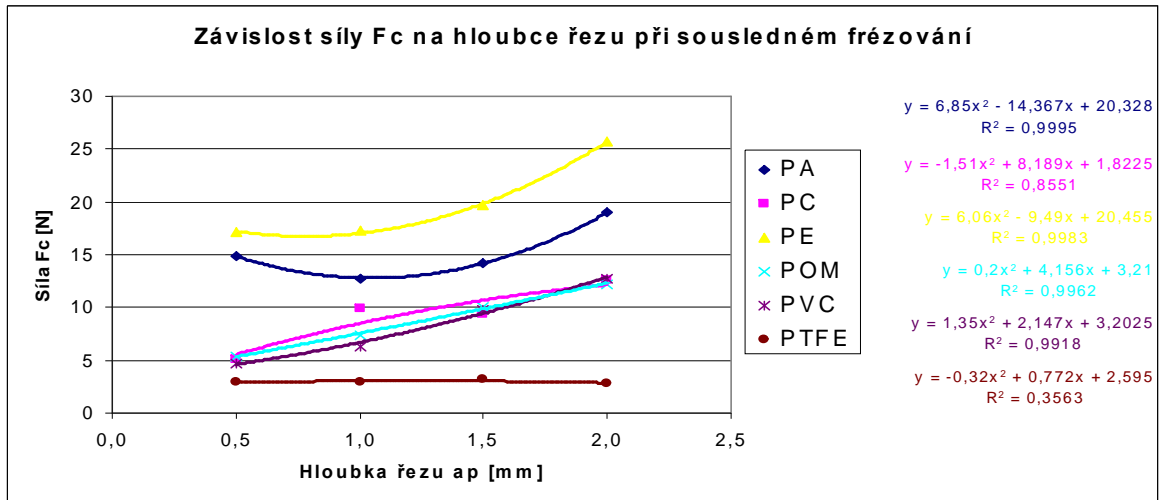
Obr. 88 Závislost síly Fc na hloubce řezu při nesousledném frézování

Při sledování velikosti síly F_c v závislosti na hloubce řezu je vidět, že u všech materiálů, s výjimkou PTFE, dochází k růstu hodnoty síly F_c . Růst je způsoben větším množstvím odebraného materiálu. U PTFE nejprve dochází ke snížení síly F_c a následně k růstu do svého maxima.



Obr. 89 Závislost síly F_p na hloubce řezu při sousledném frézování

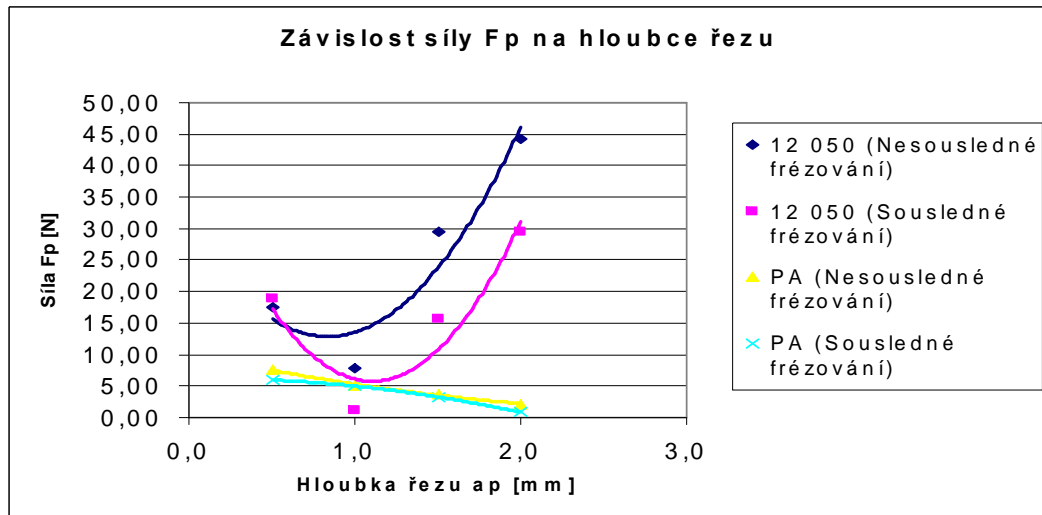
Z obr. 89 je zřejmé, že s rostoucí hloubkou řezu klesají hodnoty síly F_p u materiálů POM, PA, PVC, tento pokles je způsoben natavováním frézovaného materiálu. U PE je patrný pokles velikosti síly F_p přibližně do hloubky řezu 1,2 mm. Od této hloubky řezu můžeme sledovat růst síly F_p do maxima. Snížování hodnoty síly F_p s následným růstem můžeme vidět také u PC a PTFE. Růst velikosti síly F_p je způsoben pravděpodobně nalepováním materiálu na nástroj, tzn. zvýší se tření.

Obr. 90 Závislost síly F_c na hloubce řezu při sousledném frézování

Z obr. 90 je zřejmé, že velikosti síly F_c v závislosti na hloubce řezu mají rostoucí tendenci u PE, PC, POM a PVC. Kdežto u PA je vidět, že hodnoty síly F_c s rostoucí hloubkou řezu nejprve klesají do svého minima a následně rostou. V případě PTFE byl zaznamenán slabý růst velikosti síly a následně slabý pokles.

