



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PREDIKCE ŘEZNÝCH SIL A VÝKONŮ PŘI ŘEZÁNÍ KOTOUČOVOU PILOU

PREDICTION OF CUTTING FORCES AND POWERS WHEN SAWING WITH A CIRCULAR
SAW

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Skryja

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jan Skryja**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2018/19

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

Predikce řezných sil a výkonů při řezání kotoučovou pilou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá technologií dělení materiálů kotoučovou pilou a rozбором vlivu geometrie zubů a povlakování na řezný proces

Cíle diplomové práce:

- Teoretický rozbor problematiky.
- Popis stávajícího stavu znalostí.
- Návrh experimentálních zkoušek.
- Statistické vyhodnocení výsledků.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M. a M. PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, A. Technologie I – Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2003 [online]. [cit. 2018-16-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/TI_TO-1cast.pdf.

MÁDL, J. a I. KVASNIČKA. Optimalizace obráběcího procesu. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01864-6.

TLUSTÝ, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.

BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 1.vyd., Slovensko, Trenčin, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.

PÍŠKA, M, a kol. Speciální technologie obrábění. Učební text pro FSI. CERM, Brno, 2009. s. 248. ISBN 978-80-214-4025-8.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005. p. 651. ISBN 0-1--514206-.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou řezání tenkostěnných součástí kotoučovou pilou. Jejím předmětem je studie a test geometrií ozubení pilových kotoučů s cílem snížení řezných sil na minimum. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je proveden rozbor stávajících znalostí o celistvých pilových kotoučích a technologii řezání kotoučovou pilou. V praktické části je provedeno silové testování čtyřech pilových kotoučů s různými geometriemi ozubení při řezání vybrané tenkostěnné součásti. Z měření provedených v rámci této diplomové práce vyplývá, že výběrem správné geometrie břitu lze řezné síly snížit přibližně o 30 %.

Klíčová slova

kotoučová pila, řezná síla, řezný výkon, dělení materiálu, frézování

ABSTRACT

This thesis deals with the cutting of steel thin-walled parts by slitting saw. Its subject is to study and test of cutting edges of slitting saws with a goal to reduce cutting forces to a minimum. The thesis is divided into the theoretical and practical part. In the theoretical part, existing knowledge about slitting saws and general cutting technology is analyzed. In the practical part testing of four slitting saws with different geometries of cutting edges during machining of chosen thin-walled part is performed. The performed measurements show that by the proper choice of the geometry of cutting edge, the cutting force can be reduced approximately by 30 %.

Key words

slitting saw, cutting force, cutting performance, material cutting, milling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKRYJA, Jan. *Predikce řezných sil a výkonů při řezání kotoučovou pilou*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117282>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Predikce řezných sil a výkonů při řezání kotoučovou pilou** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Jan Skryja

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky, rady a čas, který mi věnoval při tvorbě této diplomové práce. Že byl ochoten mi pomoci a i přes svoji vysokou pracovní vytíženost si vždy našel čas odpovídat na desítky dotazů, které jsem k jeho osobě směřoval.

Dále chci poděkovat zástupcům firem Fischer Vyškov, spol. s r. o., a GSP-High Tech Saws, s. r. o., za jejich důvěru a všem, kteří mi jakýmkoliv způsobem při tvorbě této práce pomohli.

V neposlední řadě děkuji mé rodině, přítelkyni a přátelům za jejich nezdolnou psychickou podporu při studiu. Jmenovitě chci zmínit mého nejlepšího přítele a kulečnickového velmistra Davida Kozla, jenž mi byl jako spolubydlící a spolužák nejrychlejší podporou v těžkých chvílích, kterých bylo díky němu o mnoho méně.

OBSAH

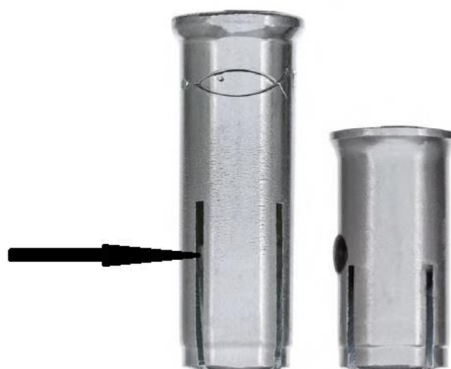
| | |
|---|----|
| ABSTRAKT | 4 |
| PROHLÁŠENÍ | 5 |
| PODĚKOVÁNÍ..... | 6 |
| OBSAH..... | 7 |
| ÚVOD | 9 |
| 1 TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ KOTOUČOVOU PILOU | 10 |
| 1.1 Kinematika řezání kotoučovou pilou..... | 11 |
| 1.1.1 Nesousledné řezání | 12 |
| 1.1.2 Sousedné řezání | 12 |
| 1.2 Dynamika řezání kotoučovou pilou..... | 13 |
| 1.2.1 Řezná síla a řezný výkon | 15 |
| 1.2.2 Přímé určování řezné síly | 18 |
| 1.2.3 Nepřímé určování řezné síly | 18 |
| 2 PILOVÉ KOTOUČE | 20 |
| 2.1 Geometrie pilových kotoučů | 20 |
| 2.1.1 Dělení pilových kotoučů podle konstrukčního provedení | 22 |
| 2.1.2 Dělení pilových kotoučů podle počtu zubů | 23 |
| 2.1.3 Dělení pilových kotoučů podle tvaru zubů..... | 23 |
| 2.1.4 Ozubení VARIO | 26 |
| 2.1.5 Dělitelnost počtu zubů..... | 27 |
| 2.2 Materiály celistvých pilových kotoučů..... | 28 |
| 2.2.1 HSS/Dmo5 – DIN 1.3343 | 29 |
| 2.2.2 HSS/Emo5 – DIN 1.3243 | 30 |
| 2.3 Povlakování pilových kotoučů | 30 |
| 2.3.1 CVD | 31 |
| 2.3.2 PVD..... | 31 |
| 3 ROZBOR PROBLÉMU..... | 32 |
| 3.1 Popis operace | 33 |
| 3.2 Řešené problémy | 34 |
| 3.3 Diplomová práce Ing. Radka Spáčila | 35 |
| 4 REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI | 38 |
| 4.1 Obecný postup měření | 38 |
| 4.2 Vstupní parametry | 39 |
| 4.2.1 Obráběcí stroj | 39 |
| 4.2.2 Obrobek a jeho upnutí..... | 39 |

| | |
|--|----|
| 4.2.3 Řezné nástroje a jejich upnutí..... | 41 |
| 4.2.4 Měření geometrie břitů..... | 43 |
| 4.2.5 Měřicí aparatura pro měření řezných sil..... | 44 |
| 4.2.6 Řezné podmínky..... | 44 |
| 4.2.7 Chlazení..... | 44 |
| 5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI..... | 45 |
| 5.1 Způsob získávání silového záznamu..... | 45 |
| 5.1.1 Transformace souřadného systému..... | 45 |
| 5.1.2 Výslednice sil..... | 46 |
| 5.1.3 Filtrace dat..... | 46 |
| 5.1.4 Skládání silových záznamů..... | 47 |
| 5.1.5 Způsob numerického vyhodnocení..... | 48 |
| 5.2 Grafické závislosti sil F_x , F_y , F_z a F na čase..... | 49 |
| 5.3 Grafické srovnání zatížení pilových kotoučů..... | 57 |
| 5.4 Numerické srovnání zatížení pilových kotoučů..... | 59 |
| ZÁVĚR..... | 61 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ..... | 62 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 65 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 67 |

ÚVOD

Řezání kotoučovou pilou je vedle dělení materiálu pásovou pilou, rozbrušováním, laserem, vodním paprskem, plazmou, kyslíkem atd. proces, při němž dochází k rozdělení jednoho polotovaru na více částí. Tyto technologie lze s výhodou využít i tam, kde není zapotřebí materiál rozdělit na více kusů, ale pouze vyfrézovat úzké a někdy i velmi hluboké drážky [1].

Předmětem této práce je operace, při níž je zapotřebí zhotovit hlubokou drážku tenkostěnné součásti zobrazené na obr. 1. Ze všech diskutovaných technologií obrábění materiálu je v tomto případě nezastupitelná právě technologie řezání kotoučovou pilou, neboť je součást vyráběna ve velkých sériích (v řádech jednotek tisíc kusů za jednu směnu). Frézování této drážky je provázeno mnoha problémy – velmi malou šířkou řezu, kuželovitostí vnitřní stěny obrobku, nedostatečným počtem zubů v záběru (doporučeno je 3 až 7 [2]), střídáním sousledného a nesousledného řezání atd.



Obr. 1 Hluboká drážka, kterou je zapotřebí zhotovit [3].

K volbě tématu mé diplomové práce mě vedla zejména vnitřní touha vyzkoušet si situaci, v níž jsem „vhozen“ do neznámého problému a pokusit se navrhnout změnu v technologii, která nežádoucí důsledky tohoto problému alespoň částečně zredukuje. Díky této práci jsem tak stál přesně na rozhraní požadavků zákazníka a technologických možností dodavatele a jednal jsem s oběma stranami na možném řešení, což je mi velkou zkušeností do budoucí praxe. Dalším aspektem při mém výběru byla moje bakalářská práce na téma Diamantové kotouče a jejich využití v kamenickém průmyslu [4], která mi byla dobrým základem pro zpracování tohoto tématu.

1 TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ KOTOUČOVOU PILOU

Dělení materiálu kotoučovou pilou je zvláštním případem obvodového frézování, při kterém dochází pomocí nástroje malé tloušťky a velkého průměru k frézování velmi úzké drážky, což nakonec vede k oddělení materiálu [5]. Pilové kotouče lze tedy chápat jako tenké válcové frézy, jejichž strany jsou mírně zkosené, aby nedocházelo k tření boků nástroje o obrobek [6]. Radiální šířka záběru a_e je limitována velikostí kotouče, resp. polovinou jeho průměru zmenšenou o poloměr upínací příruby [1]. Kvůli tenkému průřezu kotoučových pil je zapotřebí snížit velikost posuvu na zub f_z [mm] na 1/4 až na 1/8 oproti klasickému obvodovému frézování (u řezání neželezných kovů může být rychlost posuvu zvýšena) [6]. Pilový kotouč by se neměl nasazovat na vřetena frézek, není-li opatřen speciální přírubou pro zvýšení stability [6]. Vzhledem k tomu, že pilové kotouče jsou velmi náchylné k poškození, je nutné zvážit (pokud je to možné), zda bude řezání probíhat nesousledně anebo sousledně [6], viz obr. 1.2 a obr. 1.3.

Největšími výhodami dělení materiálu pilovým kotoučem jsou vysoká univerzálnost použití, vysoká produktivita technologie, vysoká přesnost řezu, čistota řezu a při správném použití nástrojů i jejich životnost [7]. Kotoučové pily jsou proto často zařazovány do výrobních linek o velkých sériích [8].

Pilové kotouče jsou vyráběny jako celistvé anebo dělené. Jako celistvé jsou vyráběny pouze kotoučové pily s menšími průměry. Výroba velkých celistvých pilových kotoučů (cca od průměru $\varnothing D \geq 300$ mm) by byla velmi nákladná, protože spotřeba drahého materiálu by byla velmi vysoká. Proto jsou u dělených kotoučů z rychlořezných ocelí vyráběny pouze vlastní řezné části a těla kotoučů jsou vyráběna z levnějších nástrojových ocelí [9].

Tato práce se zabývá řezáním tenkostěnných profilů relativně malých rozměrů, a proto bude proveden především rozbor celistvých pilových kotoučů (příklady uvedeny na obr. 1.1), které jsou pro řezání takových obrobků dostačující. Celistvé pilové kotouče jsou popsány normou ČSN 22 2901.



Obr. 1.1 Ukázky celistvých kotoučových pil s různými tvary ozubení [10].

1.1 Kinematika řezání kotoučovou pilou

Při analýze kinematiky řezání kotoučovou pilou lze vyjít z obvodového frézování. Hlavní řezný pohyb koná vždy kotoučová pila a je definován řeznou rychlostí v_c , která je dána vztahem (1.1) [11].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.1)$$

kde: $v_c [m \cdot \text{min}^{-1}]$ – řezná rychlost,
 $D [mm]$ – průměr nástroje,
 $n [\text{min}^{-1}]$ – otáčky nástroje.

Vedlejší (posuvový) pohyb v_f je konán nástrojem anebo obrobkem a jeho velikost je dána vztahem (1.2) [11].

$$v_f = \frac{f_z \cdot z \cdot n}{1000} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.2)$$

kde: $v_f [m \cdot \text{min}^{-1}]$ – posuvová rychlost,
 $f_z [mm]$ – posuv na zub,
 $z [-]$ – počet zubů nástroje,
 $n [\text{min}^{-1}]$ – otáčky za minutu.

Pozn.: Vztah (1.2) je kvůli lepší přehlednosti častěji uváděn ve tvaru (1.3) [12].

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n [mm \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.3)$$

kde: $v_f [mm \cdot \text{min}^{-1}]$ – posuvová rychlost,
 $f_z [mm]$ – posuv na zub,
 $z [-]$ – počet zubů nástroje,
 $n [\text{min}^{-1}]$ – otáčky za minutu.

Vektorovým součtem rychlostí v_c a v_f je určen vztah (1.4) pro výpočet efektivního výsledného pohybu v_e [11].

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.4)$$

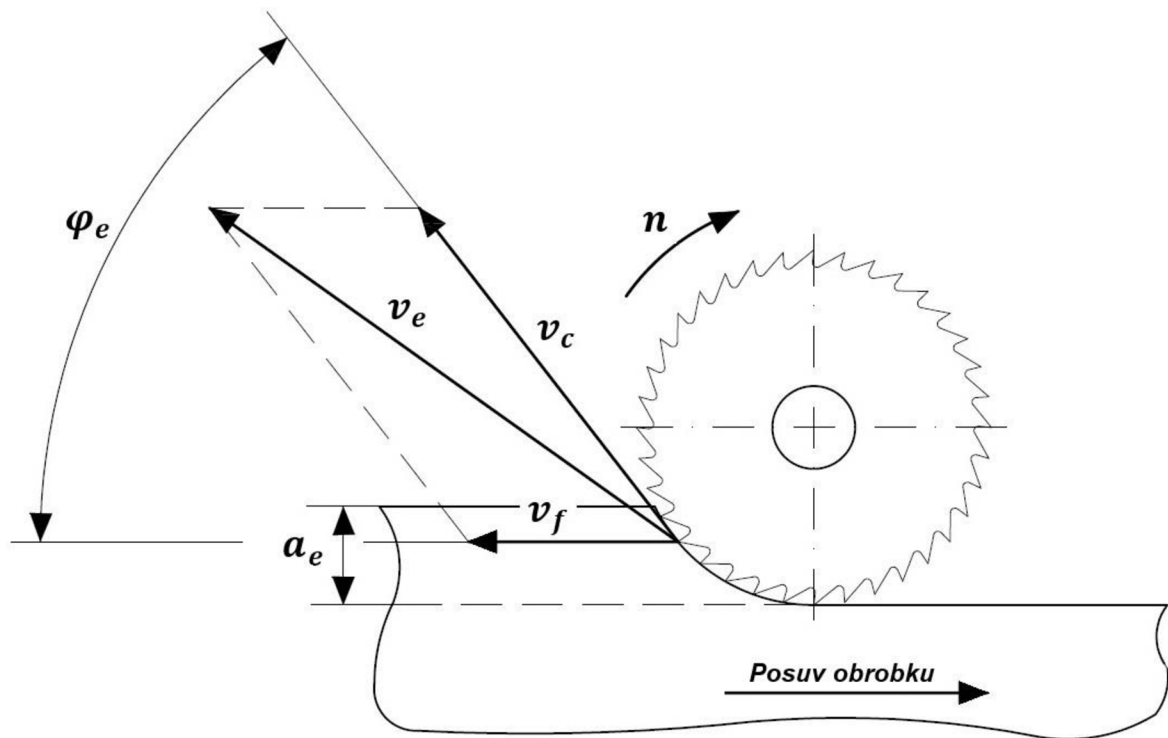
kde: $v_e [m \cdot \text{min}^{-1}]$ – efektivní výsledná rychlost,
 $v_c [m \cdot \text{min}^{-1}]$ – řezná rychlost,
 $v_f [m \cdot \text{min}^{-1}]$ – posuvová rychlost.

Řezání kotoučovou pilou může, stejně jako obvodové frézování, probíhat buď sousledně anebo nesousledně.

1.1.1 Nesousledné řezání

Nesousledné řezání kotoučovou pilou je charakterizováno opačným směrem smyslu otáčení nástroje vůči směru posuvu obrobku (viz obr. 1.2) [6].

Zub nástroje vstupuje do řezu postupně, tzn. že při vstupu zubu nástroje do řezu je tloušťka třísky nulová a při opouštění řezu je maximální. Mezi výhody nesousledného řezání patří nezávislost trvanlivosti nástroje na nečistotách povrchu obrobku. Při nesousledném řezání je však zapotřebí vyššího řezného výkonu. Soustava je méně stabilní, neboť řezná síla má složku, která má směr vzhůru (pryč od stolu). Následkem toho má vyšší sklon k vibracím, a to negativně ovlivňuje drsnost povrchu obrobku i trvanlivost nástroje [12].



Obr. 1.2 Nesousledné řezání kotoučovou pilou – podle [11].

| | | |
|-------------------------------------|---|---------------------------------------|
| kde: φ_e [°] | – | úhel posuvového pohybu, |
| v_e [$m \cdot \text{min}^{-1}$] | – | efektivní výsledná rychlost, |
| v_c [$m \cdot \text{min}^{-1}$] | – | řezná rychlost, |
| v_f [$m \cdot \text{min}^{-1}$] | – | posuvová rychlost, |
| a_e [mm] | – | radiální šířka záběru (hloubka řezu), |
| n [min^{-1}] | – | otáčky nástroje. |

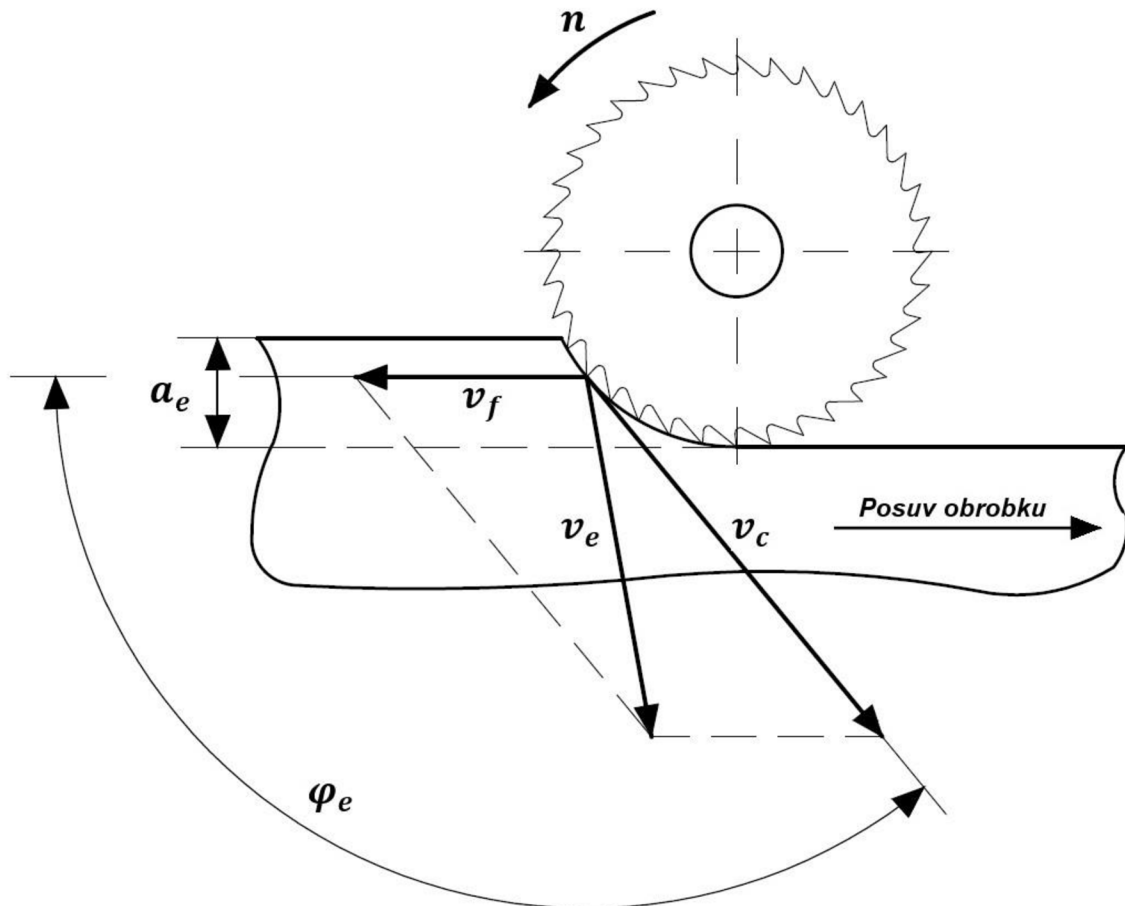
1.1.2 Sousedné řezání

Sousedné řezání je charakterizováno stejným směrem smyslu rotace nástroje a směru posuvu obrobku (viz obr. 1.3) [6].

Tříška je tvořena opačným principem než u nesousledného řezání, tj. od maximální hodnoty tloušťky třísky až po její nulovou hodnotu. Obrobená plocha je

vytvářena při odchodu zubu nástroje ze záběru. Řezná síla má kolmou složku, která směřuje dolů (do stolu), z čehož plynou menší nároky na upínání obrobků a menší sklon k vibracím soustavy. Při sousledném řezání je zapotřebí nižších řezných výkonů a lze obvykle dosáhnout i nižších hodnot drsností povrchu [12].

Přestože je trvanlivost/životnost nástroje závislá na nečistotách povrchu obrobku, při správném použití lze u této metody docílit až o 50 % vyšší trvanlivosti než u řezání nesousledného [6].



Obr. 1.3 Sousledné řezání kotoučovou pilou – podle [11].

Pozn.: Popis veličin u obr. 1.3 je totožný jako u obr. 1.2.

1.2 Dynamika řezání kotoučovou pilou

Při řezání působí kotoučová pila na obrobek, čímž je v materiálu vyvoláno napětí, proti kterému klade obráběný materiál odpor. V důsledku toho je vytvořeno pole řezání, které je charakterizováno stavem napjatosti, teploty a deformace [7].

Při překročení jisté meze napjatosti je docíleno oddělení materiálu ve formě třísky. Průvodním jevem tohoto procesu je vznik plastických i elastických deformací, které jsou doprovázeny vznikem silových poměrů. Analýza sil je klíčovým krokem při zjišťování mechanického namáhání soustavy obrábění. Díky správné analýze silového zatížení je možný návrh, konstrukce a verifikace soustavy obrábění po stránce pevnosti, tuhosti a dynamické stability řezného procesu. Dále je možné zjištění potřebného příkonu obráběcího stroje, zajištění dostatečné energetické

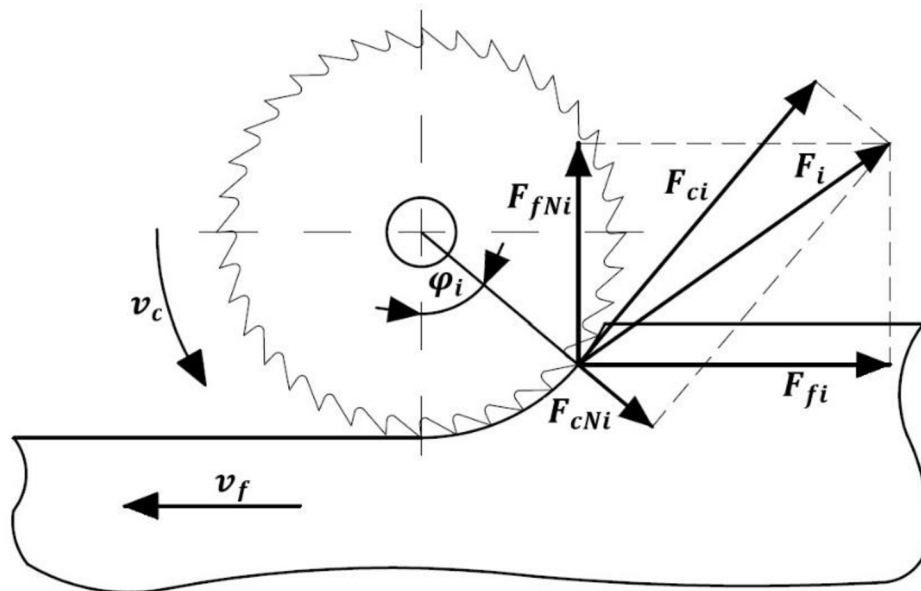
účinnosti, posouzení tepelných jevů, hodnocení trvanlivosti/životnosti nástrojů atd. [13].

Síla obrábění F je časově proměnnou veličinou, jejíž okamžitá velikost při řezání kolísá až o $\pm 20\%$, což je zapříčiněno rozptylem mechanických vlastností obráběného materiálu a způsobem tvorby třísky. Dle třetího Newtonova zákona musí být tato síla v rovnováze s opačnou silou. Opačnou silou je tzv. řezný odpor R , viz vztah (1.5) [13].

$$F = -R \text{ [N]} \quad (1.5)$$

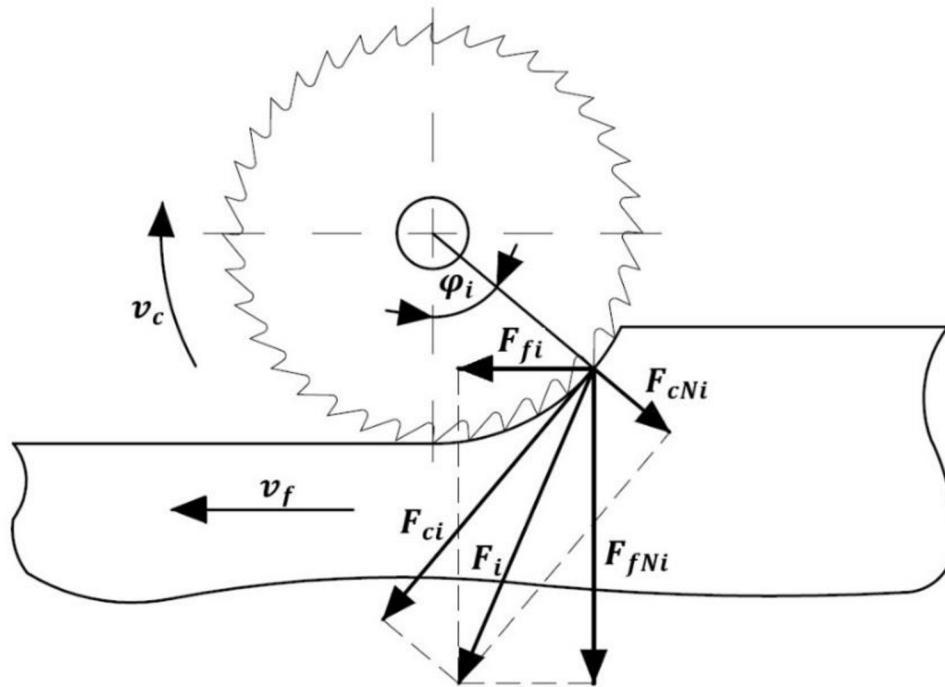
kde: F [N] – síla obrábění,
 R [N] – řezný odpor.

