

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Samuel Šuga**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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:

Výběr optimální geometrie VBD pro danou technologii

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat výběrem optimální geometrie břitové destičky pro soustružení dlouhých poddajných obrobků s poměrem D/L 15 a více. U těchto dílců je obrábění problematické z pohledu vibrací a průhybu hřídele vlivem řezných sil, které jsou dané především geometrií nástroje. V rámci práce bude provedeno experimentální obrábění s analýzou silového zatížení a následně měření a vyhodnocení drsnosti povrchu pro výběr optimální geometrie břitu.

Cíle diplomové práce:

Návrh a provedení experimentálního měření.
Vyhodnocení a interpretace získaných dat.
Výběr optimálního nástroje.
Doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.

PÍŠKA, M. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku
2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Táto práca je zameraná na testovanie hrubovania rôznych geometrií negatívnych nástrojov typu D pri sústružení dlhých tenkých súčiastok so štíhlostným pomerom 15 a viac. Pre túto úlohu bolo vybraných 5 nástrojov. Dáta z rezného procesu boli zmerané pomocou dynamometra, akcelerometra a zvuk bol meraný pomocou mikrofónu. Výsledky sú vyhodnocované pomocou FFT analýzy ako grafické výstupy. Cieľom je vybrať najvhodnejší typ geometrie pre danú aplikáciu.

Kľúčové slová

sústruženie, akcelerometer, dynamometer, FFT, meranie hluku

ABSTRACT

This thesis is focused on testing the roughing of different geometries of negative D-type tools during turning long thin parts with a slenderness ratio of 15 or more. 5 tools were selected for this task. Data from the cutting process was measured using a dynamometer, accelerometer and microphone for sound recording. The results are evaluated using FFT analysis and other signal processing methods as graphical outputs. The aim is to select the most suitable type of geometry for this application.

Key words

turning, accelerometer, dynamometer, FFT, noise measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠUGA, Samuel. *Výběr optimální geometrie VBD pro danou technologii* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140036>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Zdeněk Fiala.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému Výber optimálnej geometrie VBD pre danú technológiu vypracoval samostatne s využitím uvedenej literatúry a podkladov na základe konzultácií a pod vedením vedúceho práce.

miesto, dátum

Samuel Šuga

POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Zdeňkovi Fialovi, Ph.D. za mnoho cenných rád, zapožičanie aparatury, nastavovanie systémov a korekciám, ktoré mi pomohli dotiahnuť do konca. Rád by som mu taktiež poďakoval za všetok čas strávený konzultáciami a rozsiahlou emailovou komunikáciou, ktorú sme medzi sebou viedli. Rád by som využil túto možnosť, a poďakoval firme IMI CCI v Brne menovite Romanovi Gaňovi za poskytnutie témy a materiálu pre experimentálne obrábanie. Taktiež by som rád poďakoval svojim kolegom, najmä Karlovi Spružinovi za cenné rady, pomoc s technológiou, výber materiálu a tým aj všetok čas strávený touto pomocou. Za podporu by som rád vyjadril vďaku všetkým členom svojej rodiny. Taktiež by som veľmi rád poďakoval firmám Sandvik Coromant a Kennametal za poskytnutie rezných nástrojov na vykonanie experimentu, menovite Pánovi Ing. Petru Vrbkovi.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Návrh experimentálneho obrábania	10
1.1 Meranie rezných síl	10
1.2 Meranie vibrácií	10
1.3 Zhodnotenie kvality obrobku	10
2 Sústruženie a rezné nástroje	11
2.1 Sústruženie	11
2.2 Výpočtové vzťahy súvisiace s procesom sústruženia	11
2.3 Rezné sily pri sústružení	13
2.4 Problematika sústruženia	14
2.5 Vymeniteľné rezné nástroje	17
2.5.1 Tvar rezných nástrojov	17
2.5.2 Polomer špičky nástroja	18
2.5.3 Nastavenie uhlu nástroja	19
2.5.4 Tvary niektorých otváračov triesky	19
3 Kmitanie a spracovávanie signálov	21
3.1 Teória kmitavého pohybu	21
3.2 Chvenie pri obrábaní	21
3.3 Mechanické kmitanie sústavy pri obrábaní	21
3.3.1 Voľné kmitanie	22
3.3.2 Vynútené kmitanie	23
3.3.3 Samobudené kmitanie	23
3.4 Regeneratívne kmitanie	25
3.5 Utlmené chvenie	26
3.6 Princíp polohovej väzby	26
3.7 Spracovanie signálov obrábacieho procesu	27
3.7.1 Vzorkovanie signálu	27
3.7.2 Harmonický signál	28
3.8 Fourierova transformácia	29
3.8.1 Diskrétna Fourierova transformácia	30
3.8.2 Rýchla Fourierova transformácia FFT	31
3.9 Nástroje pre experimentálnu analýzu kmitania vplyvom obrábacích procesov	31
3.10 Dynamometre	32
3.11 Analyzátor vibrácií	34
3.11.1 Akcelerometer	34
3.11.2 Photon+	35
3.11.3 RT Pro Photon	36
4 Experiment a spracovanie výsledkov	37
4.1 Návrh experimentu obrábania	37
4.2 Použitá aparatúra pre experimentálne obrábanie	38
4.2.1 Nástroje pre obrábanie	38
4.2.2 Sústruh SV 18	40

4.2.3	Meranie drsnosti povrchu	40
4.3	Výsledky merania rezných síl	41
4.3.1	Meranie rezných síl na priemere 39 milimetrov	41
4.3.2	Meranie rezných síl na priemere 27 milimetrov	43
4.3.3	Meranie rezných síl na priemere 24 milimetrov	46
4.3.4	Meranie rezných síl na priemere 21 milimetrov	48
4.4	Výsledky merania vibrácií.....	50
4.4.1	Meranie vibrácií na priemere 39 milimetrov	50
4.4.2	Meranie vibrácií na priemere 24 milimetrov	52
4.4.3	Meranie vibrácií na priemere 21 milimetrov	54
4.4.4	RMS vibrácií na priemere 39 mm	56
4.4.5	RMS vibrácií na priemere 24 mm	57
4.4.6	RMS vibrácií na priemere 21 mm	58
4.5	Meranie zvukovej emisie.....	58
4.5.1	Spracovanie zvukovej emisie pri priemere 39 mm	58
4.5.2	Spracovanie zvukovej emisie pri priemere 24 mm	59
4.5.3	Spracovanie zvukovej emisie pri priemere 21 mm	60
4.5.4	Drsnosť povrchu	60
4.6	Porovnanie výsledkov	62
4.6.1	Opatrebenie a triesky	64
4.7	Diskusia	67
5	Záver.....	69
	Zoznam zdrojov.....	70

ÚVOD

Obrábání tenkých díelov je z mnohých důvodů náročnou strojárskou disciplínou. Hlavním důvodem náročnosti obrábání tenkých a dlhých výrobkov je vznik vibrácií. Firma IMI CCI so sídlom v Brne sa často stretáva s úlohou výroby súčiastok, ktoré majú veľký štíhlostný pomer. Táto Diplomová práca bude rozoberať výrobu súčiastky so štíhlostným pomerom priemeru ku dĺžke až 20. Inak povedané dĺžka obrábanej časti súčiastky bude 20-násobok hotového priemeru. Práca bude zameraná na výber vhodnej vymeniteľnej reznej doštičky pre túto aplikáciu za veľmi podobných podmienok. Vzhľadom na doterajšie skúsenosti a simuláciu výroby ako vo firme je vybraná rezná doštička tvaru D. Musí zvládnuť ako hrubovacie operácie, tak aj dokončenie súčiastky na jedno upnutie. Výstupom tejto práce by mala byť jasná predstava konkrétneho nástroja, ktorý je pre danú technológiu najmä hrubovania najvhodnejší.

1 NÁVRH EXPERIMENTÁLNEHO OBRÁBANIA

Cieľom práce je komparácia rôznych výmenných rezných doštičiek (VRD) pri posudzovaní použiteľnosti na trieskové obrábanie dlhých tenkých dielov metódou sústruženia. V prvej časti obrábania sa bude sledovať rozloženie rezných síl najmä za použitia doštičiek typu D s negatívnou geometriou. To znamená, že rezný nástroj bude mať lichobežníkový tvar s ostrým uhlom 55 stupňov. Vzhľadom na obmedzené množstvo polotovarov budú v experimente zastúpení dvaja výrobcovia nástrojov a to Kennametal a Sandvik Coromant. Materiál zvolený na obrábanie je nastavený tak aby zodpovedal firemným požiadavkám. Jedná sa o žiarupevnú martenzitickú oceľ X19CrMoNbVN11-1. Sústružený diel bude mať 400 mm a bude vyrábaný z polotovaru s priemerom 45 mm. Obrábaná časť bude 360 mm. Pri výslednom obrábaní a znižovaní obrábaného priemeru sa budú upravovať rezné podmienky v závislosti na hrúbke, kmitaní, trieske a zvuku pri obrábaní. Práca nadväzuje na technológiu využívanú vo firme. Preto sa približné posuvy a obder materiálu budú snažiť nasimulovať bežnú pracovnú prevádzku. Vzhľadom na stroj využitý pri realizácii experimentu však presná simulácia nebude realizovateľná. Pri klesajúcom priemere obrábaného dielu sa bude množstvo odobratého materiálu znižovať tak aby nedochádzalo k nežiadúcim účinkom obrábania. Technológie použité pri obrábaní sú nastavené tak, aby čo najlepšie zodpovedali prieniku použitých rezných nástrojov. Zmeny budú najmarkantnejšie pri reznej rýchlosti.

1.1 Meranie rezných síl

Prvá fáza obrábania sa bude konať na sústruhu TOS SU 18 vyrobenom v Trenčíne na Vysokom Učení Technickom v Brne. Z dôvodu maximálnych otáčok stroja a upnutia dynamometra pri analyzovaní rezných síl sa bude priemer obrobku v závislosti na nástroji znižovať na priemer približne 28-30 mm. Pre vyhodnocovanie rezných síl použijeme dynamometer Kistler typu 9257B SN 1017500. Obrábaný diel bude upnutý v skľučovadle a podoprený koníkom. Z dôvodu upnutia dynamometru na sústruh bude nožový suport premiestnený na opačnej strane a na stroji budú nastavené reverzné otáčky. Po ukončení obrábania bude nasledovať čiastočná úprava výsledkov v programe Dynoware, ich export a následné vytvorenie grafických výstupov v programe MS Excel.

1.2 Meranie vibrácií

Počas merania rezných síl bude zároveň na stroji umiestnený akcelerometer DeltaTron od firmy Bruel Kjaer typu 4525-B. Vďaka nemu sa budú zaznamenávať signály v najkritickejších miestach obrábania. Pôjde o prvý kontakt pri naďení nástroja do obrábaného materiálu a druhé meranie bude začínať vo vzdialenosti 180-200 mm, kedy bude nástroj najviac odtláčaný od obrobku a môže dochádzať k chveniu a vibráciám. Do štvorstupového analyzátora tejto firme je pri meraní pripojený aj mikrofón, ktorý bude zaznamenávať zvukovú emisiu. Chvenie pri obrábaní je často spojené s výrazným zvukom. Namerané signály sa budú vyhodnocovať v programe RT Pro Photon. Výstup z tohto programu bude vyexportovaný do MS Excel, kde sa vytvoria grafické výstupy a porovnanie jednotlivých obrábaní.

1.3 Zhodnotenie kvality obrobku

V poslednej časti sa vyhodnotí najvhodnejší nástroj a typ geometrie pre túto aplikáciu. Podľa možnosti povrchu sa zhodnotí jeho drsnosť Drsnomerom, alebo len empiricky ak výsledný povrch nebude možné zmerať. K nezmeraným dielom bude doplnená fotografická dokumentácia výsledkov.

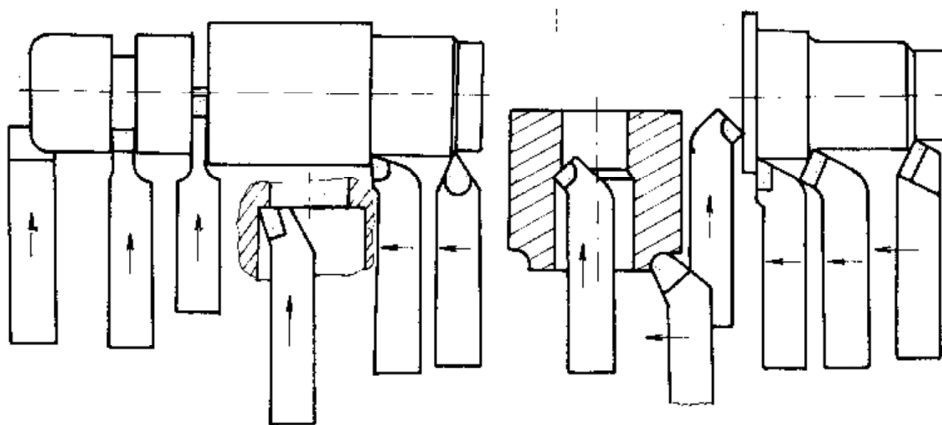
2 SÚSTRUŽENIE A REZNÉ NÁSTROJE

Táto kapitola je zameraná na technológiu sústruženia. Pojednáva o technológií vo všeobecnosti a zároveň prihliada na problematiku obrábania tenkých dielcov. Rovnako tak bude popisovať vhodnosť konkrétnych rezných nástrojov pre tieto aplikácie a čiastočne tak aj geometrie nástrojov vhodné pre aplikáciu v diplomovej práci.

2.1 Sústruženie

Sústruženie je najbežnejšou strojárskou operáciou pre vytvorenie rotačných súčastí. Z hľadiska technologického je možné považovať túto operáciu ako základný spôsob trieskového obrábania. Zároveň tvorí najväčší percentuálny podiel strojového obrábania. Princípom tejto technológie je najčastejšie vodorovne upnutý polotovar rotujúci okolo svojej osi upnutý v skľučovadle medzi hrotmi, prípadne podopretý koníkom a jednoklinný nástroj, ktorý sa pohybuje rovnobežne s osou polotovaru. [1]

Hlavný otáčavý pohyb vykonáva polotovar spolu s vretenom sústruhu a vedľajší pohyb posuvu vykonáva nástroj. Otáčavý pohyb vretena definuje reznú rýchlosť v_c [m/min] a vedľajší pohyb určuje rýchlosť posuvu f_n [mm]. Prísuvom nástroje smerom kolmým k obrobku nastavujeme hĺbku odoberaného materiálu a_p [mm]. [2] Sústružením je možné vytvárať všeobecné tvary, sústružiť kužele a guľové plochy, vyvrtávať otvory a inak povedané má táto technológia mnoho praktických aplikácií pre strojársky priemysel (Obr.1).



Obr.1 Typy sústružníckych aplikácií [3]

2.2 Výpočtové vzťahy súvisiace s procesom sústruženia

Základom pri sústružení je rezná rýchlosť. Tú môžeme vyjadriť pomocou vzťahu [2]:

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

kde: v_c - Rezná rýchlosť [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 D - Priemer obrobku [mm],
 n - Otáčky obrobku [min^{-1}].

Rýchlosť posuvu má vzťah :

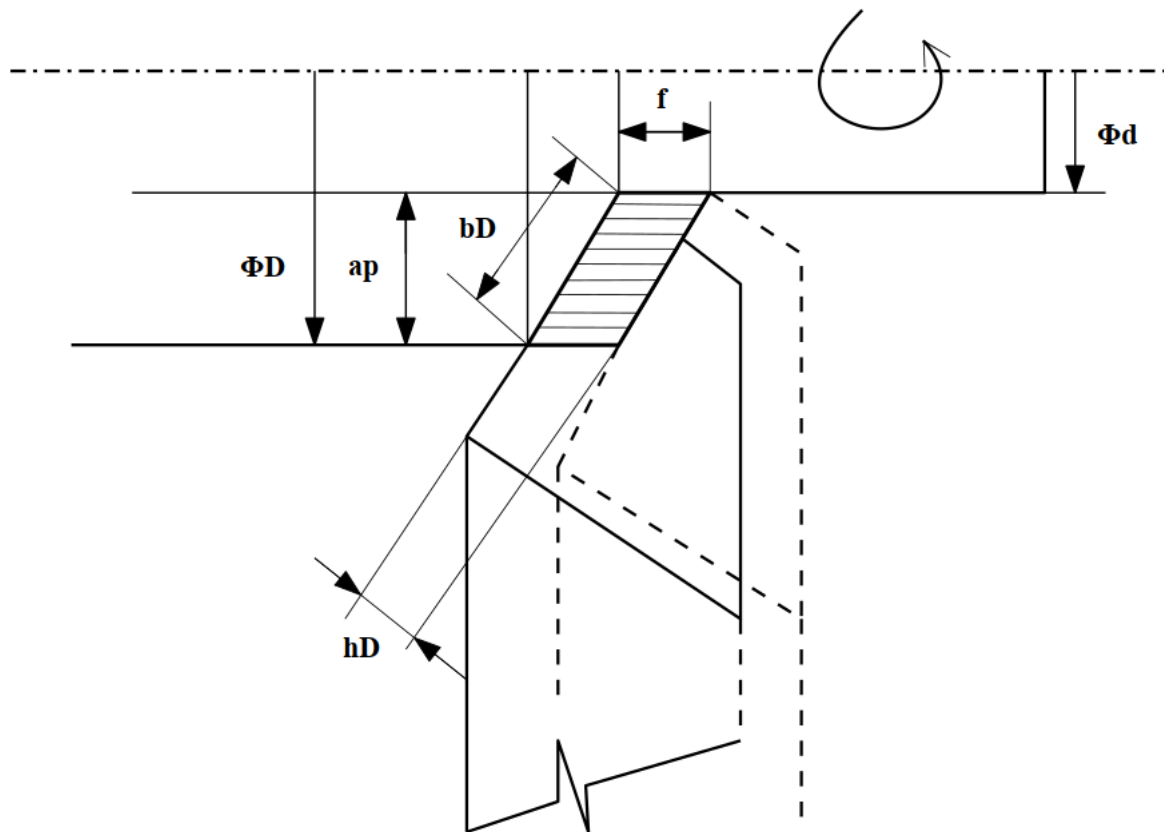
$$v_f = f \cdot n, \quad (2.2)$$

kde: f - Posuv [mm],
 n - Otáčky obrobku [min^{-1}].

Rýchlosť rezného pohybu je definovaná ako :

$$v_{c1} = 10^{-3} \cdot \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + f^2}, \quad (2.3)$$

kde: f - Posuv [mm],
 D - Priemer obrobku [mm],



Obr. 2 Veľkosť triesky pri pozdĺžnom sústružení.

Veľkosti triesky (Obr. 2) je možné vypočítať pomocou nasledujúcich vzťahov. Pre pozdĺžne sústruženie [2]:

$$a_p = 0,5(D - d), \quad (2.4)$$

kde: D - Priemer pred obrobením [mm],
 d - Priemer po obrobení [mm].

Menovitá šírka triesky je definovaná vzťahom :

$$b_d = \frac{a_p}{\sin \chi_r}, \quad (2.5)$$

kde: χ_r - Nastavenie hlavného nástrojového uhla reznej časti [°],
 a_p - Hĺbka odberu materiálu [mm].

Menovitá hrúbka triesky je definovaná vzťahom :

$$h_d = \sin \chi_r \times f, \quad (2.6)$$

kde: χ_r - Nastavenie hlavného nástrojového uhla reznej časti [°],
 f - posuv [mm].