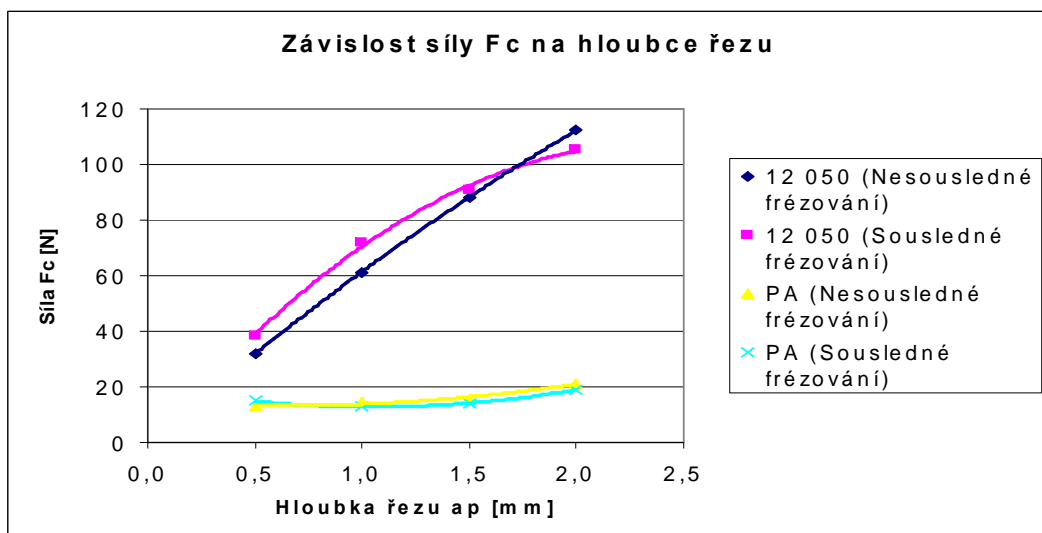
9.1.4 Vliv hloubky řezu na řezné síly – srovnání oceli 12 050 a PA při sousledném a nesousledném frézování

Zde se srovnávala ocel 12 050 a PA při sousledném a nesousledném frézování.



Obr. 91 Závislost síly F_p na hloubce řezu

Při srovnání velikosti síly F_p na hloubce řezu při sousledném a nesousledném frézování je patrné, že větší hodnoty síly jsou u nesousledného způsobu frézování.



Obr. 92 Závislost síly F_c na hloubce řezu

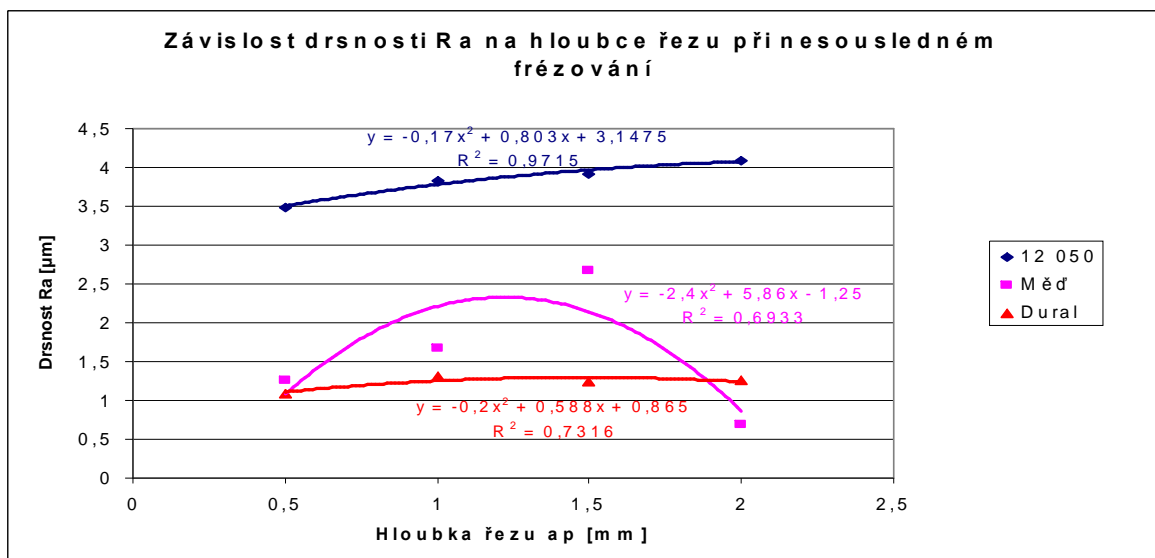
Při zkoumání této závislosti lze konstatovat, že velikosti síly F_c jsou vyšší při sousledném způsobu frézování u oceli 12 050 téměř v celém rozmezí hloubky řezu. Naopak u PA jsou hodnoty síly F_c vyšší při nesousledném způsobu frézování, pouze v nižších hloubkách řezu je tomu jinak.

9.2 Vliv hloubky řezu na jakost povrchu

9.2.1 Vliv hloubky řezu na jakost povrchu – nesousledné frézování

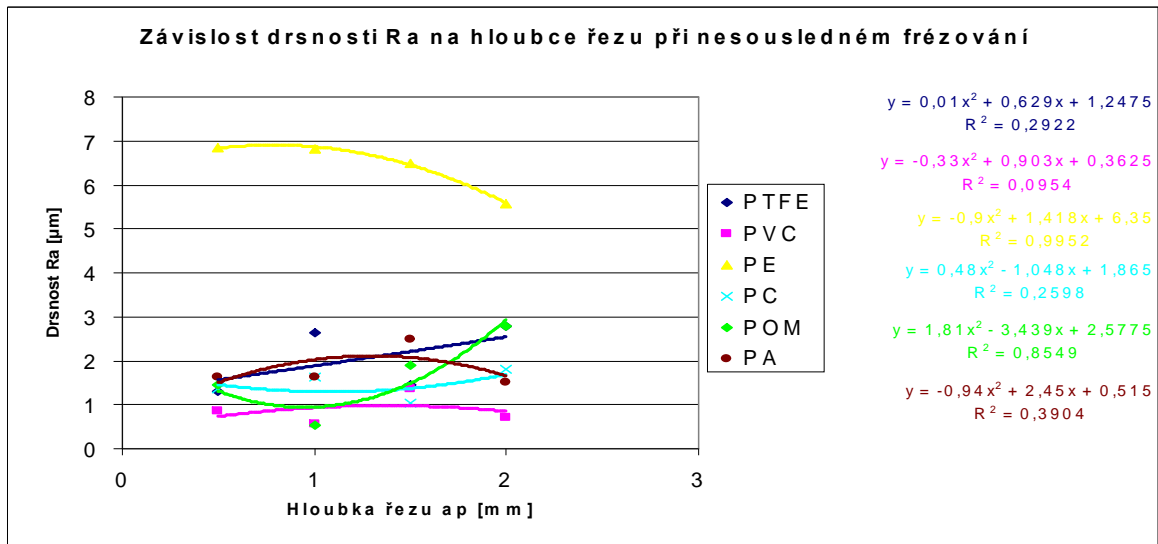
Tab. 11 Střední hodnoty drsnosti R_a při nesousledném frézování