Síla obrábění je výslednicí aktivní a pasivní složky řezání. Aktivní složka je dále rozdělena na řeznou sílu F_c a složku od posuvu F_f . Zásadní význam při optimalizaci řezných parametrů má zejména řezná síla F_c . Na obr. 1.4, resp. obr. 1.5, je uveden silový rozklad při nesousledném, resp. sousledném řezání kotoučovou pilou [13].



Obr. 1.4 Silový rozklad při nesousledném řezání kotoučovou pilou – podle [12].

kde: v_c [$m \cdot min^{-1}$] – řezná rychlost,
 v_f [$mm \cdot min^{-1}$] – posuvová rychlost,
 F_{ci} [N] – řezná síla působící na jeden zub nástroje,
 F_{cNi} [N] – kolmá řezná síla působící na jeden zub nástroje,
 F_{fi} [N] – posuvová síla působící na jeden zub nástroje,
 F_{fNi} [N] – kolmá posuvová síla působící na jeden zub nástroje,
 F_i [N] – celková síla působící na jeden zub nástroje,
 φ_i [$^\circ$] – úhel posuvového pohybu.



Obr. 1.5 Silový rozklad při sousledném řezání kotoučovou pilou – podle [12].

Pozn.: Popis veličin u obr. 1.5 je totožný jako u obr. 1.4.

1.2.1 Řezná síla a řezný výkon

Řezný výkon je dán součinem řezné síly F_c a řezné rychlosti v_c , jak je uvedeno ve vztahu (1.6) [12].

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} [W] \quad (1.6)$$

kde: $P_c [W]$ – řezný výkon,
 $F_c [N]$ – řezná síla,
 $v_c [m \cdot \text{min}^{-1}]$ – řezná rychlost.

Pozn.: Hodnota 60 ve vztahu (1.6) vyjadřuje převod minut na sekundy, neboť řezná rychlost v_c je vyjádřena v jednotkách $[m \cdot \text{min}^{-1}]$ [12].

Vztah je pro jednoduchost formálně vyjadřován v jednotkách $[kW]$ a jeho tvar potom je dle (1.7) [12].

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{10^3 \cdot 60} [kW] \quad (1.7)$$

Celková řezná síla F_c je dána součtem všech dílčích řezných sil působících na jednotlivé zuby v záběru, a platí tedy vztah (1.8) [12].

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} [N] \quad (1.8)$$

- kde: F_c [N] – celková řezná síla,
 F_{ci} [N] – složka řezné síly od i-tého zubu,
 n_z [-] – počet zubů v záběru.

Výpočet řezné síly působící na jeden zub v záběru F_{ci} je dán vztahem (1.9) [12].

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} \text{ [N]} \quad (1.9)$$

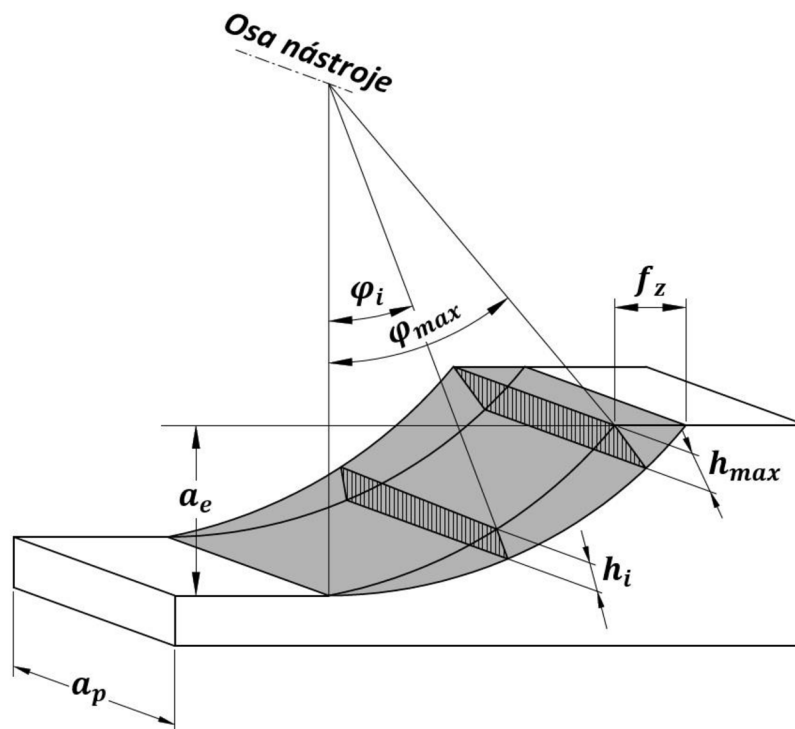
- kde: F_{ci} [N] – složka řezné síly od i-tého zubu,
 k_{ci} [MPa] – měrná řezná síla,
 A_{Di} [mm²] – průřez třísky.

Průřez třísky A_{Di} je dán vztahem (1.10) [12].

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin(\varphi_i) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.10)$$

- kde: A_{Di} [mm²] – průřez třísky,
 a_p [mm] – axiální šířka záběru (šířka řezu),
 h_i [mm] – jmenovitá tloušťka třísky,
 f_z [mm] – posuv na zub,
 φ_i [°] – úhel posuvového pohybu.

Velikost průřezu třísky při řezání kotoučovou pilou je znázorněna na obr. 1.6.



Obr. 1.6 Znárodnění průřezu třísky – podle [12].

Měrná řezná síla k_{ci} je vyjádřena vztahem (1.11) [12].

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \text{ [MPa]} \quad (1.11)$$

| | | |
|---------------------|---|---|
| kde: k_{ci} [MPa] | – | měrná řezná síla, |
| C_{Fc} [–] | – | konstanta – charakteristika obráběného materiálu, |
| h_i [mm] | – | jmenovitá tloušťka třísky, |
| x [–] | – | exponent vlivu tloušťky třísky, |
| f_z [mm] | – | posuv na zub, |
| φ_i [°] | – | úhel posuvového pohybu. |

Dosazením vztahů (1.10) a (1.11) do vztahu (1.9) a jeho následnou úpravou je určen vztah (1.12) pro výpočet řezné síly působící na jeden zub nástroje F_{ci} [12].

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (1.12)$$

Celková řezná síla F_c je potom dána vztahem (1.13) [12].

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (1.13)$$

Počet zubů v záběru n_z je dán vztahem (1.14) [12].

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} \cdot z \text{ [–]} \quad (1.14)$$

| | | |
|---------------------|---|------------------------------------|
| kde: n_z [–] | – | počet zubů v záběru, |
| φ_{max} [°] | – | maximální úhel posuvového pohybu, |
| z [–] | – | počet zubů (břitů) kotoučové pily. |

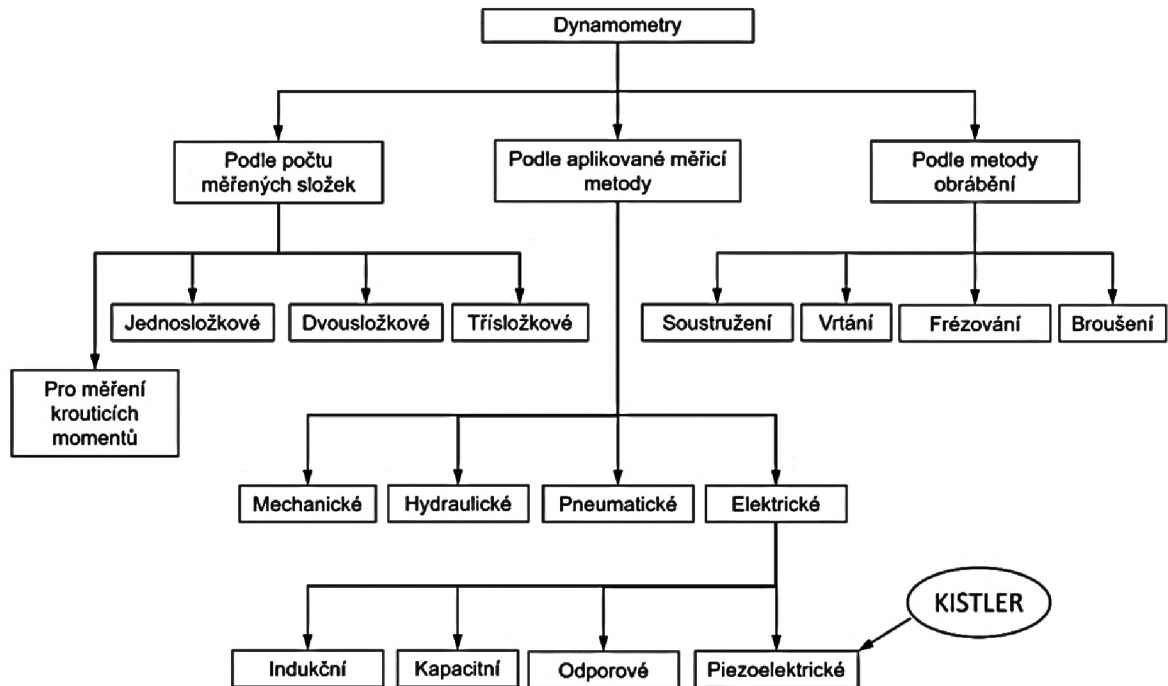
Dosazením vztahů (1.1) pro výpočet v_c a (1.13) pro výpočet F_c do vztahu (1.6) je získán vztah pro celkový řezný výkon P_c (1.15).

$$P_c = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \pi \cdot D \cdot n \cdot \frac{1}{10^6 \cdot 60} \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \text{ [W]} \quad (1.15)$$

| | | |
|--------------------------|---|---|
| kde: C_{Fc} [–] | – | konstanta – charakteristika obráběného materiálu, |
| a_p [mm] | – | axiální šířka záběru (šířka řezu), |
| f_z [mm] | – | posuv na zub, |
| x [–] | – | exponent vlivu tloušťky třísky, |
| D [mm] | – | průměr nástroje, |
| n [min ⁻¹] | – | otáčky, |
| n_z [–] | – | počet zubů v záběru, |
| φ_i [°] | – | úhel posuvového pohybu. |

1.2.2 Přímé určování řezné síly

Přímé měření silových složek je založeno na měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek. Silové zatížení je měřeno přímo v průběhu obrábění měřicím přístrojem – dynamometrem. Základním principem zařízení je přepočtení přetvoření deformačního elementu na sílu. Mezi základní parametry dynamometru patří jeho tuhost, citlivost, reprodukovatelnost a stálost údajů, setrvačnost a jeho konstrukce. Rozdělení používaných dynamometrů je uvedeno na obr. 1.7 [13].



Obr. 1.7 Rozdělení dynamometrů – podle [13].

Piezoelektrické dynamometry patří mezi elektrické dynamometry. Ty jsou založeny na principu piezoelektrického jevu. Při mechanickém stlačení piezoelektrické látky (např. křemene) dochází ke generaci elektrického napětí. Mezi mechanickým stlačením a elektrickým napětím platí lineární závislost. Příkladem moderního piezoelektrického dynamometru je dynamometr KISTLER, který je hojně využíván pro přímé měření silového zatížení v oboru obrábění [13].

1.2.3 Nepřímé určování řezné síly

Tyto metody jsou založeny převážně na měření výkonu elektromotoru obráběcího stroje, resp. na známém vztahu (1.16) pro výpočet užitečného výkonu při obrábění [13].

$$P_{už} = F_c \cdot v_c [W] \quad (1.16)$$

kde: $P_{už} [W]$ – užitečný výkon,
 $F_c [N]$ – řezná síla,
 $v_c [m \cdot s^{-1}]$ – řezná rychlost.

Při této metodě určování řezné síly je pomocí wattmetru nejprve změřen výkon nezátíženého obráběcího stroje, tj. výkon chodu naprázdno P_0 a výkon zatíženého

obráběcího stroje P_c . Užitečný výkon je dán rozdílem celkového výkonu a výkonu naprázdno, tedy [13]:

$$P_{už} = P_c - P_0 \quad (1.17)$$

kde: $P_{už}$ [W] – užitečný výkon,
 P_c [W] – výkon zatíženého obráběcího stroje,
 P_0 [W] – výkon chodu naprázdno.

Dosazením vztahu (1.16) do (1.17) a následnou úpravou dostáváme vztah (1.18) pro výpočet řezné síly F_c [13].

$$F_c = \frac{P_c - P_0}{v_c} [N] \quad (1.18)$$

kde: F_c [N] – řezná síla,
 P_c [W] – výkon zatíženého obráběcího stroje,
 P_0 [W] – výkon chodu naprázdno,
 v_c [$m \cdot s^{-1}$] – řezná rychlost.

Výhodou této metody je její relativní jednoduchost, a tudíž i rychlost určení řezné síly. Nevýhodou je značná nepřesnost z důvodu zanedbání ostatních složek celkové síly řezání F a zanedbání rozdílu účinnosti stroje při chodu naprázdno a zatíženého obráběcího stroje [13].

Řeznou sílu F_c je také možné nepřímo stanovit na základě rovnováhy krouticího momentu od řezné síly F_c a krouticího brzdného momentu od pomocné mechanické brzdy. Tato metoda je využívána zejména při vrtání [13].

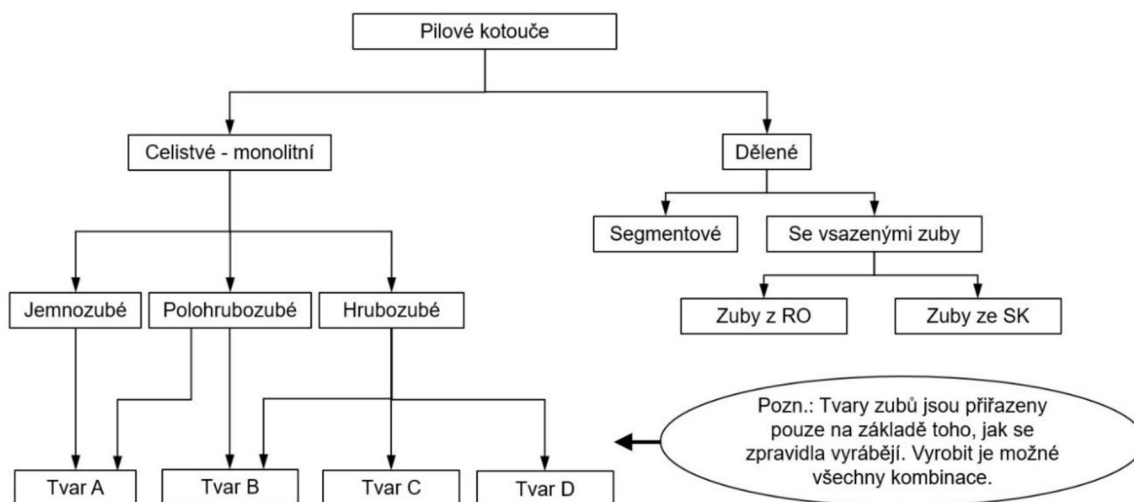
Prvním bodem je změření celkového výkonu obrábění (vrtání) pomocí moderního zapisovacího přístroje. Nástroj je potom vysunut ze záběru a pomocnou mechanickou brzdou (u níž je známá velikost momentu) je vřetenem stroje zatěžováno do chvíle, než zapisovací přístroj ukáže stejnou hodnotu jako při obrábění. Řezná síla je potom dána rovností momentů, viz vztah (1.19) [13].

$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} = M_{kb} \quad (1.19)$$

kde: M_k [$N \cdot m$] – krouticí moment od řezné síly,
 F_c [N] – řezná síla,
 D [mm] – průměr nástroje,
 M_{kb} [$N \cdot m$] – brzdný krouticí moment.

2 PILOVÉ KOTOUČE

Základní přehled používaných pilových kotoučů je uveden na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Základní rozdělení pilových kotoučů – podle [9,14].

Pozn.: Polohrubozubé ozubení již v normách ČSN popsáno není, avšak v katalogích se tento termín stále ještě používá.

2.1 Geometrie pilových kotoučů

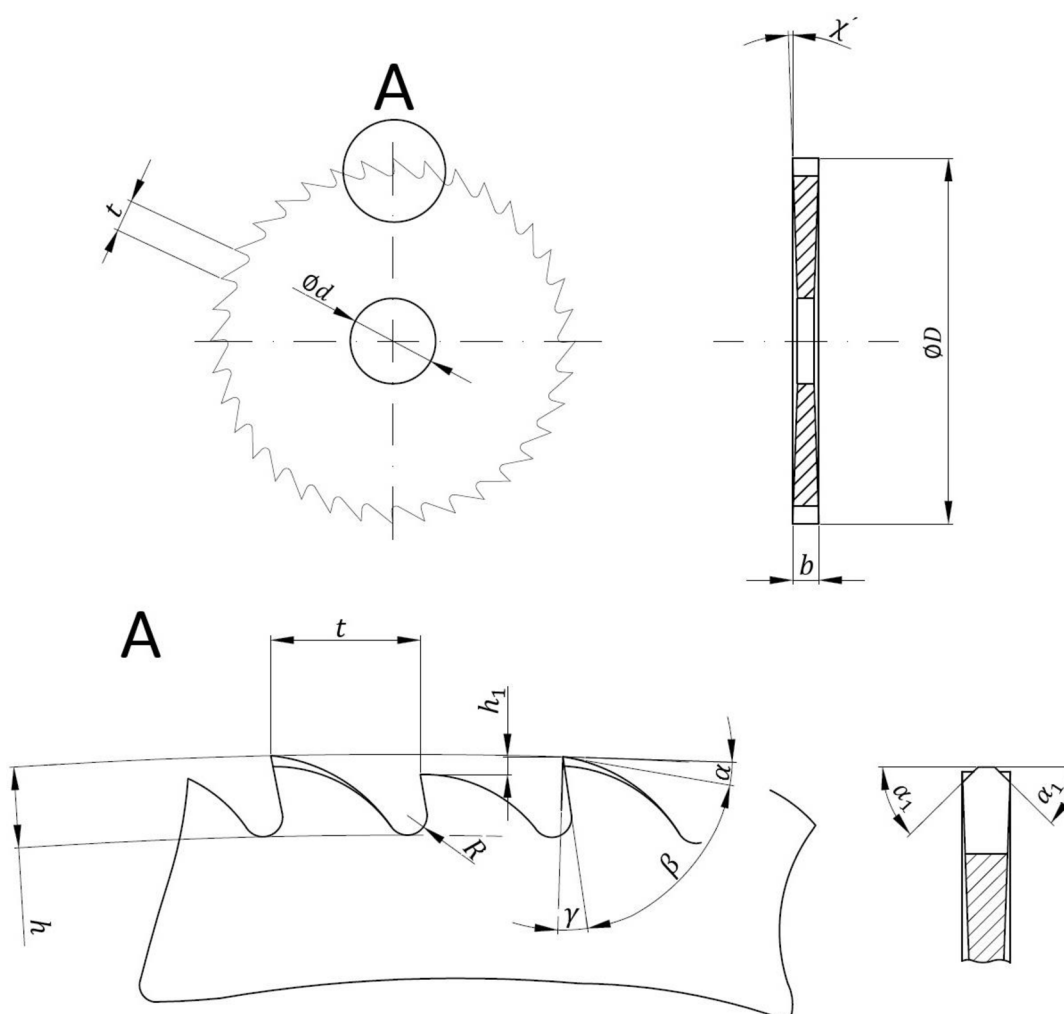
Hlavními parametry všech pilových kotoučů jsou průměr kotouče, průměr vnitřního otvoru (upínací díry), šířka nástroje, geometrie vlastní řezné části, počet zubů a u dělených pilových kotoučů i konstrukční provedení vsazovaných zubů [8].

Dle normy ČSN ISO 2296 jsou celistvé pilové kotouče s jemným ozubením vyráběny v rozsahu tloušťek 0,2 až 6 mm s průměry 20 až 315 mm a kotouče s hrubým ozubením v rozsahu tloušťek 0,3 až 6 mm s průměry 32 až 315 mm [15].

Zkosení boků kotouče je dáno úhlem χ' , jehož velikost se odvíjí od průměru pilového kotouče (obvykle se pohybuje v rozmezí $\chi' = 30'$ až $1^{\circ}30'$) [5].

U kotoučů do průměru 60 mm vede zkosení až k otvoru kotouče. U pilových kotoučů větších průměrů bývá zkosená pouze část v blízkosti vnějšího obvodu kotouče a v blízkosti středu se ponechává tloušťka konstantní, aby bylo možné kotouč správně upnout na vřeteno stroje [5].

Hlavní parametry nejčastěji používaných pilových kotoučů jsou uvedeny v normě ČSN 22 2901 (Celistvé pilové kotouče na kovy. Společné ustanovenie [14]). Geometrie pilových kotoučů je popsána několika základními parametry znázorněnými na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Základní popis geometrie celistvých pilových kotoučů – podle [14,9].

kde:

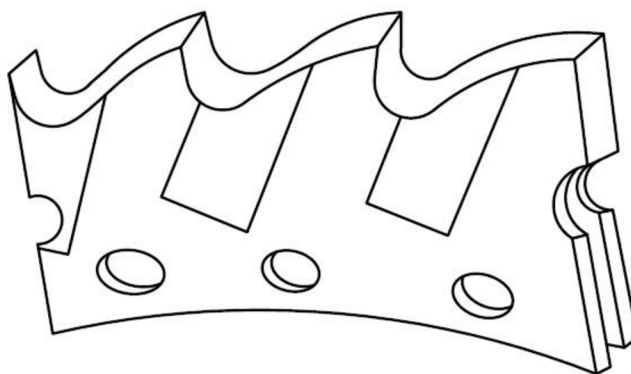
- $\varnothing D$ [mm] – Průměr pilového kotouče.
- $\varnothing d$ [mm] – Průměr upínacího otvoru pilového kotouče.
- b [mm] – Tloušťka pilového kotouče – je dána délkou ostří břitu ve směru osy nástroje [9].
- h [mm] – Výška zubu (hloubka zubové mezery) – je polovinou rozdílu průměru opsané kružnice dotýkající se ostří břitu a vepsané kružnice dotýkající se dna zubových mezer nástroje [9].
- χ' [°] – Úhel boční plochy, je úhel svíraný rovinou tečnou k boční ploše pilového kotouče a rovinou kolmou k jeho ose, proloženou vnějším okrajem zubu v rovině řezu [9].
- h_1 [mm] – Snížení zubu.

| | | |
|----------------|---|---|
| t [mm] | – | Zubová rozteč – je vzdálenost ostří břitů dvou sousedních zubů [9]. |
| R [mm] | – | Poloměr zaoblení zubové mezery (poloměr zaoblení čela zubu). |
| α [°] | – | Úhel hřbetu nástroje – úhel je měřen v rovině kolmé k ostří břitu, je svírán rovinou tečnou ke hřbetu nástroje procházející ostřím nástroje a rovinou proloženou kolmicí k poloměru, který prochází ostřím břitu zubu [9]. |
| β [°] | – | Úhel břitu nástroje – je úhel měřený v rovině kolmé k ostří břitu, je svírán rovinou tečnou k čelu a rovinou tečnou ke hřbetu nástroje procházející ostřím břitu zubu [9]. |
| γ [°] | – | Úhel čela nástroje – úhel je měřen v rovině kolmé k ostří břitu, je svírán rovinou čela nástroje (nebo rovinou k němu tečnou) a rovinou proloženou poloměrem, který prochází uvažovaným bodem ostří nástroje [9]. Má zásadní vliv na velikost silového zatížení stroje. V obecné rovině platí, že při jeho snižování se zvětšuje posuvová složka síly F_f [13]. |
| α_1 [°] | – | Úhel bočního zbrošení zubu. |

2.1.1 Dělení pilových kotoučů podle konstrukčního provedení

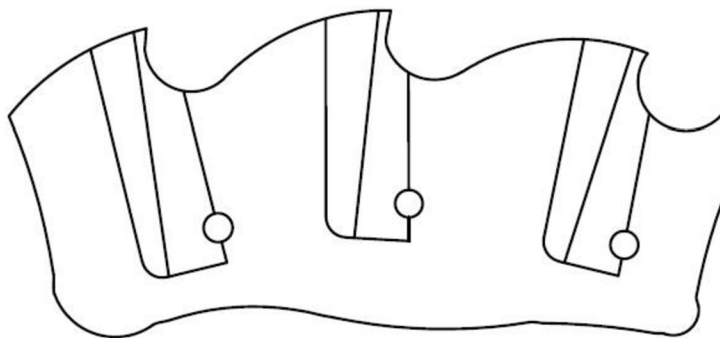
Dle konstrukčního provedení jsou pilové kotouče rozděleny na monolitní (celistvé) a dělené. Dělené kotouče lze dále rozdělit na segmentové a kotouče se vsazenými zuby z rychlořezné oceli/slinutého karbidu [2]. Dělené kotouče jsou v praxi používány zejména z důvodu šetření drahého materiálu, kdy je tělo kotouče vyrobeno z levnější konstrukční oceli [8].

Tělo kotoučů se vsazenými segmenty je zhotoveno z ušlechtilé oceli. Segmenty jsou zhotoveny buď z rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu. Segmenty jsou opatřeny drážkou a s tělem kotouče jsou spojeny nýtováním anebo ve zvláštních případech i lepením. Výhodou segmentů je, že mohou být dokoupeny jako náhradní díly a není třeba pořizovat nový kotouč. Segment pilového kotouče je znázorněn na obr. 2.3 [8].



Obr. 2.3 Segment děleného pilového kotouče – podle [8].

Těla kotoučů se vsazenými zuby jsou obvykle vyráběna z legovaných konstrukčních ocelí. Vsazované zuby jsou vyráběny z rychlořezné oceli anebo slinutých karbidů. V tělech kotoučů jsou vyrobeny radiální drážky (obr. 2.4), do nichž jsou vsazeny zuby. Pevné spojení je realizováno pomocí nýtů. Při poškození nebo vylomení vsazených zubů je možné dokoupit náhradní zub. Pilový kotouč je však nutné přebrousit, aby došlo k vyrovnání geometrií již použitých a náhradních zubů [8].



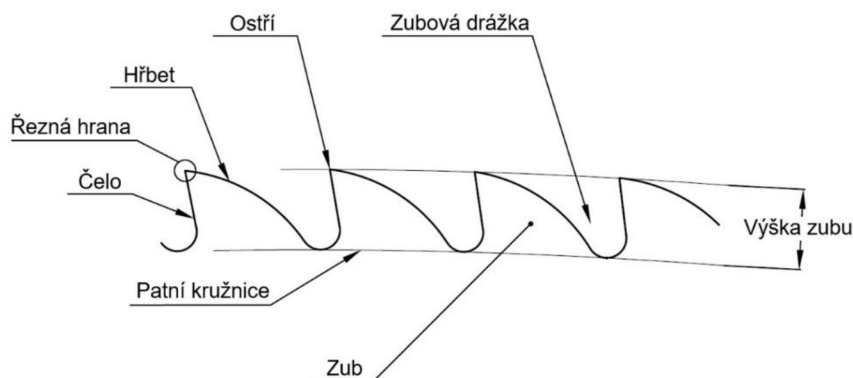
Obr. 2.4 Zub z RO/SK vsazený v těle pilového kotouče – podle [8].

2.1.2 Dělení pilových kotoučů podle počtu zubů

Pilové kotouče jsou dále děleny na kotouče s jemným ozubením a na kotouče s hrubým ozubením. Jemnozubé pilové kotouče jsou typické vysokým počtem zubů, přesněji řečeno vysokým poměrem počtu zubů k průměru kotouče. Kotouče s hrubým ozubením mají nízký poměr počtu zubů k průměru kotouče. Dle normy ČSN ISO 2296 je poměr mezi počtem zubů kotoučových pil s hrubým ozubením a počtem zubů pil s jemným ozubením 0,5. Přesné počty zubů celistvých kotoučů udávají tabulka 1 a tabulka 2 v normě ČSN ISO 2296. Např. jemnozubý kotouč s tloušťkou 1 mm a průměrem $\varnothing D = 100 \text{ mm}$ by dle normy měl 128 zubů, zatímco kotouč s hrubým ozubením pouze 64 zubů [15].