Menovitý prierez triesky sa stanoví ako násobok menovitej hrúbky triesky a menovitej šírky triesky, teda aj ako násobok posuvu a odberu materiálu:

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f, \quad (2.7)$$

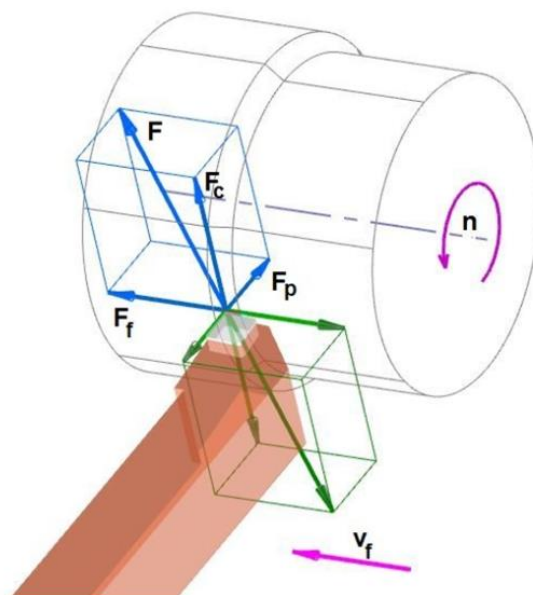
kde: b_D - Menovitá šírka triesky [mm],
 h_D - Menovitá hrúbka triesky [mm].

2.3 Rezné sily pri sústružení

Celková rezná sila F sa skladá z 3 zložiek. Sú to zložky ležiace v 3 smeroch súradníc rovín obrábania. Je to sila od posuvu nástroja F_f , rezná sila F_c a pasívna sila F_p . Sú definované podľa vzťahov (Obr. 3) [2]:

$$\begin{aligned} F_c &= C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \\ F_f &= C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \\ F_p &= C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

kde: $C_{F_p}, C_{F_f}, C_{F_c}$ - Koefficienty sú bezrozmerné materiálové konštanty,
 $x_{F_p}, x_{F_f}, x_{F_c}$ - sú exponenty vplyvu a_p [-],
 $y_{F_p}, y_{F_f}, y_{F_c}$ - sú exponenty vplyvu f [-],
 a_p - je šírka záberu noža v materiály [mm],
 f - rýchlosť posuvu [mm],



Obr. 3 Grafické znázornenie rezných síl [4].

Výslednú silu obrábacieho procesu je možné vypočítať ako kvadrát jej zložiek podľa vzťahu :

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2}, \quad (2.9)$$

kde: F_c - Rezná sila [N],
 F_p - Pasívna sila [N].
 F_f - Posunová sila [N].

Mernú reznú silu k_c je možné vypočítať ako reznú silu pôsobiacu na jednotku plochy rezu. Plocha je v tomto prípade definovaná ako prierez trieskou A_D a je v pomere s reznou silou F_c .

$$k_c = \frac{F_c}{A_D}, \quad (2.10)$$

kde: F_c - Rezná sila [N],
 A_D - Menovitá prierez triesky [mm^2].

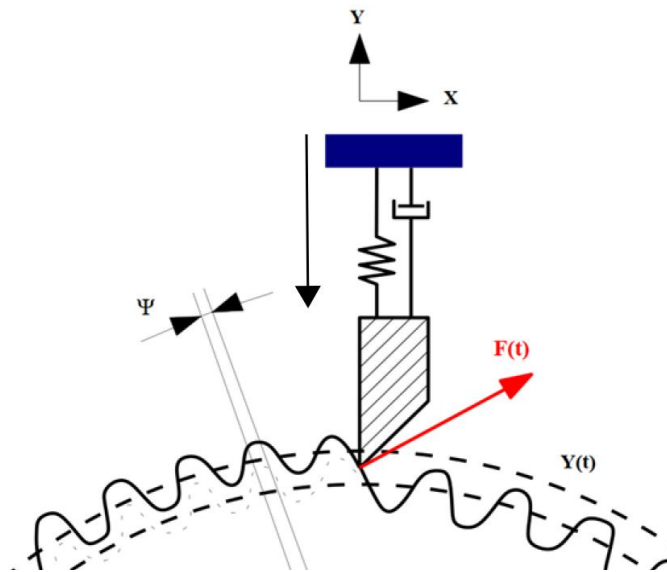
Celkový rezný výkon potrebný pre pokrytie rezného výkonu a pasívnych odporov stroja je definovaná vzťahom :

$$P_m = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4 \cdot \eta}, \quad (2.11)$$

kde: F_c - Rezná sila [N],
 v_c - Rezná rýchlosť [m/min].
 η - Mechanická účinnosť obrábacieho stroja [-].

2.4 Problematika sústruženia

Pri veľkej miere optimalizácie a štíhlej výrobe, ako aj pri rôznych špecifických aplikáciách je nutné obrábať čím ďalej tým viac komplikovanejšie a náročnejšie súčiastky. Často sa stane, že pri obrábaní dochádza k chveniu a hluku spôsobenému z prvotného kontaktu nástroja s materiálom alebo stretom s nehomogenitou v materiáli. V prípade týchto nežiadúcich účinkov sa na povrchu objavujú vlny. Ich prítomnosť je spôsobená kmitavým pohybom nástroja a obrobku kolmo k obrábanému povrchu. Za okamih sa dostáva do kontaktu nástroj s vlnami z predchádzajúcich otáčok a pôvodne statická rezná sila sa mení na silu periodicky premenlivú. Je bežné, že amplitúda kmitov narastá a zvyčajne sa ustáli na nejakej vysokej hodnote. Pokiaľ nedôjde k zmene rezných podmienok, je chvenie udržiavané samotným rezným procesom, kedy sa periodická sila udržiava vďaka rezu vln z povrchu obrábaného dielu (Obr. 4) [5].

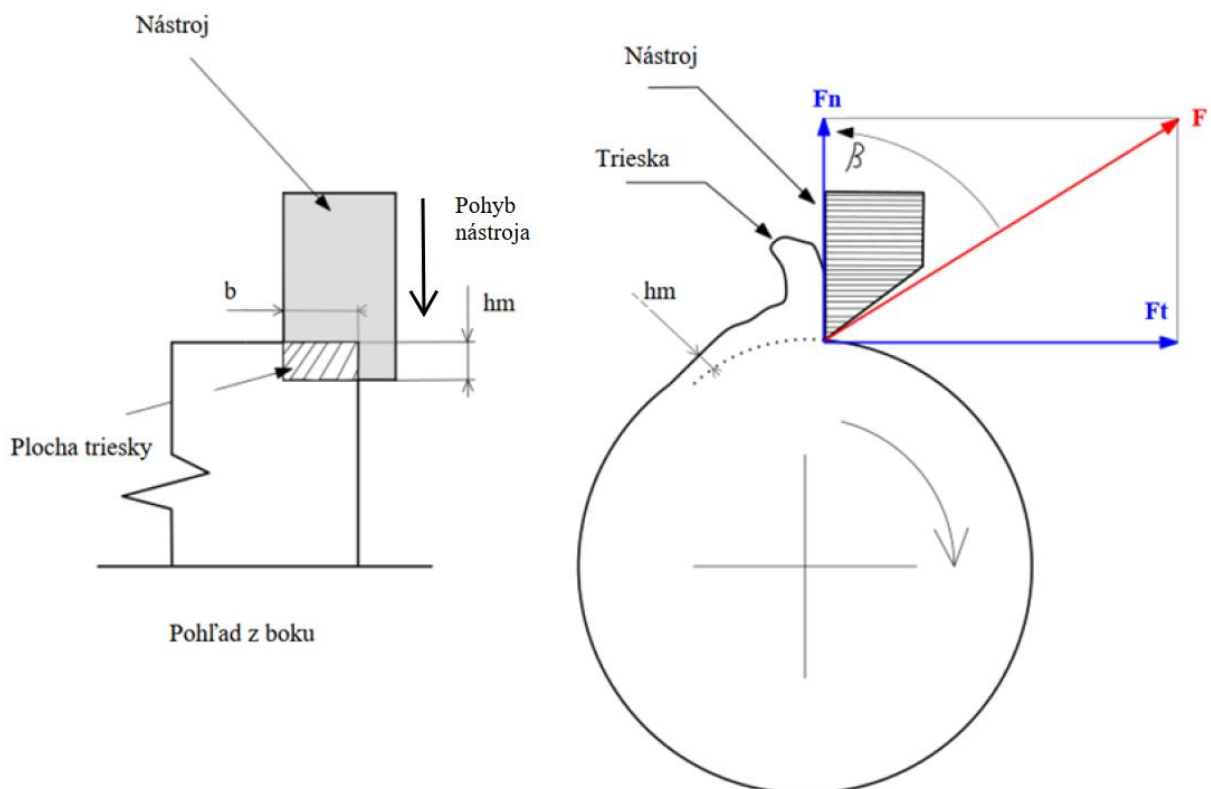


Obr. 4 Vznik vln při sůstružení.

Pre lepšiu predstavu situácie počas obrábania obrázky zobrazuje rezanie, kedy sú len normálové a tangenciálne zložky reznej sily. Zobrazuje hrúbku triesky a uhol medzi F a F_n . Bočný pohľad zobrazuje šírku triesky. Hrúbka a šírka triesky definujú odobratý materiál ako (Obr. 5) :

$$A = b * h_m, \quad (2.12)$$

kde: b - Hrúbka triesky [mm],
 h_m - Šírka triesky [mm].



Obr. 5 Rezná síla a hrúbka triesky při sůstružení.

Hodnota reznej sily je približne rovná plochy triesky a empiricky odvodeného koeficientu. Koeficient je závislý na materiáli obrobku, geometrií nástroj a čiastočne na rezných podmienkach (Obr. 6) :

$$F = K_s * A = K_s * b * h_m, \quad (2.10)$$

kde: A - Hrúbka triesky [mm],
 K_s - Šírka triesky [mm].

Hodnota reznej sily je približne rovná plochy triesky a empiricky odvodeného koeficientu. Koeficient je závislý na materiáli obrobku, geometrií nástroja a čiastočne na rezných podmienkach. Jednotlivé zložky reznej sily je možné vypočítať zo vzťahov :

$$F_n = \cos(\beta) * F = \cos(\beta) * K_s * b * h_m = k_n * b * h_m, \quad (2.11)$$

$$F_t = \sin(\beta) * F = \sin(\beta) * K_s * b * h_m = k_t * b * h_m, \quad (2.12)$$

kde: K_s - Odobratý materiál [mm²],
 b - Hrúbka triesky [mm],
 h_m - Šírka triesky [mm].

Pri využívaní dynamometru v tejto diplomovej práci môžeme merané zložky využiť práve k stanoveniu koeficientov po úprave rovníc (Obr. 6) :

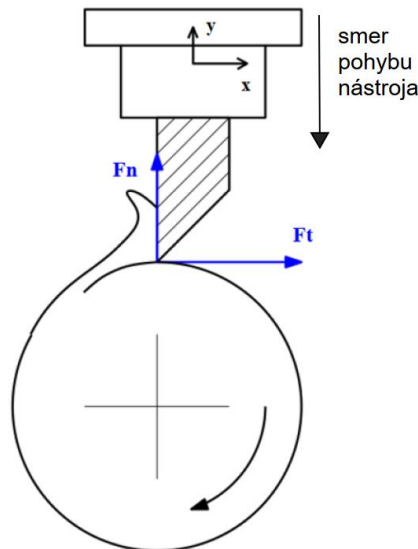
$$k_n = \frac{F_n}{b * h_m}, \quad (2.13)$$

kde: F_n - Normálová zložka reznej sily [N],
 b - Hrúbka triesky [mm],
 h_m - Šírka triesky [mm].

A

$$k_t = \frac{F_t}{b * h_m}, \quad (2.14)$$

kde: F_t - Dotyčnicová zložka reznej sily [N],
 b - Hrúbka triesky [mm],
 h_m - Šírka triesky [mm].



Obr. 6 Tvorba triesky pri sústružení.

2.5 Vymeniteľné rezné nástroje

V súčasnosti sa postupne upúšťa od pôvodných monolitných sústružníckych nožov z rýchlo-rezných ocelí, ktoré boli v minulosti veľmi rozšírené. Je úplne bežné, že množstvo firiem v priemysle tento typ nástroja už nevlastní. Využívajú najmä vymeniteľné rezné doštičky (VRD). Najčastejším materiálom pre výrobu týchto nástrojov je široké spektrum spekaných karbidov volfrámu, titanu a iných prvkov. Pre náročnejšie technické operácie sú využívané rôzne typy keramiky, kubický nitríd bóru alebo syntetický diamant. Táto diplomová práca je zameraná na špecifický druh VRD tvorený karbidmi.

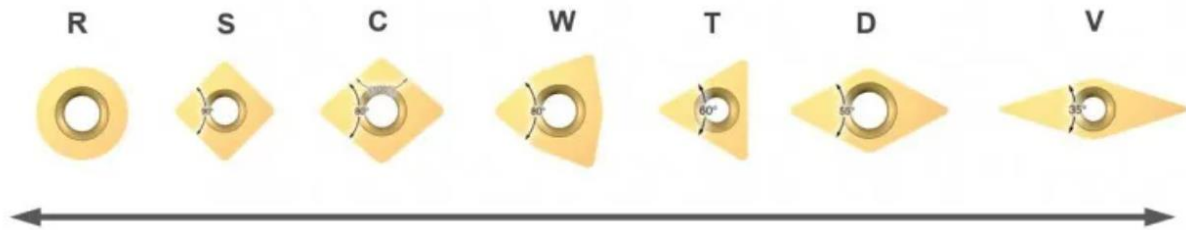
2.5.1 Tvar rezných nástrojov

Rezné doštičky sa vyrábajú v množstve variácií tvarov a geometrií. Tvar a geometriu je potrebné vyberať na základe plánovaného obrábacieho procesu. Existuje niekoľko základných tvarových typov rezných doštičiek označenými charakteristickými písmenami pre ich tvar a uhlové nastavenie (Obr. 8). Zároveň sa tieto nástroje môžu označovať rôzne v závislosti na zmene niektorých parametrov a tvarových prvkov. Každý výrobca však ponúka iné množstvo nástrojov, ktoré charakterizujú v katalógu.

Tvar destičky / Tvar doštičky			
H	O	P	R
S	T	C	D
E	M	V	W
L	A	B	K

Obr. 7 Tvary sústružníckych rezných nástrojov [6].

V nadväznosti na tvar doštičky, sa určuje aplikácia, na ktorú je konkrétna VRD určená (Obr.9). Môže ísť ako o hrubovanie alebo dokončovanie, tak aj o požadované ovplyvnenie reznej sily na obrábací proces.



Obr. 8 Charakteristika aplikácií VRD [7].

Pevnosť nástroja: (Veľký uhol špičky)

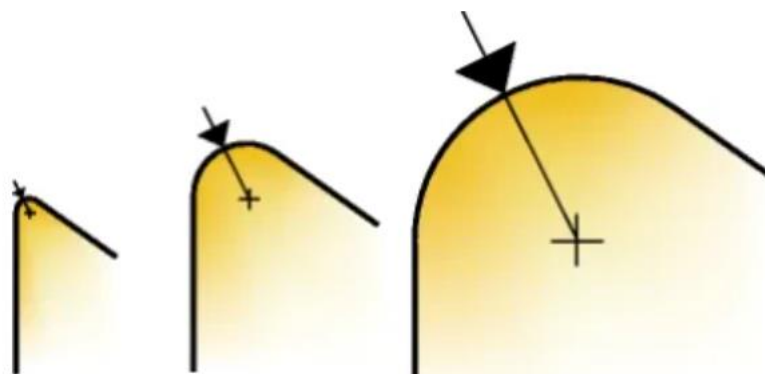
- Možnosť vyššej rýchlosti posuvu
- Vyššia odolnosť nástroja na tlakové zaťaženie
- Vyššia rezná sila
- Väčšie sklony k vibráciám
- Väčšia odolnosť proti plastickej deformácií [7]

Menší sklon k vibráciám: (malý uhol špičky)

- Lepší prístup do miesta rezu
- Menšie vibrácie
- Menšie rezné sily Menej odolný a pevný nástro

2.5.2 Polomer špičky nástroja

Dôležitým faktorom pri voľbe rezného nástroja je polomer špičky r_ϵ . Polomer sa volí podľa nárokov na odber materiálu, posuv, kvalitu obrábaného povrchu, delenie triesky a pevnosť samotného nástroja. Polomer špičky má podobný vplyv na oblasť primárnej plastickej deformácie ako uhol rezu. Hlavným dôvodom je skutočnosť, že so zväčšovaním polomeru špičky rastie aj stredná hodnota uhlu rezu. Ak sa znižuje polomer, znižuje sa teda aj oblasť primárnej plastickej deformácie, súčiniteľ pechovania aj merný rezný odpor [8]. Pri hrubovacích operáciách s veľkými nárokmi na pevnosť sa polomer špičky volí čo najväčší. Naopak pri malých polomeroch špičky nástroja sa zlepšuje schopnosť jemne obrábať (Obr. 10) [9], [10].



Obr. 9 Polomer špičky nástroja [10].

Malý polomer špičky

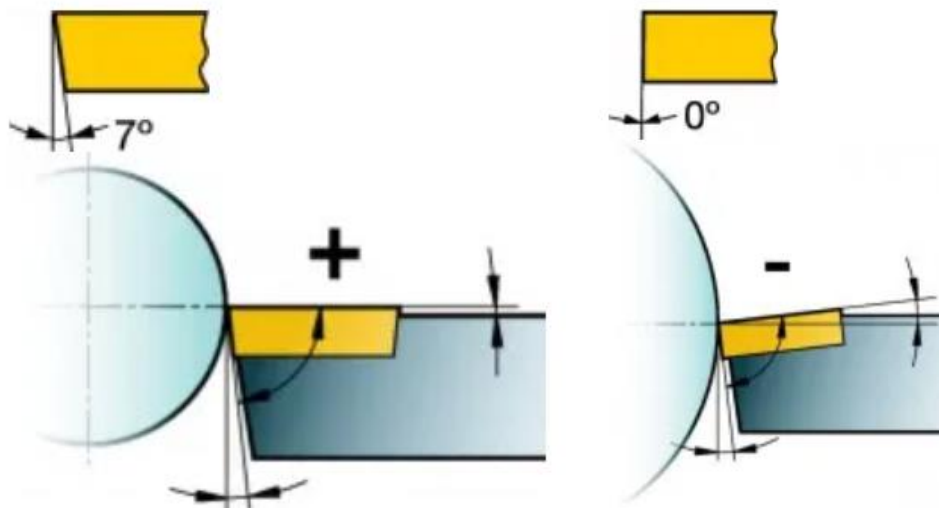
- Ideálny pre menšie hĺbky rezu
- Obmedzuje sa náchylnosť na vibrácie
- Menšia pevnosť nástroja
- Lepšie delenie triesky

Veľký polomer špičky

- Vysoké rýchlosti posuvu
- Väčšie hĺbky rezu
- Pevnejší a odolnejší
- Vyššie radiálne rezné sily

2.5.3 Nastavenie uhlu nástroja

Existujú dva základné typy nastavenia nástroja. Negatívna doštička má uhol ostria 90 stupňov a uhol chrčba 0 stupňov, zatiaľ čo pozitívne nastavenie VRD má uhol menší ako 90 stupňov a nulový kladný uhol chrčba. Pozitívne nastavená doštička vytvára nižšiu reznú silu a využíva sa pri sústružení vnútorných priemerov a vonkajších plôch na vnútorných súčiastkach. Negatívna VRD je obojstranná, má vysokú pevnosť ostria, nulový uhol chrčba a využíva sa najmä na sústruženie vonkajších plôch. Je nadimenzovaná na ťažšie rezné podmienky ako pozitívne nastavená rezná doštička (Obr. 11)(Obr. 12) [10].