Materiál	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm
12 050	3,49	3,83	3,92	4,09
Měď	1,26	1,67	2,68	0,69
Dural	1,09	1,31	1,24	1,26
PTFE	1,31	2,65	1,45	2,80
PVC	0,86	0,55	1,36	0,72
PE	6,85	6,82	6,50	5,57
PC	1,35	1,63	1,04	1,80
POM	1,45	0,53	1,91	2,80
PA	1,64	1,62	2,48	1,52



Obr. 93 Závislost drsnosti R_a na hloubce řezu při nesousledném frézování

Jak je z grafu patrné, tak při rostoucí hloubce řezu se zvyšuje drsnost materiálu Ra u oceli 12 050. U mědi drsnost Ra nejprve roste, dosáhne svého maxima přibližně v hloubce řezu 1,2 mm a následně padá do svého minima, které se nachází v hloubce řezu 2 mm. U duralu můžeme pozorovat pozvolný růst drsnosti do hloubky řezu 1,5 mm a následné klesání hodnoty Ra do hloubky řezu 2 mm.



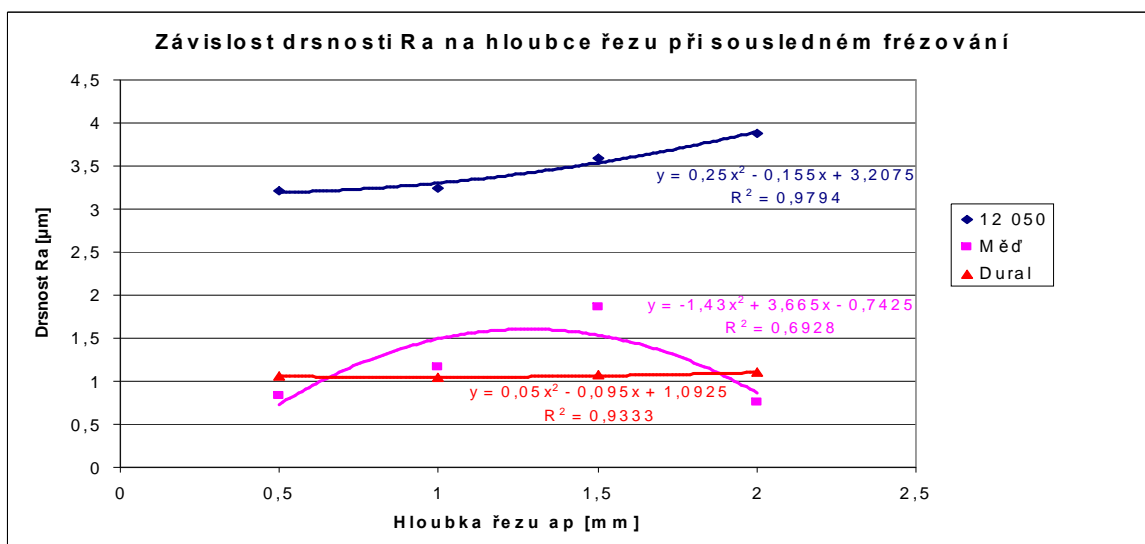
Obr. 94 Závislost drsnosti Ra na hloubce řezu při nesousledném frézování

Při sledování drsnosti Ra při nesousledném frézování u plastů můžeme říct, že nejvyšší hodnoty drsnosti Ra dosáhl PE a naopak nejnižší PVC. S rostoucí hloubkou řezu u PE klesá hodnota Ra. V případě PTFE je tomu naopak, zde s rostoucí hloubkou řezu roste hodnota Ra. Dále můžeme konstatovat, že u PVC a PA drsnost nejprve roste, dosáhne svého maxima a následně pozvolna klesá. V případě materiálů POM a PC nastává nejprve pokles hodnoty Ra a následně nárůst této hodnoty.

9.2.2 Vliv hloubky řezu na jakost povrchu – sousledné frézování

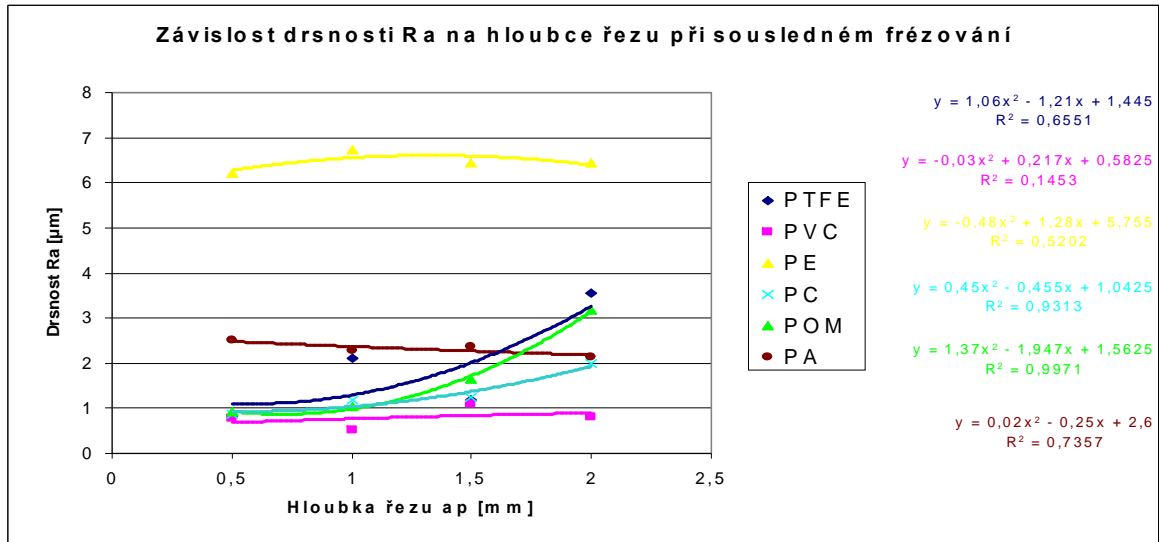
Tab. 12 Střední hodnoty drsnosti Ra při sousledném frézování