2.1.3 Dělení pilových kotoučů podle tvaru zubů

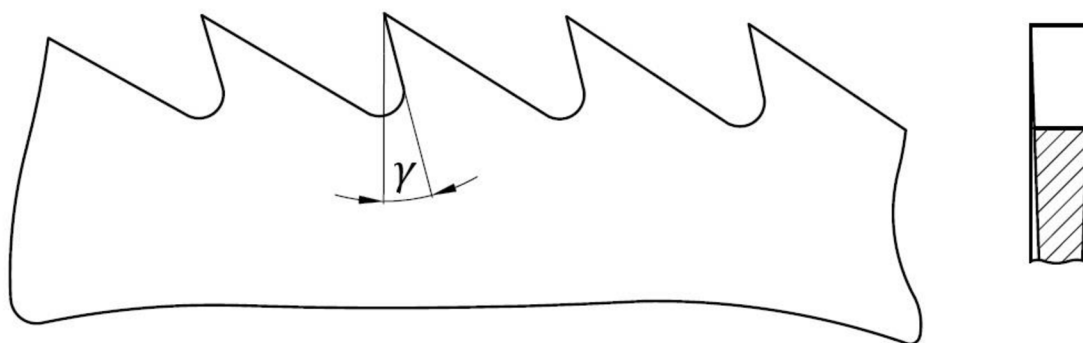
Pro popis vlastní řezné části bylo dle normy ČSN 22 2901 zavedeno názvosloví uvedené na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Názvosloví vlastní řezné části pilových kotoučů dle ČSN 22 2901 – podle [14].

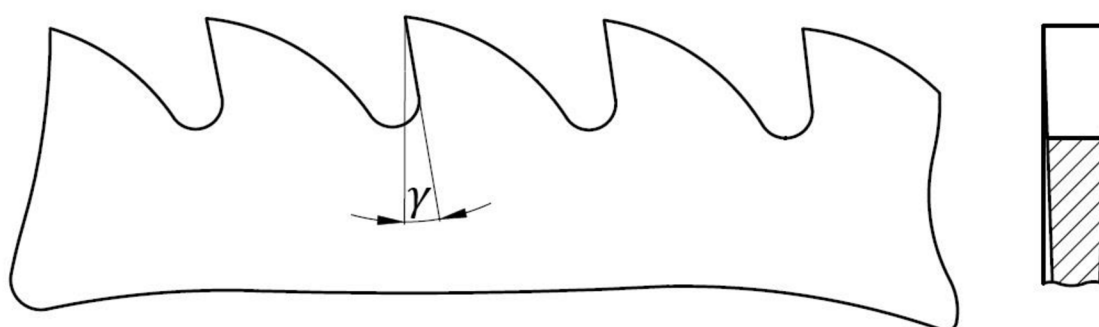
V normě ČSN 22 2901 jsou popsány čtyři základní tvary ozubení pilových kotoučů – tvary A, B, C a D, které jsou znázorněny na obr. 2.6 až obr. 2.9.

Prvním typem je ozubení tvaru A (obr. 2.6). Jedná se o nejjednodušší typ ozubení. Kotouče se zuby tvaru A jsou nejčastěji vyráběny s jemným popř. polohrubým ozubením [5]. Vzhledem k tomu, že poloměr zaoblění zubové mezery R je relativně malý, může u těchto kotoučů docházet k hromadění třísky v zubových mezerách, což má negativní vliv na průběh obrábění a může docházet i k ulamování jednotlivých zubů [16]. Proto jsou kotouče s ozubením A využívány zejména při řezání tenkostěnných profilů. V katalogích firem zabývajících se výrobou pilových kotoučů jsou uváděny i další modifikace A-ozubení, zůstává však malý poloměr zaoblění zubové mezery R [10,16].



Obr. 2.6 Ozubení tvaru A – podle [14].

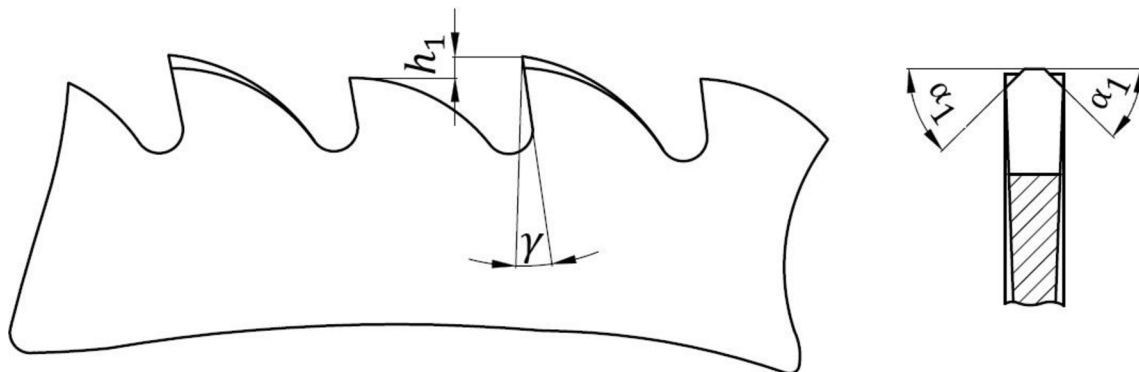
Kotouče s ozubením tvaru B (obr. 2.7) jsou při dělení železných materiálů používány nejčastěji [17]. Hřbetní plocha zubů je zaoblena. Poloměr zaoblění zubové mezery R je větší než u ozubení tvaru A, což má příznivý vliv na odchod třísky, a proto je tento tvar ozubení často využíván u hrubozubých kotoučů pro řezání plných polotovarů [10]. Stejně jako u ozubení tvaru A jsou v katalogích uváděny i některé další modifikace tohoto tvaru (obr. 2.10).



Obr. 2.7 Ozubení tvaru B – podle [14].

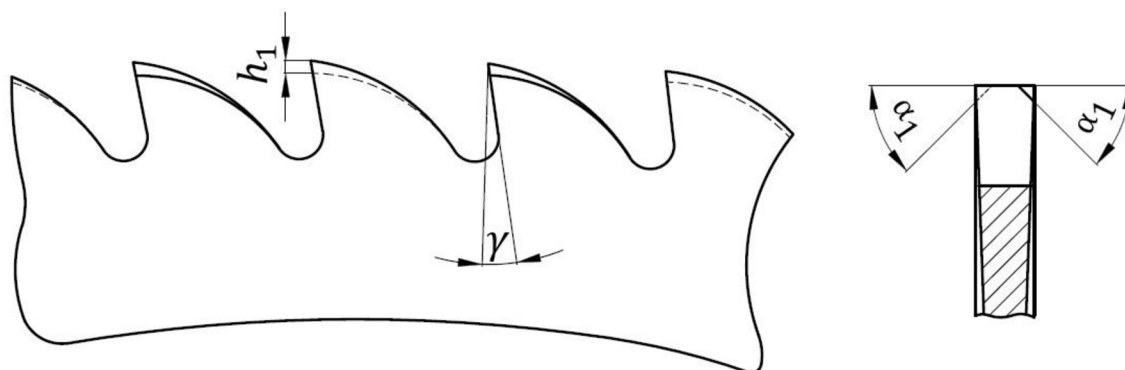
Na rozdíl od ozubení A a B, kde jsou všechny zuby stejné, se u ozubení C (obr. 2.8) střídají dva tvary zubů. Po obvodu kotouče se střídají zub tvaru B s funkcí předřezávacího zubu a zub se sraženými hranami o úhel bočního zbrúšení α_1 . Tento zub je o 0,15 až 0,30 mm vyšší a má funkci tzv. předřezávacího zubu. Při výrobě tohoto ozubení je zapotřebí technologie broušení [16].

Kvůli větší složitosti výroby jsou v normě ČSN 22 2901 na kotouče s C-ozubením kladeny další požadavky. Norma uvádí kotouče s C ozubením pouze o tloušťce $b \geq 2 \text{ mm}$ a průměrem $\varnothing D \geq 100 \text{ mm}$ [14]. Kotouče s ozubením tvaru C jsou nejčastěji využívány při řezání plných materiálů, popř. trubek s velkou tloušťkou stěny, neboť je u nich docíleno lepšího dělení třísky (tříška je rozdělena na tři části) [16,17].



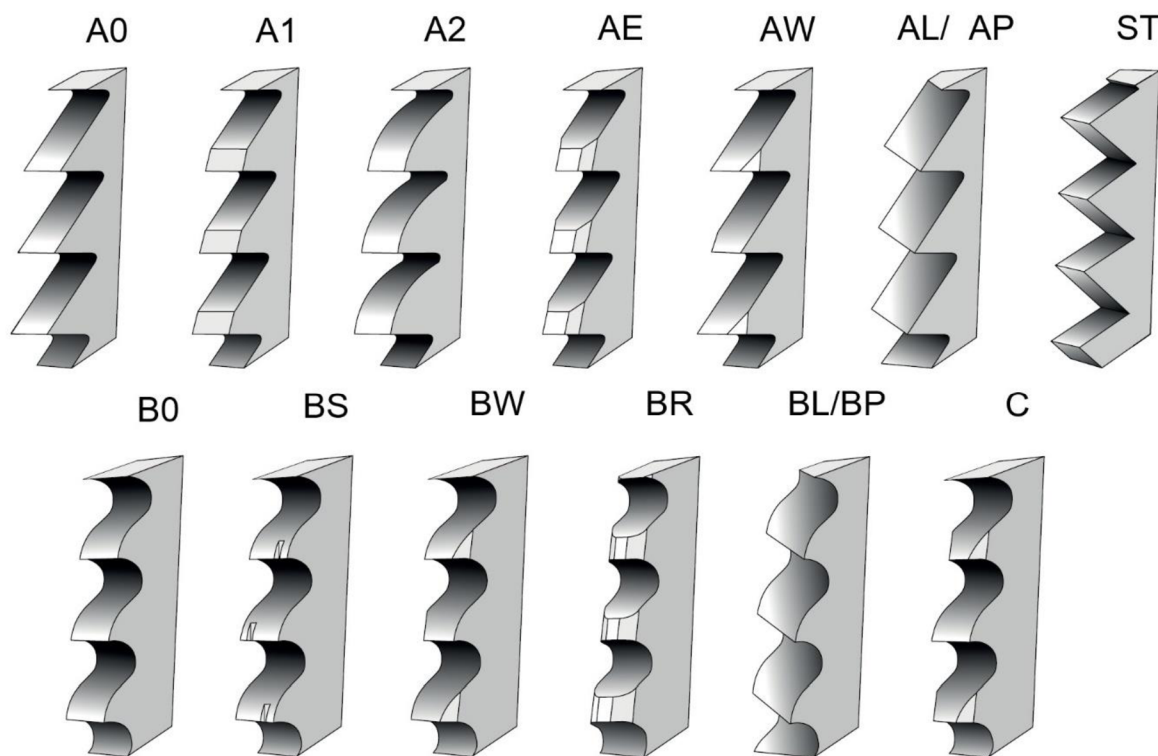
Obr. 2.8 Ozubení tvaru C – podle [14].

Ozubení D (obr. 2.9) je rovněž využíváno při řezání převážně plných polotovárů [16]. Po obvodu kotouče se střídají dva tvary zubů. První zub má zkosenou jednu hranu o úhel bočního zbrošení α_1 a u druhého zubu je zbrošena druhá hrana o stejný úhel α_1 . Zub je zkosen v jedné třetině jeho šířky. Díky tomu je tříška rozdělena na dvě části, což značně zjednodušuje její odchod ze zubové mezery [17]. V katalogích firem je toto ozubení často označováno jako BW [10].



Obr. 2.9 Ozubení tvaru D – podle [14].

Některé tvary ozubení pilových kotoučů byly výrobcí modifikovány. Tyto úpravy nejčastěji vycházejí z problematiky řezání silnostěnných profilů a plných materiálů, kde je zapotřebí docílit co nejlepšího lámání třísek. Tvar ozubení BS (obr. 2.10) je vybaven speciálním lamačem třísek, který má šířku 0,3 mm [18]. Kotouče s ozubením BS jsou limitovány minimální šířkou 2 mm. Zvláštním typem ozubení jsou také kotouče s typem AL/AP, resp. BL/BP, u nichž je rovněž docíleno lepší tvorby třísky, avšak při řezání těmito kotouči vzniká axiální síla, která směřuje do vřetena stroje. Pro řezání tenkostěnných profilů je od výrobců doporučeno použití kotoučů s tvarem ozubení BW anebo B0 [16].



Obr. 2.10 Tvary zubů pilových kotoučů nabízených firmou GSP-High Tech Saws, s. r. o. [10].

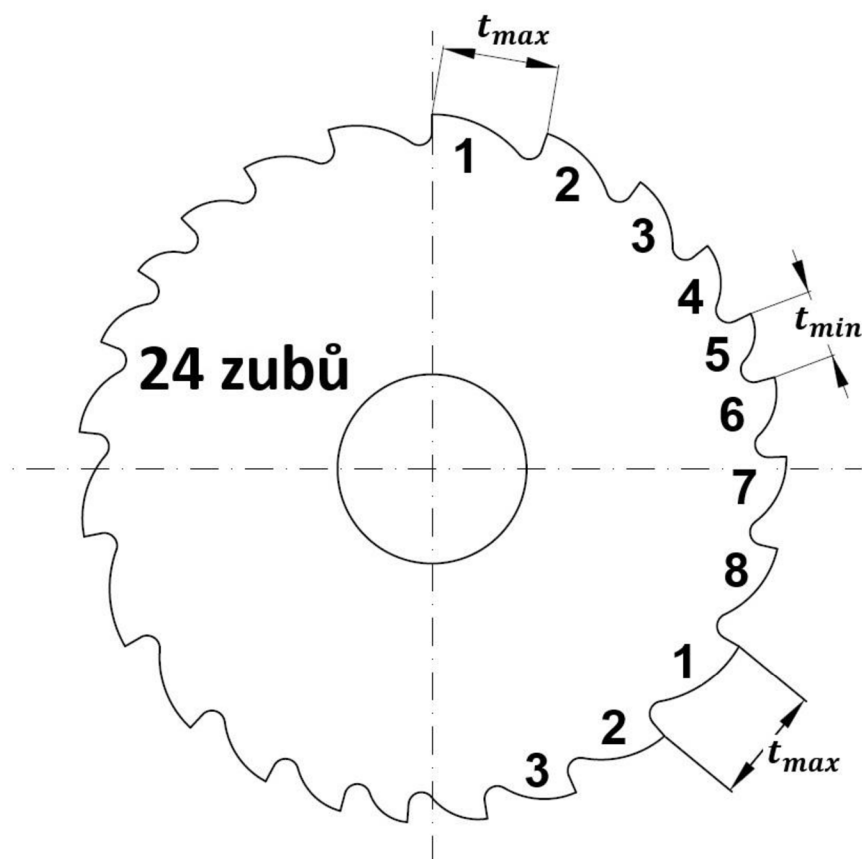
2.1.4 Ozubení VARIO

Jak již bylo popsáno v předešlých kapitolách, obecně platí, že při řezání velkých průměrů jsou používány kotouče s nízkým počtem zubů a velkou zubovou roztečí, která je základem pro dobrý odchod třísky. Naopak u tenkostěnných součástí jsou využívány kotouče s více zuby, tzn. menší roztečí. Tím je dosaženo většího počtu zubů v záběru, a v důsledku toho klesá řezný výkon [19].

Snahou vytvořit univerzální ozubení bylo vytvořeno tzv. VARIO ozubení (obr. 2.11), které se vyznačuje nepravidelnou roztečí zubů t . Po obvodu kotouče se periodicky opakuje skupina čtyř, šesti nebo osmi zubů, které mají jinou zubovou rozteč.

Toto ozubení je běžné zejména u pilových pásů a je využíváno pro svoji univerzálnost a při správné volbě řezných podmínek i menší náchylnost k vibracím [19,20]. U pilových kotoučů se toto ozubení používá jenom zřídka, protože jeho výroba je relativně složitá. Většina firem, které pilové kotouče používají, následně nedokáže VARIO ozubení znovu naostřit, a proto raději zvolí kotouče s jednodušším tvarem ozubení [18].

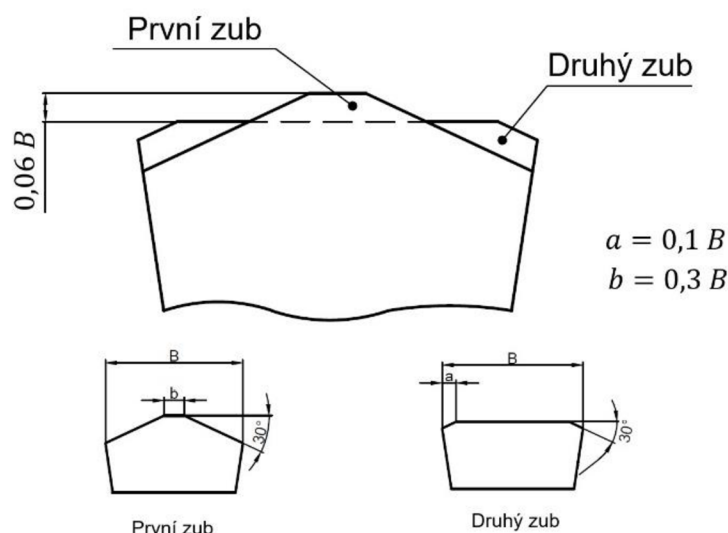
U pilových kotoučů s ozubením VARIO je zcela zásadní dodržet podmínku dělitelnosti. Opakuje-li se po obvodu kotouče skupina šesti zubů VARIO (V6), musí být celkový počet zubů dělitelný šesti atd.



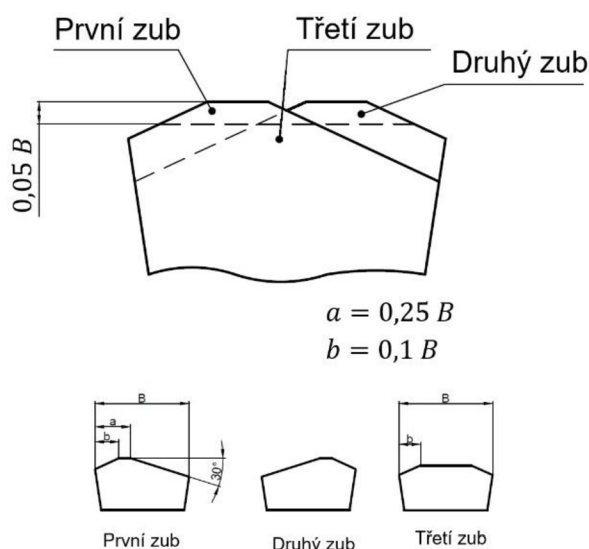
Obr. 2.11 Ozubení VARIO B (V8) – podle [19,20].

2.1.5 Dělitelnost počtu zubů

Střídání více tvarů zubů po obvodu je hojně využívanou modifikací pilových kotoučů. Na dnešních CNC bruskách lze vyrobit pilové kotouče přesně na přání zákazníka. Po obvodu kotouče se tak mohou střídat i tři tvary zubů. Při modifikaci tohoto typu je ale vždy třeba brát ohled na celkový počet zubů pilového kotouče, resp. na jeho dělitelnost. Nejsou-li všechny zuby stejné a jejich tvar se mění přes jeden zub (sudé a liché), musí být celkový počet zubů dělitelný dvěma (obr. 2.12). Střídají-li se po obvodu kotouče tři tvary zubů, musí být počet zubů dělitelný třemi (obr. 2.13) atd. Při nesplnění podmínky dělitelnosti by mohlo docházet k vibracím a dalším nežádoucím jevům při procesu řezání [5].



Obr. 2.12 Příklad střídavého ozubení pro kotouč s počtem zubů dělitelným dvěma – podle [5].



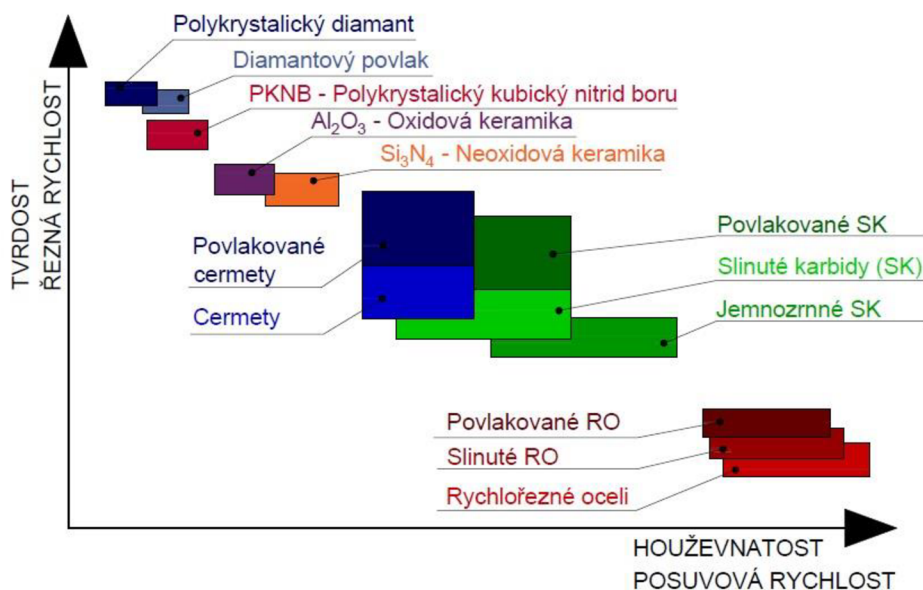
Obr. 2.13 Příklad střídavého ozubení pro kotouč s počtem zubů dělitelným třemi – podle [5].

2.2 Materiály celistvých pilových kotoučů

Celistvé pilové kotouče se obvykle vyrábějí z rychlořezných ocelí (HSS – High Speed Steel). Rychlořezné oceli jsou typické obzvláště vysokou austenizační teplotou [21] a velkým zastoupením přísadových prvků s převahou wolframu a molybdenu. Celkové zastoupení karbidotvorných prvků je 10 až 25 % [11].

Prvním krokem při výrobě rychlořezných ocelí je stupňovitý ohřev na vysokou teplotu (1150 až 1270 °C) a následné kalení v ochlazovací lázni o teplotě 620 °C. Dále následuje několikanásobné popouštění na sekundární tvrdost, čímž jsou odstraněna i zbytková napětí [11]. HSS oceli jsou popsány v normách ČSN 41 9824, ČSN 41 9830 a ČSN 41 9861 (ostatní normy ČSN popisující HSS byly zrušeny bez

náhrady) [22]. Srovnání HSS ocelí s ostatními řeznými materiály po stránce tvrdosti a houževnatosti je na obr. 2.14.



Obr. 2.14 Zařazení rychlořezných ocelí ve schematickém diagramu vlastností používaných řezných materiálů – podle [12].

Pro výrobu celistvých pilových kotoučů jsou v praxi používány zejména dva řezné materiály a to HSS/Dmo5 a HSS/Emo5 (viz kapitoly 2.2.1 a 2.2.2). V obou ocelích je vysoký obsah molybdenu, který podporuje tvorbu jemné martenzitické struktury, a tím je zvýšena odolnost nástroje proti lomu. Vysokým obsahem wolframu je zajištěna vysoká pevnost, odolnost proti opotřebení a schopnost materiálu odolat vysokým teplotám [17].

2.2.1 HSS/Dmo5 – DIN 1.3343

HSS/Dmo5 je rychlořezná ocel charakterizovaná vysokou pevností, houževnatostí a otěruvzdorností. Je nevhodná na tvářeni za tepla a ve stavu žíhaném na měkko je velmi těžko obrobitelná. Tato ocel je využívána u nástrojů, u kterých je zapotřebí vyvážený poměr tvrdosti a houževnatosti (soustružnické nástroje, vrtáky, tvářecí stroje atd.) Její chemické složení je uvedeno v tab. 2.1 [23].

Tab. 2.1 Chemické složení oceli Dmo5 [10].

| Typické chemické složení [hm %] dle výrobce pilových kotoučů | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| C [%] | Si [%] | Mn [%] | Cr [%] | Mo [%] | V [%] | W [%] |
| 0,90 | 0,25 | 0,3 | 4,1 | 5,0 | 1,8 | 5,4 |

Tento materiál je popsán normou DIN 1.3343. Stejný materiál (ocel 19 830) je rovněž popsán normou ČSN 41 9830, dle které je chemické složení dané tab. 2.2 [24,25].

Tab. 2.2 Chemické složení oceli Dmo5 dle ČSN [26].

| Chemické složení dle ČSN 41 9830 [hm %] | | | | | | | | |
|---|--------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| C [%] | Mn [%] | Si [%] | Cr [%] | W [%] | V [%] | Mo [%] | P [%] | S [%] |
| od 0,80 | 0,45 | 0,45 | od 3,80 | od 5,50 | od 1,50 | od 4,50 | 0,035 | 0,035 |
| do 0,90 | max. | max. | do 4,60 | do 7,00 | do 2,20 | do 5,50 | max. | max. |

2.2.2 HSS/Emo5 – DIN 1.3243

HSS/Emo5 je rychlořezná ocel s cca 5% přísadou kobaltu, který zvyšuje schopnost materiálu pracovat za vysokých teplot. Toho se využívá především při řezání těžko obrobitelných materiálů, jako jsou např. nerezové oceli apod. Chemické složení oceli Emo5 je uvedeno v tab. 2.3 [17].

Tab. 2.3 Chemické složení oceli Emo5 [10].

| Typické chemické složení [hm %] dle výrobce pilových kotoučů | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| C [%] | Si [%] | Mn [%] | Cr [%] | Mo [%] | V [%] | W [%] | Co [%] |
| 0,9 | 0,4 | 0,3 | 4,1 | 5,0 | 1,9 | 6,4 | 4,8 |

Tento materiál je popsán v normě DIN 1.3243. Stejný materiál (ocel 19 852) je rovněž popsán již zrušenou normou ČSN 41 9852, dle které je chemické složení dané tab. 2.4 [24,25].

Tab. 2.4 Chemické složení oceli Emo5 dle ČSN [27].

| Chemické složení dle ČSN 41 9852 [hm %] | | | | | | | | |
|---|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| C [%] | Mn [%] | Si [%] | Cr [%] | W [%] | V [%] | Mo [%] | Co [%] | P, S [%] |
| od 0,80 | 0,45 | 0,45 | od 3,80 | od 5,50 | od 1,50 | od 4,50 | od 4,30 | 0,035 |
| do 0,90 | max. | max. | do 4,60 | do 7,00 | do 2,20 | do 5,50 | do 5,20 | max. |

2.3 Povlakování pilových kotoučů

Vedle geometrie a materiálu lze výkon řezného nástroje zlepšit i vhodnou volbou povlaku. Povlaky lze na nástroje nanášet pomocí metod PVD (Physical Vapour Deposition), CVD (Chemical Vapour Deposition) anebo některou z moderních metod povlakování, které jsou vyznačovány např. jiným typem aktivace povlakovací atmosféry (PCVD – Plazma Chemical Vapour Deposition atd) [28]. Obecným účelem nanášení povlaků je zvýšení tvrdosti povrchu a odolnosti proti opotřebení při zachování dostatečné odolnosti vůči oxidaci a teplotní a chemické stability. Základním předpokladem pro dosažení těchto vlastností je jemnější zrnitost a méně strukturních defektů vrstvy přídatného materiálu. Tloušťka povlaků se obvykle pohybuje v řádech jednotek mikrometrů [29].