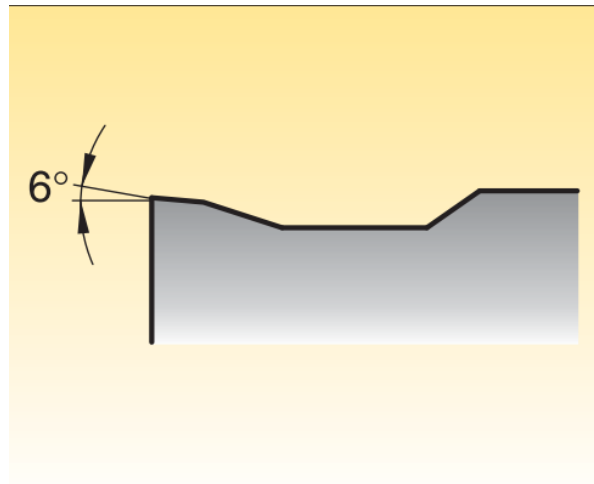


Obr. 11 Nástroj s pozitívnym nastavením [10]. Obr. 12 Nástroj s negatívnym nastavením [10].

2.5.4 Tvary niektorých otváračov triesky

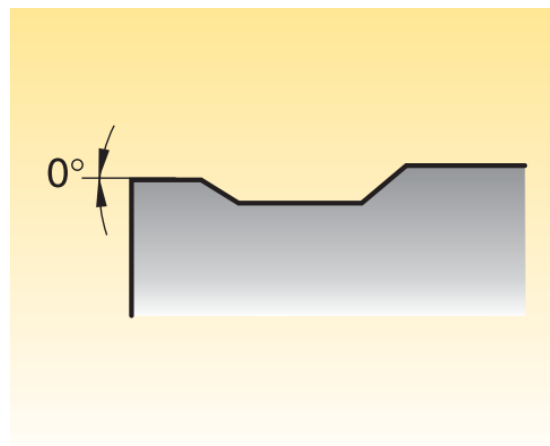
Nástroje využité v tejto práci budú mať primárni 3 hlavné typy otváračov. Bude sa jednať najmä o polohrubovacie a čiastočne dokončovacie utváratele triesky. Geometria uhla utvárateľa bude zobrazená na obrázku. Bude sa jednať o geometrie typu PM, FF, MN. Tieto geometrie sú definované z katalógu od firmy Kennametal. Môže sa stať, že rozdielny výrobcovia budú mať medzi sebou nejaké rozdiely. Ku konkrétnym typom utvárateľov triesky a ich geometrií sa z verejných zdrojov pravdepodobne nedá dostať. Preto je táto podkapitola krátka a len chce opísať tvar VBD pre pochopenie toku triesky po jej povrchu.

Geometria špičky nástroja typu PM má uhol 6 stupňov pre vnikanie materiálu (Obr. 13).



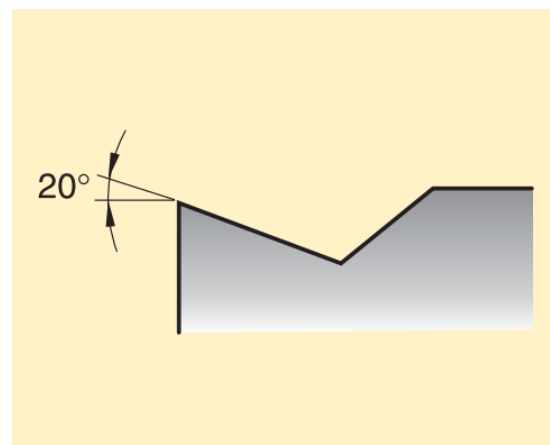
Obr. 13 Geometria typu PM [11].

Geometria špičky nástroja typu PM má uhol 0 stupňov pre vnikanie materiálu (Obr. 14).



Obr. 14 Geometria typu MN [11].

Geometria špičky nástroja typu FF má ostrý uhol 20 stupňov pre vnikanie materiálu a mohol by byť veľmi efektívny pre konkrétnu aplikáciu (Obr. 15).



Obr. 15 Geometria typu FF [11].

3 KMITANIE A SPRACOVÁVANIE SIGNÁLOV

3.1 Teória kmitavého pohybu

O kmitoch, kmitaní, oscilácií alebo vlnení hovoríme, keď nejaká fyzikálna veličina v čase nadobúda opakovane striedavých hodnôt pričom tieto hodnoty nikdy neprekročia hranicu určitého intervalu, v ktorom sa pohybuje. Pri mechanickom kmitaní ide o fyzikálny jav, kedy hmotný bod alebo iné tuhé teleso nadobúda v čase rôzne polohy v priestore tak, že sa pohybuje v určitej vzdialenosti v intervale, ktorý neprekročí okolo svojej strednej polohy. Táto poloha sa nazýva rovnovážna poloha. Počas nadobúdania rôznych polôh v danom intervale sa postupne vracia do niektorej z predchádzajúcich polôh. Mechanické kmitanie je kinematickou veličinou, ktorá je opísateľná svojou výchylkou (dráha, vzdialenosť) a časom. Pri vyšetrowaní časového priebehu mechanického kmitania určitého telesa je nutné zistiť jeho kinematické pomery. Pri určovaní príčin kmitania je nutné vyšetriť rovnicu rovnováhy síl a momentov pôsobiacich na zostavu. Polohu tuhého telesa alebo hmotného bodu v priestore určuje jeho polohový vektor, vďaka ktorému je možné počítať mechanické kmitanie tohto telesa [12].

3.2 Chvenie pri obrábaní

Počas obrábacieho procesu aj pokiaľ nedochádza k pozorovateľnému chveniu, pôsobí kolísavá premenlivá rezná sila. Okamžitá veľkosť sily F sa pohybuje okolo strednej hodnoty reznej sily v rozmedzí ΔF . Toto kolísanie je spôsobené zložitými záberovými pomermi pri obrábaní ale hlavne nesvojrodosťou obrábaného materiálu. Pri kolísaní tejto sily neustále dochádza k vytváraniu silových impulzov, čo vedie k vzniku tlmených kmitov. Tento priebeh obrábania sa však môže za určitých podmienok narušiť periodicky vyvolávanou budiacou silou. Podľa charakteru tejto sily sa potom uvažuje, či ide o kmity samobudené alebo vynútené [8].

3.3 Mechanické kmitanie sústavy pri obrábaní

Pri reznom procese je úplne bežným sprievodným javom mechanické kmitanie. Pri mechanickom kmitaní je kmitajúcou veličinou vždy nejaká mechanická veličina. Ide o fyzikálny jav, kedy sa hmotný bod alebo tuhé teleso nachádza v priestore v určitom intervale vzdialenosti a neprekročí túto vzdialenosť v závislosti na jeho rovnovážnej polohe. Vracia sa teda z jeho maximálnych hodnôt (amplitúd) späť do polohy rovnovážnej. Pri mechanickom kmitaní sa v čase hodnoty určujúce kmitanie menia. Preto hovoríme, že mechanické kmitanie je dynamickým dejom. Tento jav je možné sledovať na takmer všetkých obrábacích strojoch. Je to zložitý, ťažko opísateľný jav, pretože obrábací stroj je komplikovaná sústava pružných a pevných telies. Tieto kmitania sa budú v tejto práci vzťahovať vždy na sústavu stroj, nástroj a obrobok (S-N-O). Kmitanie, ktoré v tejto sústave vzniká, môže byť tak malé, že nemá takmer žiaden nepriaznivý účinok na obrábací proces. Často sa v strojárskych praxi stretávame s prípadmi, kedy je kmitanie sústavy veľmi intenzívne a môže nepriaznivo vplyvať na hotový výrobok v rôznych oblastiach. Kmitanie jednotlivých obrábacích prvkov v systéme zhoršuje kvalitu výslednej požadovanej plochy. Povrch má charakteristickú vlnitosť, čo vo výsledku zhoršuje presnosť geometrického tvaru a drsnosť povrchu. Vznikajú rôzne vlnitosti ale najmä sa zhoršuje drsnosť povrchu. Ďalším nepriaznivým javom kmitania je zvyšujúce sa opotrebenie nástroja. Nástroje z HSS sa rýchlo otupujú a VBD pri obrábaní sa často lámu. Pri častom kmitaní systému zároveň dochádza k rýchlejšiemu opotrebeniu jednotlivých častí obrábacieho stroja. Pri intenzívnom charakteristickom zvuku obrábania s mechanickým kmitaním tak zvuk spôsobí celkové zhoršenie pracovného prostredia. Na základe vonkajšieho silového pôsobenia môžeme kmitanie rozdeliť na vlastné, vynútené a samobudené kmitanie podľa existencie vonkajšej

budiacej sily. Podľa prítomnosti tlmičov v systéme ďalej môžeme deliť kmitanie na tlmené alebo netlmené [13] [14].

3.3.1 Voľné kmitanie

Jedným zo základných typov kmitania sú vlastné kmity. V systéme nástroj stroj a obrobnok sú vyvolané nárazom. Znamená to, že ide o voľné kmity, ktoré sú vyvolené jednorázovou direktívnou silou. Voľné kmity sa udržuujú pôsobením pružných síl. Vplyvom odporu sa sami utlmia, a preto je vo veľkom množstve prípadov ich vplyv na obrábací proces zanedbateľný. Periódy a frekvencia pritom nezávisia na počiatocnej rýchlosti kmitajúcej častice, ani na počiatocnej výchylke. Zaoberanie sa týmito druhov kmitania má v technickej praxi význam len v súvislosti s určovaním charakteru procesov kmitania. Nepriaznivý vplyv na obrábací proces majú hlavne vynútené a samobudené kmity [15] [16] [2] [17].

Pohybová rovnica voľného tlmeného kmitania S-N-O pri uvažovaní jedného stupňa voľnosti je riešením rovnice :

$$m\ddot{u} + b\dot{u} + ku = 0, \quad (3.1)$$

kde: m - Hmotnosť [kg],
 b - Koeficient tlmenia [kg/s],
 k - Tuhosť pružiny [N/m].

Pri uvažovaní tlmenia tejto sústavy úmernému funkcie rýchlosti $\dot{u}(t)$ s konštantnou umernou b je tak možné rovnicu upraviť na tvar :

$$\ddot{u} + 2b_p\Omega\dot{u} + \Omega^2 u = 0, \quad (3.2)$$

kde: b_p - $\frac{b}{b_k}$ je pomerný útlm
 b_k - $2\sqrt{km} = 2m\Omega$ súčiniteľ aperiodického, respektíve kritického tlmenia
 Ω - vlastná frekvencia netlmenej sústavy

Pre netlmené kmitanie voľnej sústavy platí vzťah :

$$u(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (3.3)$$

Integračné konštanty C_1 a C_2 sa určujú z počiatocných podmienok $u(0)$ a $\dot{u}(1)$ prípadne z iných podmienok v závislosti $u(t)$, z frekvenčnej charakteristickej rovnice :

$$\lambda^2 + 2b_p\Omega\lambda + \Omega^2 = 0, \quad (3.4)$$

Je možné vypočítať korene λ_1 a λ_2 .

Zo vzťahu pre uhlovú frekvenciu tlmenej sústavy Ωt plyní :

$$\left(\frac{\Omega t}{\Omega}\right)^2 + b_p^2 = 1, \quad (3.4)$$

Túto závislosť je možné pre $b_p \leq 1$ zobraziť v súradnicovom systéme $\frac{\Omega t}{\Omega}$, b_p ako štvrt' kružnice o polomere rovnom jedna v prvom kvadrante [15].

3.3.2 Vynútené kmitanie

Keďže je voľné kmitanie sústavy vplyvom straty energie utlmované a zaniká, na udržania kmitania je potrebné dodať externú energiu. Pokiaľ bude na sústavu pôsobiť nepretržitá harmonicky premenlivá sila, pre ktorú platí $F = F_m \sin \Omega$, tak je v sústave vynútené harmonické kmitanie. Tieto kmity vznikajú silami, ktoré sa menia periodicky v čase a pôsobia na systém nástroj-stroj-obrobok. Môžu sa však vyskytnúť aj na stroji, ktorý neobrába a beží naprázdno. Podľa pôvodu budiacej sily ich delíme na vynútené kmity, kde budiaca sila nesúvisí s procesom rezania a na také, kedy s procesom rezania súvisí. Parametrické kmity sú osobitným druhom vynútených kmitov. Líšia sa spôsobom vonkajšieho pôsobenia sily. Zatiaľ čo je pri vynútených kmitoch vonkajšia sila, ktorá vyvoláva kmity, parametre sústavy ako takej sa nemenia a zostávajú konštantné. Kmity parametrické však vytvára periodická zmena jedného z parametrov, ktorý by bol pri vynútených kmitoch nemenný. Príkladom takéhoto parametra je pri obrábaní premenlivá tuhosť jednotlivých častí stroja. Zdrojom môže byť hriadiel namáhaná ohybom a zoslabená drážkami. Predstavme si hriadeľ s drážkami, ktorý rotuje. Pôsobia na neho sily od telies ktoré sú s ním v kontakte. Priehyb hriadeľa sa bude meniť v závislosti na polohe drážky, takže sa v závislosti na polohe drážky bude periodicky meniť tuhosť tejto sústavy. To vyvolá periodické kmitanie. Obdobným prípadom môže byť aj premenlivý prierez triesky pri frézovaní. Zmenou prierezu triesky sa zmení aj rezná sila. Pri sústružení k periodickým kmitom môže dochádzať napríklad pri nerovnomernom rozmiestnení prídavkov na obrábanie a v spojitosti s hádzaním obrobku [18] [16].

Pre vynútené kmitanie a jeho výchylku $u(t)$ v okolí rovnovážnej polohy pre jeden stupeň voľnosti platí pohybová rovnica :

$$m\ddot{u} + b\dot{u} + ku = F(t), \quad (3.6)$$

Tlmenie uvažujeme úmerné rýchlosti $\dot{u}(t)$ s konštantnou úmernosťou b . Člen rovnice $b\dot{u}$, na ktorý pôsobí tlmiaca sila, vystihuje približne tlmiaci účinok väzkého oleja v olejovom viskóznom tlmiči. Existuje mnoho typov tlmenia, nie všetky je však možno matematicky vyjadriť v pohybovej rovnici v tvare lineárneho člena. Keď sa zavedie do rovnice pomerný útlm b_p a vlastné uhlové frekvencie rovnakej sústavy bez prítomnosti tlmenia Ω pohybová rovnica získa tvar :

$$\ddot{u} + 2b_p\Omega\dot{u} + \Omega^2u = \frac{1}{m}F(t), \quad (3.7)$$

Pre výchylku $u(t)$ platí vzťah :

$$u(t) = \frac{1}{m} \int_0^t F(t - \tau)g(\tau)d\tau + u(0)g(t) + [\dot{u}(0) + 2b_p\Omega u(0)]g(t), \quad (3.8)$$

V ktorom $u(0)$ a $\dot{u}(0)$ a dané počiatočné podmienky a funkcie $g(t)$ respektíve $g(\tau)$ sa stanovia z prenosovej funkcie sústavy obrobku [18] [16].

3.3.3 Samobudené kmitanie

Pri obrábaní kovov môžu v niektorých prípadoch vznikáť energetické kmity, ktorých amplitúda rýchlo rastie. Pokiaľ sú kmity menej intenzívne, dá sa pozorovať, ako sa amplitúda kmitov ustáli na určitej hodnote. V mnohých prípadoch je však nutné obrábanie prerušiť a nestihne tak dôjsť k ustáleniu amplitúdy. Frekvencia týchto kmitov je veľmi blízka vlastnej frekvencii niektorej časti so systému N-S-O. Hovoríme potom o vlastných kmitoch nejakej časti stroja, respektíve o kmitavom systéme príslušnej časti stroja. Pri sústružení tvorí výraznú časť

kmitavého systému najmä obrobok a jeho upnutie, teda vreteno, koník obrob .ok, skľučovadlo a pružiny, ktoré tvoria upínacie časti stroja [16].

Je to typ kmitania, ku ktorému na rozdiel od vynúteného kmitanie nie je potreba žiadnej vonkajšej periodicky sa meniacej sily. Jeho vznik a udržanie sa je spôsobené silou, ktorá vzniká v priebehu kmitania. Periodická sila sa stráca spolu s kmitaním. Frekvencia tohto kmitania nie je určená vonkajším zdrojom a jeho funkciou, ale je naviazaná na vlastnosti kmitajúceho systému. Približuje sa vlastnej frekvencii niektorého z riadiacich členov systému. Poznáme dva typy samobudeného kmitania a to relaxačné alebo skoro-harmonické. Vzhľadom na príčiny vzniku tohto kmitania ich delíme ako kmity vyvolané činiteľmi súvisiace s procesom a kmity vyvolané činiteľmi nepriamo súvisiace s procesom rezania.

- Do kategórie budiacej sily nesúvisiacej s procesom rezania, teda k relaxačnému kmitaniu, dochádza predovšetkým na strojoch obrábajúcich veľmi malými posuvmi.
- Budiaca sila ktorá súvisí s rezným procesom je druh samobudeného kmitania ktorý sa pri obrábaní vyskytuje najčastejšie. Najvýznamnejším prejavom tohto deja je výrazná vlnitosť obrobenej plochy a hluk. Kmitanie je vyvolané reznou silou. Inak môžeme tento druh kmitov nazvať aj ako skoro-harmonické samobudené kmity. Frekvenciu kmitov určuje tuhosť a hmota systému N-S-O a nie je v zásade určená reznými pomermi. Ako už bolo vyššie spomenuté, je blízka vlastnej frekvencii kmitov niektorého zo sústavy N-S-O. Pri konštantných podmienkach je amplitúda kmitov rovnaká. Samobudené kmity sú podmienené periodickými zmenami reznej sily. Existuje totiž tzv. spätná väzba reznej sily a existencia samobudeného kmitania.
- Podmienkami spojenými so vznikom samobudeného kmitanie je možné rozdeliť do dvoch skupín.

Vlastnosti stroja ako kmitavého systému :

- druh stroja
- usporiadanie pre jednotlivé operácie
- spôsobom upnutia obrobku

Technologické podmienky :

- druh obrábaného materiálu
- rezné podmienky
- tvar nástroja daný uhlami rezných častí
- rezná rýchlosť
- posuv
- hĺbka rezu
- otupenie nástroja
- nastavenie nástroja a podobne

Primárne je samobudené kmitanie pri obrábacom procese skoro vždy spojené a zosilované rezonančným vynúteným kmitaním. Vo väčšine prípadov obrábania dochádza k styku nástroja s plochou, z ktorej odobral materiál pri predchádzajúcom prejazde alebo inom kontakte. Ak v nejakom mieste pri predchádzajúcom kontakte vzniklo samobudené kmitanie, na povrchu materiálu vznikla vlnitosť obrobenej plochy $Y_0(t)$. Následne sa tak pri ďalšom prejazde, prechode alebo otáčke nástroj $Y(t)$ dostane do kontaktu s už zvltneným povrchom obrobku.