Materiál	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm
12 050	3,21	3,25	3,59	3,88
Měď	0,84	1,17	1,86	0,76
Dural	1,06	1,04	1,07	1,10
PTFE	0,83	2,12	1,19	3,54
PVC	0,77	0,51	1,10	0,81
PE	6,22	6,72	6,43	6,45
PC	0,88	1,18	1,23	1,98
POM	0,91	1,05	1,66	3,17
PA	2,51	2,28	2,36	2,15



Obr. 95 Závislost drsnosti Ra na hloubce řezu při sousledném frézování

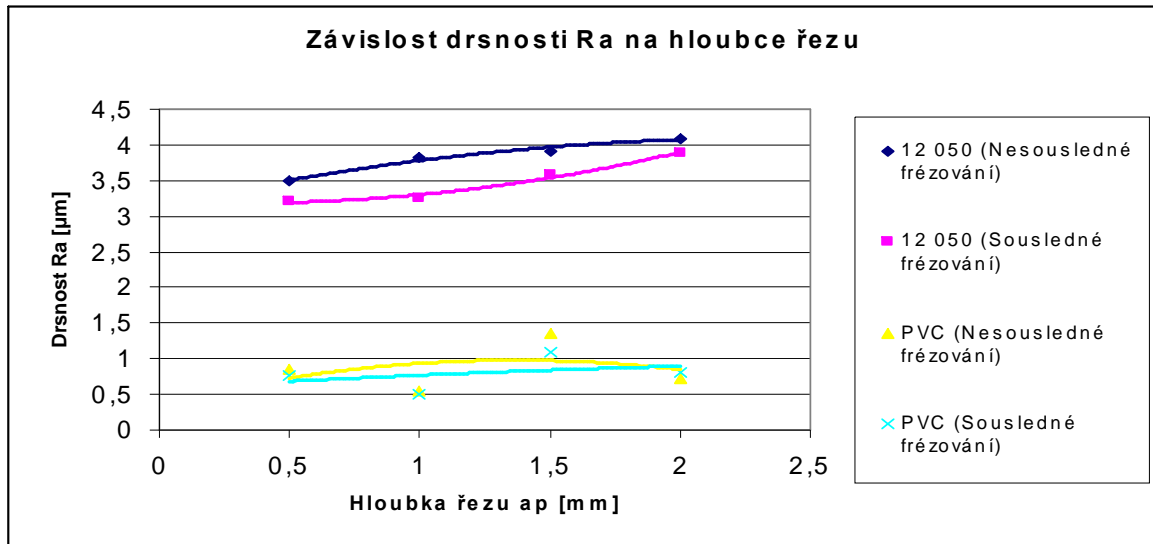
Stejně jako u měření drsnosti Ra při nesousledném frézování, i zde u oceli 12 050 roste hodnota drsnosti Ra, můžeme také pozorovat podobný průběh drsnosti Ra u mědi. Z grafu také vyplývá, že u duralu byl zaznamenán slabý pokles hodnoty Ra do hloubky řezu 1,2 mm a následný slabý růst.



Obr. 96 Závislost drsnosti Ra na hloubce řezu při sousledném frézování

V případě závislosti drsnosti Ra na hloubce řezu při sousledném frézování je zřejmé, že stejně jako u nesousledného frézování, bylo dosaženo nejvyšší hodnoty Ra u PE a nejnižší hodnoty u PVC. U PE můžeme pozorovat mírný růst hodnoty Ra s rostoucí hloubkou řezu a následný mírný pokles. Růst hodnoty Ra s rostoucí hloubkou řezu můžeme pozorovat u PTFE, POM, PVC a také PC. Naopak pokles měřené veličiny na hloubce řezu je patrný pouze u PA.

9.2.3 Porovnání drsnosti Ra při nesousledném a sousledném frézování – ocel 12 050 a PVC



Obr. 97 Závislost drsnosti Ra na hloubce řezu

Při porovnávání závislostí drsnosti Ra na hloubce řezu při nesousledném a sousledném frézování, je patrná vyšší hodnota drsnosti Ra u oceli 12 050 a PVC při nesousledném frézování. Tento výsledek porovnání se očekával.

ZÁVĚR

U broušení se měřily řezné síly při změně hloubky řezu a změně rychlosti posuvu. Brousilo se třemi brousícími kotouči – A 99 K 80 9 V, A 99 K 80 13 V a A 99 60 J 12 V. Dále se měřila drsnost povrchu obrobeného materiálu při rychlosti posuvu 23,5 m/min a hloubce řezu 0,04 mm. Naměřené hodnoty se zpracovávaly do tabulek a následně vyhodnocovaly.