2.3.1 CVD

CVD je starší metodou povlakování. Metoda je charakterizována zejména vysokou teplotou povlakovacího procesu (900 až 1200 °C) [12]. Při povlakovacím procesu dochází k reakcím plynných chemických sloučenin těsně u povrchu nástroje, což vyústí k přilnutí vzniklých molekul (produktů reakce) na základový materiál, a tím je vytvořen povlak [12]. Pro správný průběh reakce je nezbytná i přítomnost katalyzátoru – reaktivního plynu (např. N₂ nebo CH₄) [28]. Metoda je nejčastěji využívána při povlakování slinutých karbidů [12]. Povlakovat je možné i HSS oceli za podmínky, že je jejich austenitizační teplota vyšší než 1000 °C [30].

CVD povlakováním lze dosáhnout větších tloušťek povlaků a všestranného účinku (povlak je nanášen ve všech směrech, zatímco u PVD může část nástroje zůstat nepovlakovaná). Nevýhodami jsou nemožnost napovlakování ostrých hran, snížení ohybové pevnosti základního materiálu a vznik zbytkových tahových napětí v povlaku [12].

2.3.2 PVD

Metoda povlakování PVD je mladší metodou nanášení přídavných materiálů než CVD. Díky relativně nízkým teplotám procesu (do 500 °C) lze metodu s výhodou použít při povlakování materiálů z HSS, aby nedocházelo k jejich teplotnímu ovlivnění [28].

PVD povlakování je realizováno podtlakem (ve vysokém vakuu) [31]. Nanášený kov (např. titan) je pomocí elektrického oblouku, svazkem elektronů nebo klasickým odporovým ohřevem přiveden do stavu páry. Volné atomy jsou ionizovány, reagují s přivedeným reakčním plynem (např. dusíkem nebo argonem) a dopadají na povrch povlakované součásti. Tím dochází k vytvoření velmi tenké a tvrdé vrstvy – povlaku. Výhodou této metody je možnost povlakování ostrých hran. Nevýhodami jsou menší tloušťka povlaku, vysoká náročnost přípravy povrchu nástroje před povlakováním a vysoké nároky na povlakovací zařízení [28].

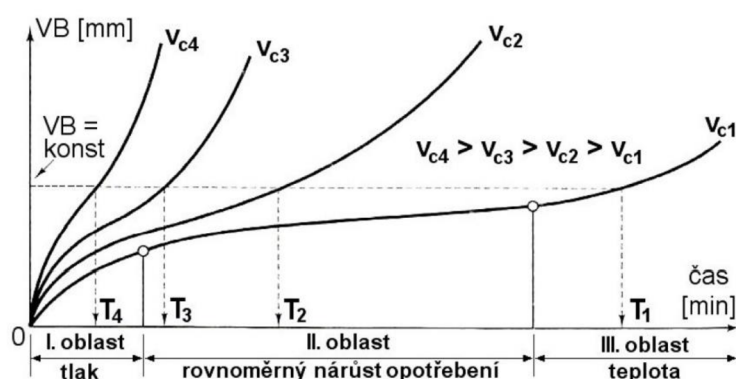
3 ROZBOR PROBLÉMU

Tato diplomová práce se zabývá frézováním velmi úzkých drážek do tenkostěnných součástí v podélném směru. Výchozím produktem je zarážecí kotva EA II, viz obr. 3.1 b), kterou vyrábí firma Fischer Vyškov, spol. s r. o. Jelikož se jedná o součást vyráběnou ve velkých sériích (v rádech jednotek tisíců kusů za jednu směnu), klíčovým hlediskem při její výrobě je zejména vysoká produktivita obrábění. Po stránce produktivity je i přes všechna úskalí této operace nenahraditelná technologie řezání kotoučovou pilou [32].



Obr. 3.1 a) výchozí polotovár, b) konečný produkt s již vyhotovenou drážkou [3].

Problémem, se kterým se společnost při výrobě tohoto produktu potýká, je přílišné zatížení elektromotoru, jímž je poháněn obráběcí stroj (obr. 3.3). Aby byl při zachování mechanického zatížení stroje zachován jeho takt, jsou nastavovány takové řezné podmínky, které jsou pro trvanlivost a životnost nástrojů nevhodné (přibližně trojnásobně vyšší řezná rychlost). Na obr. 3.2 je znázorněn vliv řezné rychlosti na opotřebení nástroje [32].



Obr. 3.2 Vliv řezné rychlosti na hřbetní opotřebení VB v závislosti na čase [12].

Prostor pro zdokonalení technologie se v obecné rovině naskýtá ve třech oblastech – vhodnou volbou povlaku nástroje, správným výběrem řezné kapaliny a správnou volbou geometrie pilového kotouče.

Testy, které byly doposud fakultou FSI na VUT v Brně v souvislosti s tímto problémem provedeny, byly zaměřeny zejména na vhodnou volbu povlaků a na počet zubů pilových kotoučů. Především počet zubů byl v průběhu zkoumání této operace v minulosti upraven, když se z pilových kotoučů se 128 zuby (to je při průměru kotouče $\varnothing D = 100 \text{ mm}$ počet zubů, který udává norma ČSN ISO 2296) přešlo na kotouče se 100 zuby (u větších průměrů zářezcích kotev na pilové kotouče s 80 zuby) [32].

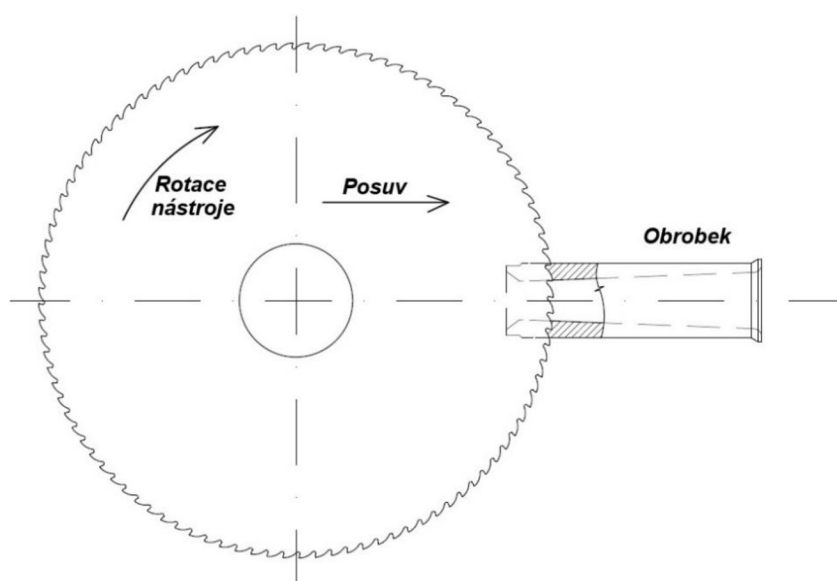
3.1 Popis operace

Obrábění drážek probíhá na víceúčelovém automatu znázorněném na obr. 3.3.



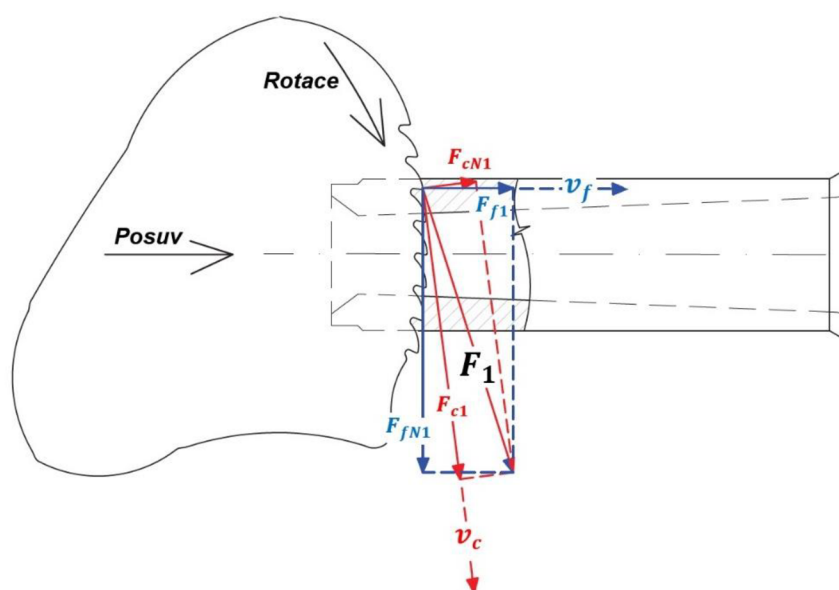
Obr. 3.3 Víceúčelový automat používaný k frézování drážek do obrobků [33].

Obrobek (výkovek z oceli 12 050) je pevně uchycen v kleštině. Hlavní i vedlejší pohyb (tj. posuvný i rotační pohyb) koná nástroj (obr. 3.4), jímž je pilový kotouč s parametry uvedenými v tab. 3.1.



Obr. 3.4 Operace frézování hluboké drážky do polotovaru.

Řezné síly působící na jeden zub nástroje jsou zobrazeny na obr. 3.5.



Obr. 3.5 Řezné síly působící na jeden břit nástroje.

Tab. 3.1. Parametry používaných pilových kotoučů.

| Vnější průměr $\varnothing D$ [mm] | Šířka kotouče $\varnothing b$ [mm] | Průměr upínacího otvoru $\varnothing d$ [mm] | Počet zubů [-] | Tvar zubů [-] | Úhel čela [°] |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---|-------------------|------------------|------------------|
| 100 | 1,0 | 22 | 100 (80) | B | 14 |

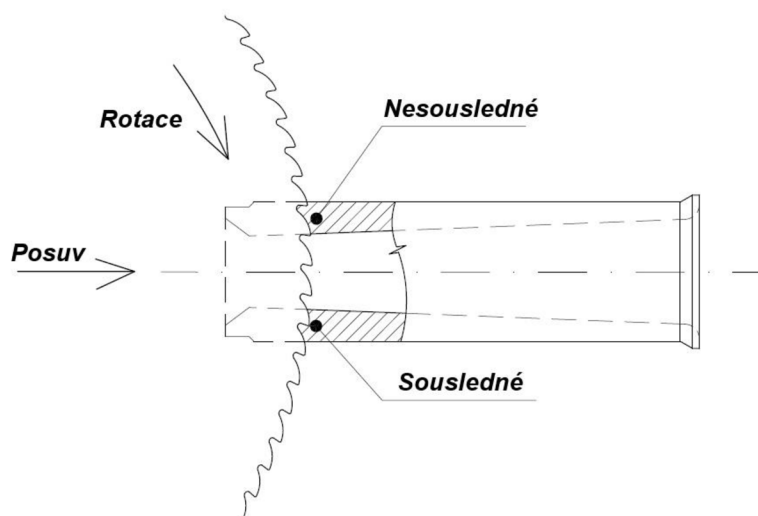
Pozn.: U větších polotovarů jsou používány kotouče s 80 zuby. Řezné podmínky jsou zachovány. Řezná rychlost je $v_c = 94 \text{ m/min}^{-1}$, což odpovídá otáčkám $n = 300 \text{ min}^{-1}$. Posuv na zub je $f_z = 0,013 \text{ mm}$, což odpovídá posuvové rychlosti $v_f = 390 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Chlazení je realizováno aditivovaným řezným olejem.

3.2 Řešené problémy

Je-li v záběru jen několik málo zubů, lze očekávat vysokou náklonnost k torzním kmitům a z toho pramenící neuspokojivé výsledky obrábění [34]. Všeobecným doporučením při řezání tenkostěnných součástí kotoučovou pilou je, aby byly v záběru vždy alespoň tři zuby (avšak maximálně sedm) [2]. U této operace však tato varianta není možná, neboť pilový kotouč by při takovém požadavku měl na takto malém průměru přibližně 256 zubů (pro jemné ozubení je norma 128 zubů). Při takovém ozubení by se výrazně snížila šířka zubové mezery, což negativně ovlivňuje odchod třísky. I normovaný pilový kotouč s jemným ozubením dle ČSN ISO 2296 o 128 zubech se při této operaci neosvědčil a na základě doporučení VUT FSI začala společnost používat kotouče s počtem 100 a 80 zubů [32].

Dalším řešením, které se nabízí, je stanovit počet zubů pilového kotouče tak, aby v každém časovém okamžiku byl stejný počet zubů v záběru (vždy jeden) a nikoliv v jednom okamžiku dva a následně žádný. Podařilo-li by se takto docílit správné kombinace počtu zubů kotoučové pily a typu obrobku, bylo by docíleno stabilizace řezné síly a nedocházelo by k jejím oscilacím. Toto hledisko však ztrácí na významu, protože polotovar pro výrobu zarážecích kotev (výkovek) je kuželovitého tvaru (jeho vnitřní stěna) a po jeho délce se mění i tloušťka stěny.

Dalším neopomenutelným problémem je střídání sousledného a nesousledného řezání. Dvěma přímkami – osou nástroje a osou obrobku je definována rovina, která proces řezání rozděluje na dva poloprostory, kde v jednom probíhá řezání sousledné a v druhém nesousledné (obr. 3.6). Kvůli tomu dochází k neustálému střídání odlišných charakteristik, kterými jsou tyto způsoby obrábění doprovázeny.



Obr. 3.6 Střídání sousledného a nesousledného řezání při operaci.

3.3 Diplomová práce Ing. Radka Spáčila

Tato práce se přímo opírá o dosažené výsledky z předchozích testů technologických vlastností pilových kotoučů při řezání kotoučovou pilou. Testy byly provedeny v rámci diplomové práce Ing. Radka Spáčila (bývalý student VUT FSI) z roku 2018 s názvem Analýza řezání tenkostěnných součástí [33]. Ing. Radek Spáčil se ve své práci zaměřil především na vhodnou volbu povlaků pilových kotoučů. Následující popis experimentu je pouze orientačním shrnutím nejdůležitějších faktů a pro jeho detailní pochopení je doporučena podrobná studie zdroje [33].

V experimentální části zmíněné diplomové práce bylo zkoušeno celkem šest pilových kotoučů při řezání austenitické korozivzdorné oceli ČSN 41 7346. Tab. 3.2 udává chemické složení a mechanické vlastnosti této oceli [33].

Tab. 3.2 Chemické složení korozivzdorné oceli ČSN 41 7346 použité při experimentu [33].

| Chemické složení [hm %] | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|----------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|------------------|--------------|
| C [%] | Si [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] | Cr [%] | Ni [%] | Mo [%] | N [%] |
| 0,07 max. | 1,00 max. | 2,00 max. | 0,045 max. | od 0,012 do 0,03 | od 16,5 do 18,5 | od 10,0 do 13,0 | od 2,0 do 2,5 | 0,11 max. |
| Mechanické vlastnosti | | | | | | | | |
| R _{p0,2 min} [MPa] | | | R _m [MPa] | | | A _{50 min} [%] | | |
| 560 | | | 700 až 850 | | | 20 | | |

Výše popsaný materiál byl řezán ve formě tyčí tažených za studena, jejichž průměr byl 19,5 mm a délka 50 mm. Každým nástrojem byla obrobena dráha 4660 mm [33].

Pro řezání byly u všech kotoučů použity stejné řezné podmínky uvedené v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Řezné podmínky při řezání v experimentu [33].

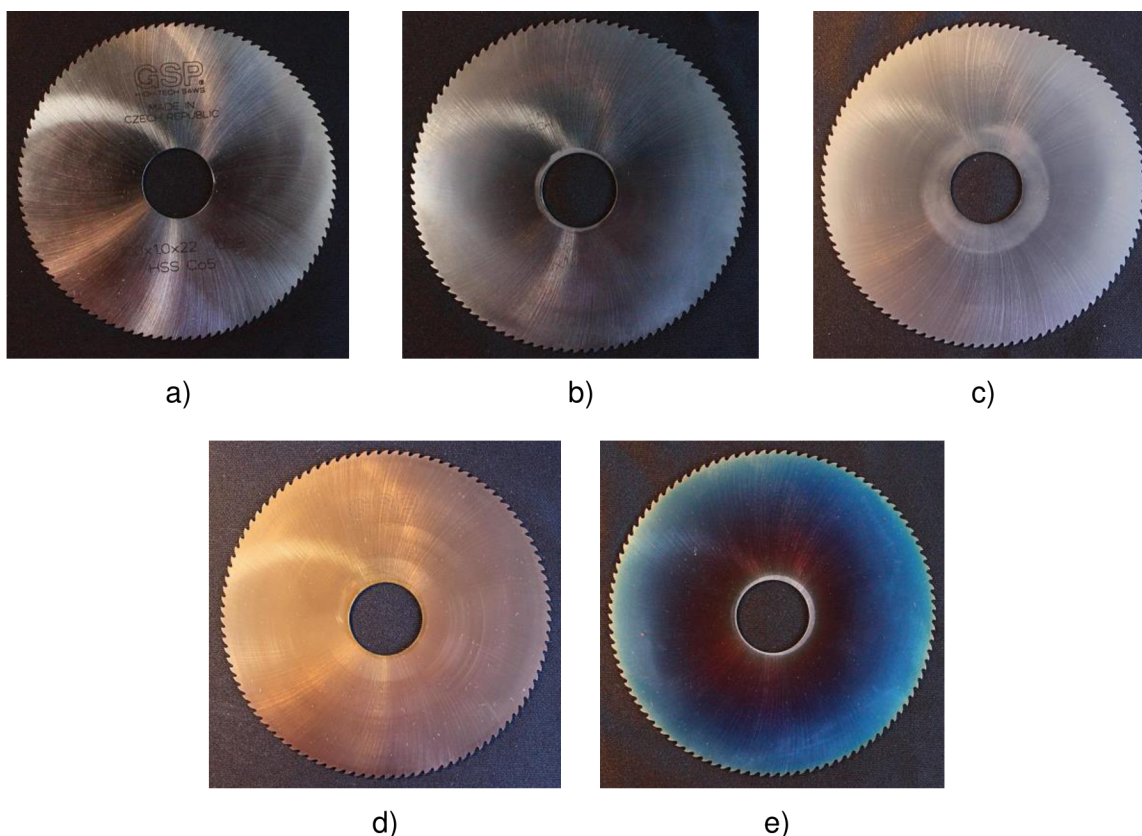
| | | |
|-------------------------|-------|----------------------------|
| Řezná rychlost | v_c | 25 (28) $m \cdot min^{-1}$ |
| Otáčky vřetene | n | 80 (90) min^{-1} |
| Posuv na zub | f_z | 0,02 mm |
| Posuvová rychlost | v_f | 160 $mm \cdot min^{-1}$ |
| Radiální hloubka záběru | a_e | 0,5 mm |
| Axiální hloubka záběru | a_p | 1 mm |

V rámci experimentu bylo provedeno testování celkem šesti pilových kotoučů uvedených na obr. 3.7. Všechny testované kotouče byly z materiálu Emo5 (DIN 1.3243) a měly stejnou geometrii uvedenou v tab. 3.4. Kotouče se tedy lišily pouze druhem povlaku [33].

Tab. 3.4 Geometrie testovaných pilových kotoučů [33].

| Vnější průměr $\varnothing D$ [mm] | Šířka kotouče $\varnothing b$ [mm] | Průměr upínacího otvoru $\varnothing d$ [mm] | Počet zubů [-] | Tvar zubů [-] | Úhel čela [°] |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---|-------------------|------------------|------------------|
| 100 | 1,0 | 22 | 100 | B | 14 |

Vyhodnocení testů bylo založeno především na zjištění opotřebení VB pomocí stereo mikroskopu STEMI 2000-C Zeiss a silového zatížení stroje, které bylo monitorováno pomocí piezoelektrického dynamometru KISTLER 9257B, plně řízeného počítačem, se zesilovačem KISTLER 5070A.



Obr. 3.7 Pilové kotouče testované při experimentu: a) bez povlaku (odjehlený a neodjehlený), b) povlak BIGAAN, c) povlak ALWIN, d) povlak TiCN MP, e) povlak TripleCoating Cr [33].

Z testů byly mimo jiné vyvozeny tyto závěry [33]:

- Odjehlením a zaoblením špičky nástroje bylo způsobeno razantní zvýšení silového zatížení nástroje.
- Obrobením dráhy 4660 mm nebylo na kotoučích vyvoláno výrazné hřbetní opotřebení VB (max. naměřená hodnota hřbetního opotřebení byla 0,1 mm).
- Nejvyšší hodnota hřbetního opotřebení byla pozorována u nepovlakovaného odjehleného nástroje.
- Nejnižší hodnota hřbetního opotřebení byla pozorována u pilového kotouče s povlakem BIGAAN ($VB = 0,05 \text{ mm}$).
- U povlaku BIGAAN byly zjištěny nejvyšší síly při řezání.
- V několika případech byla zjištěna plastická deformace nástrojů vzniklá v důsledku tření boků kotoučů o obrobek. Tento průvodní jev byl nižší u povlakovaných kotoučů.
- Nejlepším nástrojem při řezání reálných polotovarů pro výrobu zarážecích kotev po stránce trvanlivosti nástroje byl pilový kotouč s povlakem TripleCoating Cr.

4. REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Ve firmě Fischer Vyškov, spol. s r. o., nebyla vlivu tvarů zubů prozatím věnována přílišná pozornost. Základním předpokladem pilových kotoučů totiž je, aby mohl být kotouč po uplynutí trvanlivosti opět znovu naostřen přímo ve strojovém parku firmy a poté znovu používán. Nynější možnosti firmy jsou v této oblasti omezené a složitější tvary ozubení doposud nebylo možné znovu nabrousit. V blízké budoucnosti však společnost zvažuje nákup nové CNC brusky, na které nabroušení složitějších tvarů zubů možné bude. Tím se otevírá nový prostor pro zdokonalení technologie [32].

Z výše uvedeného důvodu nebyl experiment této diplomové práce soustředěn na povlakování pilových kotoučů, nýbrž na výběr vhodné geometrie břitů pilových kotoučů. Ve snaze udělat testy silového zatížení co nejnázornější, bylo testování provedeno přímo na polotovarech pro zarážecí kotvy, které pro experiment poskytla právě společnost Fischer Vyškov, spol. s r. o. Na základě poznatků ze zdroje [33] (po obrobení dráhy 4660 mm nebylo sledováno výrazné opotřebení) nelze předpokládat, že bude po obrobení několika kusů polotovarů opotřebení kotoučů nabývat vysokých hodnot.

Vyhodnocení experimentu je proto založeno na získání a porovnání silových záznamů, nikoliv na sledování opotřebení.

4.1 Obecný postup měření

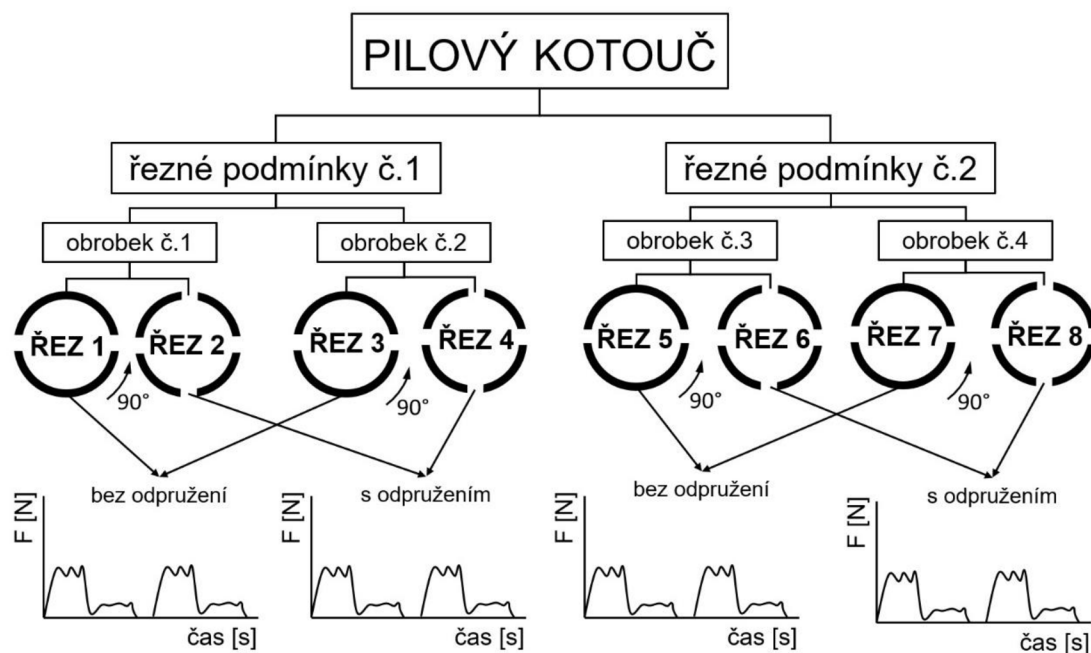
Do pracovního prostoru frézky byl pomocí šroubů připevněn dynamometr KISTLER a na něj byly pomocí speciálního přípravku, upínek a dorazu připevňovány jednotlivé obrobky. Nulový bod obrábění byl nastaven pomocí dotykové obrobkové sondy HEIDENHAIN.

V rámci experimentu bylo řezáno celkem 20 obrobků – na každém obrobku byly provedeny 2 řezy (obr. 3.1 b). Celkem bylo tedy provedeno 40 řezů (40 měření) z nichž relevantní informace pro tuto práci se podařilo získat z 32 z nich. Několik řezů bylo provedeno v rámci testování soustavy a z jiných byla získána nekvalitní data v důsledku ovlivnění dalšími faktory, které silový záznam zkreslovaly (posunutí obrobku při řezání, přílišné utažení upínacího přípravku, překročení nastaveného rozsahu sil atd.). Obráběná dráha byla z důvodu většího průměru upínací příruby pouze 20 mm (drážka v reálném produktu je hluboká 25 mm – tj. polovina celkové délky obrobku).

Čtyřmi kotouči (ozubení B, C, BW a VARIO) bylo provedeno vždy 8 řezů (4 řezy při řezných podmínkách dle katalogu dodavatele a 4 řezy při řezných podmínkách dle Fischer Vyškov, spol. s r. o.). Průběh testování pro jeden pilový kotouč je uveden v následujících bodech:

- 1) Do soustavy byl vložen první obrobek a byl proveden 1. řez.
- 2) Poté byl obrobek ručně otočen o 90° a proveden 2. řez.
- 3) Následně byl obrobek odebrán, byl vložen nový a stejným způsobem byl proveden 3. a 4. řez.
- 4) Byly nastaveny odlišné řezné podmínky.
- 5) Následně proběhlo stejným způsobem provedení 5., 6., 7. a 8. řezu.

Ve vyhodnocení experimentální části jsou vždy dva silové záznamy (ze dvou řezů) vloženy do jednoho grafu. Lze předpokládat, že každý sudý řez (druhý řez na obrobku) byl ovlivněn odpružením, které vzniklo v důsledku prvního řezu. S ohledem na tutu skutečnost byly vždy složeny dva záznamy ze dvou obrobků bez vlivu odpružení a poté dva záznamy ze dvou obrobků s vlivem odpružení. Pro lepší pochopení je uvedeno schéma získávání silových záznamů pro jeden pilový kotouč (obr. 4.1).



Obr. 4.1 Schéma vyhodnocení dat pro jeden pilový kotouč.