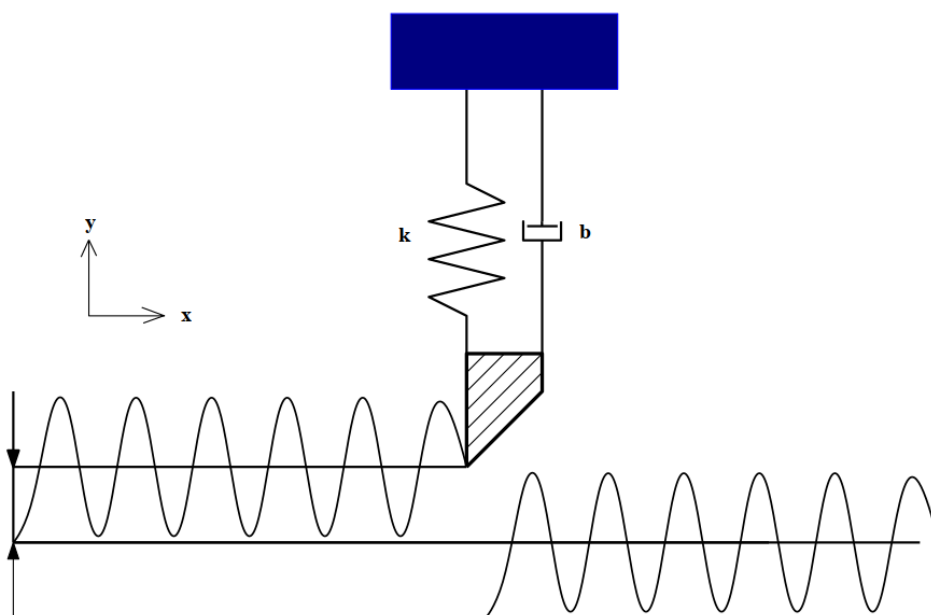
Odrezáva z neho triesku, ktorá je vplyvom zvlnenia periodicky premenlivá. Týmto javom dochádza súčasne k premenlivej veľkosti reznej sily, a jej frekvencia je rovnako tak zhodná z frekvenciou samobudeného kmitania, ktoré vyvolalo prvotnú vlnitosť povrchu. Táto frekvencia je daná vlastnou frekvenciou celého kmitavého systému stroja. Existuje istý fázový posun ψ medzi vlnitosťami na obrábanom povrchu, ktorý je pre vznik kmitov taktiež rozhodujúci. Periodicky premenlivá rezná sila tak pôsobí ako zdroj vynúteného kmitania, ktoré sa sčítavajú s primárnymi samobudenými kmitmi. Toto kmitanie je na základe vzniku kategorizované ako regeneratívny princíp kmitania. [19].

Na rozdiel od vynúteného kmitania, ktoré je vo väčšine prípadov pri obrábaní škodlivé až pri veľmi vysokých amplitúdach, je samobudené kmitanie pri obrábaní prakticky neprípustným javom. Preto je v technickej praxi snaha o takú optimalizáciu rezných podmienok, aby sa samobudené kmitanie v plnom rozsahu výkonu jednotlivých stojov pri obrábaní nevyskytovalo [20]. Tento druh kmitania sa veľmi často experimentálne vyhodnocuje pomocou modálnej analýzy, respektíve pomocou frekvenčnej prenosovej funkcie FRF. Tieto kmity je potom možné vyhodnocovať a eliminovať vďaka takzvaným diagramom stability (Lobovým diagramom). Pre túto prácu by bolo veľmi náročné uskutočniť, pretože sa v nich pracuje s FRF. Vďaka nej sa vytvárajú zobrazenia vlastných tvarov kmitov a vlastných frekvencií. Tie sa však menia spolu so zmenou hmotnosti. Pri obrábaní by dochádzalo k odoberaniu materiálu, zmene hmotnosti a teda aj zmien vlastných frekvencií a vlastných tvarov kmitov.

3.4 Regeneratívne kmitanie

Ako už sa v tejto práci spomínalo, pokiaľ sa zanedbá predpoklad tuhého nástroja odpovedajúcemu reálnemu obrábaniu, rezná sila spôsobuje výchylky nástroja pri procese rezania. Nástroj je hmotný a tuhý, takže vzniká kmitanie a vibrácie. Pokiaľ nástroj počas obrábania vibruje, na obrobenej časti sa vytvára zvlnený povrch. Pri následnom obrábaní materiálu sa nástroj dostáva do kontaktu s vlnitým povrchom. Pri odoberaní premenlivej triesky vzniká premenlivá rezná sila, ktorá spôsobuje kmitanie sústavy, ktoré sa môže nazývať regeneratívnym kmitaním (Obr. 16) [21]. Časovo okamžitá hĺbka triesky je určená rovnicou :

$$h(t) = h_m + y(t - \tau) - y(t), \quad (3.9)$$



Obr. 16 Rozvinutý pohľad na sústružnícku operáciu.

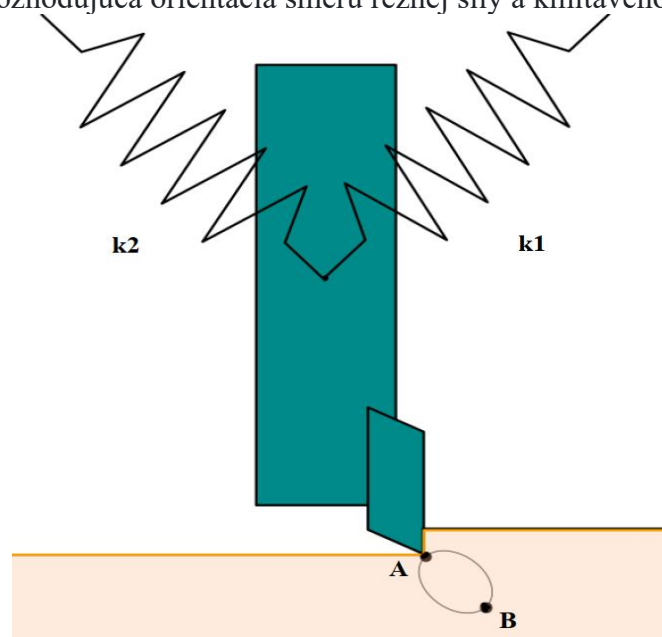
Rozdielom fázy zvlnených povrchov medzi jednou a druhou otáčkou sa určuje odchýlka sily a získava sa vedomosť, či je obrábanie stabilné alebo nestabilné [21].

3.5 Utlmené chvenie

Chvenie, vibrácie a oscilácie pri takomto type rezného procesu sa väčšinou sami neutlmia je teda nutnosťou hľadať jeho príčinu a prerušiť obrábací proces. Všeobecne sa jedná o nedostatočnú tuhosť v systéme stroj, nástroj a obrobok. Nedostatočná tuhosť môže byť zapríčinená slabým miestom na konštrukcii stroja, štihlosťou nástroja, veľkým vyložením nástroja, štihlosťou obrobku a podobne. Jednou z možností redukcie chvenia je zmena mechanického usporiadania systému pre zaistenie vyššej tuhosti. Pri obrábaní má na kmitanie vplyv ako statická tak dynamická tuhosť sústavy. Je teda možné tlmiť tú časť systému, ktorá najviac osciluje. V praxi sa používajú rôzne typy tlmičov na rôzne časti systému. Pri sústružení je obmedzenou možnosťou aj zmena smeru reznej sily, ktorá však vyžaduje zložitý postup a analýzu situácie výrobcom stroja. Takáto metóda sa využíva pri prototypizácii. V bežnej praxi sa však používajú nákladnejšie tlmené nástroje, zmena rezných podmienok ako posuv alebo odber materiálu. S takýmito zmenami však dochádza k zhoršovaniu efektivity a produktivity obrábania. Zmena reznej rýchlosti však v prípadoch sústruženia nepomáha [5].

3.6 Princíp polohovej väzby

Druhým spôsobom vzniku samobudených kmitov je existencia dvoch dominantných tvarov kmitov medzi obrobkom a nástrojom. Tie musia byť navzájom kolmé a mať rôzne vlastné frekvencie. Pri splnení tejto podmienky následne periodická rezná sila rozkmitá systém v oboch smeroch naraz rovnakou frekvenciou a s konštantnou vzájomnou fázou tak, že sa rezná časť nástroja pohybuje po eliptickej dráhe. Pri pohybe, ktorý je znázornený na obrázku (Obr. 17), môže pri pohybe po eliptickej dráhe z bodu A do bodu B rezná sila pôsobiť proti smeru posuvu a odoberať tak systému energiu. Pri pohybe proti smeru hodinových ručičiek z bodu B do bodu A je však energia systému dodávaná. Keďže sa na dráhe B-A obrába vo väčšej hĺbke, a teda s väčšou reznou silou ako na dráhe A-B, prevažuje energia, ktorá je do systému dodávaná. Ak táto energia nie je spotrebovaná dostatočným tlmením, dochádza k nárastu amplitúdy a rezný proces sa stane nestabilným. Takýmto spôsobom, môže dochádzať k vzniku samobudeného kmitania aj pri obrábaní hladkého, nezvlneného povrchu. Podľa princípu polohovej väzby je pri vzniku chvenia rozhodujúca orientácia smeru reznej sily a kmitavého systému stroja [19].



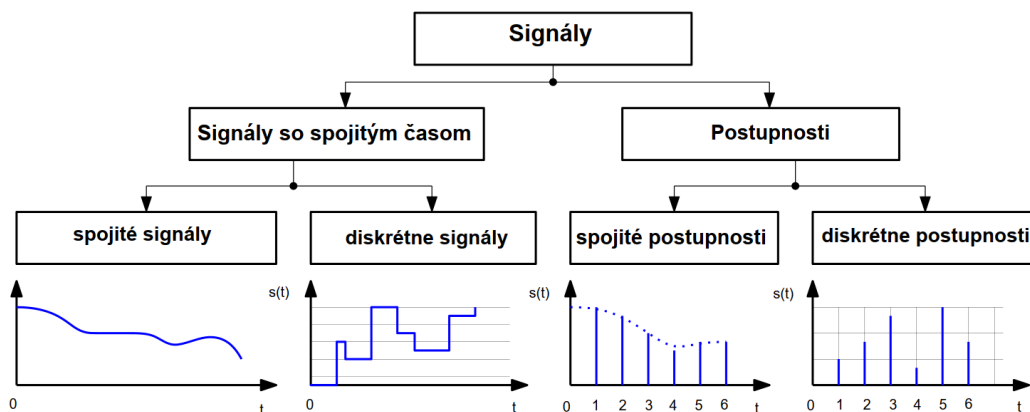
Obr. 17 Princíp polohovej väzby.

3.7 Spracovanie signálov obrábacieho procesu

V dnešnej dobe sa s rýchlo vyvíjajúcim trendom pokroku stále viac uplatňuje spojenie meracej a výpočtovej techniky pre automatizáciu a analýzy. Veľkou výhodou spracovania analógových dát na digitálne je možnosť ich úschovy. Nevýhodou digitálneho merania je však nemožnosť získania spojitého signálu, ale len diskretných hodnôt, ktoré sa následne počítačom spracovávajú. V oblasti vyhodnocovania technických signálov má rozsiahle použitie frekvenčná analýza ako napríklad diskretná konvencia, spektrálna výkonnostná hustota či fázové spektrum. Ich výpočet je však z matematického a časového hľadiska veľmi náročný, preto sa na výpočet technických signálov využíva vhodná ortogonálna transformácia. Najviac používaným nástrojom pre spracovanie takéhoto signálu je fourierova transformácia, Laplacova transformácia alebo Z transformácia.

Signál je fyzikálnou veličinou, ktorá prenáša istý druh správy. Tá môže obsahovať určité množstvo informácií. Môže byť reprezentovaná popisom závislosti na jednom parametri, kedy hovoríme o závislej premennej alebo na inom parametri, kedy hovoríme o premennej nezávislej. Najčastejšie je nezávislá premenná čas, ako to dokazuje aj táto diplomová práca. Pre účely tejto diplomovej práce sa nebudú popisovať všetky (Obr. 18), ale len hlavné typy signálov súvisiace s prácou [22].

Periodický druh signálu je taký, ktorému je možné určiť periódu spájajúcu sa s rovnakými funkčnými hodnotami. Perióda môže nabrať ľubovoľných hodnôt, ale platí, že sa v čase musí opakovať. Vhodným príkladom periodického signálu je signál zložený zo súčtu harmonických signálov. Neperiodickým signálom naopak nie je možné určiť periódu, ktorá by sa v čase opakovala. Stacionárny signál je stochaický teda náhodný, ktorý si zachováva svoje štatistické vlastnosti. Nie je dopredu možné určiť ich funkčnú hodnotu, ale len pravdepodobnosť v akom intervale sa budú hodnoty nachádzať. Typickým príkladom náhodného signálu je šum, ktorého podstata neumožňuje presný popis všetkých dejov. Charakteristika takýchto signálov je časovo invariantná. Štatistické vlastnosti nestacionárnych signálov sú v čase premenné, takže ich vyhodnocovanie musí byť závislé na čase. Takéto signály sú časovo invariantné. Invariancia označuje stav, kedy sú určité veličiny nemenné voči iným referenčným veličinám, pokiaľ nadobúdajú rovnakú hodnotu pri zmenách referenčnej veličiny [23] [24]. Determinované (regulárne) signály sú popísané nenáhodnou funkciou času a je možné z nich v každom okamihu určiť ich hodnoty [25].



Obr. 18 Rozdelenie signálov.

3.7.1 Vzorkovanie signálu

Diskretizácia je proces, pomocou ktorého sa získava diskretný signál z analógových signálov. Inak sa nazýva aj ako vzorkovanie. V súčasnosti je to jeden z hlavných spôsobov digitalizácie signálov. Vzorkovanie sa javí ako vynechanie časti určitého priebehu pôvodného spojitého

signálu. Dochádza pri tom k zmene pôvodného spojitého signálu $x(t)$ na diskkrétne hodnoty $x(nT)$, ktoré sú brané v periodických intervaloch vzorkovania $t = nT$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) [26]. Je to transformácia spojitého signálu $x(t)$ na postupnosť hodnôt so spojitou amplitúdou. Požiadavkou po transformácii je existencia informácie o pôvodnom spojitom signály. Aby bola požiadavka splnená, je nutné aby bol spojitý signál $x(t)$ ohraničený frekvenčným spektrom (f_{max}) a bolo možné ho nahradiť postupnosťou diskrétnych vzoriek, ktoré boli odobraté periódou diskreditácie. Pre správny vzorkovací postup je nutné dodržať Nyquistove kritérium. Toto kritérium stanovuje vzorkovaciu frekvenciu f_d minimálne tak veľkú, ako je dvojnásobok najväčšej frekvencie f_{max} v signáli:

$$f(d) \geq 2f_{max}, \quad (3.10)$$

Pri vzorkovaní platí, že čím väčšia bude vzorkovacia frekvencia, tým presnejšia informácia sa dosiahne z hľadiska rekonštrukcie signálu. Pokiaľ sa nedodrží správne nastavenie vzorkovania, môže dochádzať k skresleniam výsledkov [27].

V skutočnosti je možné vytvárať nekonečne mnoho signálov, s rovnakými vzorkami. Ak je spektrum signálov dostatočne obmedzené frekvenciou, fourierova transformácia nad frekvenčným pásmom je rovná nule, potom sú vzorky signálu dostatočne určené. O tomto fakte pojednáva vzorkovacia teoréma, prakticky využívaná pri skúškach a analýzach signálov. Vysvetľuje, že každý časový priebeh $x(t)$, ktorého modulové spektrum je zhora obmedzené kruhovou frekvenciou $\omega_m = 2\pi f_m$. To poukazuje na limitnú frekvenciu, nad ktorou je modulové spektrum spojitého signálu nulové :

$$X(j\omega) = 0 \text{ pre } |\omega| > \omega_m, \quad (3.11)$$

A musí byť jednoznačne určený hodnotami rovnomerne odoberaných časových intervalov :

$$T \leq \frac{1}{2f_m}, \quad (3.12)$$

Zároveň sa vzorkovacia teoréma označuje aj ako Nyquistova, Shannonova alebo Kotelnikovova teoréma. Signál analógového pôvodu $x(t)$ je vzorkovaný každých T sekúnd alebo v iných intervaloch aby $T = 1/2f_m$. Vzorky následne obsahujú informáciu o signály $x(t)$ pre takmer každú hodnotu t . Je nutné, aby modulové spektrum signálu, ktorý je vzorkovaný aby obsahoval aspoň dva krát vyššiu frekvenciu, ako je medzná frekvencia f_m . Zjednodušene povedané, aby sa predišlo chybám, by mal byť analógový signál vzorkovaný aspoň da krát v každej perióde jeho najvyššej frekvenčnej zložky [26]. Informácia o akomkoľvek fyzikálnom, technickom alebo inom dejí je v signáli reprezentovaná ako nejaká zmena okamžitej hodnoty niektorej z veličín, ktoré popisuje. Na nasnímaný signál analógového typu je možné aplikovať pasívne alebo aktívne filtre, a následne signál digitalizovať a spracovávať [24].

3.7.2 Harmonický signál

Najjednoduchším periodickým signálom je harmonický signál. Tento signál je reálna časová funkcia, ktorá môže byť popísaná pomocou kosínusovej rovnice ako [28]:

$$x(t) = C \cdot \cos(\omega t + \varphi), \quad (3.13)$$

kde: C - Kladná konštanta amplitúda [-],
 ω - Uhlový kmitočet [rad/s],
 φ - Počiatočná fáza [°].

Fáza harmonického signálu je daná hodnotou $\omega t + \varphi$ vyjadrujúcou lineárnu funkciu času a harmonický signál je signálom periodickým, ktorého základná perióda T_1 je určená vzťahom:

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (3.14)$$

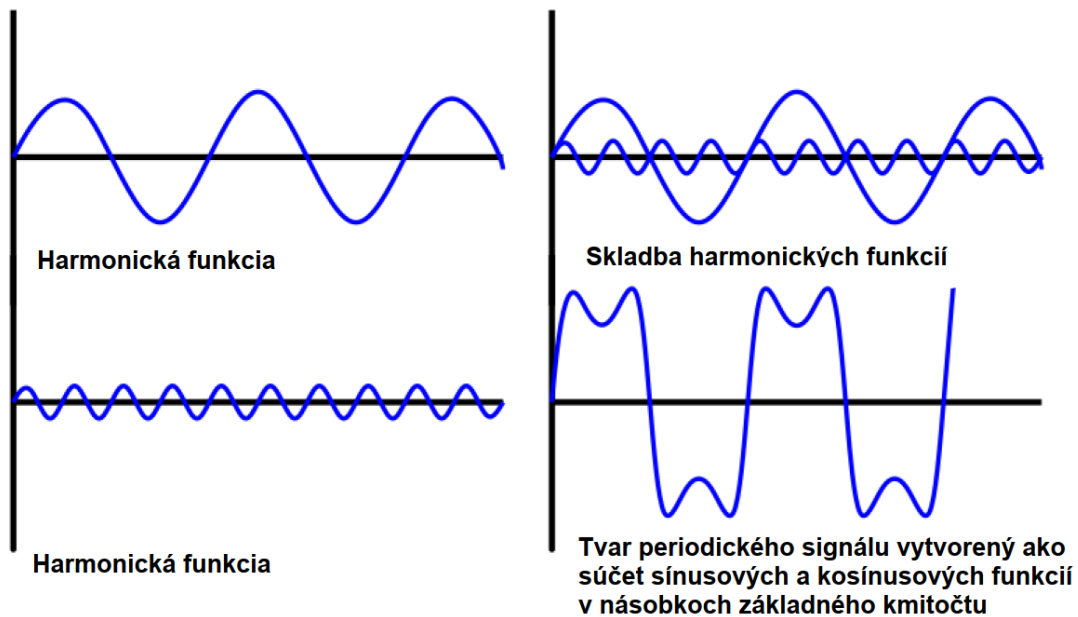
kde: ω - Uhlový kmitočet [rad/s],

V teórii signálov sa harmonické cykly skladajú a môžu nadobúdať rôznych hodnôt amplitúd, uhlových frekvencií a uhlovej rýchlosti. V takýchto prípadoch je vhodné harmonický signál popisovať pomocou komplexných funkcií v exponenciálnom tvare. Podľa Eulerového vzorca teda platí (Obr. 19) [29]:

$$x(t) = C \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \frac{C}{2} \exp(j(\omega t + \varphi)) + \frac{C}{2} \exp(-j(\omega t + \varphi)), \quad (3.15)$$

kde: C - Kladná konštanta amplitúda [-],
 ω - Uhlový kmitočet [rad/s],
 φ - Počiatočná fáza.