Provedený experiment ukazuje:

- S rostoucí hloubkou řezu roste jak axiální síla F_p , tak i tangenciální síla F_c u všech kovových materiálů. V případě polymerů můžeme sledovat rostoucí charakter řezných sil v závislosti na hloubce řezu u všech vzorků, tedy až na některé případy, kdy dochází k natavování materiálu.
- S rostoucí rychlostí posuvu, rostou u kovů, téměř ve všech případech, hodnoty řezných sil F_p a F_c . V případě polymerních materiálů je zřejmý, až na některé výjimky, rostoucí průběh těchto sil. V případě PTFE můžeme sledovat ve všech případech, u všech brousících kotoučů nejprve růst a později klesající charakter řezných sil. Tento fakt je způsoben pravděpodobně tím, že PTFE "maže".
- Při sledování vlivu struktury brousícího kotouče na hodnoty tangenciální síly F_c u oceli 14 109 je patrné, že nejvyšší hodnoty síly F_c byly naměřeny u brousícího kotouče A 99 K 80 9 V a naopak nejnižší u A 99 60 J 12 V téměř v celém rozsahu hloubky řezu. V případě PA je zřejmé, že vliv brousícího nástroje není nijak veliký a dá se konstatovat, že je téměř zanedbatelný. V závislosti síly F_p na hloubce řezu u oceli 14 109 je patrné, že při nižší hloubce řezu vykazuje nejvyšší hodnoty síly F_p kotouč A 99 K 80 9 V, při vyšších hloubkách řezu pak brousící nástroj A 99 K 80 13 V. Naopak v nejnižších hodnotách síly F_p se vystřídají brousící nástroje A 99 K 80 13 V a A 99 60 J 12 V. V případě PA vykazoval nejvyšší hodnoty síly F_p kotouč A 99 K 80 13 V a nejnižší byly naměřeny u brousících nástrojů A 99 K 80 9 V při nižší hloubce řezu a A 99 60 J 12 V ve vyšší hloubce řezu. V závislosti axiální síly v závislosti na rychlosti posuvu u oceli vykazoval nejvyšší hodnoty řezné síly F_p kotouč A 99 K 80 9 V téměř v celém rozsahu rychlosti posuvu a nejnižší brousící nástroj A 99 60 J 12 V. U PA byly naměřeny nejvyšší hodnoty síly F_p u kotouče A 99 60 J 12 V při nižších rychlostech posuvu, při vyšších pak A 99 K 80 13 V. Naopak nejnižší hodnoty síly F_p byly neměřeny u kotouče

A 99 K 80 9 V do rychlosti posuvu přibližně 18 m/min, odtud pak nejnižší hodnoty síly F_p byly naměřeny u brousícího nástroje A 99 60 J 12 V. Teoreticky by brousící kotouč s nižší pórovitostí měl vykazovat vyšší hodnoty řezných sil.

- Pokud srovnáme oba sloupcové grafy, tak zjistíme, že u brousícího kotouče A 99 K 80 9 V dosahujeme u všech materiálů nižší hodnoty R_a , než u brousícího nástroje A 99 60 J 12 V, kromě duralu a PA. Lze tedy konstatovat, že lepší hodnoty drsnosti R_a vykazuje mírně pórovitý brousící kotouč. Drsnost povrchu R_a nebyla naměřena u kotouče A 99 K 80 13 V z technických důvodů.

Frézovalo se tříbřitým frézovacím nástrojem o o 10 mm sousledně a nesousledně. Měřily se zde řezné síly při změně hloubky řezu. Dále se měřila drsnost povrchu R_a ve všech hloubkách řezu při sousledném i nesousledném frézování.

Dané závislosti ukazují:

- Nejvyšší řezné síly ze všech frézovaných materiálů nám vykazovala ocel 12 050. Z obr. 84 a 86 je patrné, že s rostoucí axiální hloubkou řezu, roste tangenciální síla F_c , tzn. s větším množstvím odebíraného materiálu, roste síla F_c . V případě axiální velikosti síly F_p můžeme sledovat nejprve propad této síly a následně růst do svého maxima. Tento pokles je pravděpodobně způsoben snížením tření mezi nástrojem a obrobkem.
- U polymerů vykazoval nejvyšší hodnoty síly F_p POM jak při sousledném, tak i nesousledném způsobu frézování téměř v celém rozsahu hloubky řezu, naopak nejnižší byly zaznamenány u PTFE téměř po celé hloubce řezu. U všech polymerních materiálů, kromě PC, PE u obou způsobů frézování a PTFE při sousledném frézování, můžeme sledovat klesající tendenci hodnoty síly F_p . Klesání je způsobeno natavováním frézovaného materiálu.
- V závislosti síly F_c na hloubce řezu u polymerních materiálů můžeme sledovat růst těchto hodnot síly při nesousledném způsobu frézování u PE, PA, POM, PVC a PC. V případě sousledného způsobu je zřejmý růst síly F_c u PE, PC, POM a PVC. Můžeme konstatovat, že čím větší bude úběr materiálu, tím vyšší bude síla F_c . U obou způsobů frézování vykazoval nejvyšší hodnoty síly F_c PE, naopak nejnižší PTFE.

- V případě porovnání závislosti drsnosti Ra na hloubce řezu při sousledném a nesousledném způsobu frézování je zřejmé, že vyšší drsnost Ra vykazoval nesousledný způsob, což se také očekávalo. Dále lze konstatovat, že čím větší hloubka řezu, tím u oceli roste drsnost Ra. V případě PVC se drsnost materiálu s rostoucí hloubkou řezu téměř nemění. V případě sousledného frézování tato hodnota mírně roste, kdežto u nesousledného frézování nastává od hloubky řezu 1,5 mm slabý pokles. Stejně jako u oceli, tak i zde vykazuje vyšší drsnost Ra nesousledné frézování, s tím rozdílem, že přibližně od hloubky řezu 1,7 mm je drsnost Ra na stejné resp. nižší hodnotě, než u sousledného způsobu.