4.2 Vstupní parametry

Vstupní parametry obrábění jsou uvedeny v kapitolách 4.2.1 až 4.2.7.

4.2.1 Obráběcí stroj

Obráběcím strojem byla konzolová vertikální frézka FV 25 CNC A s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530 výrobce TOS Olomouc, s. r. o (Obráběcí stroje Olomouc, spol. s r. o.). Frézka je součástí dílen Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

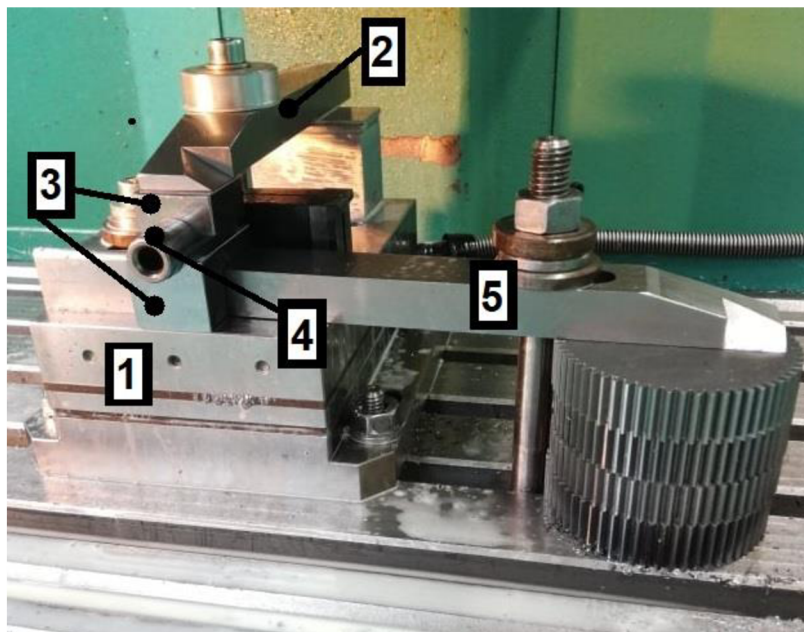
4.2.2 Obrobek a jeho upnutí

Obrobkem byl výkovek z materiálu 12 050 (obr. 4.2), který je polotovarem pro výrobu zarážecích kotev EA II z katalogu společnosti Fischer Vyškov, spol. s r. o. [3], viz obr. 3.1 b). Funkce této zarážecí kotvy je vysvětlena také ve zdroji [35].



Obr. 4.2 Obrobek použitý v experimentu (vpravo s již vyhotovenou drážkou).

Upínání obrobku do pracovního stroje je znázorněno na obr. 4.3. Dynamometr KISTLER (1) byl k pracovnímu stolu frézky připevněn čtyřmi šrouby. Pomocí upínky (2) byl k pracovní ploše dynamometru připevněn speciální upínací přípravek (3), který byl vyroben tak, aby kopíroval tvar obrobku (4) a zároveň nemohlo dojít k jeho kolizi s nástrojem. K lepšímu ustanovení přípravku s obrobkem sloužila ještě druhá upínka (5), která zamezovala pootočení přípravku ve vodorovné rovině (tato upínka byla do soustavy přidána až dodatečně po pootočení přípravku v tangenciálním směru v důsledku velké síly F_x při jednom z řezů).



Obr. 4.3 Upnutí obrobku a dynamometru KISTLER.

4.2.3 Řezné nástroje a jejich upnutí

Firma Fischer Vyškov, spol. s r. o., poskytla několik vyřazených pilových kotoučů (obr. 4.4), které se ve firmě neosvědčily. Šlo o pilové kotouče s ozubením tvaru A se 128 zuby (jemnozubé dle ČSN) z oceli Dmo5 vyrobené firmou GSP-High Tech Saws, s. r. o. Vlastnosti těchto vyřazených kotoučů jsou uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Specifikace původních (vyřazených) pilových kotoučů.

| Vnější průměr $\varnothing D$ [mm] | Šířka kotouče $\varnothing b$ [mm] | Průměr upínacího otvoru $\varnothing d$ [mm] | Počet zubů [-] | Tvar zubů [-] | Úhel čela [°] |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---|-------------------|------------------|------------------|
| 100 | 1,0 | 22 | 128 | A | 14° |



Obr. 4.4 Kotouče 100×1.0×22 128A, které se při obrábění zarážecích kotev neosvědčily.

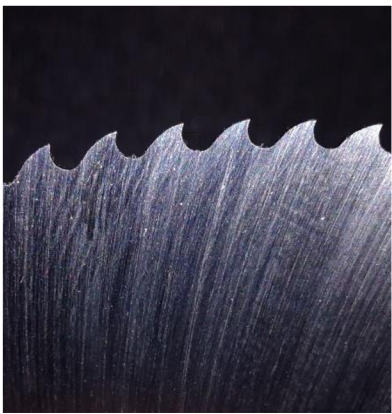
Tyto kotouče byly poté převezeny do firmy GSP-High Tech Saws, s. r. o., na přebroušení. Po konzultacích s jednatelem společnosti Fischer Vyškov, spol. s r. o., a GSP-High Tech Saws, s. r. o., byly navrženy čtyři pilové kotouče a následně zrealizována jejich výroba.

Pro experiment byly vybrány tyto pilové kotouče (značení dle obr. 2.10):

- pilový kotouč s ozubením B – tab 4.2,
- pilový kotouč s ozubením C – tab 4.3,
- pilový kotouč s ozubením BW – tab 4.4,
- pilový kotouč s ozubením VARIO B (V8) – tab 4.5.

Pozn.: Všechny pilové kotouče mají menší průměr právě z důvodu přebroušení původních kotoučů. Menší průměr byl zohledněn při volbě řezných podmínek.


Tab. 4.2 Pilový kotouč s ozubením B.

| | | | |
|---|--|--|--|
|  | Materiál [-] | Vnější průměr $\varnothing D$ [mm] | Šířka kotouče $\varnothing b$ [mm] |
| | HSS/Dmo5 – DIN 1.3343 | 96,0 | 1,0 |
| | Průměr up. otvoru $\varnothing d$ [mm] | Počet zubů [-] | Úhel čela [°] |
| | 22 | 100 | 20 ± 2 |

Obr. 4.5 Detail ozubení B.

Pozn. k tab. 4.2: Tento typ kotouče byl v době tvoření této diplomové práce ve firmě Fischer Vyškov, spol. s r. o., pro řezání používán.


Tab. 4.3 Pilový kotouč s ozubením C.

| | | | |
|--|--|--|--|
|  | Materiál [-] | Vnější průměr $\varnothing D$ [mm] | Šířka kotouče $\varnothing b$ [mm] |
| | HSS/Dmo5 – DIN 1.3343 | 96,0 | 1,0 |
| | Průměr up. otvoru $\varnothing d$ [mm] | Počet zubů [-] | Úhel čela [°] |
| | 22 | 100 | 20 ± 2 |

Obr. 4.6 Detail ozubení C.

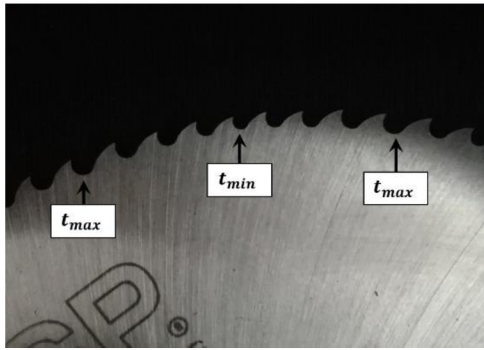
Pozn. k tab. 4.3: Ač úhly bočního zbrošení α_1 pomocí mikroskopu měřeny nebyly (viz kapitola 4.2.4), i pouhým okem byla u některých zubů kotouče s ozubením tvaru C vidět výrazná nesymetrie bočních zbrošení.

Tab. 4.4 Pilový kotouč s ozubením BW (dle ČSN ozubení D).

| | | | |
|---|--|--|--|
|  | Materiál [-] | Vnější průměr $\varnothing D$ [mm] | Šířka kotouče $\varnothing b$ [mm] |
| | HSS/Dmo5 – DIN 1.3343 | 96,0 | 1,0 |
| | Průměr up. otvoru $\varnothing d$ [mm] | Počet zubů [-] | Úhel čela [°] |
| | 22 | 100 | 20 ± 2 |

Obr. 4.7 Detail ozubení BW.

Tab. 4.5 Pilový kotouč s ozubením VARIO B (V8).

| | | | |
|---|--|--|--|
|  | Materiál [-] | Vnější průměr $\varnothing D$ [mm] | Šířka kotouče $\varnothing b$ [mm] |
| | HSS/Dmo5 – DIN 1.3343 | 96,0 | 1,0 |
| | Průměr up. otvoru $\varnothing d$ [mm] | Počet zubů [-] | Úhel čela [°] |
| Obr. 4.8 Detail ozubení VARIO B. | 22 | 104 | 20 ± 2 |

Pozn. k tab. 4.5: Pilový kotouč s ozubením VARIO měl jako jediný 104 zubů z důvodu dodržení dělitelnosti počtu zubů (celkový počet zubů musí být u ozubení VARIO (V8) dělitelný osmi). U tohoto pilového kotouče byly pomocí mikroskopu MarVision MM 420 změřeny zubové rozteče u několika po sobě jdoucích zubů, které jsou uvedeny v tab. 4.6.

Tab. 4.6 Zubové rozteče u ozubení VARIO B (V8).

| $t_1 = t_{max}$ [mm] | t_2 [mm] | t_3 [mm] | t_4 [mm] | t_5 [mm] | t_6 [mm] | t_7 [mm] | t_8 [mm] | $t_9 = t_{max}$ [mm] |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|
| 2,443 | 2,114 | 2,097 | 1,862 | 1,757 | 1,886 | 2,099 | 2,212 | 2,397 |

K upnutí všech nástrojů byl použit frézovací trn 69871.40AD-FMH22255 (obr. 4.9).



Obr. 4.9 Frézovací trn 69871.40AD-FMH22255.

4.2.4 Měření geometrie břitů

Měření geometrie břitů bylo provedeno na dílenském mikroskopu MarVision MM 420 od společnosti Mahr. Pomocí tohoto mikroskopu byly změřeny úhly čel jednotlivých kotoučů. U pilového kotouče typu VARIO byly u osmi po sobě jdoucích zubových drážek změřeny zubové rozteče. Úhly bočních zbrošení zubů α_1 (u pilových kotoučů s ozubením BW a C) měřeny nebyly, protože je pod mikroskopem takřka nemožné zobrazit čelo zubu, aniž by kotouč musel být rozlomen.

Pozn.: U úhlů čel nelze stanovit jednu konkrétní hodnotu jejich velikostí, protože naměřené hodnoty u jednotlivých zubů se mírně lišily. V tab. 4.2 až tab. 4.5 jsou proto uvedena rozmezí velikostí úhlů, které byly změřeny pomocí mikroskopu.

4.2.5 Měřicí aparatura pro měření řezných sil

Měřicí aparatura pro měření sil (obr. 4.10) sestávala z dynamometru KISTLER upevněného na pracovní stůl obráběcího stroje. Pomocí prodlužovacího kabelu byl dynamometr spojen s rozbočovací boxem s BNC konektory a ten dále pomocí BNC kabelu propojen s osmikanálovým zesilovačem, plně řízeným notebookem se softwarem Dynoware 2825A-02 [36].



Obr. 4.10 Měřicí aparatura pro měření řezných sil [37].

4.2.6 Řezné podmínky

Řezání bylo realizováno za dvojích řezných podmínek s ohledem na dvě různá hlediska. První typ řezných podmínek byl stanoven na základě katalogových doporučení výrobce pilových kotoučů. V tab. 4.7 jsou to řezné podmínky označené jako č. 1 a č. 3. Druhý typ řezných podmínek byl vybrán s ohledem na stávající stav řezných podmínek v prostředí firmy Fischer Vyškov, spol. s r. o. V tab. 4.7 se jedná o řezné podmínky označené jako č. 2 a č. 4.

Tab. 4.7 Řezné podmínky použité v experimentu.

| Řezné podmínky | Použití u kotoučů | Řezná rychlost | Otáčky nástroje | Posuv na zub | Posuvová rychlost |
|----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|
| – | – | v_c [$m \cdot min^{-1}$] | n [min^{-1}] | f_z [mm] | v_f [$mm \cdot min^{-1}$] |
| č. 1 | B, C, BW | 30,16 | 100 | 0,02 | 200 |
| č. 2 | B, C, BW | 81,43 | 270 | 0,013 | 350 |
| č. 3 | VARIO | 30,16 | 100 | 0,02 | 208 |
| č. 4 | VARIO | 81,43 | 270 | 0,013 | 365 |

4.2.7 Chlazení

Chlazení bylo při experimentu realizováno emulzí Cimstar 597 od společnosti Cimcool industrial Products B.V [38].

5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

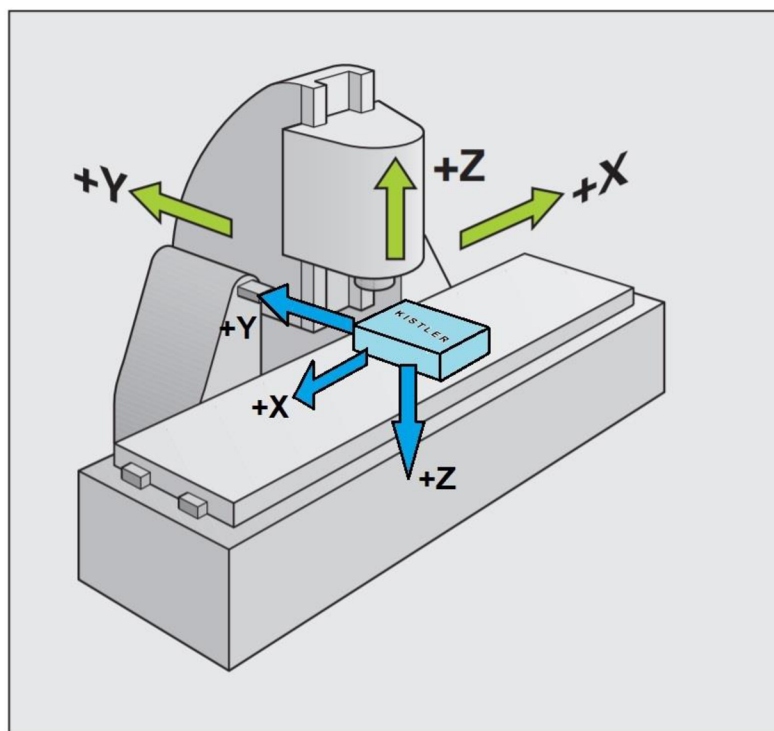
V této kapitole je uveden postup zpracovávání naměřených dat a jejich grafické a numerické vyhodnocení.

5.1 Způsob získávání silového záznamu

Výstupem proběhlého měření bylo několik souborů dat, které obsahovaly informace o silovém zatížení dynamometru v závislosti na čase. Tyto soubory byly dále zpracovávány v rozhraní tabulkového procesoru Microsoft Excel a byly z nich vytvořeny grafy závislostí sil F_x , F_y a F_z na čase obrábění. Vytváření grafických závislostí probíhalo v několika krocích.

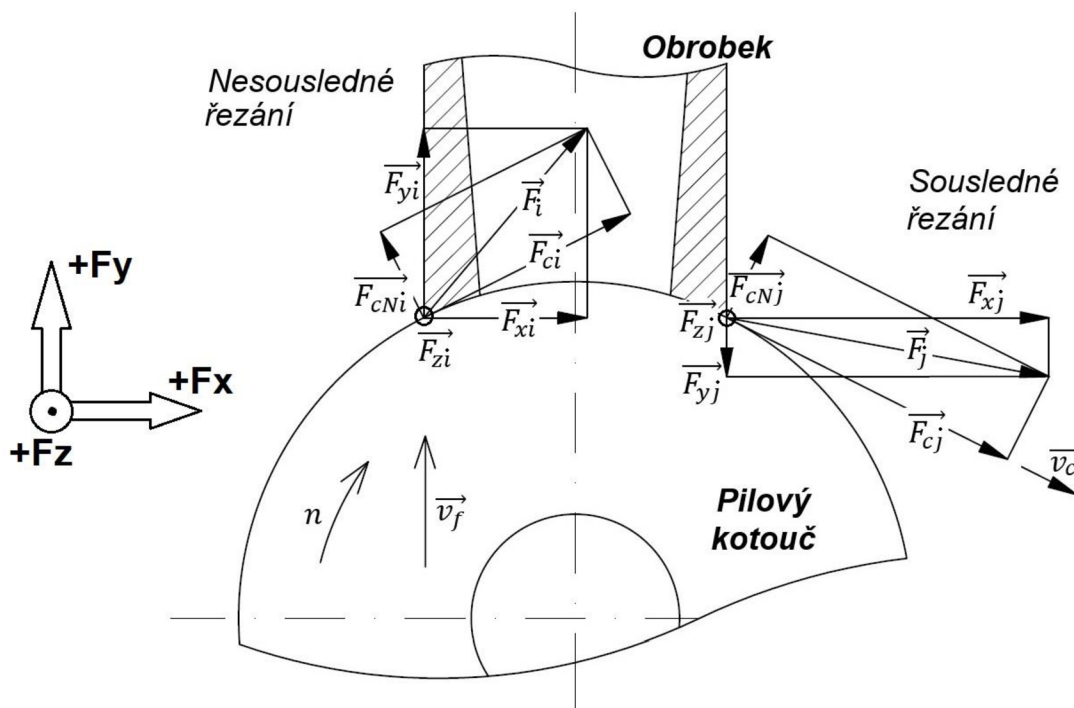
5.1.1 Transformace souřadného systému

Prvním krokem byla transformace souřadného systému, neboť souřadný systém dynamometru KISTLER nebyl shodný se souřadným systémem frézky. Dynamometr KISTLER byl v celém průběhu testování vzhledem ke stroji ustanoven v pozici dle obr. 5.1. Aby bylo možné grafické závislosti vyjádřit v souřadném systému stroje, musela být provedena rotace souřadného systému dynamometru kolem osy y o 180° . Jinými slovy – byla získána opačná hodnota silových složek F_x a F_z .



Obr. 5.1 Souřadný systém frézky (zeleně) a souřadný systém dynamometru KISTLER (modře) – podle zdrojů [36,39].

Vykreslené grafy závislostí sil na čase tedy plně korespondují se souřadným systémem uvedeným na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Silový rozklad při řezání drážky zářezací kotvy (pohled shora).

5.1.2 Výslednice sil

Výslednice sil byla vypočítána dle vztahu (5.1).

$$F = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \text{ [N]} \quad (5.1)$$

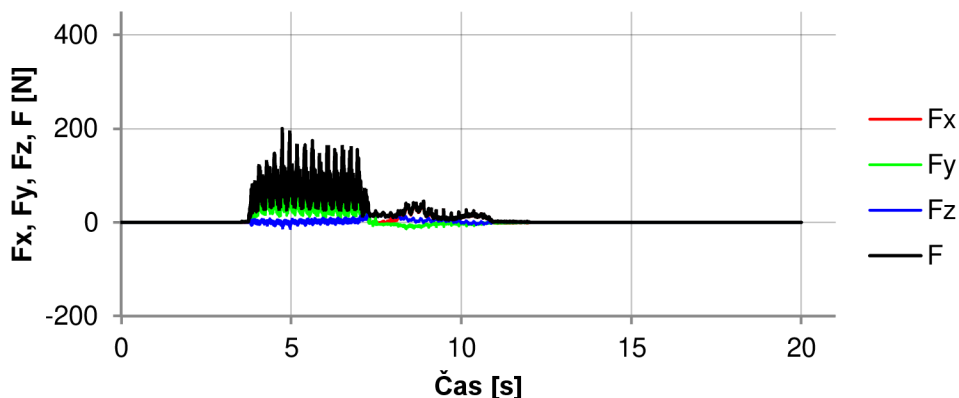
| | | |
|--------------|---|-----------------------------|
| kde: F [N] | – | výslednice – síla obrábění, |
| F_x [N] | – | x-ová složka síly, |
| F_y [N] | – | y-ová složka síly, |
| F_z [N] | – | z-ová složka síly. |

5.1.3. Filtrace dat

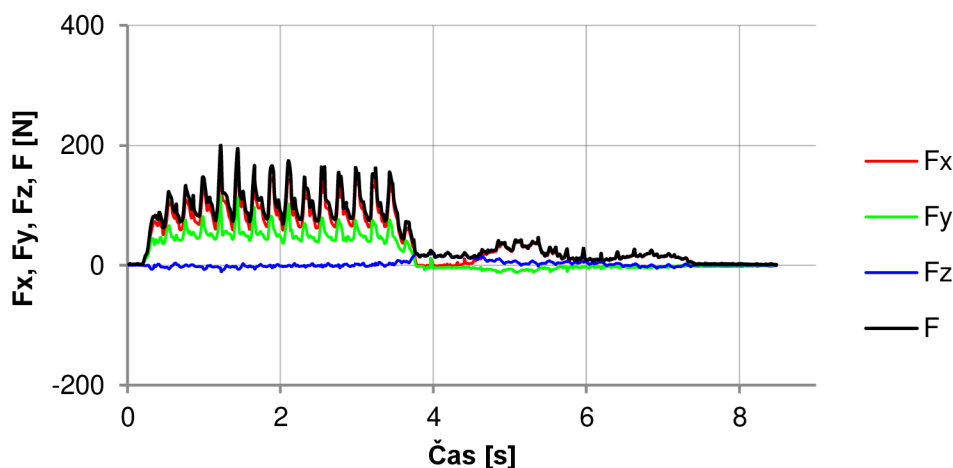
Skrze nastavenou poměrně vysokou vzorkovací frekvenci dynamometru f ($f = 1000 \text{ Hz}$) se v každém souboru dat jednalo o zpracovávání několika desítek tisíc hodnot, které zahrnují všechny náběhy a přeběhy nástroje a rovněž zahrnují všechny časové okamžiky obrábění, kdy např. v záběru nebyl žádný zub kotouče. Takový soubor dat má po vykreslení grafů oscilující tendenci a je velmi nepřehledný.

Eliminace těchto dat byla realizována jednoduchou filtrací, která spočívala ve výběru maximálních hodnot výsledných sil F složek F_x , F_y a F_z v jednotlivých časových intervalech.

Rozdíl mezi grafickým zobrazením filtrovaných a nefiltrovaných hodnot je znázorněn na obr. 5.3 a obr. 5.4.



Obr. 5.3 Ukázka vykreslení grafu z nefiltrovaných hodnot.

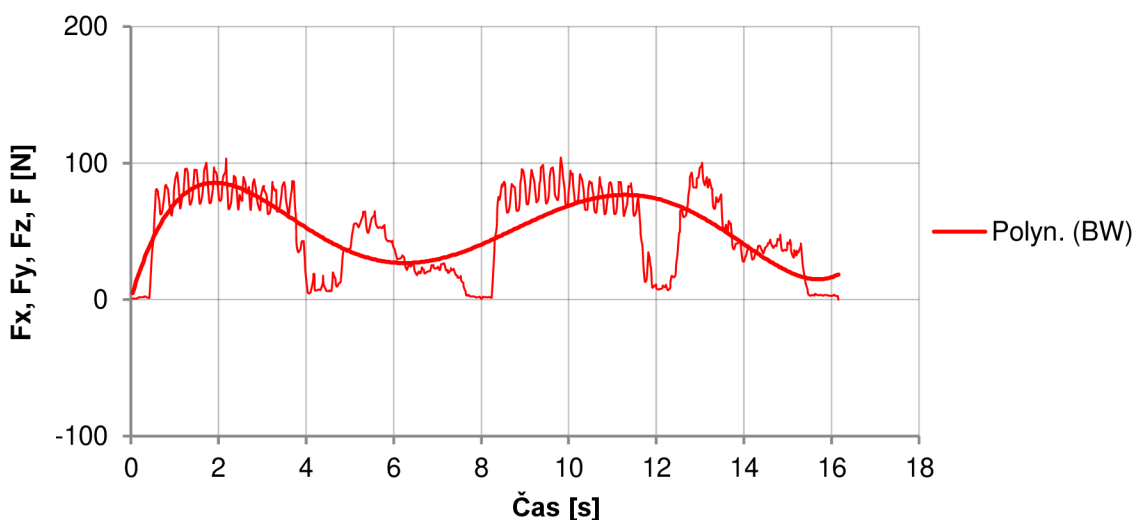


Obr. 5.4 Ukázka vykreslení grafu z filtrovaných hodnot.

5.1.4. Skládání silových záznamů

Záznamy řezů, které proběhly za stejných parametrů obrábění (typ kotouče, řezné podmínky, řezání s vlivem/bez vlivu odpružení), byly následně vloženy do jednoho grafu. Výsledky jsou znázorněny na obr. 5.6 až obr. 5.21. Pro snadnější pochopení vytváření silových záznamů slouží schéma na obr. 4.1.

V posledním kroku byly všechny závislosti výslednic sil proloženy interpolačními polynomy 6. stupně (kvůli nejvyšší možné přesnosti) a doplněny o jejich rovnice, které jsou uvedeny jako příloha této diplomové práce. Interpolační polynomy výslednic všech kotoučů byly poté pro názorné srovnání vykresleny do jednoho grafu. Výsledky jsou znázorněny na obr. 5.22 až obr. 5.25. Příklad proložení dat polynomem 6. stupně je uveden na obr. 5.5.



Obr. 5.5 Ukázka proložení výslednice sil polynomem šestého stupně.