Reálny signál je teda možné nahradit' ako súčet dvoch komplexne združených funkcií času, a teda so zhodnými reálnymi aj imaginárnymi časťami.



Obr. 19 Skladanie harmonických signálov.

3.8 Fourierova transformácia

Priebeh signálu sa zvyčajne znázorňuje v časovej oblasti. Jeho vlastnosti je možné prezentovať rozkladom na súbor elementárnych funkcií. V technických oblastiach je prirodzené rozkladať signál na súbor harmonických funkcií líšiacich sa amplitúdou, frekvenciou alebo počiatočnou polohou. Pokiaľ sa v harmonickom signály znázorní závislosť amplitúdy a počiatočnej fáze na frekvencií, je potom znázornení nie v časovej ale vo frekvenčnej oblasti. Rozklad periodickej funkcie so spojitým časom na kombináciu harmonických signálov je nazýva Fourierov rad a všeobecne pre neperiodické funkcie je možné hovoriť o Fourierovej transformácii [29]. Napriek tomu, že je signál vo všeobecnosti nekonečný, fourierova transformácia vytvára rozklad na zložky s frekvenciami, ktoré sú násobky harmonickej funkcie, základnej frekvencie opakovaného signálu. Znamená to, že spektrum signálu obsahuje len určité harmonické zložky. Fourierova transformácia je definovaná nasledujúcimi vzorcami [29]:

Priama transformácia :

$$X(\omega) = F\{x(\epsilon)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (3.16)$$

kde: $X(\omega)$ - Má význam obrazu resp. všeobecného signálu ktorý je transformovaný do frekvenčnej oblasti.

Inverzná transformácia :

$$x(t) = F^{-1}\{x(\epsilon)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \exp(j\omega t) d\omega, \quad (3.17)$$

3.8.1 Diskrétna Fourierova transformácia

Fourierová transformácia je integrálna transformácia, ktorá prevádza signál medzi časovo a frekvenčne závislým vyjadrením vďaka harmonickému signálu, to znamená funkciám sínus a kosínus všeobecne známym ako funkciám exponenciálnym. Slúži najmä pre prevod signálu z časovej oblasti do frekvenčnej oblasti. Tento signál sa môže nachádzať buď v spojitaj alebo diskkrétnej časovej oblasti. Diskrétna Fourierova transformácia našla najväčšie uplatnenie s rozvojom počítačovej techniky. Súčasťou je rada prístrojov, ktoré dokážu výstupné dáta vyhodnocovať touto transformáciou [30]. Slúži na transformáciu periodického signálu, nie len do časovej oblasti, ale aj do oblasti kmitočtov. Je možné ju využiť aj na vyjadrenie neperiodických signálov, podmienkou však je konečný časový interval [25]. V praxi sa často stáva, že k skúmanému meranému signálu je k dispozícii postupnosť hodnôt, ktoré zodpovedajú známym časovým okamihom. Jednotlivé vzorky signálu od seba bývajú v čase vzdialené o istý časový interval T . Takéto vzorky $x[nT]$ sú získané meraním diskrétnych časových okamihov $t=nT$ v určitom konečnom časovom intervale T_0 . Ak je časový priebeh analógového signálu $x(t)$ určený diskrétnou časovou postupnosťou $x[nT_1]$ kde T_1 je periódou vzorkovania, je možné na výpočet spektra využiť diskrétnu Fourierovu transformáciu skratkou DFT. Vďaka tejto transformácii, je možné vypočítať z daných vzoriek obmedzeného časového priebehu vzorky spektra, ale aj naopak je možnosť vypočítať vzorky časového priebehu zo vzoriek spektra. Pre vyjadrenie časového priebehu aj spektra diskrétnych hodnôt je nutné sledovaný časový priebeh uvažovať ako priebeh vzorkovaný a periodický. Pri uvažovaní spojitého časového priebehu $x(t)$, kde je doba trvania T_0 a modulové spektrum $X(\omega)$ je frekvenčne zhora obmedzené kruhovou frekvenciou ω_m môžeme spojitý časový priebeh nahradiť postupnosťou vzoriek $x[nT_1]$ v diskrétnych periodických okamihoch $t_n = nT_1$, kde T_1 je periódou vzorkovania. Pre celkový počet vzoriek intervalu T_0 bude N :

$$T_0 = NT_1, \quad (3.18)$$

Vzorkovací signál $x_y(t)$:

$$x_y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_1) \delta(t - nT_1), \quad (3.19)$$

Spektrum $\overline{X_p}(\omega)$ je diskrétne a obálkou preň je spektrum $\overline{X}(\omega)$ aby :

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}, \quad (3.20)$$

kde: T_0 - Interval [-],
 ω_0 - Uhlový kmitočet [rad/s],

Po náročnejšom odvodzovaní je možné získať výsledný vzťah pre priamu DFT :

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}, \quad (3.21)$$

Pre $n=0, 1, 2, \dots, N-1$

Časová postupnosť $x[n]$ je vytvorená superpozíciou s viacerých diskretných postupností $e^{j\frac{2\pi}{N}nk}$.

Zložky v spektre $\frac{1}{N}X[k]$ určujú váhu jednotlivých harmonických zložiek s frekvenciami $k\omega_0$ pôvodného

Signálu. Kruhová frekvencia ω_0 prvej harmonickej zložky $X(k)$ je určená šírkou intervalu T_0 [26].

Efektívnou hodnotou, ktorou je možné nahradiť časový priebeh vibrácií je RMS (Root mean square). Je to konštantná hodnota energie vyjadrená vzorcom :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2(t) dt}, \quad (3.22)$$

3.8.2 Rýchla Fourierova transformácia FFT

Je modifikáciou a efektívnym nástrojom pre rýchle riešenie diskretnéj fourierovej transformácie a jej inverzie. Aplikáciou tohto nástroja sa získavajú rovnaké výsledky ako pri použití DFT avšak podstatne rýchlejšie. DFT, ako už bolo v teste uvedené, potrebuje $0(N^2)$ operácií, zatiaľ čo FFT $0(N \log(N))$ operácií. Táto metóda sama o sebe vychádza z DFT avšak rozkladá jednotlivé vzorky signálu na postupnosti s párnymi a nepárnymi prvkami pôvodnej vzorky signálu (pôvodnej postupnosti) [31]. Signál sa najčastejšie posudzuje v čase a dopĺňujú sa jeho vlastnosti reprezentované rozkladom na súbor elementárnych funkcií. Najvhodnejším rozkladom pre technickú prax je rozklad na súbor harmonických funkcií líšiacich sa amplitúdou, uhlovou frekvenciou a svojou fázou počiatku. Rozkladom spojitého signálu v čase na kombináciu harmonických signálov je možné nazvať Fourierovou radou. Pre všeobecné neperiodické funkcie sa používa rýchla fourierova transformácia. Tento rozklad sa týka najmä periodických a kvaziperiodických signálov. Napriek tomu, že sa signál považuje vo všeobecnosti za nekonečný, obsahuje tento rozklad len zložky frekvencie ktoré majú harmonické násobky. Spektrum tak obsahuje len izolované zložky. Podstatou je zvláštna voľba dĺžky záznamu a využíva urýchleného výpočtu podľa autorov Coolyho a Tukeyho. Matematicky je možné dodať, že FFT rozkladá signál na určité amplitúdy odpovedajúce frekvenčným budiacim zložkám [32]. Táto voľba vedie k dĺžkam záznamu s počtom prvkov N napríklad $N= 512, 1024, 2048, 4096, 8192\dots$ [29]

3.9 Nástroje pre experimentálnu analýzu kmitania vplyvom obrábacích procesov

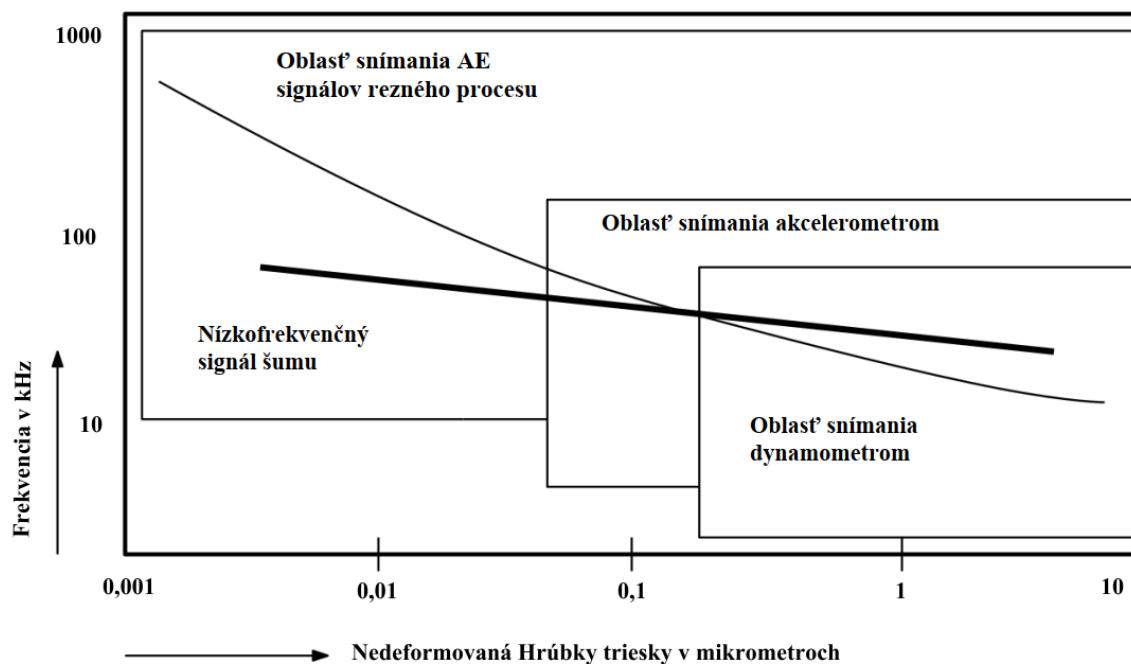
Dynamické aspekty rezného procesu pri obrábaní je možné rozdeliť do dvoch kategórií:

- Analytický prístup – modelovanie rezného procesu pomocou sústavy rovníc, nerovnic, bokových modelov a podobne.

- Experimentálny prístup – na základe merania istých významných veličín obrábacieho procesu je možné analyzovať a vyhľadávať vzťahy medzi jednotlivými veličinami. Takýmto spôsobom je možné aj overovanie výsledkov analytických výpočtov a štúdií.

Analytické aj experimentálne analýzy dynamických aspektov pri reznom procese obrábania môže byť náročnou disciplínou vyžadujúcou si znalosť viacerých vedných oborov. Nutnou podmienkou pre realizáciu dynamických aspektov sú zariadenia schopné určovať poruchy, vyskytujúce sa pri reznom procese. Vstupmi pre analýzu predstavuje nástroj, stroj, rezné prostredie, vlastnosti materiálu, rezné podmienky a podobne. Výstupmi môžu byť napríklad kvantitatívne parametre obrobku, hospodárnosť operácie alebo samotná produktivita. Dynamické veličiny rezného procesu je možné merať počas experimentálneho obrábania ako napríklad akustickú emisiu, rezné sily alebo teploty. Pre ďalšie z nich je však nutné identifikovať po skončení procesu. Dôležitou súčasťou experimentálneho merania je výber vhodných veličín (signálov), ktoré závisia na experimente samotnom. Môže ísť o citlivosť snímačov, veľkosť sústavy, charakter procesu obrábania alebo o časovú odozvu systému. Nutnosťou pre experimentálne meranie je aplikácia snímačov so schopnosťou monitorovania rezného procesu v reálnom čase. Na experimentálnu analýzu sa preto najčastejšie využívajú [33]:

- Dynamometre
- Akcelerometre
- Snímače akustickej emisie



Obr. 20 Oblasť využitia jednotlivých typov snímačov v závislosti na hrúbke triesky a frekvencie.

3.10 Dynamometre

Meranie rezných síl a ich točivých momentov zakladajúce sa na systéme N-S-O počas obrábania je možné realizovať pomocou dynamometra. Je to merací prístroj, ktorý musí zaručiť stálosť nameraných hodnôt v čase vrátane možnosti ich reprodukcie [34]. Musí taktiež zaručiť meranie sledovanej veličiny v zvolenom rozsahu s maximálnou presnosťou [33]. Dynamometre sú jednými z hlavných priamych možností merania síl a momentov [16]. Dynamometer je

schopný merať silu F , ktorou pôsobí nástroj na obrobok. Sila, ktorou pôsobí obrobok na nástroj je rovnako veľká ale opačného smeru. Nazývame ju merný rezný odpor. Vzhľadom na náročnosť jej zachytenia v dynamickom deji, ju v praxi chápeme ako statický jav, pričom sa za stredná hodnota nachádza medzi minimálnou a maximálnou silou. Výslednú zložku reznej sily, ako pri rozklade síl pri sústružení delíme na axiálnu, radiálnu a tangenciálnu [33].

Základné požiadavky na dynamometer [34]:

- **Tuhosť dynamometru** daná zaťažujúcou silou F spôsobujúca deformáciu y . Veľkosť deformácie y závisí na tvare a prevedení deformačného elementu v dynamometri. Dostatočná tuhosť je zásadná pri dynamických metódach merania.
- **Citlivosť dynamometra** súvisiaca s citlivosťou použitej meracej metódy a tuhosťou daného dynamometra.
- **Stálosť údajov dynamometra** v závislosti od tuhosti, citlivosti presnosti.
- **Reprodukovateľnosť údajov**
- **Zotrvačnosť** priamo úmerne súvisiaca s hmotnosťou sústavy.

Konštrukcia dynamometra zaisťujúca vzájomné neovplyvňovanie meraných zložiek rezných síl.

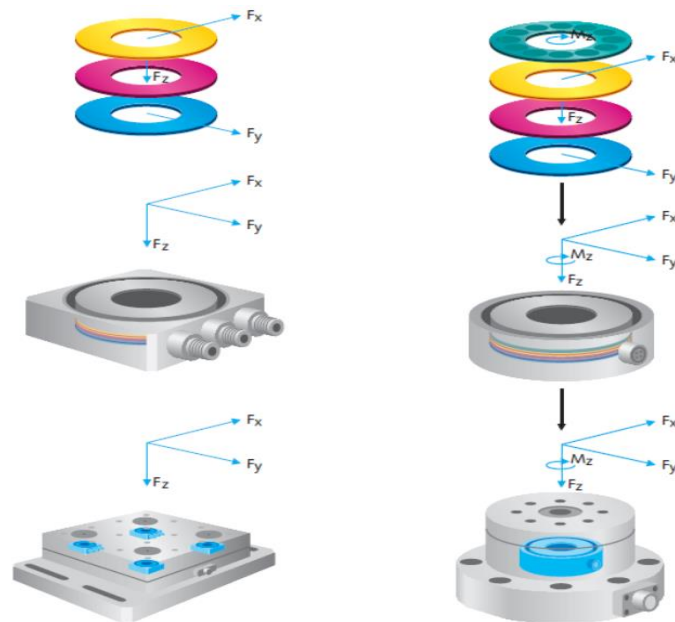
Jedným zo základných delení dynamometrov je podľa merania na základe rôznych fyzikálnych princípov a to na [33]:

- Mechanický dynamometer
- Pneumatický dynamometer
- Hydraulický dynamometer
- Optický dynamometer
- Elektrický dynamometer – (kapacitný, odporový)
- Piezoelektrický dynamometer
- Tenzometrický dynamometer

Jedným z najvyužívanejších typov dynamometrov pri meraní rezných síl je piezoelektrický dynamometer. Zároveň je využitý v experimentálnej časti tejto diplomovej práce. Jedná sa o Dynamometer firmy Kistler s označením 9257B (Obr. 21). Tento druh dynamometra využíva pre snímanie deformácie piezoelektrického javu, ktorý je charakterizovaný vznikom elektrického náboja na povrchu niektorých kryštálov. Najčastejšie využívaným kryštálom je kremeň ale aj materiály ako titaničnan bárnatý, Seignettova soľ a podobne. Základom pre tento snímač je doštička vyrezaná z príslušného kryštálu (Obr. 22). Pri zaťažovaní je veľkosť náboja priamo úmerná veľkosti pôsobiacej sily F a s ubúdajúcim zaťažením lineárne klesá [34].



Obr. 21 Piezoelektrický Dynamometer 9257B [35].



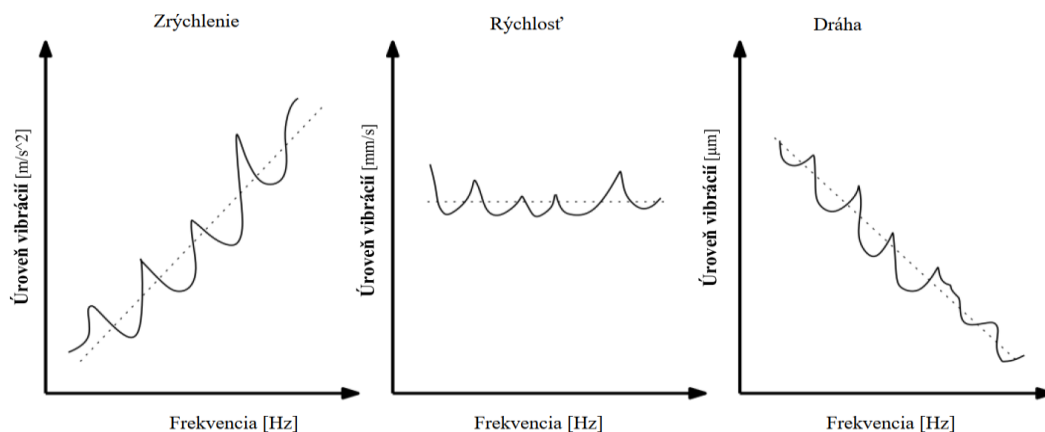
Obr. 22 Konštrukcia dynamometru [36].