Cílem práce bylo určit vliv technologických podmínek na dynamickou obrobiteľnosť kovů a plastů při broušení a frézování, všechny body zadání byly splněny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BEŇO, Jozef. *Teória rezania kovov*. Košice: VIENALA, 1999
- [2] BRANDŠTETR, Jiří a kolektiv. *Chemie pro posluchače Fakulty strojního inženýrství*. Brno: VUTIUM, 1999
- [3] BUDA, J., BÉKÉS, J. *Teoretické základy obrábění kovov*. Bratislava: ALFA, 1977
- [4] BUDA, SOUČEK, VASILKO. *Teória obábání*. Bratislava: ALFA, 1988
- [5] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. Praha: SNTL, 1957
- [6] HLUCHÝ, Miroslav a kolektiv. *Strojírenská technologie I*. Praha: SNTL, 1978
- [7] HOLVEK, J., KAČÍREK, J., TOMAN K. *Frézky, frézy a frézování*. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1951
- [8] KAŠTÁNEK, Otakar. *Strojírenské materiály a technologie*. Brno: ES VUT, 1980
- [9] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie - Obrábění*. Brno: CERM, 2004
- [10] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001
- [11] LEINVEBER, Jan, VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Praha: SCIENTIA, 1996
- [12] LIEMERT, DRÁBEK, ONDRA, VAVŘÍK. *Obrábění*. Praha: SNTL, 1974
- [13] LUKOVICS, Imrich. *Konstrukční materiály a technologie*. Brno: ES VUT, 1986
- [14] MASLOV, J.N. *Teorie broušení kovů*. Praha: SNTL, 1979
- [15] NESLUŠAN, Miroslav a kolektiv. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina: EDIS, 2007
- [16] PŘIKRYL, Z. a kolektiv. *Technologie obrábění*. Praha: SNTL, 1967
- [17] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. Praha: SNTL, 1971
- [18] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002
- [19] ROČEK, Vladimír. *Příručka obrábění*. Praha: SNTL, 1973
- [20] VASILKO, K. *Analytická teória trieskového obrábání*. Prešov: COFIN, 2007
- [21] VIGNER, M., PŘIKRYL, Z. a kolektiv. *Obrábění*. Praha: SNTL, 1984
- [22] BRH 20.03F, *Bruska rovinná horizontální. Návod k použití*

- [23] Microstep, s.r.o., *Uživatelská příručka řídiaceho systému FC 16 CNC*. 1993
- [24] Mitutoyo SJ – 301, *Přístroj na měření drsnosti povrchu. Návod k použití*.
- [25] Feron – Sortimentní katalog [online]. cit. [2008-04-05]. Dostupný z WWW:
http://62.168.62.45/cze/katalog/mat_normy.php
- [26] Progrese – Ocel pro strojírenství [online]. cit. [2008-04-05]. Dostupný z WWW:
<http://www.progrese.cz/pgs/zkusebna/zkusebna-page.html>
- [27] Wikipedie – Otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2008-04-05]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Dural>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

λ_c	Filtr profilu s dlouhou vlnovou délkou	[μm]
λ_f	Filtr profilu s dlouhou vlnovou délkou	[μm]
A	Celková práce	[$\text{J}\cdot\text{min}^{-1}$]
a	Přídavek na broušení	[mm]
a_c	Pracovní radiální záběr	[mm]
A_d	Práce plastických deformací	[$\text{J}\cdot\text{min}^{-1}$]
A_e	Práce pružných deformací	[$\text{J}\cdot\text{min}^{-1}$]
a_e	Radiální hloubka řezu	[mm]
a_p	Axiální hloubka řezu	[mm]
A_p	Práce disperzní	[$\text{J}\cdot\text{min}^{-1}$]
A_t	Práce tření	[$\text{J}\cdot\text{min}^{-1}$]
A_{t1}	Práce tření na čele nástroje	[$\text{J}\cdot\text{min}^{-1}$]
A_{t2}	Práce tření na hřbetu nástroje	[$\text{J}\cdot\text{min}^{-1}$]
B	Šířka broušené plochy u rovinného broušení	[mm]
b	Šířka frézované plochy	[mm]
b_s	Šířka brousícího kotouče	[mm]
C_1	Konstanta, která vyjadřuje všeobecné podmínky frézování	[-]
C_F	Materiálová konstanta pro určování řezné síly	[-]
C_{Fc}	Konstanta	[-]
ČSN	Česká technická norma	
C_t	Konstanta vlivu materiálu obrobku na materiál nástroje	[-]
C_ω	Koeficient, který vyjadřuje vliv úhlu sklonu šroubovice	[-]
D	Průměr obrobku nebo nástroje	[mm]
e	Měrná práce řezání	[$\text{J}\cdot\text{mm}^{-2}$]
f	Posuv na jednu otáčku broušeného dílce	[$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$]
F_{1c}	Řezná síla na jedno zrno	[N]
fa	Axiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku	[mm]
F_c	Tangenciální síla	[N]
F_{cN}	Radiální síla	[N]
F_f	Horizontální složka výsledné řezné síly	[N]

F_{fN}	Vertikální složka výsledné řezné síly	[N]
f_{Min}	Podélný posuv dílce	[mm.min ⁻¹]
F_O	Osová síla	[N]
F_p	Radiální síla	[N]
$f_{př}$	Příčný posuv u rovinného broušení	[mm/zdvih]
f_r	Radiální posuv stolu	[mm]
F_t	Síla tření mezi čelem nože a třískou	[N]
h	Hloubka řezu	[mm]
h_D	Jmenovitá tloušťka řezu	[mm]
h_{Dc}	Tloušťka třísky	[mm]
h_x	Hloubka třísky v dané poloze zubu	[mm]
h_z	Výpočtová hodnota hloubky odebrané vrstvy	[mm]
i	Počet záběrů	[-]
i_v	Počet vyjiskřovacích záběrů	[-]
J	Mechanický ekvivalent tepla	[kpm/kcal]
k	Součinitel osového skluzu	[-]
L	Celková dráha frézy i s přeběhy	[mm]
l_p	Základní délka primárního profilu	[mm]
l_r	Základní délka profilu drsnosti	[mm]
l_w	Základní délka profilu vlnitosti	[mm]
M	Kroutící moment	[kp.mm]
n	Otáčky obrobku nebo nástroje	[min ⁻¹]
N	Potřebný efektivní výkon motoru	[kW]
p	Měrný řezný odpor	[kp.mm ⁻²]
PA	Polyamid	
PC	Polykarbonát	
P_c	Řezný výkon	[kW]
P_e	Efektivní výkon	[kW]
PE	Polyethylen	
P_k	Výkon potřebný pro broušení kotoučem	[kW]
POM	Polyoxymethylen	
P_s	Výkon potřebný na otáčení součástky	[kW]