5.1.5 Způsob numerického vyhodnocení

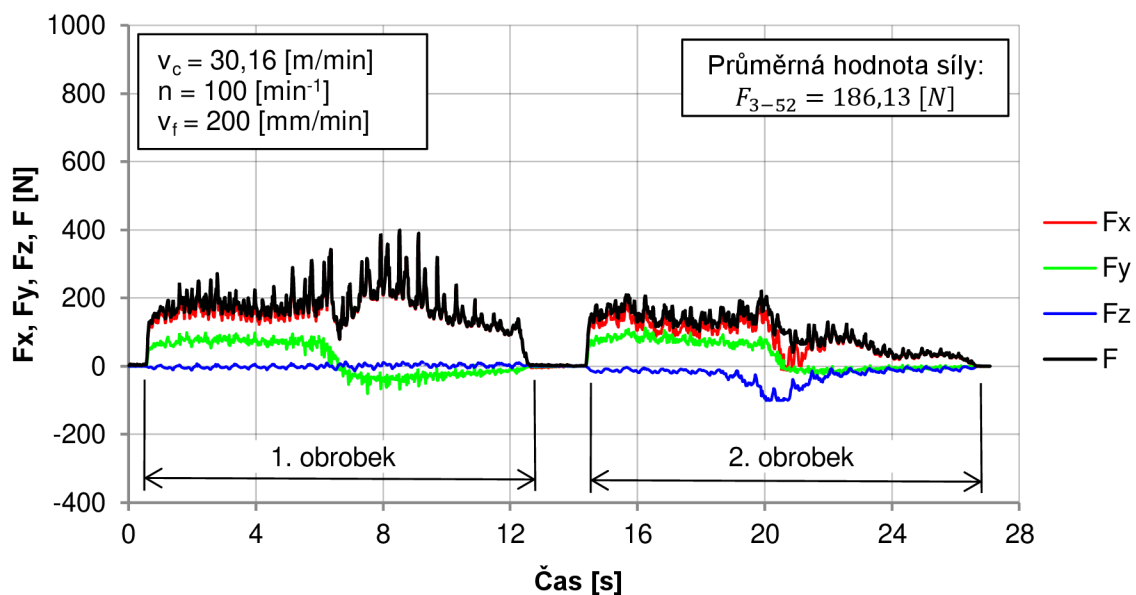
Aby bylo možné výsledky měření vyjádřit nejen graficky, ale i číselně, byly vypočítány přibližné průměrné hodnoty výslednic sil F_{5-104} anebo F_{3-52} dle následujícího postupu

Průměrná hodnota výslednic sil F_{5-104} :

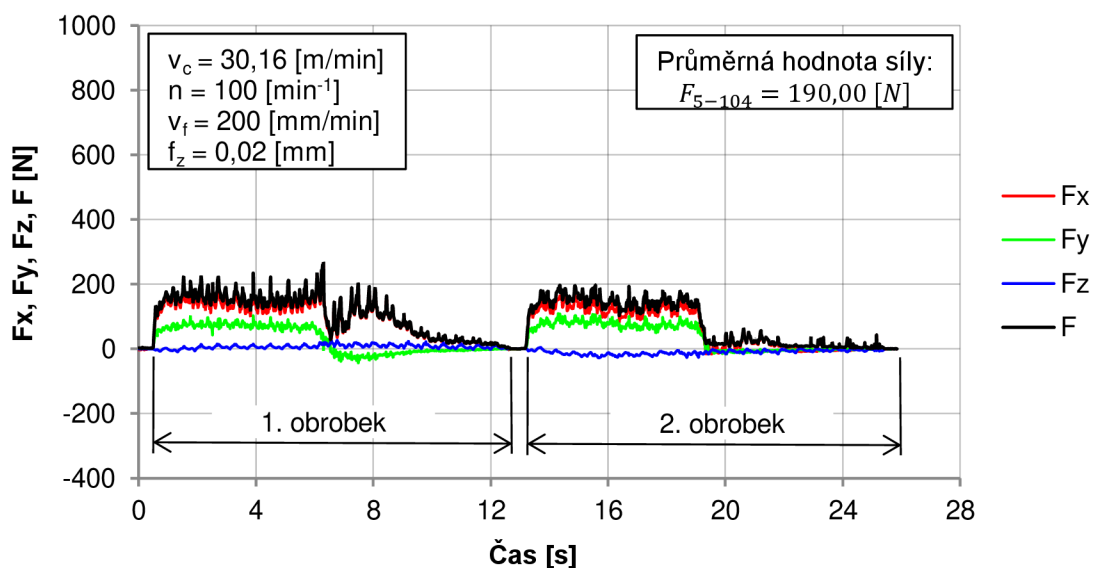
Výslednice sil v souboru byly nejprve seřazeny dle velikosti od největší po nejmenší hodnotu. Průměrná hodnota pak byla stanovena ze 100 nejvyšších hodnot souboru, z kterého byly však pro eliminaci chyb odebrány čtyři nejvyšší hodnoty. Průměr byl tedy určen z 5. až 104. nejvyšší hodnoty souboru. Příkladem je např. soubor na obr. 5.7.

Průměrná hodnota výslednic sil F_{3-52} :

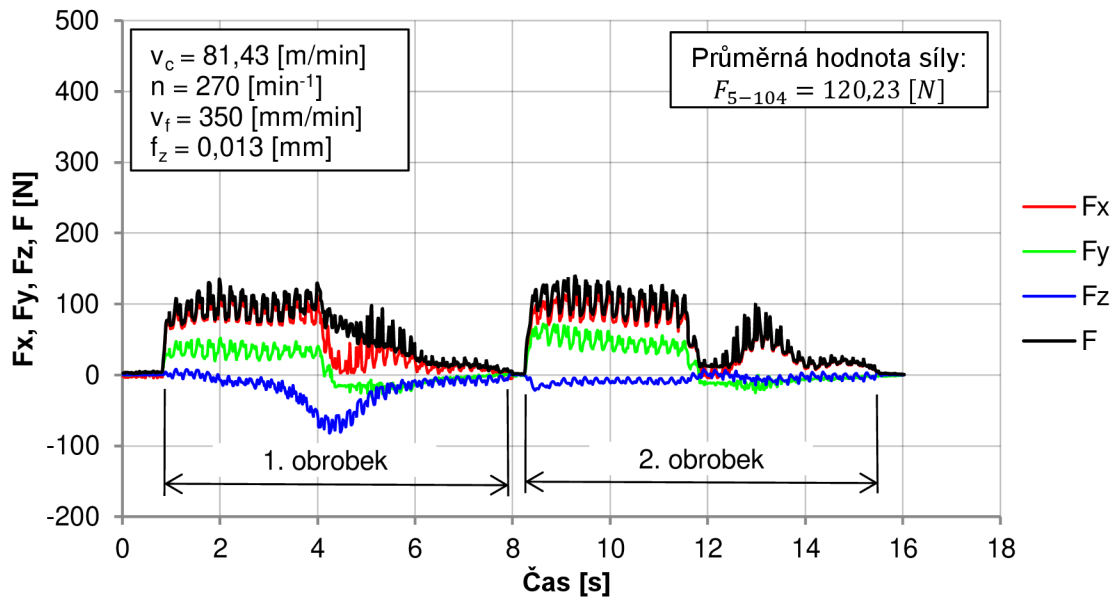
Tato hodnota byla určena v případě těch souborů, u kterých byla některá data vysokou měrou ovlivněna přílišným dotažením přípravku. Jednalo se o takové silové záznamy, u kterých byly velikosti sil při výjezdu ze záběru vyšší než při samotném obrábění. V takovém případě byl výpočet proveden pouze pro tu polovinu souboru, která měla „správný průběh“. Průměrná hodnota byla tedy stanovena pouze z 50 nejvyšších hodnot, z kterých byly však vyřazeny dvě nejvyšší hodnoty. Průměr byl tedy vypočítán z 3. až 52. nejvyšší hodnoty souboru. Příkladem je např. soubor na obr. 5.6.

5.2 Grafické závislosti sil F_x , F_y , F_z a F na čase.


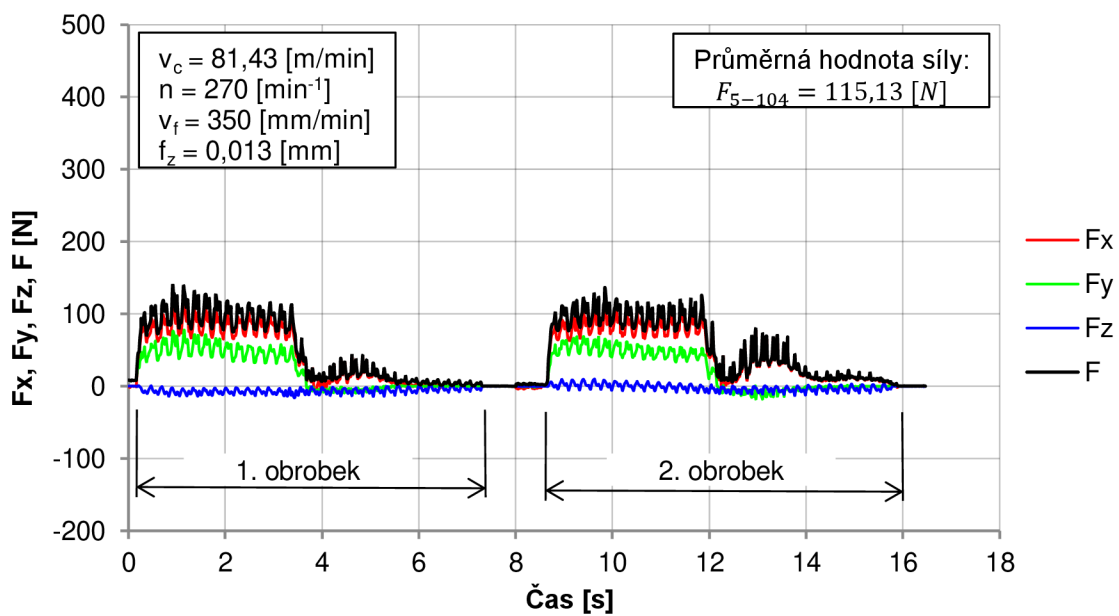
Obr. 5.6 Řez bez vlivu odpružení pilovým kotoučem s ozubením B při řezných podmínkách č. 1.



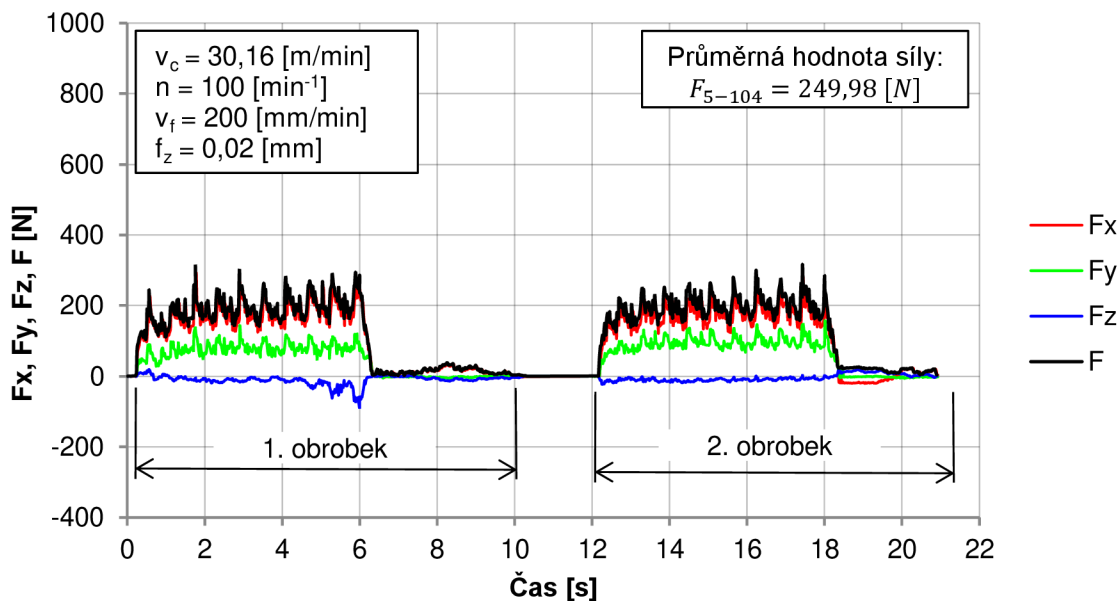
Obr. 5.7 Řez s vlivem odpružení pilovým kotoučem s ozubením B při řezných podmínkách č. 1.



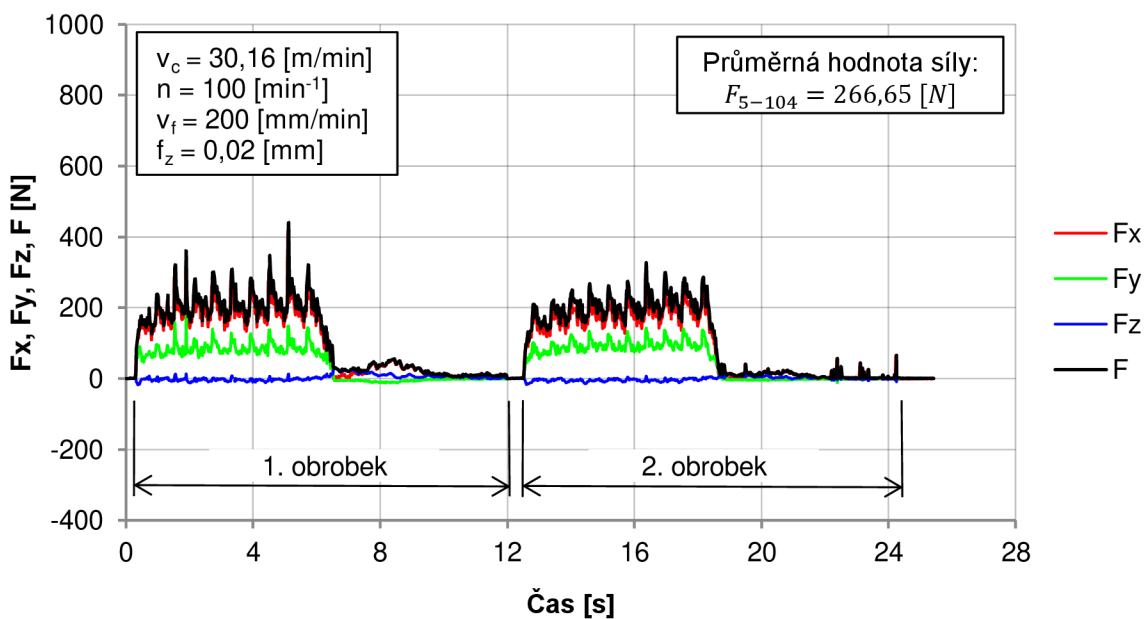
Obr. 5.8 Řez **bez** vlivu odpružení pilovým kotoučem s ozubením **B** při řezných podmínkách č. 2.



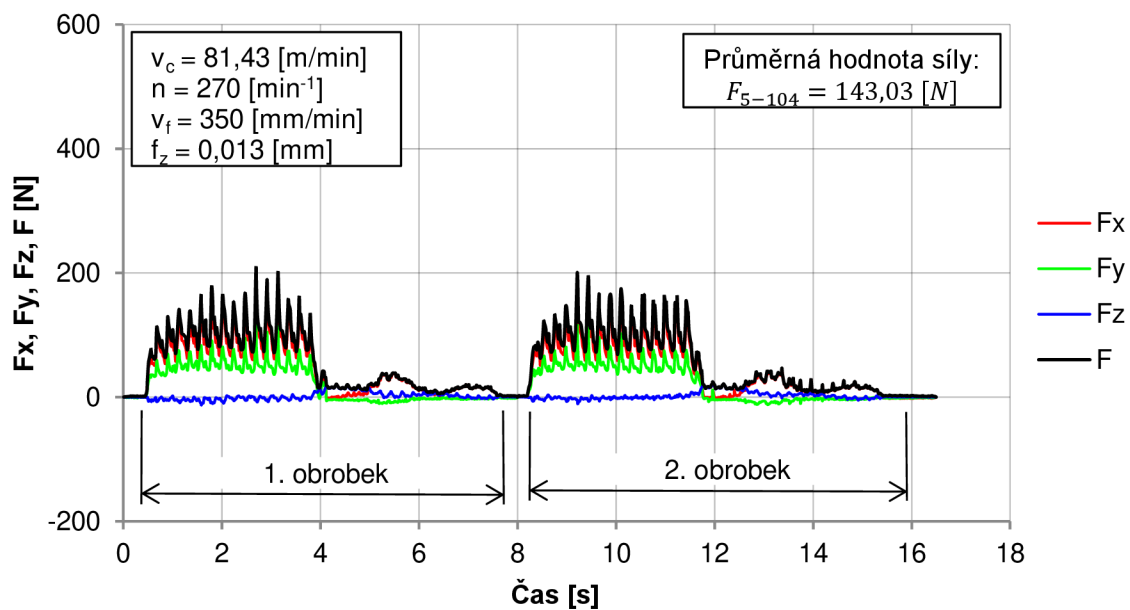
Obr. 5.9 Řez **s** vlivem odpružení pilovým kotoučem s ozubením **B** při řezných podmínkách č. 2.



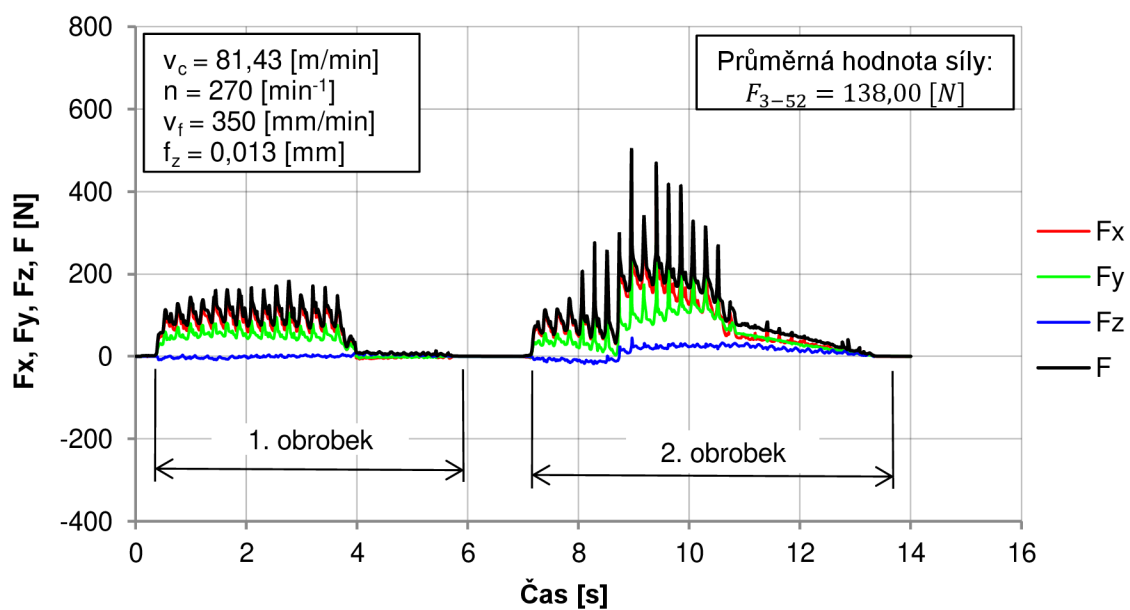
Obr. 5.10 Řez **bez vlivu odpružení** pilovým kotoučem s ozubením C při řezných podmínkách č. 1.



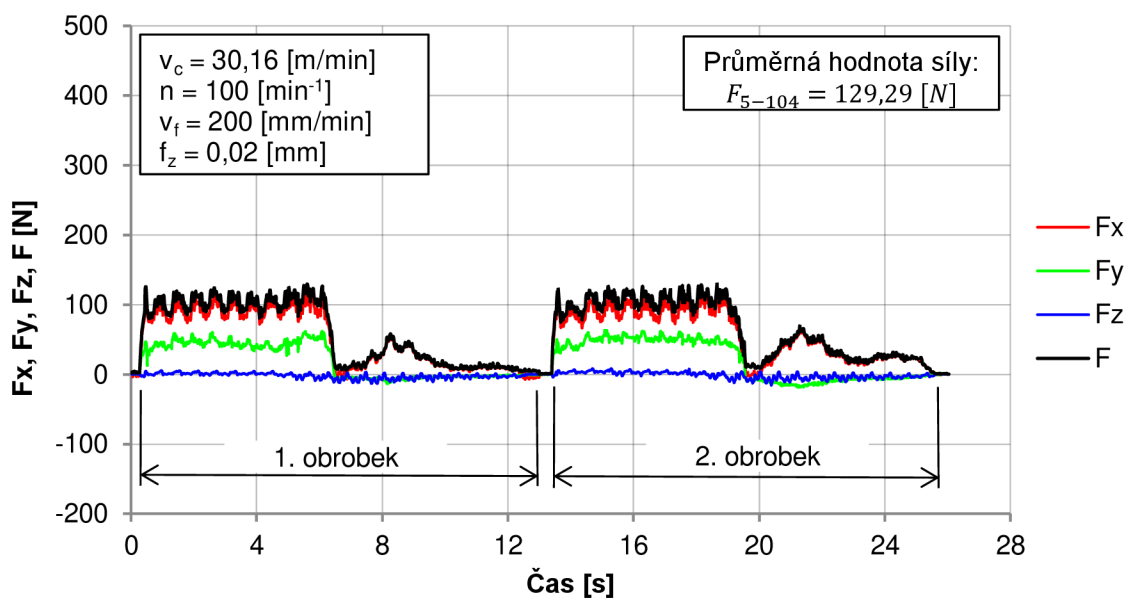
Obr. 5.11 Řez **s vlivem odpružení** pilovým kotoučem s ozubením C při řezných podmínkách č. 1.



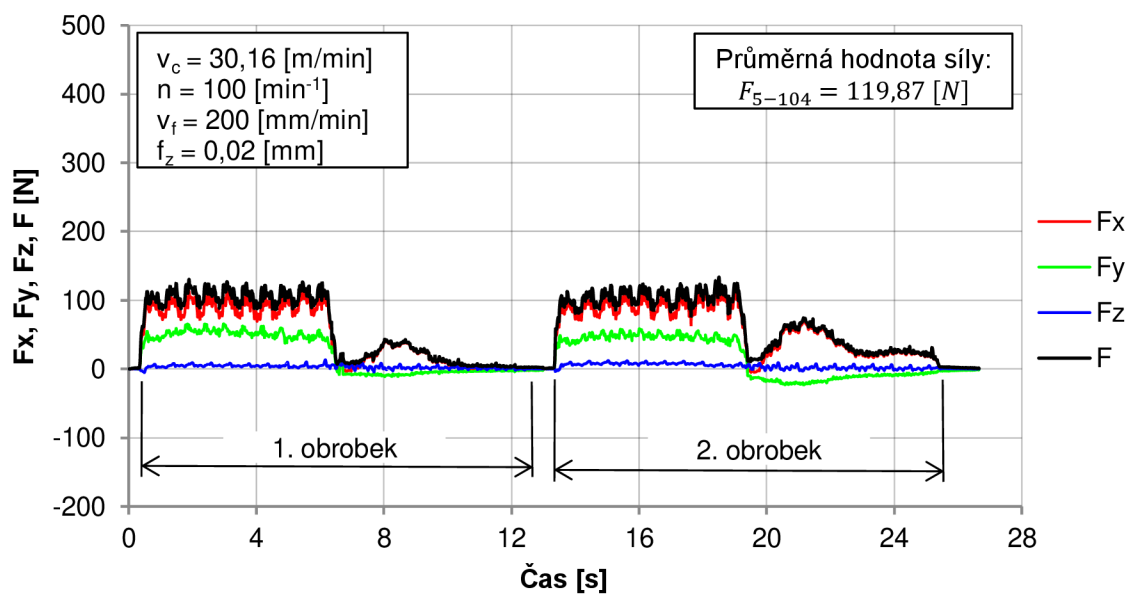
Obr. 5.12 Řez **bez** vlivu odpružení pilovým kotoučem s ozubením C při řezných podmínkách č. 2.



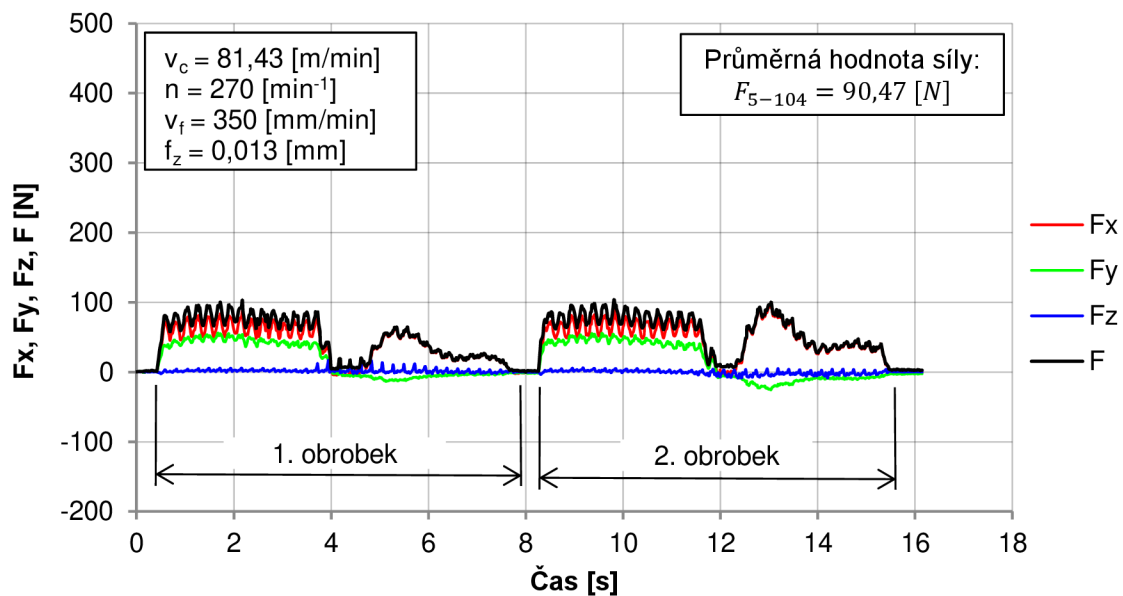
Obr. 5.13 Řez **s** vlivem odpružení pilovým kotoučem s ozubením C při řezných podmínkách č. 2.



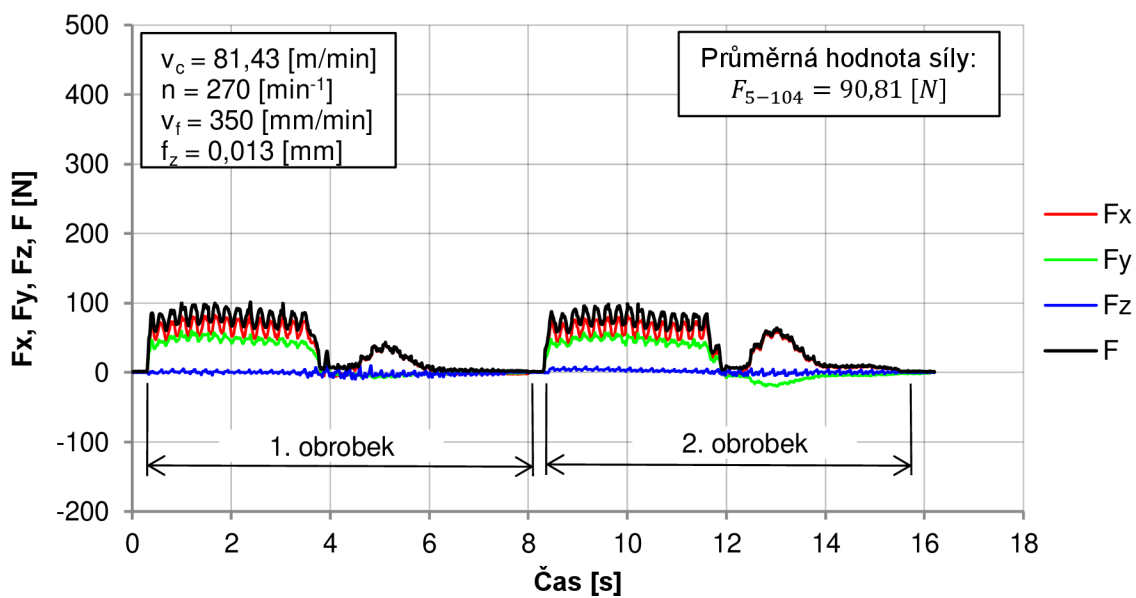
Obr. 5.14 Řez **bez vlivu odpružení** pilovým kotoučem s ozubením **BW** při řezných podmínkách č. 1.