3.11 Analyzátor vibrácií

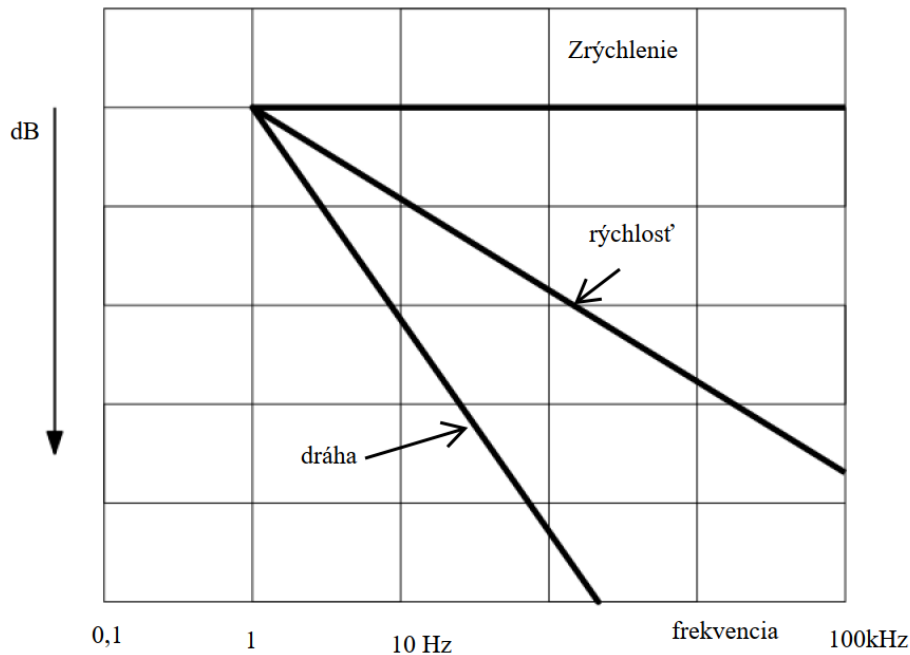
Pre vyhodnocovanie vibrácií sa využívajú mnohé zariadenia a snímače, pracujúce na rôznych princípoch. Okrem merania fyzických kmitov a chvenia je možné vibrácie vyhodnocovať aj metódami snímania zvuku. Pre túto diplomovú prácu je kľúčovým analyzátorom akcelerometer v kombinácii s meraním hluku pomocou mikrofónu.

3.11.1 Akcelerometer

V súčasnosti sa ako najvhodnejším nástrojom na hodnotenie vibrácií používa akcelerometer. Akcelerometer je zariadenie, vďaka ktorému je možné merať a analyzovať uhlové a lineárne zrýchlenie. Služi ako na meranie gravitačného zrýchlenia umožňujúc tak určiť uhol odchýlky meraného objektu od vertikály, tak aj meranie dynamického zrýchlenia spôsobeného otrasmi, nárazmi, pohybu alebo vibráciami. Je možné s ním merať nízkofrekvenčné vibrácie a nízke amplitúdy rádovo niekoľkých desiatok Hz [37]. Je možné ho využiť na meranie dráhy, rýchlosti alebo zrýchlenia (Obr. 23). Merací rozsah akcelerometrov sa môže štandardne pohybovať od 5Hz – 3 kHz [33].



Obr. 23 Závislosť zrýchlenia, rýchlosti a dráhy na frekvencii.



Obr. 24 Dominancia nízkych frekvencií a amplitúd.

Obrázok (Obr. 24) ukazuje dominanciu amplitúd nízkych frekvencií vo frekvenčnom spektre dráhy. Frekvenčné spektrum zrýchlenia je významné amplitúdami vysokých frekvencií. Výstupnou veličinou akcelerometra býva často zrýchlenie. Veľkosť rýchlosti je možné vypočítať na základe vzťahu [33]:

$$\dot{x} = \int (\ddot{x}) dt, \quad (3.23)$$

Veľkosť dráhy je možné získať integráciou rýchlosti :

$$x = \int (\dot{x}) dt, \quad (3.24)$$

3.11.2 Photon+

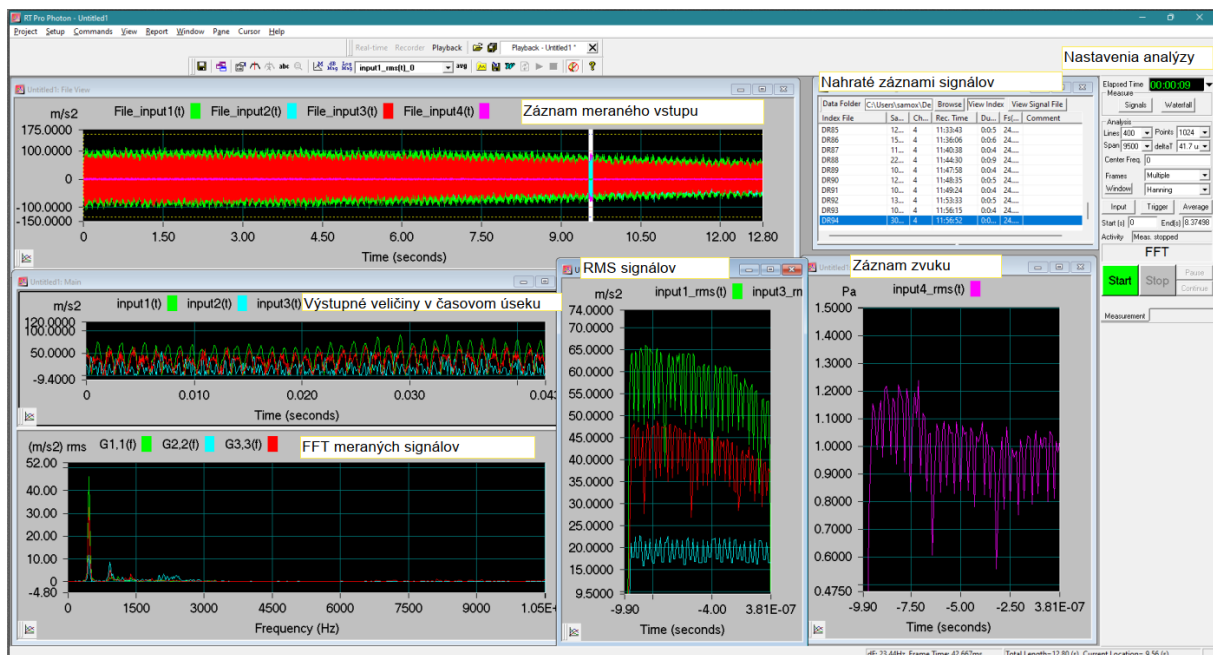
Analyzátor od spoločnosti Bruel and Kjaer s názvom Photon+ (Obr. 25) slúži na spracovávanie vibračných odoziev konštrukcií, ale aj strojných zariadení a súčastí s širokým spektrom zamerania. Jeho hlavnými prednosťami je možnosť merania odoziev vibrácií, modálna analýza, zber prenosových funkcií, analýzy zvuku a podobne. V kombinácii so softvérom RT pro je následne možné analyzovať vibrácie, spracovávať signály a vytvárať FFT transformácie. Jeho výhodou je meranie signálov ako na Obr. V troch osách a štvrtým vstupom do prístroja je meraná zvuková emisia [38].



Obr. 25 Analyzátor Photon+ [38].

3.11.3 RT Pro Photon

Na vyhodnocovanie vibrácií z akcelerometra bol využitý program RT Pro photon od firmy Brüel and Kjær. Vďaka spracovávaniu a vyhodnoteniu vibrácií pomocou FFT sa použil analyzátor od tejto spoločnosti s názvom Photon+. Vďaka jeho schopnosti spracovávania signálov, modálnej analýzy, analýzy zvukovej kvality a akustických emisií boli vyhodnotené výsledky pre diplomovú prácu (Obr. 26) [38] [39].



Obr. 26 Prostredie Analyzátoru RT Pro.

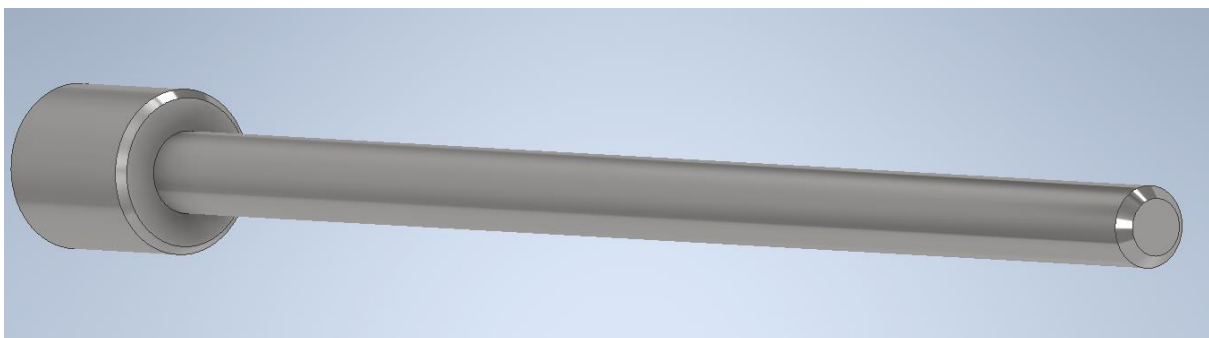
4 EXPERIMENT A SPRACOVANIE VÝSLEDKOV

4.1 Návrh experimentu obrábania

Táto diplomová práca popisuje obrábanie dlhých tenkých dielov metódou sústruženia z martenzitickej žiarupevnej ocele X19CrMoNbVN11-1. Polotovar o priemere 45 mm a dĺžke 400 mm je sústružený z ľavej strany na dĺžke 360 mm. Upnutý v skľučovadle a podoprený hrotom. Odber materiálu a_p je pri každom prejazde 3 mm na priemer a teda $a_p = 1,5$ mm (Obr. 27). Pôjde o sústruženie na sústruhu TOS Trenčín SU 18 s maximálnymi otáčkami 2400 ot. Obrábanie je vykonávané piatimi rôznymi nástrojmi s odlišnými geometriami v rátane utváračov triesky. Rezné rýchlosti a posuvy sú nastavené tak aby vyhovovali každej VRD podľa zadania výrobcom. Od priemeru 30 mm však vzhľadom na možnosti obrábacieho stroja ostávajú otáčky na 2320 ot a obrábanie pokračuje až do priemeru 18 mm. Počas tohto obrábania sú v kritickom mieste priehybu dielu merané vibrácie pomocou akcelerometra Brüel & Kjær v dĺžke medzi 1800-200 mm od počiatočného nájazdu do materiálu. Rezné sily sú merané počas celého prejazdu nástroja materiálom. Zvuková emisia pri sústružení je taktiež meraná počas momentov najintenzívnejšieho možného kmitania a to v strede materiálu. Rezné podmienky sú teda nemenné pre každý nástroj a znázornené v Tab. 1. Podľa možnosti je následne vyhodnocovaná kvalita povrchu materiálu na priemere 18 mm. Celkový obrábací čas na jeden nástroj je približne 12 minút, v závislosti na tom ako bol stroj schopný držať nastavené otáčky.

Tab. 1 Podmienky obrábania a merania.

Meranie č.	Priemer [mm]	a_p [mm]	otáčky	posuv [mm/ot]	Vzorkovacia frekvencia [Hz]	Čas [s]
1.	45	1,5	1420	0,147	189	1,70
2.	42	1,5	1520	0,147	126	1,58
3.	39	1,5	1632	0,147	136	1,47
4.	36	1,5	1768	0,147	147	1,36
5.	33	1,5	1929	0,147	161	1,24
6.	30	1,5	2122	0,147	177	1,13
7.	27	1,5	2320	0,147	193	1,02
8.	24	1,5	2320	0,147	193	1,02
9.	21	1,5	2320	0,147	193	1,02



Obr. 27 Model obrábaného dielu.

Martenzitická žiarupevná ocel' využitá na tento experiment X19CrMoNbVN11-1 má maximálnu tvrdosť 302 HB. Jej modul pružnosti $E = 216$ GPa. Chemické zloženie je v hmotnostných percentách popísané v tabuľke (Tab. 2) :

Tab. 2 Chemické zloženie [hm/%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,17- 0,23	0,5 max	0,4-0,9	0,025 max	0,015 max	10-11,5	0,2-0,6
Ni	Mo	Nb	V	B	N	Al
0,2-0,6	0,5-0,8	0,25- 0,55	0,1-0,3	0,0015 max	0,05-0,1	0,02 min

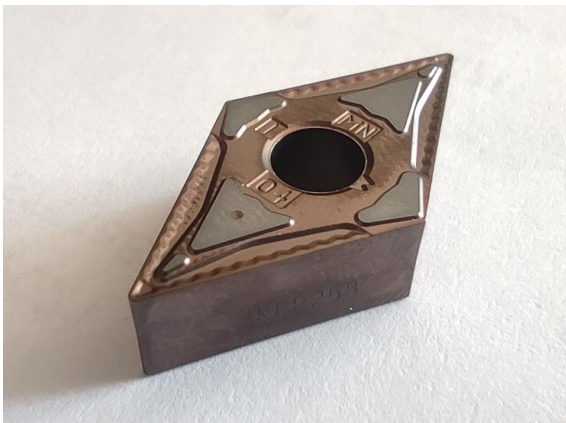
4.2 Použitá aparátúra pre experimentálne obrábanie

4.2.1 Nástroje pre obrábanie

V tejto kapitole je nutné predstaviť konkrétne nástroje, ktoré boli pri obrábaní využité. Ako už je vyššie spomenuté, jedná sa o negatívne nástroje tvaru D. Ich uhol geometrie je 55 stupňov a budú sa líšiť len veľkosťou polomeru reznej špičky a geometriou utváračov triesky. Dĺžka reznej hrany je 15,5 mm a šírka tohto nástroja je 6,35 mm pre zabezpečenie dostatočnej tuhosti obrábacieho procesu. Nástroje sú neutrálne a majú 4 rezne špičky, čo dvojnásobne zvyšuje možnosť ich využitia v porovnaní s nástrojmi typu D s pozitívnym nastavením.

- **1-VBD-DNMG150604MN**

Tento nástroj od spoločnosti Kennametal má polomer reznej špičky 0,4 mm (Obr. 28). Jedná sa o nástroj, vyrobený z karbidu KCP25B. Je určený pre hrubovacie aj dokončovacie aplikácie. Najvhodnejšie pracuje pri reznej rýchlosti 195 m/min a posuve 0,1563 mm za otáčku.



Obr. 29 VRD - DNMG150608PM.



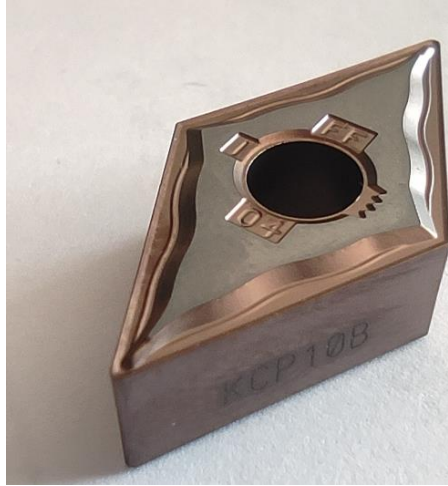
Obr. 28 VRD - DNMG150604MN.

- **2-VBD-DNMG150608PM**

Tento nástroj od spoločnosti Sandvik Coromant má polomer reznej špičky 0,8 mm (Obr.29). Jedná sa o nástroj, vyrobený z karbidu 4425. Je určený pre hrubovacie aj dokončovacie operácie. Najvhodnejšie pracuje pri reznej rýchlosti 250 m/min a posuve 0,15-0,5 mm za otáčku.

- **3-VBD-DNMG150604FF**

Tento nástroj od spoločnosti Kennametal má polomer reznej špičky 0,4 mm (Obr. 30). Jedná sa o nástroj vyrobený z karbidu KCP10B. Je určený pre polo-hrubovacie aj dokončovacie operácie. Najvhodnejšie pracuje pri reznej rýchlosti 215 m/min a posuve 0,06-0,15 mm za otáčku.



Obr. 30 VRD - DNMG150604FF.



Obr. 31 VRD - DNMG150608PM.

- **4-VBD-DNMG150608PM**

Tento nástroj od spoločnosti Kennametal má polomer reznej špičky 0,8 mm (Obr. 31). Jedná sa o nástroj vyrobený z karbidu KCP10. Je určený pre hrubovacie aj dokončovacie aplikácie. Najvhodnejšie pracuje pri reznej rýchlosti 190 m/min a posuve 0,15-0,3 mm za otáčku.

- **5-VBD-DNMG150604PM**

Tento nástroj od spoločnosti Kennametal má polomer reznej špičky 0,4 mm (Obr. 32). Jedná sa o nástroj, vyrobený z karbidu KCS10B. Je určený pre polo-hrubovacie aj dokončovacie operácie. Najvhodnejšie pracuje pri reznej rýchlosti 190 m/min a posuve 0,06-0,15 mm za otáčku. Jedná sa o polo-pozitívny nástroj.



Obr. 32 VRD - DNMG150604PM.

4.2.2 Sústruh SV 18



Obr. 33 VRD - DNMG150604PM.

Obrábanie bolo vyhotovená na hrotovom sústruhu SV 18 RA (Obr. 33). Točná dĺžka tohto stroja je 1000 mm. Otáčky vretena boli v minulosti výrobcom limitované na 2800 otáčok, avšak sústruh na ktorom bol experiment vykonaný zvládal maximálne 2400-2500 otáčok za minútu. Obrobok bol upnutý v trojčelust'ovom skľučovadle podporený hrotom. Výkon elektromotora je 6 kW a celková hmotnosť stroja počítá 1800 kg.

4.2.3 Meranie drsnosti povrchu

Meranie drsnosti bolo vyhotovené pomocou vreckového drsnomeru TR100 (Obr. 34). Drsnomer má merací rozsah Ra od 0,05 – 15 mikrometrov. Výšku profilu Rz je možné merať v meracom rozsahu 0,1 – 50 mikrometrov. Merania sú vyhotovené po 20 meraní na obvode každých 50 mm. To znamená, že každý obrobok bol meraný na 200 miestach a výsledky boli spriemerované pomocou programu excel.



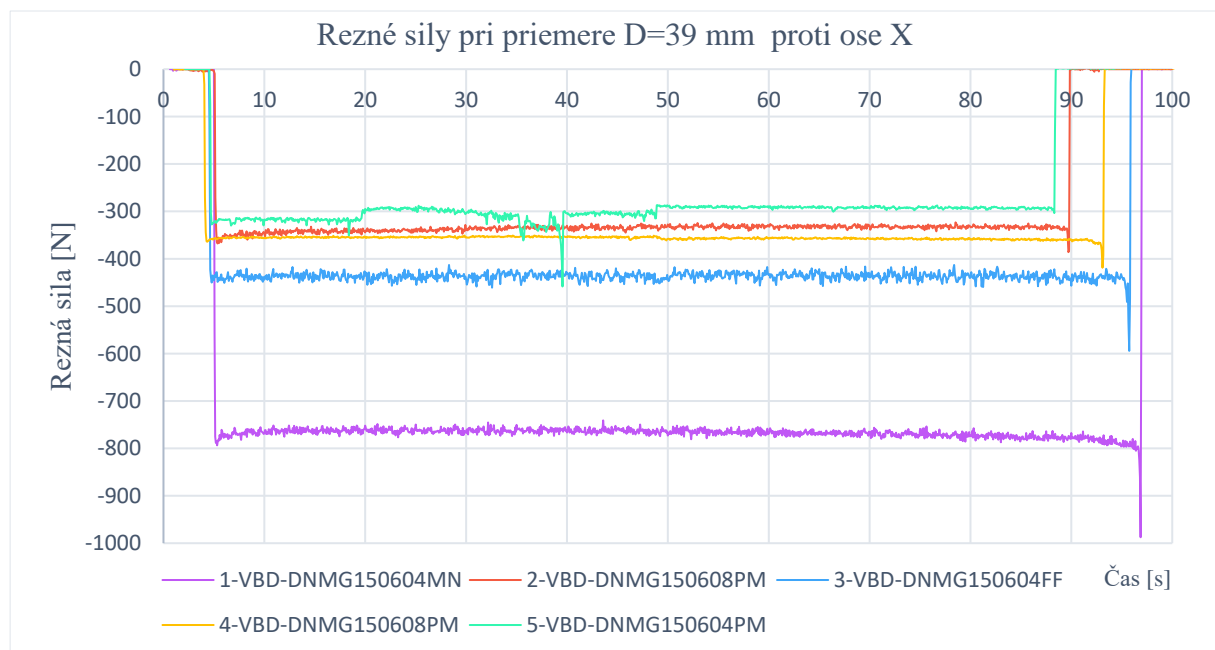
Obr. 34 Drsnomer TR100.