P_{sh}	Rovina stříhu	[-]
PTFE	Polytetrafluorethylen	
PVC	Polvinylchlorid	
q	Součinitel určující podíl z celkové práce řezání, přeměněný v teplo	[-]
Q_e	Vzniklé teplo řezného procesu	[J]
Q_n	Teplo odvedené nástrojem	[J]
Q_o	Teplo odvedené obrobkem	[J]
Q_{pd}	Teplo vzniklé v oblasti plastických deformací při tvoření třísky	[J]
Q_{pr}	Teplo odvedené řezným prostředím	[J]
Q_t	Teplo odvedené třískou	[J]
Q_α	Teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje po přechodové ploše	[J]
Q_γ	Teplo vzniklé v oblasti zření třísky po čele nástroje	[J]
R	Poloměr frézy	[mm]
R_a	Střední aritmetická výška nerovností povrchu	[μm]
r_n	Poloměr zaoblení ostří	[mm]
S	Průřez třísky	[mm^2]
s_{min}	Posuv za minutu	[$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
S_x	Průřez třísky	[mm^2]
s_z	Posuv na zub	[mm]
S_z	Skutečný průřez odřezávaného kovu jedním brousícím zrnem	[mm^2]
t	Hloubka odfrézované vrstvy materiálu	[mm]
T	Trvanlivost	[min]
t_{AS}	Čas potřebný pro broušení	[min]
t_r	Teplota řezání	[$^{\circ}\text{C}$]
t_s	Řezný čas	[min]
U_m	Měrný výkon	[cm^3/min]
v	Řezná rychlost	[m/min]
V	Objem odebraného materiálu	[$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]
v_c	Řezná rychlost	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
v_f	Posuvová rychlost	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_{fa}	Axiální rychlost posuvu stolu	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_{fr}	Radiální rychlost posuvu stolu	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

v_{ft}	Tangenciální rychlost posuvu stolu	$[m.min^{-1}]$
v_k	Obvodová rychlost brousícího kotouče	$[m.s^{-1}]$
v_p	Obvodová rychlost podávacího kotouče	$[m.min^{-1}]$
v_s	Obvodová rychlost broušené součásti	$[m.min^{-1}]$
v_w	Obvodová rychlost obrobku	$[m.min^{-1}]$
x_F	Exponent pro výpočet řezné síly	[-]
x_t	Exponent	[-]
y_F	Exponent pro výpočet řezné síly	[-]
y_t	Exponent	[-]
z	Počet zubů frézy	[-]
z	Počet současně zabírajících zrn	[-]
α	Sklon osy podávacího kotouče	$[^\circ]$
α_n	Normální úhel hřbetu	$[^\circ]$
γ_n	Normální úhel čela	$[^\circ]$
φ	Úhel pootočení zubu frézy	$[^\circ]$
Φ	Úhel roviny stříhu	$[^\circ]$
φ_0	Velikost úhlu	$[^\circ]$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Obráběná plocha, obrobená plocha, plocha řezu [16].....	12
Obr. 2 Realizace řezného procesu [10].....	14
Obr. 3 Schéma vzniku třísky [14].....	14
Obr. 4 Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě [10].....	15
Obr. 5 Zjednodušený model tvorby elementů třísky při ortogonálním řezání [10].....	16
Obr. 6 Složky řezného odporu a řezných sil při soustružení [19]	19
Obr. 7 Teplotní pole obrobku, třísky a nástroje při ortogonálním řezání – příklad [10].....	21
Obr. 8 Závislost obecných trendů teploty řezání na řezné rychlosti a posuvu při soustružení [10].....	22
Obr. 9 Model záběru brousícího zrna [10].....	24
Obr. 10 Vybrané způsoby obvodového broušení[10]	25
Obr. 11 Vybrané způsoby čelního broušení [10]	26
Obr. 12 Schéma obvodového broušení s podélným (axiálním) posuvem [10]	26
Obr. 13 Princip hloubkového broušení [10].....	27
Obr. 14 Princip zapichovacího broušení [10]	28
Obr. 15 Schéma bezhrotého broušení [9]	34
Obr. 16 Základní tvary brousících kotoučů a tělísek [21].....	35
Obr. 17 Rozklad řezné síly při válcovém broušení [20].....	37
Obr. 18 Zjednodušená plocha průřezu řezu při broušení [20].....	38
Obr. 19 Okružovací frézování [10].....	41
Obr. 20 Čelní frézování [13]	42
Obr. 21 Sousedné frézování [16].....	43
Obr. 22 Nesousedné frézování [16].....	44
Obr. 23 Válcová fréza se zuby ve šroubovici [13]	48
Obr. 24 Normální dvoubřítá drážkovací fréza [7]	48
Obr. 25 Nástrčná čelně – válcová fréza [13].....	49
Obr. 26 Kotoučová fréza [7].....	50
Obr. 27 Úhlová fréza [7].....	50
Obr. 28 Normální fréza na drážky T [7]	51
Obr. 29 Schéma rozkladu sil působících na zub válcové frézy [3].....	53
Obr. 30 Schéma změny hloubky odebrané vrstvy na délce oblouku při frézování [3].....	55