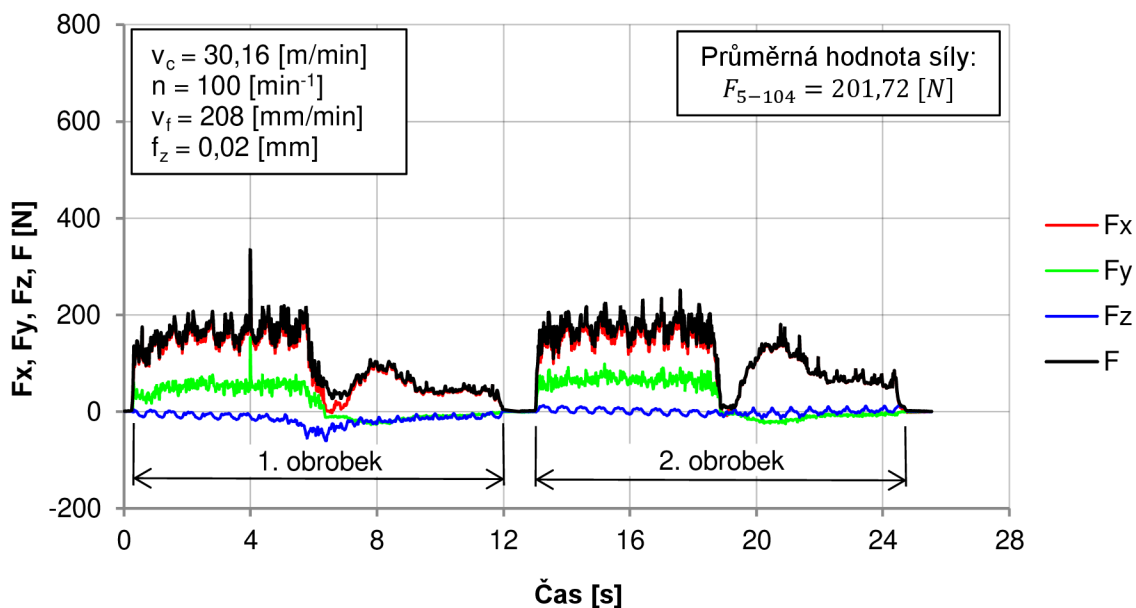
Obr. 5.15 Řez **s vlivem odpružení** pilovým kotoučem s ozubením **BW** při řezných podmínkách č. 1.



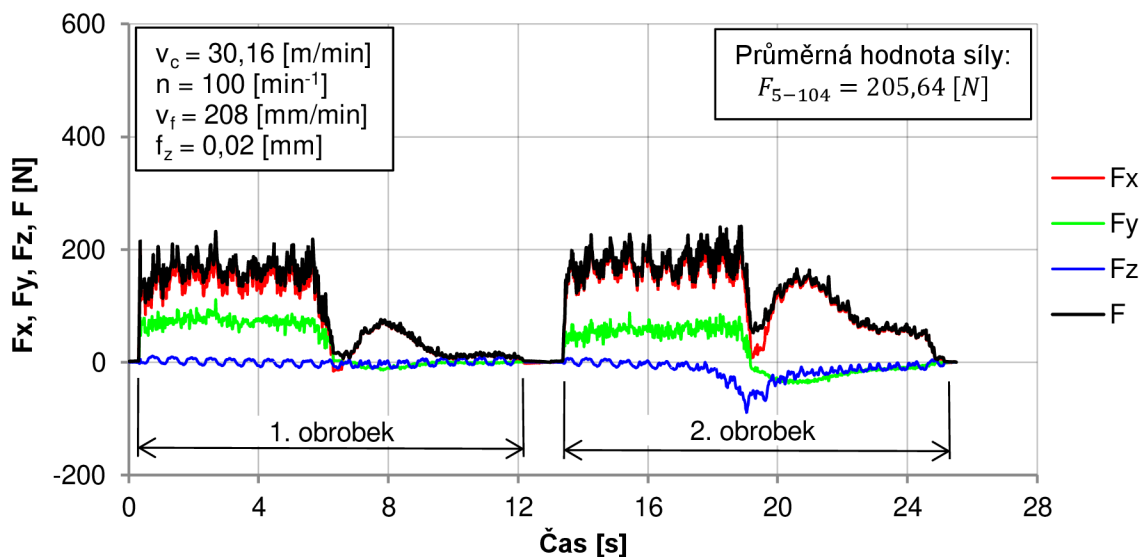
Obr. 5.16 Řez **bez vlivu odpružení** pilovým kotoučem s ozubením **BW** při řezných podmínkách č. 2.



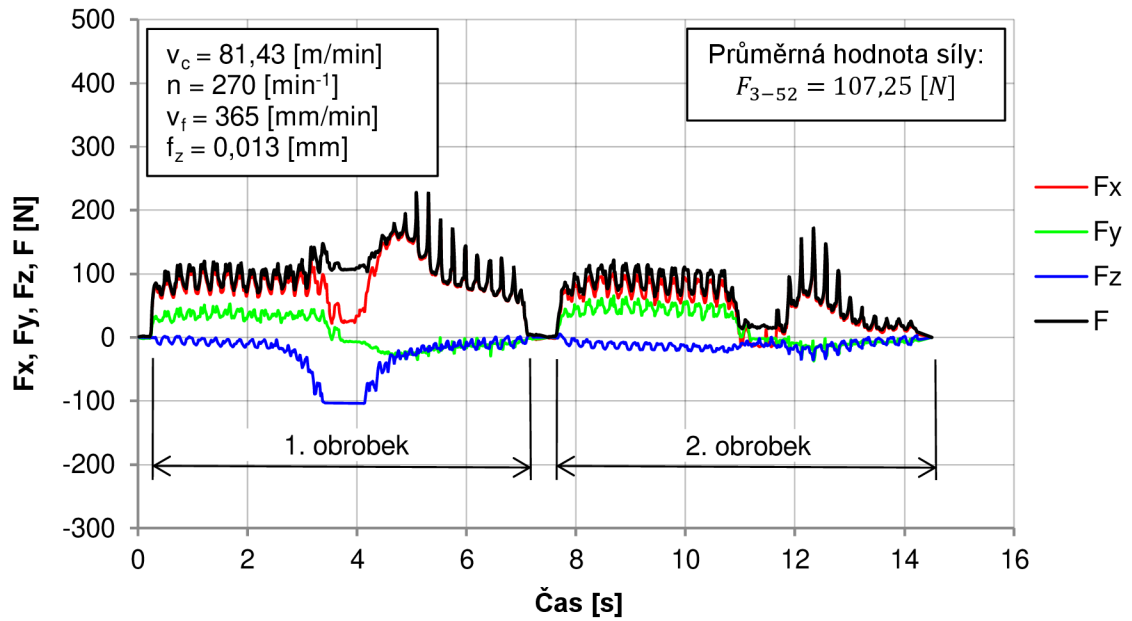
Obr. 5.17 Řez **s vlivem odpružení** pilovým kotoučem s ozubením **BW** při řezných podmínkách č. 2.



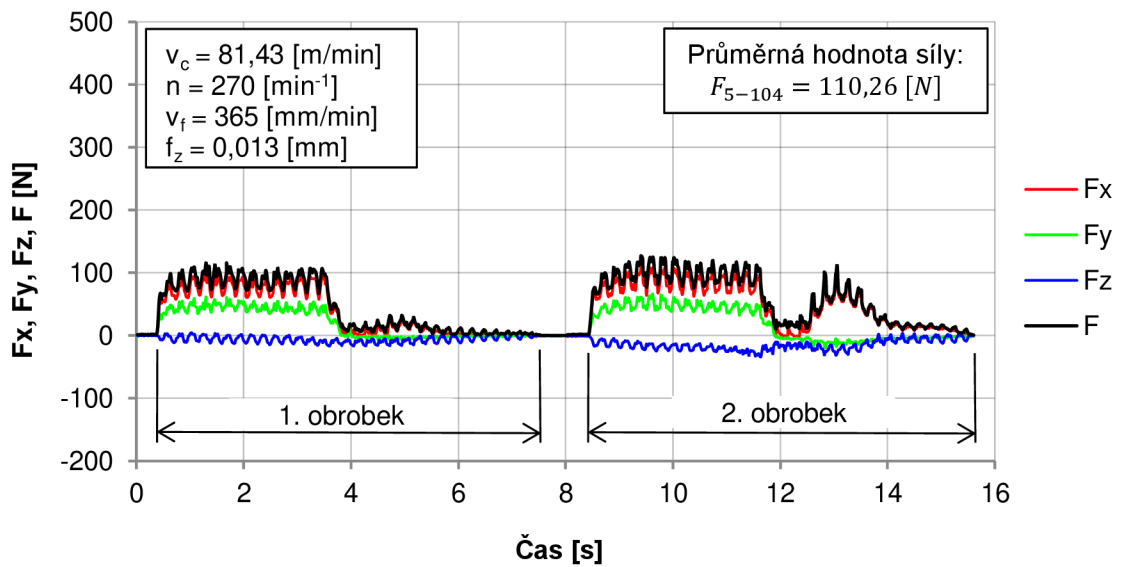
Obr. 5.18 Řez **bez vlivu odpružení** pilovým kotoučem s ozubením **VARIO B** při řezných podmínkách č. 3.



Obr. 5.19 Řez **s vlivem odpružení** pilovým kotoučem s ozubením **VARIO B** při řezných podmínkách č. 3.

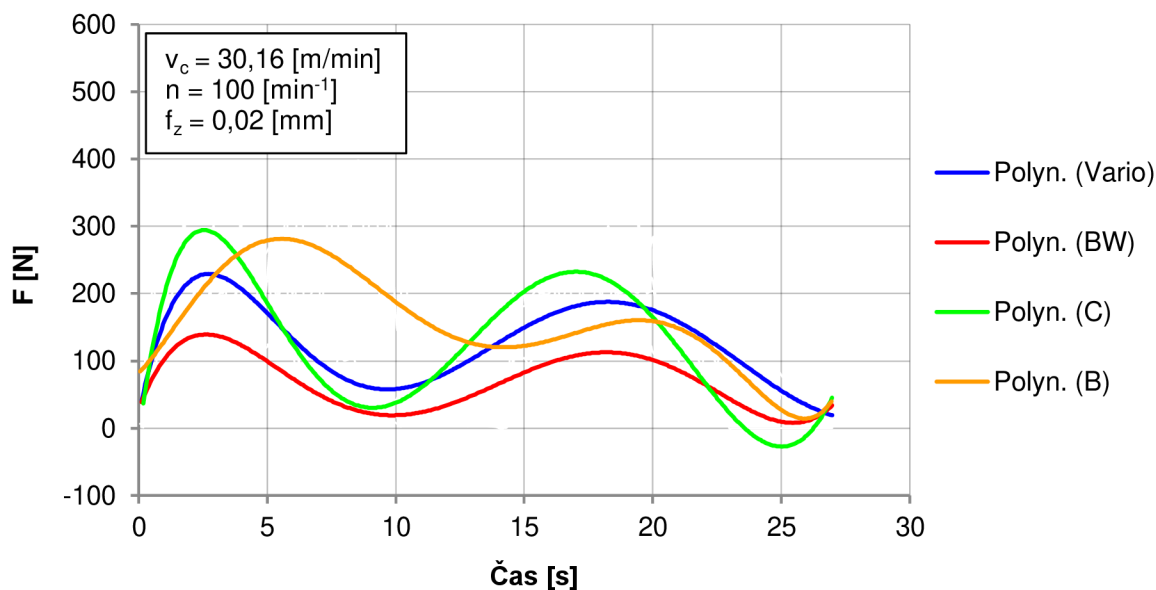


Obr. 5.20 Řez **bez vlivu odpružení** pilovým kotoučem s ozubením **VARIO B** při řezných podmínkách č. 4.

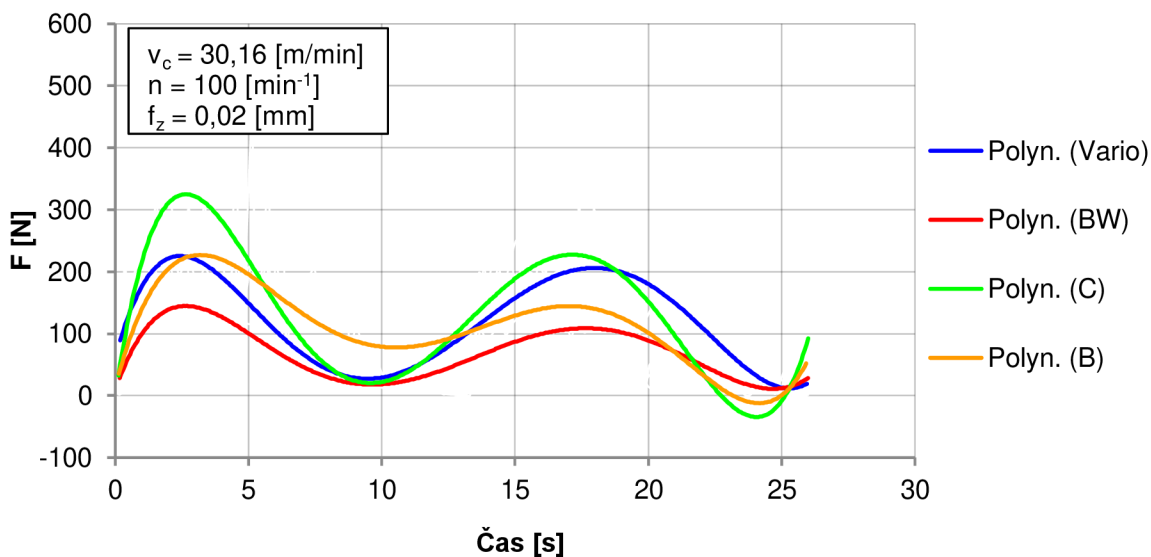


Obr. 5.21 Řez **s vlivem odpružení** pilovým kotoučem s ozubením **VARIO B** při řezných podmínkách č. 4.

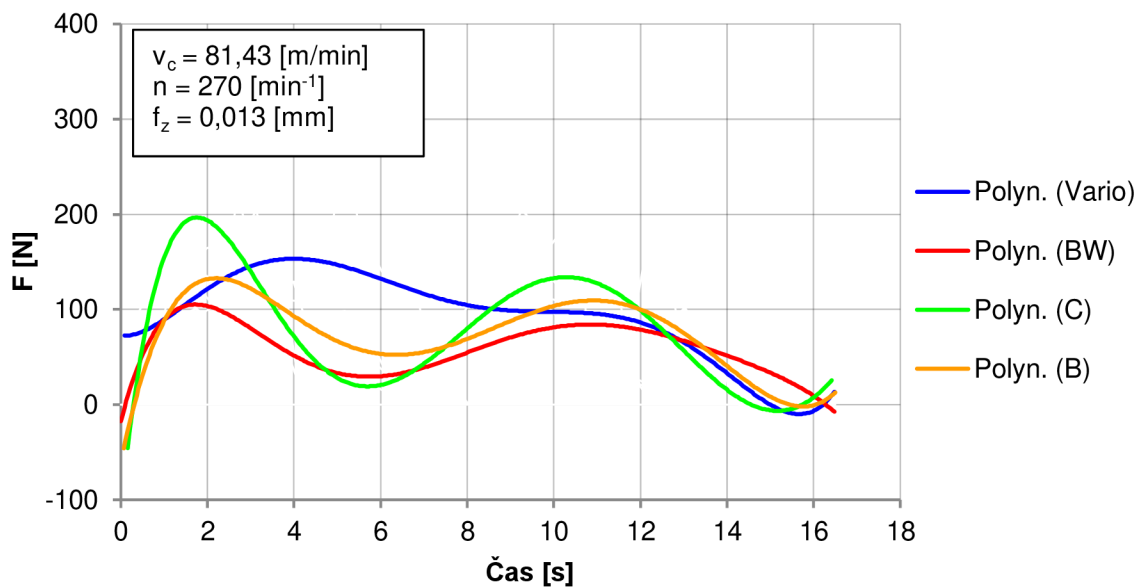
5.3 Grafické srovnání zatížení pilových kotoučů



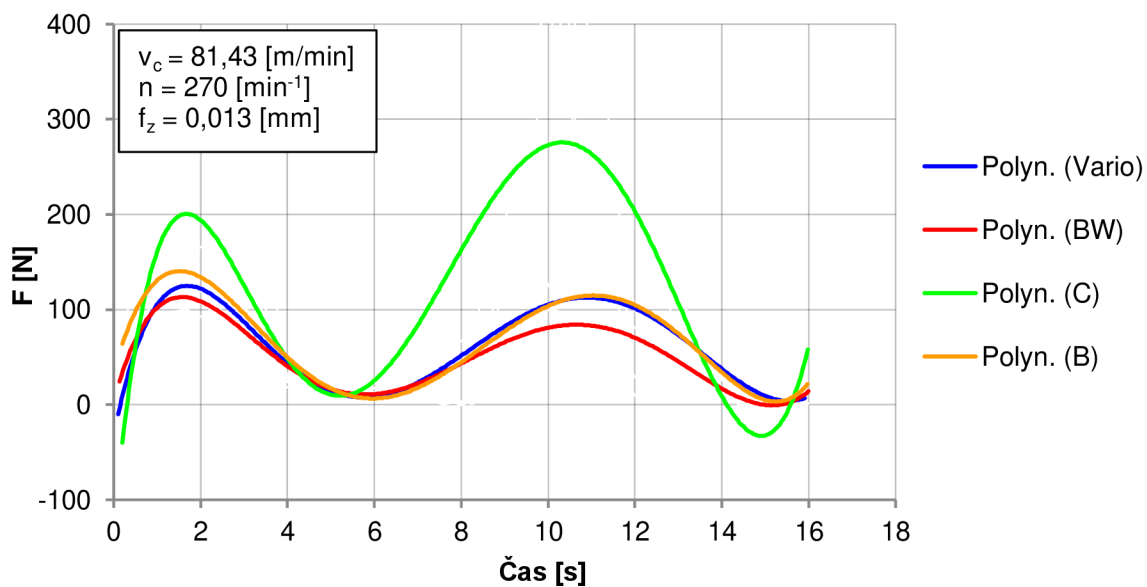
Obr. 5.22 Řezání při řezných podmínkách dle katalogu bez vlivu odpružení.



Obr. 5.23 Řezání při řezných podmínkách dle katalogu s vlivem odpružení.



Obr. 5.24 Řezání při řezných podmínkách dle Fischer Vyškov, spol. s r. o., bez vlivu odpružení.



Obr. 5.25 Řezání při řezných podmínkách dle Fischer Vyškov, spol. s r. o., s vlivem odpružení.

5.4 Numerické srovnání zatížení pilových kotoučů

Souhrn výsledků je uveden v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Numerické shrnutí výsledků.

| – | – | Průměrná síla F_{5-104} (anebo F_{3-52}) [N] | | | |
|----------------|----------------------------|---|----------|-----------|-----------------|
| | | Kotouč B | Kotouč C | Kotouč BW | Kotouč VARIO V8 |
| Vliv odpružení | Řezné podmínky | | | | |
| ne | dle katalogu | 186,13 | 249,98 | 129,29 | 201,72 |
| ano | dle katalogu | 190,00 | 266,65 | 119,87 | 205,64 |
| ne | dle Fischer, spol. s r. o. | 120,23 | 143,03 | 90,47 | 107,25 |
| ano | dle Fischer, spol. s r. o. | 115,13 | 138,00 | 90,81 | 110,26 |

V tab. 5.2 jsou výsledky vyjádřeny v procentuálním poměru vzhledem k silovému zatížení kotouče s ozubením B, který společnost používá v současnosti.

Tab. 5.2 Numerické shrnutí výsledků v procentech.

| – | – | Průměrná síla F_{5-104} (anebo F_{3-52}) vyjádřená v procentech vztahených ke kotouči s ozubením B [%] | | | |
|----------------|----------------------------|---|----------|-----------|-----------------|
| | | Kotouč B | Kotouč C | Kotouč BW | Kotouč VARIO V8 |
| Vliv odpružení | Řezné podmínky | | | | |
| ne | dle katalogu | 100 | 134,30 | 69,46 | 108,38 |
| ano | dle katalogu | 100 | 140,34 | 63,09 | 108,23 |
| ne | dle Fischer, spol. s r. o. | 100 | 118,96 | 75,25 | 89,20 |
| ano | dle Fischer, spol. s r. o. | 100 | 119,86 | 78,88 | 95,77 |

Z tab. 5.2 plyne, že oproti pilovému kotouči s ozubením typu B, které firma Fischer, spol. s r. o., používá v současnosti:

- byl u kotouče s ozubením typu C sledován nárůst velikosti výslednice sil o 34,30 %, 40,34 %, 18,96 % a 19,86 % v závislosti na řezných podmínkách.
- byl u kotouče s ozubením typu BW sledován pokles velikosti výslednice sil o 30,54 %, 36,91%, 24,75 % a 21,12 % v závislosti na řezných podmínkách.
- byl u kotouče s ozubením typu VARIO B (V8) při řezných podmínkách dle katalogu sledován nárůst velikosti výslednice sil o 8,38 % a 8,23 %. U řezných podmínek dle Fischer, spol. s r. o., se však už jednalo o pokles výslednice sil o 10,80 % a 4,23 %.

Dále je z tab. 5.1 patrné, že při snížení posuvu na zub f_z z hodnoty 0,02 mm na 0,013 mm při současném zvýšení řezné rychlosti v_c z hodnoty 30,16 m/min na 81,43 m/min:

- byl u kotouče s ozubením B zaznamenán pokles výslednice sil o 35,41 % a 39,41 %.
- byl u kotouče s ozubením C zaznamenán pokles výslednice sil o 42,78 % a 48,25 %.
- byl u kotouče s ozubením BW zaznamenán pokles výslednice sil o 30,03 % a 24,24 %.
- byl u kotouče s ozubením VARIO B (V8) zaznamenán pokles výslednice sil o 46,83 % a 46,38 %.

ZÁVĚR

V teoretické části byla zpracována rešerše technologie řezání kotoučovou pilou se zaměřením na kinematiku a dynamiku řezání. V další kapitole byl proveden rozbor používaných nástrojů – pilových kotoučů, který zahrnoval popis jejich geometrie, popis materiálů, z nichž se kotouče vyrábí, a metody jejich povlakování. Poslední část rešerše je zaměřena na rozbor konkrétního problému, jehož se tato práce týká, a je v ní proveden výčet dosavadních znalostí.

V praktické části bylo provedeno testování čtyřech pilových kotoučů z hlediska silového zatížení. Šlo o pilové kotouče, jejichž hlavní rozměry byly stejné, avšak lišily se geometrií břitů. Pro co nejlepší názornost bylo testování provedeno přímo na reálných polotovarech, ze kterých jsou vyráběny finální produkty. Silové zatížení bylo měřeno pomocí dynamometru KISTLER.

Z provedené silové analýzy plynou následující závěry:

- U kotouče s ozubením C byly naměřeny nejvyšší hodnoty řezných sil, avšak je nutné podotknout, že vyrobený kotouč měl výrazné nedostatky, které bylo možné sledovat již pouhým okem. Šlo zejména o výraznou nesymetrii bočního zbrošení α_1 u některých zubů.
- Kotouč s ozubením VARIO B (V8) vykazoval při řezných podmínkách dle katalogu vyšší řezné síly než kotouč s ozubením typu B. Při řezání za řezných podmínek dle Fischer, spol. s r. o., však byly naměřeny nižší řezné síly. Rozdíl ve zjištěných silách nebyl výrazný. Dalším aspektem je pořizovací cena, která je u tohoto pilového kotouče přibližně o 20 % vyšší než u kotouče s klasickým ozubením B.
- U kotouče s ozubením BW byly u všech měření zaznamenány nejnižší řezné síly. Při různých parametrech obrábění bylo sledováno jejich snížení o 21,12 % až 36,91 % oproti obrábění pilovým kotoučem s ozubením B, které používá společnost v současnosti. Pořizovací cena je přibližně o 10 až 15 % vyšší než u kotouče s ozubením B.
- Při obrábění součásti upnuté ve speciálním přípravku nebyla zaznamenána žádná pravidelnost ve zvýšení/snížení řezných sil v důsledku obrábění s vlivem anebo bez vlivu odpružení.

Z experimentální části této diplomové práce zcela jednoznačně vyplývá, že střídavé boční zbrošení má příznivý vliv na řezný proces z hlediska řezných sil. U kotouče s ozubením BW byly při řezných podmínkách $f_z = 0,02 \text{ mm}$ a $v_c = 30,16 \text{ m/min}$ naměřeny nižší síly než u pilového kotouče s ozubením B, a to o více než 30 %. Při řezných podmínkách $f_z = 0,013 \text{ mm}$ a $v_c = 81,43 \text{ m/min}$ byly naměřeny o 20 % nižší řezné síly. Z toho plynou rovněž i nižší nároky na potřebný výkon stroje.

V dalším kroku je doporučeno otestování pilových kotoučů s ozubením BW přímo ve výrobě s cílem zjištění jejich trvanlivosti a životnosti při řezání hlubokých drážek do zarážecích kotev. V případě pozitivních výsledků je dále doporučeno zvážit zvýšení posuvové rychlosti, čímž by se výrazně snížily časy řezání.

V případě nízké trvanlivosti/životnosti pilových kotoučů s ozubením BW zvážit aplikaci některého z povlaků uvedených ve zdroji [33].

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KMEC, Ján. *Delenie materiálov*. Vyd. 2. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2014. ISBN 978-80-553-1872-1.
- [2] MRKVICA, Miloš. *Přípravky a obráběcí nástroje*. I. díl, Řezné nástroje. 4. vydání. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3775-8.
- [3] *Kompletní katalog*. Katalog společnosti Fischer [online]. Vyškov, c2019. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://www.fischer-cz.cz/cs-cz/ke-stazeni/katalogy>.
- [4] SKRYJA, J. *Diamantové kotouče a jejich využití v kamenickém průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.
- [5] ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2336-6.
- [6] KRAR, Stephen F., Arthur GILL a Peter SMID. *Technology of machine tools*. 7th ed. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-351083-5.
- [7] ČEP, Robert. *Skripta z technologie II - 2. díl* [online]. Ostrava: Technická univerzita Ostrava [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf.
- [8] VIGNER, Miloslav. *Obrábění*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984. Technický průvodce.
- [9] SKVORCOV, Pavel Fedorovič. *Řezání kovů kotoučovými pilami: příručka pro praxi s tabulkami řezných podmínek a návod k zhospodárnění řezání kovů : určeno pracujícím ve strojárnách, technikům z přípravy výroby a z dílenské konstrukce*. Praha: Práce, 1952. Technické příručky Práce.
- [10] *Český katalog GSP 2013*. Katalog společnosti GSP [online]. Zborovice, 2013. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://www.gspzborovice.cz/Ke-stazeni/>.
- [11] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [12] HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory*. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2003 [online]. [cit. 2019-02-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf.
- [13] NESLUŠAN, Miroslav. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. Vysokoškolské učebnice. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [14] ČSN 22 2901. *Celistvé pílové kotouče na kovy. Spoločné ustanovenie*. Praha: Český normalizační institut, 1991, 12 s. Třídící znak 222901.
- [15] ČSN ISO 2296. *Pílové kotouče s jemnými a hrubými zuby - Metrické řady*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 12 s. Třídící znak 222910.
- [16] *Český katalog PILANA*. Katalog společnosti PILANA [online]. Zborovice, 2013. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://www.gspzborovice.cz/Ke-stazeni/>.
- [17] Kotoučové pily na kov. MM Průmyslové spektrum [online]. 2002, (4) [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kotoucove-pily-na-kov.html>.