4.3 Výsledky merania rezných síl

Meranie prebiehalo po celej dĺžke obrábanej plochy pomocou dynamometra. Pre rozsiahle grafické zobrazenie a veľké množstvo údajov bude táto časť zameraná hlavne na vyhodnocovanie zaujímavých priemerov, kedy dochádzalo k zmenám veľkostí pravdepodobne zapríčinených vznikom nútených a samobudených kmitov. Za neutrálnu hodnotu budeme považovať priemer 42, respektíve 39 milimetrov, kedy sa rozloženie a veľkosť rezných síl výrazne nemenila.

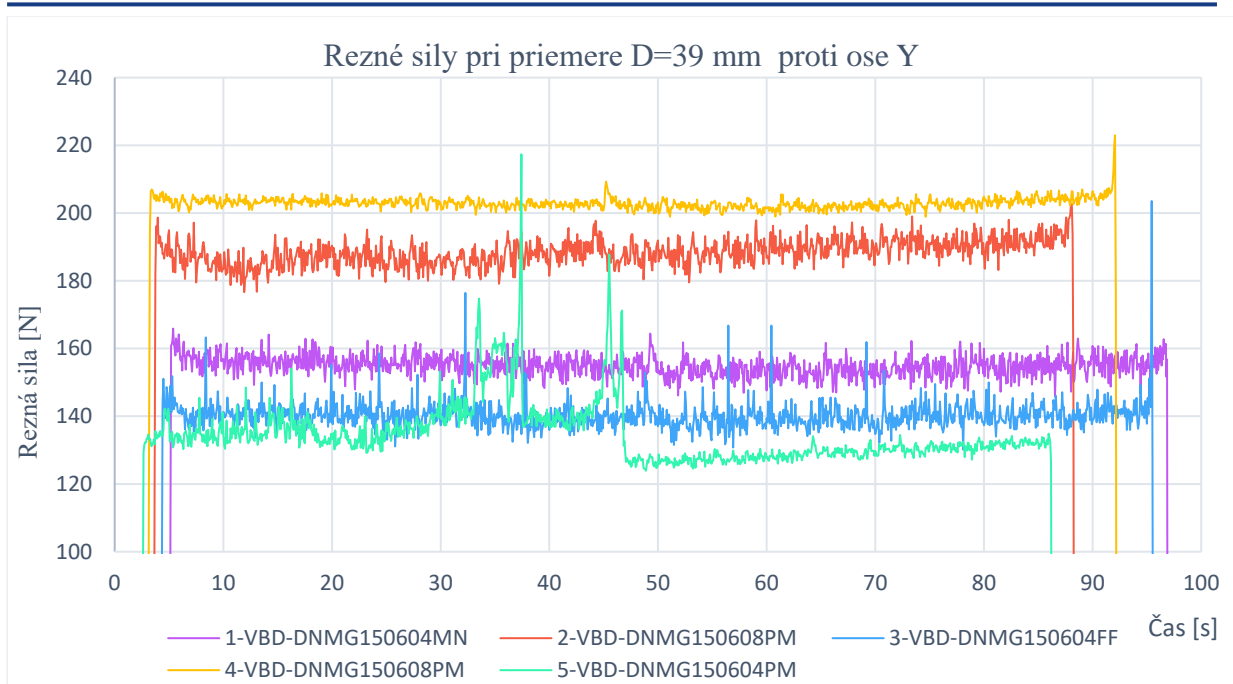
4.3.1 Meranie rezných síl na priemere 39 milimetrov

Táto podkapitola obsahuje grafy, ktoré reprezentujú veľkosti rezných síl vo všetkých osách obrábania. Priemer 39 milimetrov bol zvolený ako neutrálna hodnota, kedy sa štíhlostný pomer pohybuje okolo hodnoty 10 medzi priemerom a dĺžkou obrábaného materiálu. V týchto štíhlostných pomeroch by obrábanie malo prebiehať konvenčne, bez vznikajúceho chvenia a vibrácií. Nástroje by mali správne oddelovať materiál. Nástroje sú očíslované od 1-5 ako v predchádzajúcej kapitole. Výkyv pri nástroji č. 5 je spôsobený namotaním triesky a jej nepriaznivým delením. Preto sa pri tomto priemere hodnoty reznej sily nebudú vyhodnocovať.



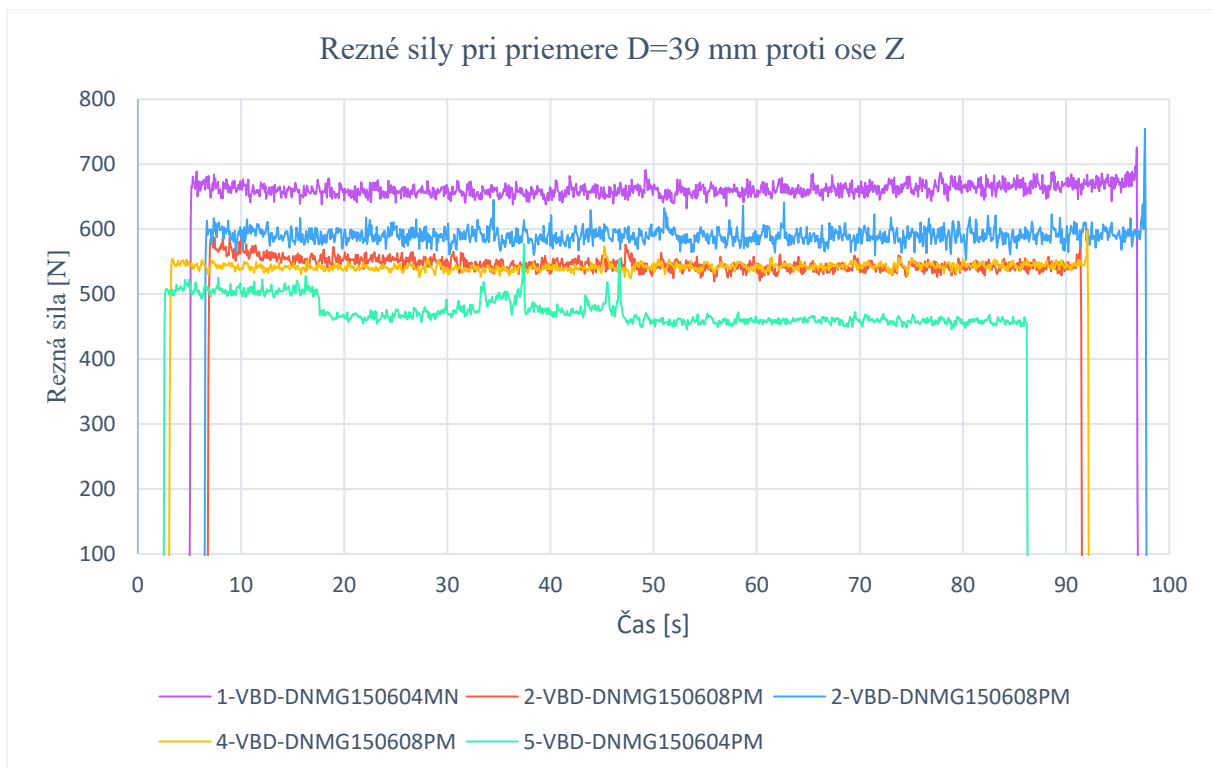
Obr. 34 Graf priebehu rezných síl v ose X.

Počiatkové hodnoty rezných síl v ose X je možné vidieť na obrázku (Obr. 34). Najväčšiu hodnotu reznej sily má doštička č.1 s najostrejším utváračom a to približne 870 N. Nástroje s menšou špičkou majú v ose X väčšiu reznú silu ako nástroje s väčším polomerom. To je pravdepodobne spôsobené väčšou bočnou plochou nástroja, ktorá je v reze a ich jednotlivou geometriou. V tejto ose je sila v záporných hodnotách, pretože nastavenie súradnicového systému dynamometru zobrazuje os X obrátene.



Obr. 35 Graf priebehu rezných síl v ose Y.

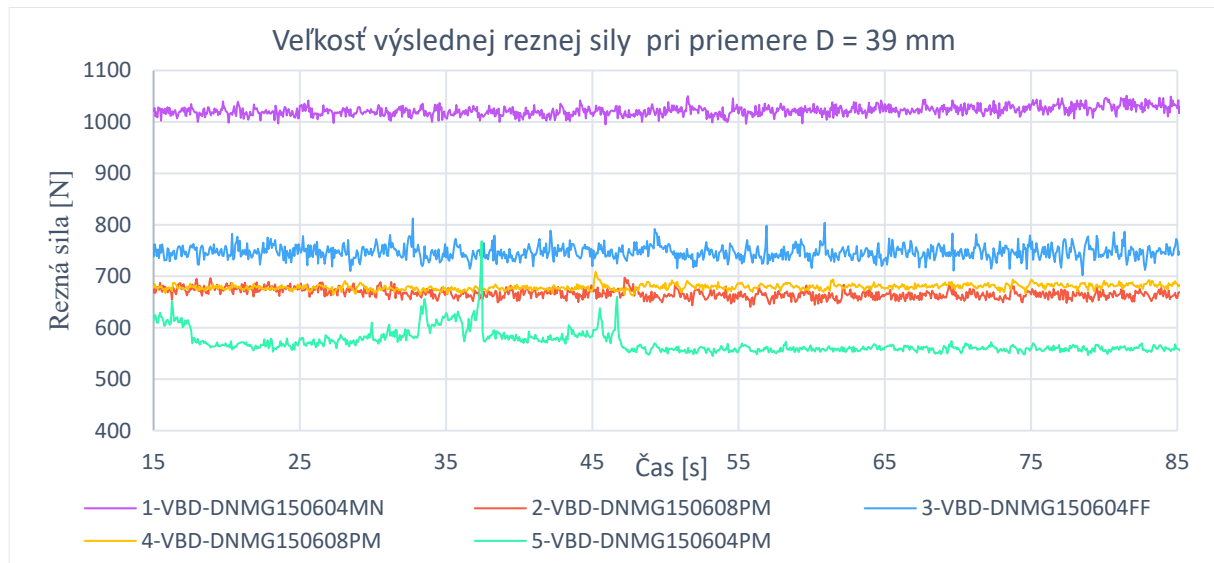
V ose Y je zřejmé, že najväčšie hodnoty rezných síl dosahujú nástroje, ktorý majú polomer špičky 0,8 mm (Obr. 35). Je to spôsobené väčším rádiusom, a teda aj väčšou oblou plochou, ktorá odtláča obrábaný diel od rezu. Najväčšiu hodnotu dosahuje VRD č.4 a to viac ako 200 N a VRD č.2 a to približne 190 N. Najnižšiu hodnotu reznej sily má VRD č.3 a to približne 130 N.



Obr. 36 Graf priebehu rezných síl v ose Z.

Z obrázku (Obr. 36) je zjavné, že najväčšiu reznú silu opäť dosahujú v ose Z doštičky s menším polomerom špičky. Je to pravdepodobne spôsobené menšou plochou v mieste rezu. Pri rovnakom posuve a rovnakých otáčkach je rezná plocha menšia a tým je sila väčšia. Pre VRD

č.1 dosahuje hodnôt až 670 N. Najmenšiu hodnotu má VRD č.5, ktorá na seba namotávala triesku a plocha mohlo byť teoreticky menšia.

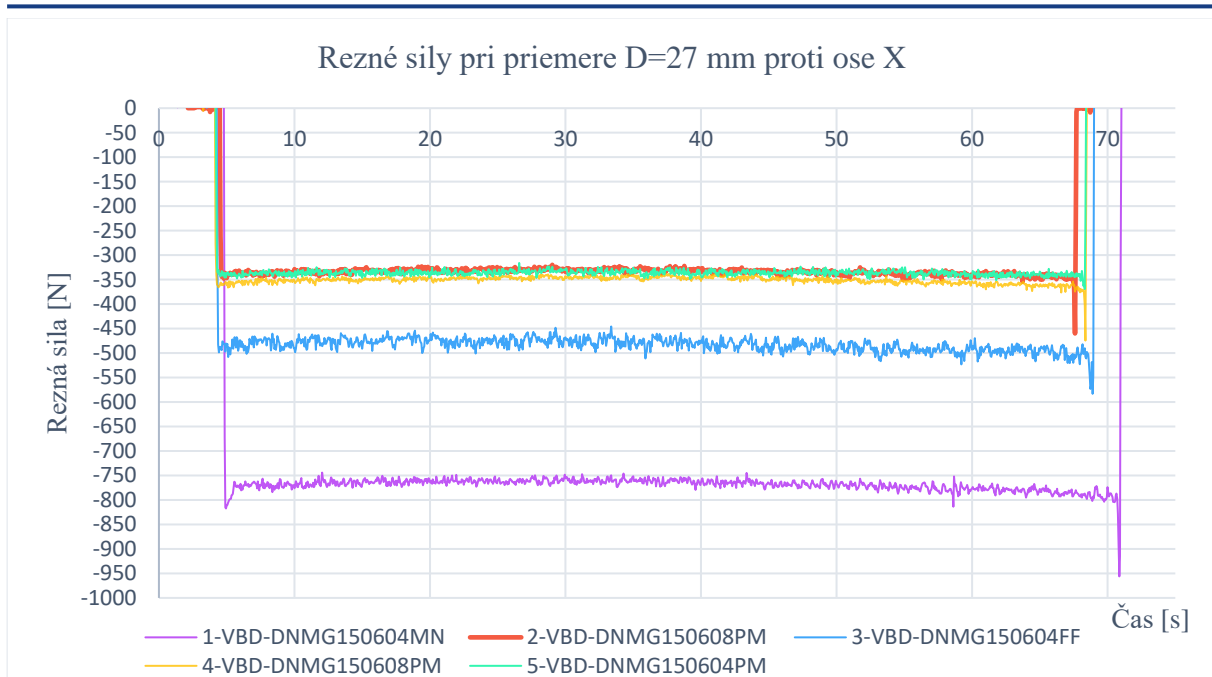


Obr. 37 Graf priebehu výslednej reznej sily.

Súčtom rezných síl pri priemere 39 milimetrov môžeme vidieť, že najväčšiu reznú silu vygeneroval nástroj č.1 jej hodnota je viac ako 1000 N. Druhým nástrojom je opäť VRD s polomerom špičky 0,4 mm a to na hodnote 650 N. Výsledná rezná sila doštičky č.2 a č.4 so špičkou 0,8 milimetra je okolo 670 N. Peaky pri grafe nástroja č.5 sú spôsobené nesprávnym odvodom triesky a jej hromadením.

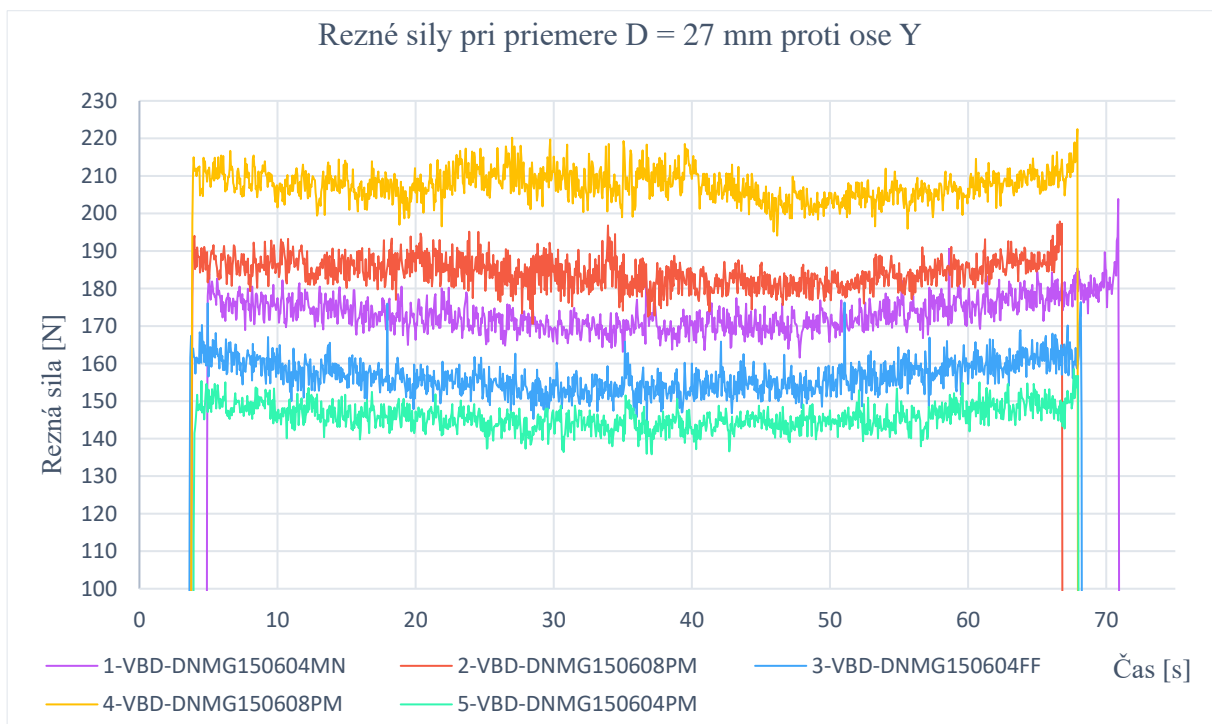
4.3.2 Meranie rezných síl na priemere 27 milimetrov

Druhým z porovnávaných priemerov je priemer 27 mm. Predchádzajúce 3 priebehy obrábania nebudú v praktickej časti spracované, pretože ich priebehy neboli výsledkami zaujímavé. Preto sa pre porovnanie táto kapitola presunie k priemere 27 mm. (Obr. 38) Zobrazuje veľkosť rezných síl pri priemere 39 milimetrov v ose X. Úber materiálu ap je ako pri každom prejazde 1,5 mm. Hodnoty všetkých síl pre každú doštičku je trochu menší ako pri predchádzajúcich prejazdoch. Hovoríme o jednotkách až desiatkach newtonov. Na grafe je však možné pozorovať, že zo začiatku do stredu polotovaru rezné sily trochu klesajú. Zároveň sa od stredu následne zdvíhajú. To by mohlo značiť vibrácie a odtlačanie obrobku od nástroja. Zároveň je možné vidieť, že VRD č.5 má veľmi podobnú reznú silu, ako VRD č.2 a č.4, ktoré majú väčšiu reznú špičku ako č.5. Ich rovnaká veľkosť môže byť spôsobená nepriaznivým odvodom triesky a následne zväčšením kontaktnej plochy.