Obr. 31 Schéma pro výpočet obvodové síly při válcovém frézování [3]	56
Obr. 32 Bruska BRH 20.03 F	67
Obr. 33 Frézka FC 16 CNC	68
Obr. 34 Profil povrchu [15]	68
Obr. 35 Přenosové charakteristiky pro profil drsnosti, vlnitosti a primární profil [15].....	69
Obr. 36 Prvek profilu [15]	70
Obr. 37 Amplitudové parametry – Rp, Rv, Rz (výstupek a prohloubenina) [15]	71
Obr. 38 Přístroj na měření drsnosti povrchu – MITUTOYO SJ – 301 [24]	72
Obr. 39 Dvousložkový tenzometrický dynamometr	73
Obr. 40 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min	79
Obr. 41 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min.....	80
Obr. 42 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min	81
Obr. 43 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min.....	81
Obr. 44 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min	82
Obr. 45 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min.....	83
Obr. 46 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	83
Obr. 47 Závislost síly Fc na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	84
Obr. 48 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	84
Obr. 49 Závislost síly Fc na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	85
Obr. 50 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	86
Obr. 51 Závislost síly Fc na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	86
Obr. 52 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min	87
Obr. 53 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min.....	88
Obr. 54 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min	88
Obr. 55 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min.....	89
Obr. 56 Závislost síly Fp na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min	90
Obr. 57 Závislost síly Fc na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min.....	90
Obr. 58 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	91
Obr. 59 Závislost síly Fc na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	92
Obr. 60 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	92
Obr. 61 Závislost síly Fc na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	93
Obr. 62 Závislost síly Fp na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	94

Obr. 63 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	94
Obr. 64 Závislost síly F_p na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min	95
Obr. 65 Závislost síly F_c na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min.....	96
Obr. 66 Závislost síly F_p na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min	96
Obr. 67 Závislost síly F_c na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min.....	97
Obr. 68 Závislost síly F_p na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min	98
Obr. 69 Závislost síly F_c na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min.....	98
Obr. 70 Závislost síly F_p na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	99
Obr. 71 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	99
Obr. 72 Závislost síly F_p na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	100
Obr. 73 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	101
Obr. 74 Závislost síly F_p na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	101
Obr. 75 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	102
Obr. 76 Závislost síly F_p na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min	103
Obr. 77 Závislost síly F_c na hloubce řezu při posuvu 23,5 m/min.....	104
Obr. 78 Závislost síly F_p na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	104
Obr. 79 Závislost síly F_c na rychlosti posuvu při hloubce řezu 0,04 mm	105
Obr. 80 Drsnost povrchu R_a po broušení kotoučem A 99 K 80 9 V	106
Obr. 81 Drsnost R_a po broušení kotoučem A 99 60 J 12 V	107
Obr. 82 Vliv brousícího kotouče na drsnost R_a	107
Obr. 83 Závislost síly F_p na hloubce řezu při nesousledném frézování	109
Obr. 84 Závislost síly F_c na hloubce řezu při nesousledném frézování.....	110
Obr. 85 Závislost síly F_p na hloubce řezu při sousledném frézování.....	110
Obr. 86 Závislost síly F_c na hloubce řezu při sousledném frézování	111
Obr. 87 Závislost síly F_p na hloubce řezu při nesousledném frézování	112
Obr. 88 Závislost síly F_c na hloubce řezu při nesousledném frézování.....	112
Obr. 89 Závislost síly F_p na hloubce řezu při sousledném frézování.....	113
Obr. 90 Závislost síly F_c na hloubce řezu při sousledném frézování	114
Obr. 91 Závislost síly F_p na hloubce řezu	115
Obr. 92 Závislost síly F_c na hloubce řezu	115
Obr. 93 Závislost drsnosti R_a na hloubce řezu při nesousledném frézování	116
Obr. 94 Závislost drsnosti R_a na hloubce řezu při nesousledném frézování	117

Obr. 95 Závislost drsnosti Ra na hloubce řezu při sousledném frézování.....	118
Obr. 96 Závislost drsnosti Ra na hloubce řezu při sousledném frézování.....	119
Obr. 97 Závislost drsnosti Ra na hloubce řezu.....	120

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Volba brousícího kotouče pro broušení vnějších rotačních ploch [21].....	29
Tab. 2 Směrné hodnoty řezných podmínek pro rovinné broušení obvodem kotouče [21]	31
Tab. 3 Volba kotouče pro rovinné broušení obvodem kotouče [21].....	31
Tab. 4 Směrné hodnoty řezných podmínek pro rovinné broušení čelem kotouče [21]	31
Tab. 5 Volba kotouče pro rovinné broušení čelem [21]	32
Tab. 6 Dosahované parametry přesnosti obrobených ploch pro abrazivní metody obrábění [10]	34
Tab. 7 Způsob označování brousících kotoučů [21]	36
Tab. 8 Měrný výkon [16]	44
Tab. 9 Dosahovaná přesnost a jakost povrchu [16]	45
Tab. 10 Seznam funkcí v CNC programu	109
Tab. 11 Střední hodnoty drsnosti Ra při nesousledném frézování	116
Tab. 12 Střední hodnoty drsnosti Ra při sousledném frézování.....	118

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Tabulky naměřených hodnot řezných sil – A 99 K 80 9 V
- P II Tabulky naměřených hodnot řezných sil – A 99 K 80 13 V
- P III Tabulky naměřených a přepočítaných hodnot řezných sil – A 99 60 J 12 V
- P IV Tabulky naměřených hodnot řezných sil - frézování
- P V Tabulky naměřených a vyhodnocených hodnot drsností Ra – broušení
- P VI Tabulky naměřených a vyhodnocených hodnot drsností Ra – frézování
- P VII Závislosti řezných sil na hloubce řezu – A 99 K 80 9 V
- P VIII Závislosti řezných sil na rychlosti posuvu – A 99 K 80 9 V
- P VIIX Závislosti řezných sil na hloubce řezu – A 99 K 80 13 V
- P X Závislosti řezných sil na rychlosti posuvu – A 99 K 80 13 V
- P XI Závislosti řezných sil na hloubce řezu - A 99 60 J 12 V
- P XII Závislosti řezných sil na rychlosti posuvu - A 99 60 J 12 V
- P XIII Závislosti řezných sil na hloubce řezu - porovnání brousících kotoučů
- P XIV Závislosti řezných sil na rychlosti posuvu - porovnání brousících kotoučů
- P XV Závislosti řezných sil na hloubce řezu pro jednotlivé materiály – frézování