- [18] Informace poskytl Lukáš DANĚK, obchodní zástupce ve společnosti GSP-High Tech Saws, s. r. o. Zborovice 8.4.2019.
- [19] *Zubová rozteč* [online]. Hulín: Pilanametal, c2015-2019 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.pilanametal.cz/zubova-roztec.html>.
- [20] *Variable pitch band saw blades for cutting logs* [online]. Satu Mare: Metamob, c2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.metamob.ro/en/products/wide-band-saw-blades/with-vario-stellite-tipped-teeth>.
- [21] TLUSTÝ, Jiří. *Manufacturing processes and equipment*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000, xxviii, 928 s. : il. ISBN 0-201-49865-0.
- [22] *MATERIÁLOVÉ LISTY OCELÍ 4198 - Oceli třídy 19. Materiálové listy* [online]. Hradec Králové: TECHNOR print, c2005-2018 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/hutnictvi-materialove-listy-oceli-41/oceli-tridy-19-materialove-listy-4198>.
- [23] *1.3343 / 19 830* [online]. Kladno: TOOLSTEEL, c2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/1-3343-19830-hs6-5-2c-s6-5-2-m2-max-special-mo-5/>
- [24] *Převodní tabulky ocelí*. [online]. TumliKOVO, c2010 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/prevodni-tabulky-oceli/>.
- [25] *Materiálová tabulka ocelí - převod* [online]. Valašské Meziříčí: VALSTEEL. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://www.valsteel.cz/dodavana-ocel/materialova-tabulka-oceli-prevod/>.
- [26] ČSN 41 9830. *Ocel 19 830 rychlořezná*. Praha: Český normalizační institut, 1967, 8 s. Třídící znak 419830.
- [27] ČSN 41 9852. *Ocel 19 852 W-Mo-Co-Cr-V*. Praha: Český normalizační institut, 1978, 8 s. Třídící znak 419852. Norma již není platná.
- [28] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje: Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI*. Brno, 2006. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [29] ŠÍMA, Michal, Mojmír JÍLEK, Pavel HOLUBÁŘ a Ondřej ZINDULKA. *Měření vlastností povlaků na nástrojích*. In: MM Průmyslové spektrum. [online]. 2004 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.kom.tul.cz/to/sdilene/merenipovlaku.pdf>.
- [30] *CVD povlakování* [online]. Praha: Böhler Uddeholm, c2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.bohler-uddeholm.cz/media/CVD.pdf>.
- [31] *PVD povlakování* [online]. Praha: Böhler Uddeholm, c2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.bohler-uddeholm.cz/media/PVD.pdf>.
- [32] Informace poskytl Jiří FUČÍK, technolog ve společnosti Fischer Vyškov, spol. s r. o. Ivanovice na Hané 4.4.2019.
- [33] SPÁČIL, R. *Analýza řezání tenkostěnných součástí pilou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 106 s. 1 příloha. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [34] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN 91-972299-4-6.

-
- [35] FISCHER .FIXINGS. fischer Hammerset anchor EA II hef = 25 mm. In: *Youtube* [online]. Zveřejněno 9. 06. 2016. Dostupné z: <https://youtu.be/rn6G72aaal0>.
- [36] *Dílčí zpráva k projektu č. 456: Rozvoj informačních a komunikačních technologií podporující akreditované studijní programy a řízení vysoké školy* [online]. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, c2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Vybaveni_CNC_KISTLER_JC.pdf
- [37] JAROŠ, A. *Nové frézovací nástroje z rychlořezných ocelí pro hrubovací operace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 147 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [38] Informace poskytl Jiří Čech, technický pracovník na Ústavu strojírenské technologie, Vysoké učení technické v Brně, Fakula strojního inženýrství. Brno, 14.5.2019.
- [39] *Příručka uživatele: Popisový dialog HEIDENHAIN iTNC 530* [online]. Německo: HEIDENHAIN, 2012 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/pdf_files/iTNC530/60642x-02/bhb/737_759-C1.pdf
- [40] FUČÍK, Jiří. *Rozměry obrobku*. [elektronická pošta]. [cit. 2019-05-21].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

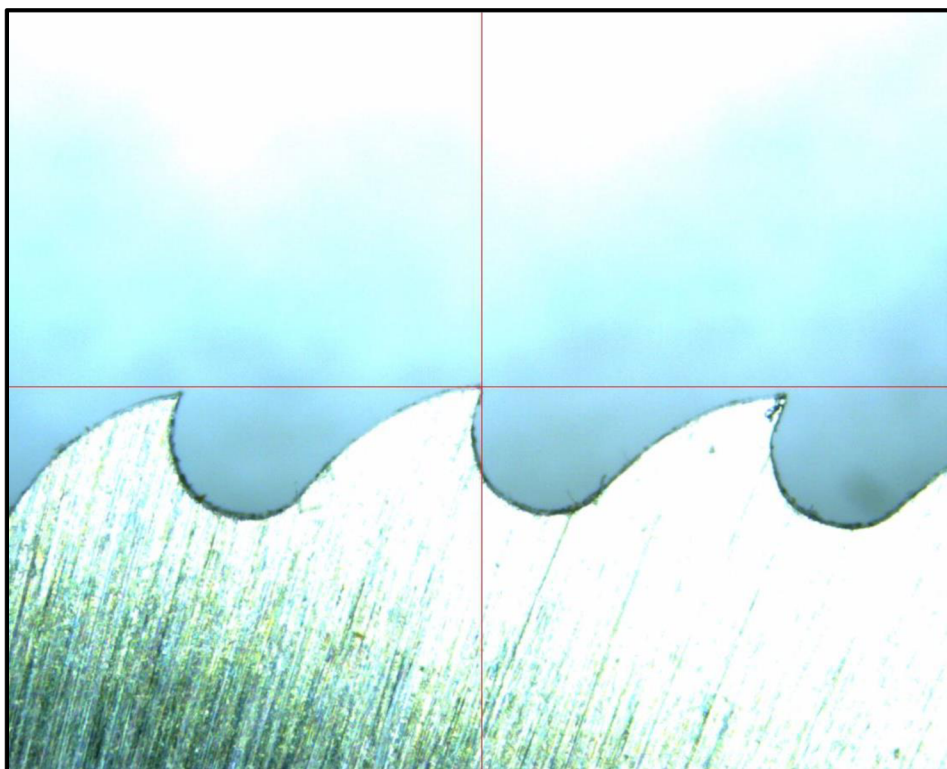
| Zkratka/Symbol | Jednotka | Popis |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| s r. o. | – | s ručením omezeným |
| f_z | mm | posuv na zub |
| $\emptyset D$ | mm | vnější průměr pilového kotouče |
| v_c | $m \cdot \text{min}^{-1}$ | řezná rychlost |
| n | min^{-1} | otáčky nástroje (za minutu) |
| v_f | $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ | posuvová rychlost |
| z | – | počet zubů nástroje |
| v_e | $m \cdot \text{min}^{-1}$ | efektivní výsledná rychlost |
| φ_e | ° | úhel posuvového pohybu |
| a_e | mm | radiální šířka záběru (hloubka řezu) |
| F | N | síla obrábění |
| R | N | řezný odpor |
| F_{ci}, F_{cj}, F_{c1} | N | řezná síla působící na jeden zub nástroje (i-tý/j-tý/jeden zub) |
| $F_{cNi}, F_{cNj}, F_{cN1}$ | N | kolmá řezná síla působící na jeden zub (i-tý/j-tý/jeden zub) |
| F_{fi}, F_{fj}, F_{f1} | N | posuvová síla působící na jeden zub nástroje (i-tý/j-tý/jeden zub) |
| $F_{fNi}, F_{fNj}, F_{fN1}$ | N | kolmá posuvová síla působící na jeden zub (i-tý/j-tý/jeden zub) |
| F_i, F_j, F_1 | N | celková síla působící na jeden zub nástr. (i-tý/j-tý/jeden zub) |
| F_x, F_{xi}, F_{xj} | N | síla v ose x (i-tý/j-tý zub) |
| F_y, F_{yi}, F_{yj} | N | síla v ose y (i-tý/j-tý zub) |
| F_z, F_{zi}, F_{zj} | N | síla v ose z (i-tý/j-tý zub) |
| F_{5-104} | N | průměrná hodnota výslednic sil pro 5. až 104. nejvyšší hodnotu souboru |
| F_{3-52} | N | průměrná hodnota výslednic sil pro 3. až 52. nejvyšší hodnotu souboru |
| P_c | W | řezný výkon |
| F_c | N | řezná síla |
| n_z | – | počet zubů v záběru |
| k_{ci} | MPa | měrná řezná síla |
| A_{Di} | mm^2 | průřez třísky |
| a_p | mm | axiální šířka záběru (šířka řezu) |
| h_i | mm | jmenovitá tloušťka třísky |
| C_{Fc} | – | konstanta – charakteristika obr. materiálu |
| x | – | exponent vlivu tloušťky třísky |
| φ_{max} | ° | maximální úhel posuvového pohybu |
| h_{max} | mm | maximální tloušťka třísky |
| $P_{už}$ | W | užitečný výkon |
| P_o | W | výkon chodu naprázdno |

| | | |
|---|-------------|---|
| M_k | $N \cdot m$ | kroucí moment od řezné síly |
| M_{kb} | $N \cdot m$ | brzdící moment |
| RO | – | rychlořezná ocel |
| SK | – | slinutý karbid |
| χ' | ° | úhel boční plochy |
| $\varnothing d$ | mm | průměr upínacího otvoru pilového kotouče |
| b | mm | tloušťka pilového kotouče |
| h | mm | výška zubu |
| h_1 | mm | snížení zubu |
| t | mm | zubová rozteč |
| t_1 až t_9 | mm | první až devátá zubová rozteč |
| t_{max}, t_{min} | mm | maximální rozteč, minimální rozteč |
| R | mm | poloměr zaoblení zubové mezery |
| α | ° | úhel hřbetu nástroje |
| β | ° | úhel břitu nástroje |
| γ | ° | úhel čela nástroje |
| α_1 | ° | úhel bočního zbrošení zubu |
| A, B, C, D | – | tvary ozubení pil. kotoučů dle normy ČSN |
| A0, A1, A2, AE, AW, AL, AP, ST, B0, BS, BW, BR, BL, BP, C | – | tvary ozubení pilových kotoučů dle katalogu |
| PKNB | – | polykrystalický kubický nitrid boru |
| Al_2O_3 | – | oxidová keramika |
| Si_3N_4 | – | neoxidová keramika |
| HSS | – | rychlořezná ocel |
| PVD | – | physical vapour deposition |
| CVD | – | chemical vapour deposition |
| PCVD | – | plazma chemical vapour deposition |
| VB | mm | hřbetní opotřebení |
| T | min | trvanlivost nástroje |
| FSI | – | Fakulta strojního inženýrství |
| VUT | – | Vysoké učení technické v Brně |
| $R_{p0,2}$ | MPa | nevýrazná mez kluzu |
| R_m | MPa | mez pevnosti |
| $A_{50 min}$ | % | tažnost |
| ČSN | – | československá státní norma |
| Dmo5, Emo5 | – | materiály pro výrobu pilových kotoučů |
| f | Hz | vzorkovací frekvence |
| a | s | čas (pozn.: t [mm] – zubová rozteč) |

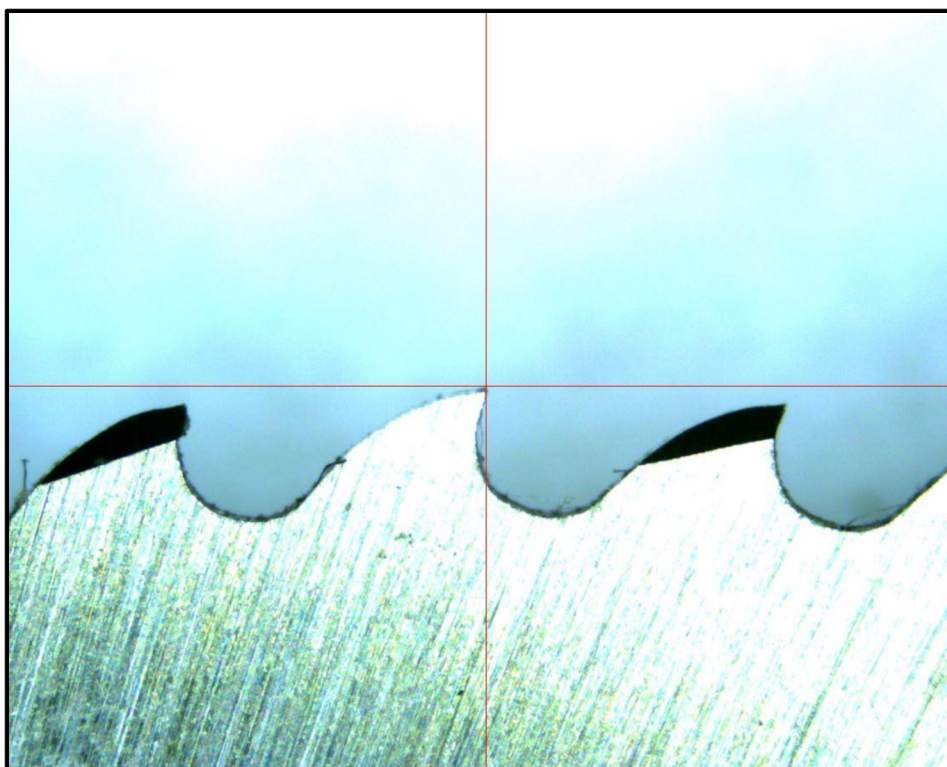
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Detailní snímky ozubení pořízené mikroskopem MarVision MM 420 od společnosti Mahr.
- Příloha 2 Základní rozměry obrobku [40].
- Příloha 3 Rovnice polynomů k obr. 5.22 až obr. 5.25.

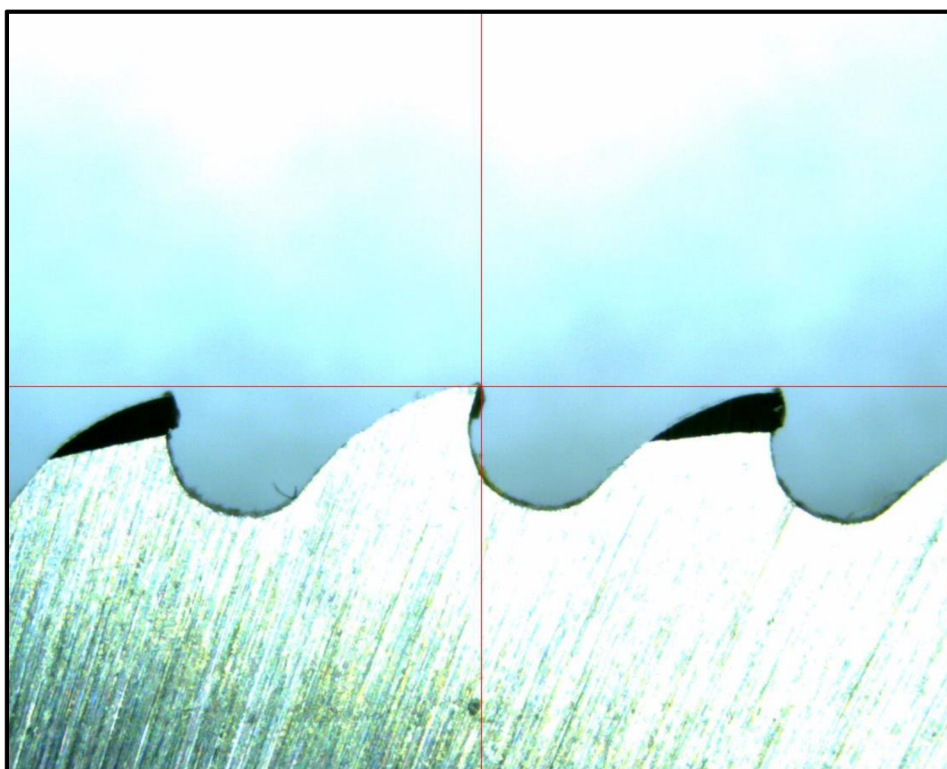
PŘÍLOHA 1



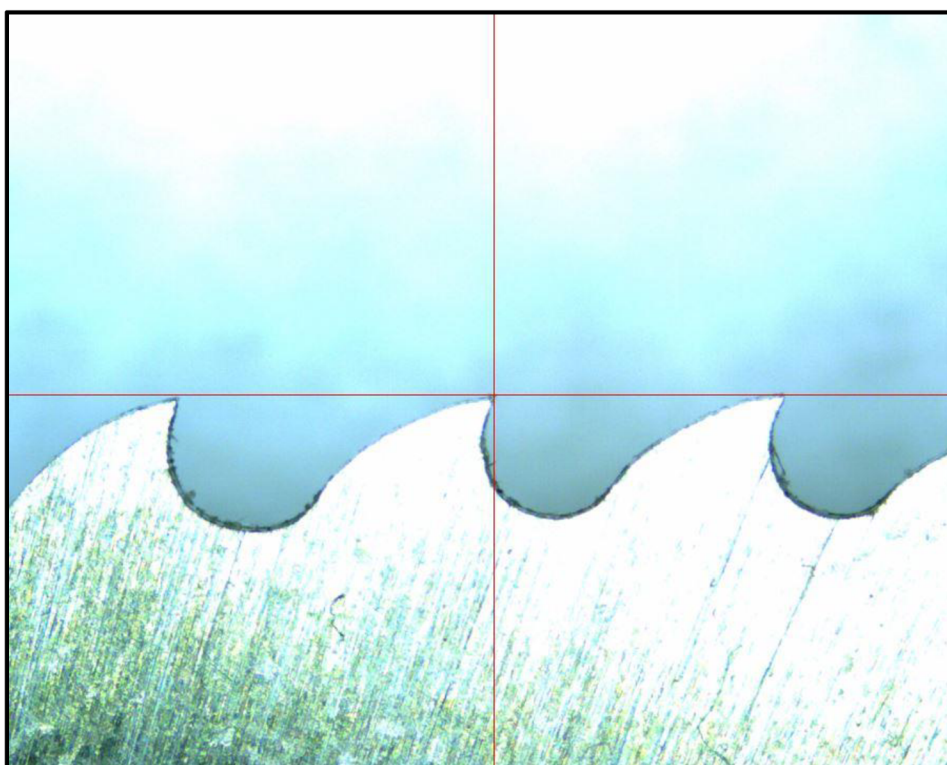
Pilový kotouč s ozubením B



Pilový kotouč s ozubením C

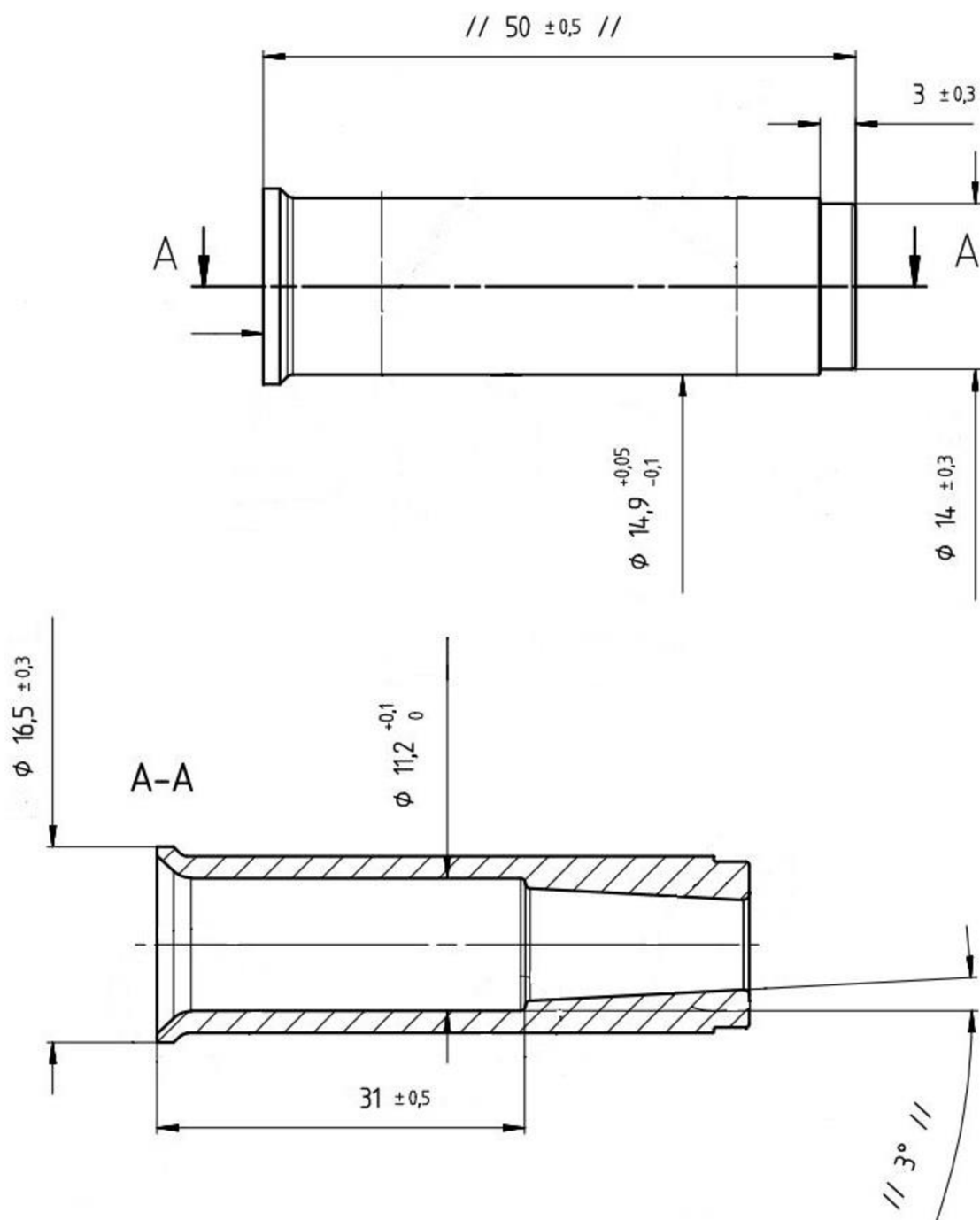


Pilový kotouč s ozubením BW



Pilový kotouč s ozubením VARIO B

PŘÍLOHA 2



PŘÍLOHA 3

Křivky v grafu na **obr. 5.22** jsou popsány rovnicemi (0.1) až (0.4).

Rovnice křivky (0.1) pro pilový kotouč s ozubením VARIO:

$$F = -7 \cdot 10^{-5} \cdot a^6 + 0,0078 \cdot a^5 - 0,3247 \cdot a^4 + 6,2721 \cdot a^3 - 55,842 \cdot a^2 + 188,56 \cdot a + 19,843 \text{ [N]} \quad (0.1)$$

Rovnice křivky (0.2) pro pilový kotouč s ozubením BW:

$$F = -1 \cdot 10^{-5} \cdot a^6 + 0,0024 \cdot a^5 - 0,1357 \cdot a^4 + 3,0763 \cdot a^3 - 29,741 \cdot a^2 + 101,55 \cdot a + 28,069 \text{ [N]} \quad (0.2)$$

Rovnice křivky (0.3) pro pilový kotouč s ozubením C:

$$F = -1 \cdot 10^{-4} \cdot a^6 + 0,0142 \cdot a^5 - 0,5812 \cdot a^4 + 10,882 \cdot a^3 - 92,581 \cdot a^2 + 294,74 \cdot a - 12,55 \text{ [N]} \quad (0.3)$$

Rovnice křivky (0.4) pro pilový kotouč s ozubením B:

$$F = 2 \cdot 10^{-4} \cdot a^6 - 0,0118 \cdot a^5 + 0,3237 \cdot a^4 - 3,659 \cdot a^3 + 11,554 \cdot a^2 + 39,578 \cdot a + 81,8 \text{ [N]} \quad (0.4)$$

Křivky v grafu na **obr. 5.23** jsou popsány rovnicemi (0.5) až (0.8).

Rovnice křivky (0.5) pro pilový kotouč s ozubením VARIO:

$$F = -2 \cdot 10^{-5} \cdot a^6 + 0,0044 \cdot a^5 - 0,2411 \cdot a^4 + 5,3183 \cdot a^3 - 49,589 \cdot a^2 + 160,02 \cdot a + 60,99 [N] \quad (0.5)$$

Rovnice křivky (0.6) pro pilový kotouč s ozubením BW:

$$F = -3 \cdot 10^{-5} \cdot a^6 + 0,004 \cdot a^5 - 0,1921 \cdot a^4 + 4,0062 \cdot a^3 - 36,91 \cdot a^2 + 124,4 \cdot a + 8,5128 [N] \quad (0.6)$$

Rovnice křivky (0.7) pro pilový kotouč s ozubením C:

$$F = -4 \cdot 10^{-5} \cdot a^6 + 0,0082 \cdot a^5 - 0,4364 \cdot a^4 + 9,4581 \cdot a^3 - 88,438 \cdot a^2 + 299,73 \cdot a - 3,7513 [N] \quad (0.7)$$

Rovnice křivky (0.8) pro pilový kotouč s ozubením B:

$$F = 2 \cdot 10^{-5} \cdot a^6 + 0,0009 \cdot a^5 - 0,1285 \cdot a^4 + 3,6607 \cdot a^3 - 40,517 \cdot a^2 + 162,77 \cdot a + 14,265 [N] \quad (0.8)$$

Křivky v grafu na **obr. 5.24** jsou popsány rovnicemi (0.9) až (0.12).

Rovnice křivky (0.9) pro pilový kotouč s ozubením VARIO:

$$F = 0,0015 \cdot a^6 - 0,0719 \cdot a^5 + 1,2589 \cdot a^4 - 9,7472 \cdot a^3 + 28,959 \cdot a^2 - 3,3511 \cdot a + 72,455 [N] \quad (0.9)$$

Rovnice křivky (0.10) pro pilový kotouč s ozubením BW:

$$F = -0,0011 \cdot a^6 + 0,0673 \cdot a^5 - 1,5382 \cdot a^4 + 16,793 \cdot a^3 - 86,843 \cdot a^2 + 178,28 \cdot a - 17,35 [N] \quad (0.10)$$

Rovnice křivky (0.11) pro pilový kotouč s ozubením C:

$$F = -0,0024 \cdot a^6 + 0,151 \cdot a^5 - 3,589 \cdot a^4 + 40,054 \cdot a^3 - 209,98 \cdot a^2 + 437,86 \cdot a - 109,78 [N] \quad (0.11)$$

Rovnice křivky (0.12) pro pilový kotouč s ozubením B:

$$F = -0,0002 \cdot a^6 + 0,0281 \cdot a^5 - 0,9584 \cdot a^4 + 13,667 \cdot a^3 - 87,402 \cdot a^2 + 223,77 \cdot a - 60,883 [N] \quad (0.12)$$

Křivky v grafu na **obr. 5.25** jsou popsány rovnicemi (0.13) až (0.16).

Rovnice křivky (0.13) pro pilový kotouč s ozubením VARIO:

$$F = -0,0008 \cdot a^6 + 0,06 \cdot a^5 - 1,6225 \cdot a^4 + 19,799 \cdot a^3 - 109,23 \cdot a^2 + 228,23 \cdot a - 31,957 [N] \quad (0.13)$$

Rovnice křivky (0.14) pro pilový kotouč s ozubením BW:

$$F = -0,0006 \cdot a^6 + 0,0457 \cdot a^5 - 1,2558 \cdot a^4 + 15,326 \cdot a^3 - 83,642 \cdot a^2 + 167,82 \cdot a + 3,6736 [N] \quad (0.14)$$

Rovnice křivky (0.15) pro pilový kotouč s ozubením C:

$$F = -0,0016 \cdot a^6 + 0,135 \cdot a^5 - 3,7124 \cdot a^4 + 44,495 \cdot a^3 - 236,61 \cdot a^2 + 482,73 \cdot a - 125,86 [N] \quad (0.15)$$

Rovnice křivky (0.16) pro pilový kotouč s ozubením B:

$$F = -2 \cdot 10^{-5} \cdot a^6 + 0,0223 \cdot a^5 - 0,9233 \cdot a^4 + 13,553 \cdot a^3 - 81,153 \cdot a^2 + 165,03 \cdot a + 34,219 [N] \quad (0.16)$$