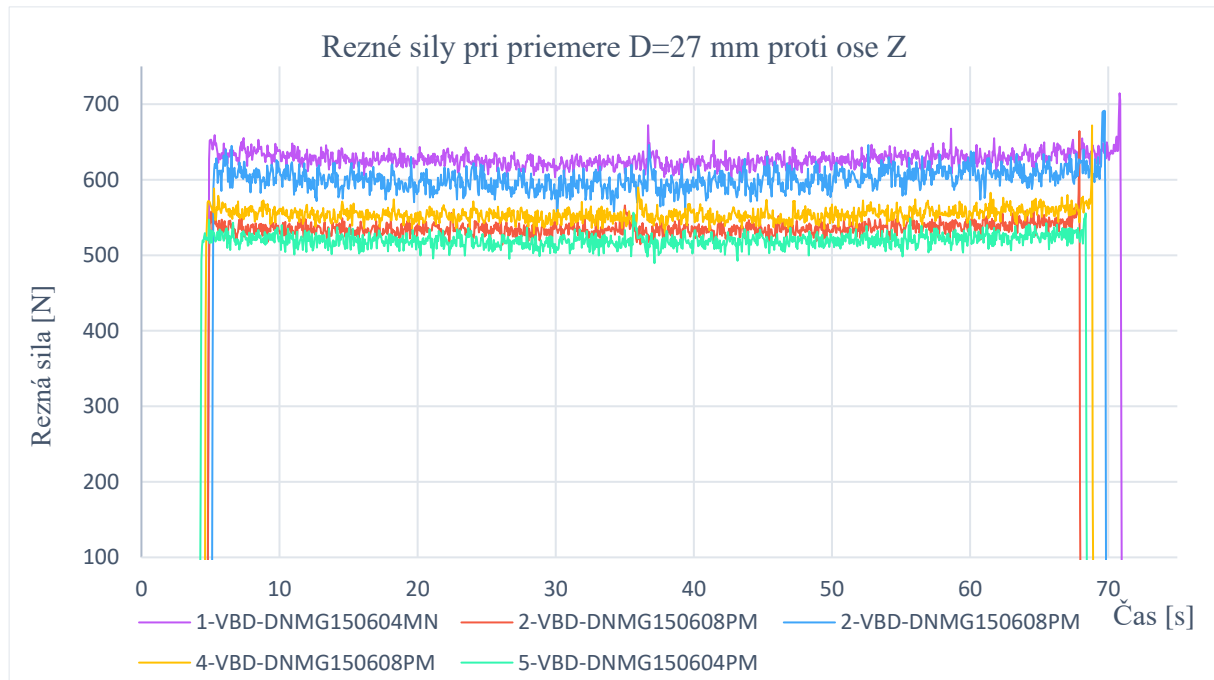
Obr. 38 Graf priebehu rezných síl v ose Y.

V grafe osy Y (Obr. 39) je možné pozorovať už výrazne väčšiu volatilitu a výkyvy ako pri grafe X z priemeru 39mm. Ako v predchádzajúcom grafe, sa opäť ukazuje pokles niekde v oblasti stredu obrábanej časti pri všetkých VRD. Výraznými sú však VRD č.2 a č.4 s špičkou 0,8 mm. V oblasti okolo 180 mm od začiatku obrábania začalo pravdepodobne dochádzať k vibráciám a istej periodickej zmeny reznej sily v závislosti na priemere triesky. Mohlo dochádzať k nepozorovateľným kmitom, ktoré tento jav zapríčiňovali. Najmenšiu reznú silu a teda najmenší tlak na obrobok od nástroja mala VRD č.5.



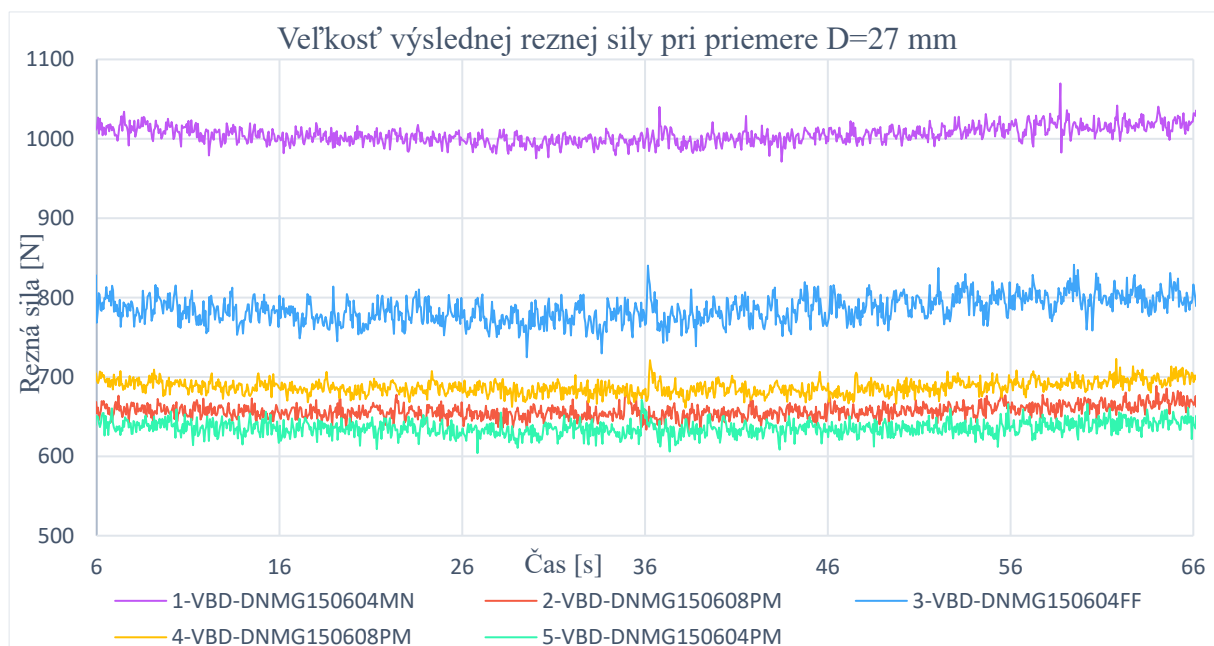
Obr. 39 Graf priebehu rezných síl v ose Y.

V grafe osy Z (Obr. 40) pod týmto textom je možné vidieť, že rozloženie veľkostí rezných síl od jednotlivých nástrojov svoje poradie takmer nezmenil. VRD č.2 a č.4 čiastočne obmenili svoju pozíciu. Opäť je viditeľný pokles reznej sily pri všetkých nástrojoch. Najvýraznejšie je to pravdepodobne pri VRD č. 2. Ako aj pri iných rezných silách tohto priemeru je možné vidieť mierny pokles v strednej časti grafu a teda aj obrábaného dielu.



Obr. 40 Graf priebehu rezných síl v ose Y.

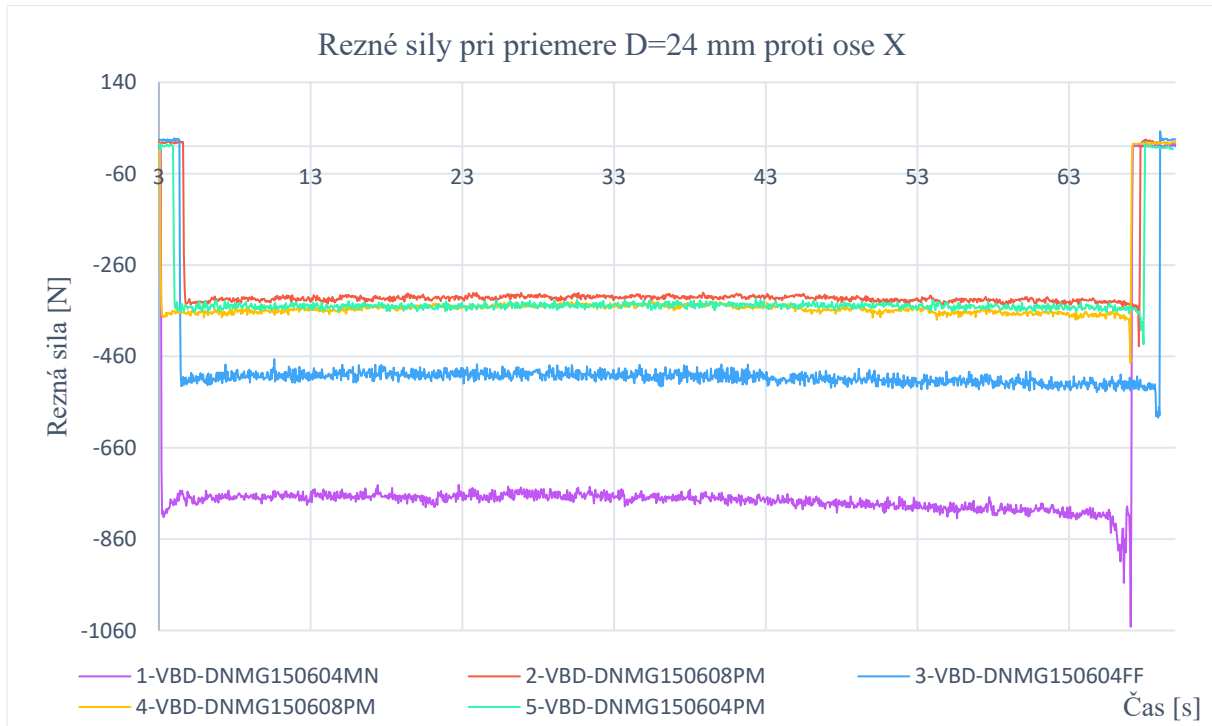
Na grafe výslednej reznej sily (Obr. 40) pri priemere 27 mm je možné vidieť ako aj pri grafoch jednotlivých zložiek určitý pokles. Premennivosť a zmena v čase je tu však výraznejšia ako pri základnom priemere 39 mm. Pri tomto priemere teda mohlo dochádzať k vibráciám, ktoré spôsobovali poklesy a rasty amplitúd signálu.



Obr. 40 Graf priebehu výsledných rezných.

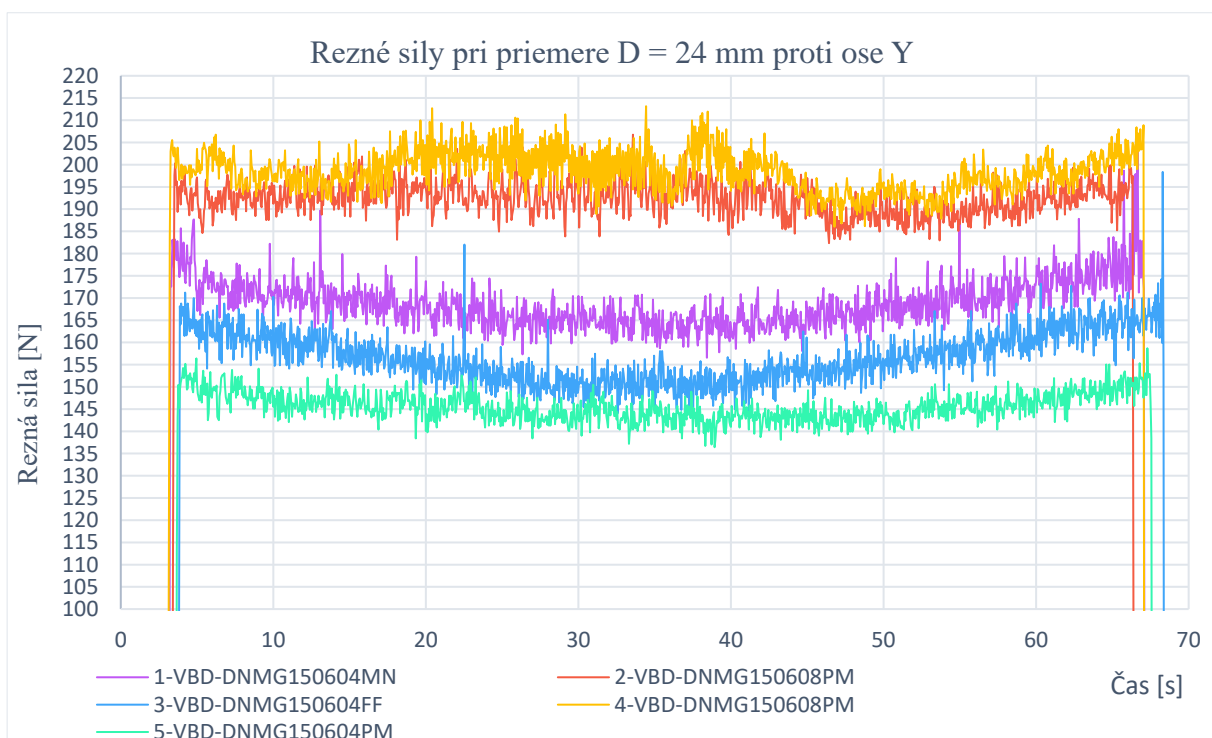
4.3.3 Meranie rezných síl na priemere 24 milimetrov

Pri obrábání priemeru 24 mm začalo dochádzať k viditeľným stopám na povrchu obrobkov. Vzhľadom na tento jav sa museli premenlivé rezné sily zobrazit' aj pri meraní rezných síl.



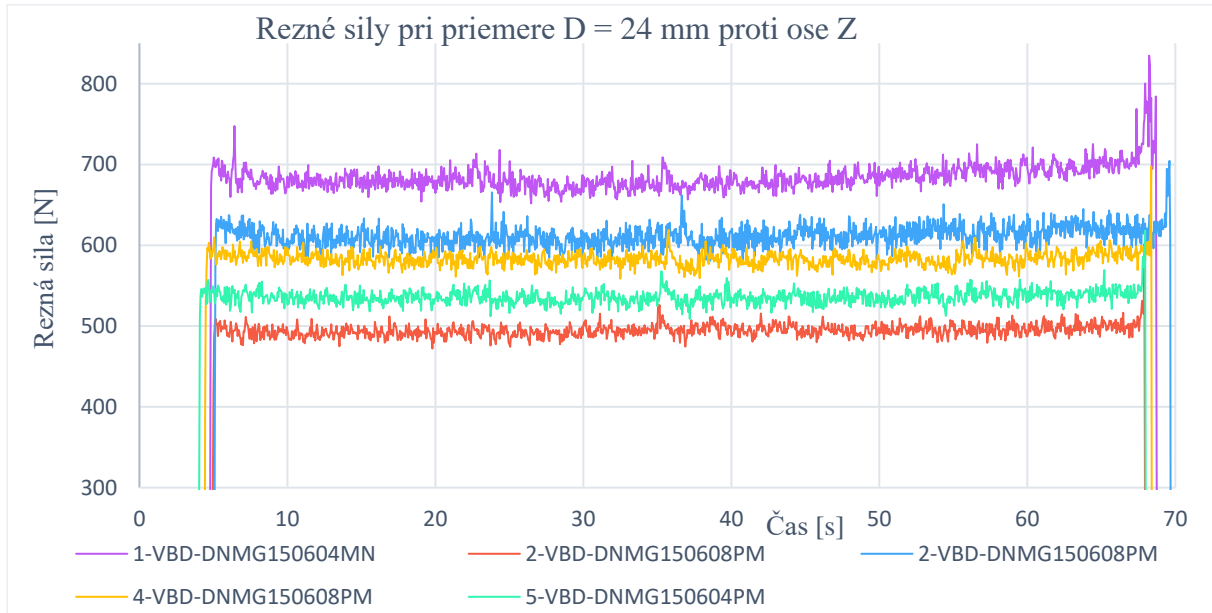
Obr. 41 Graf priebehu rezných síl v ose X.

Pomery rezných síl v ose X sa nezmenili (Obr. 41). To by malo byť samozrejmosťou vzhľadom na to, že na túto silu vplyva posuv na otáčku, ktorý sa v priebehu celého obrábania nezmenil za predpokladu, že je obrábaný diel v tomto smere tuhý. K drobným zmenám však dochádzalo.



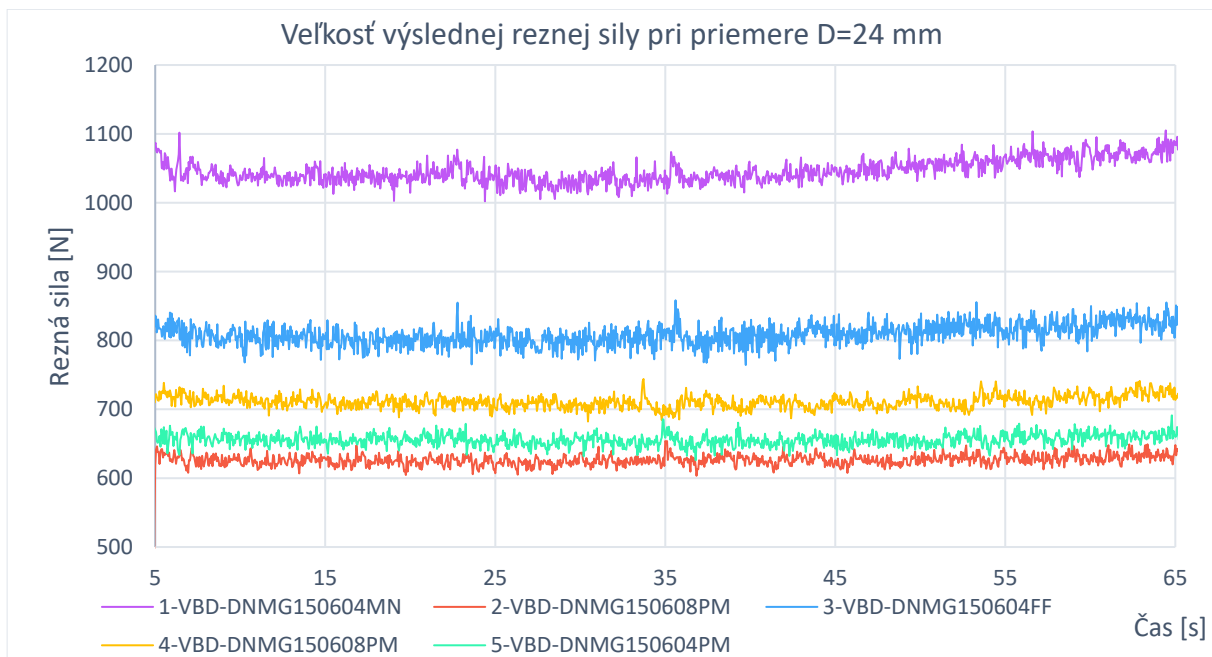
Obr. 42 Graf priebehu rezných síl v ose Y.

Na rozdiel od osi X sa v ose Y prejavila veľmi výrazná kolísavosť (Obr. 42). Veľmi výrazné boli najmä nástroje č.2 a č.4 s rádiusom špičky 0,8. Zároveň doštička č.5 nemala tak výraznú kolísavosť a neodtláčala obrobok. To môže byť spôsobené počiatočnými vibráciami. Ostatné nástroje so špičkou 0,4 mm zjavne pôsobili silou od nástroja kolmou na os obrábania a v rizikových miestach prehýbali obrobok. Tieto nárasty a poklesy v grafe sú pravdepodobne spôsobené vibráciami, ku ktorým dochádzalo viditeľne aj na povrchu obrobku.



Obr. 43 Graf priebehu rezných síl v ose Z.

V ose Z (Obr. 43) sa menilo poradie rezných síl od nástrojov, ktoré vytvárali vibrácie a zľú drsnosť na povrchu obrobku. Celkovo síly okrem VRD č.5 výraznejšie klesli ako pri predchádzajúcich prejazdoch. Najvýznamnejší pokles sa prejavil pri druhom nástroji.

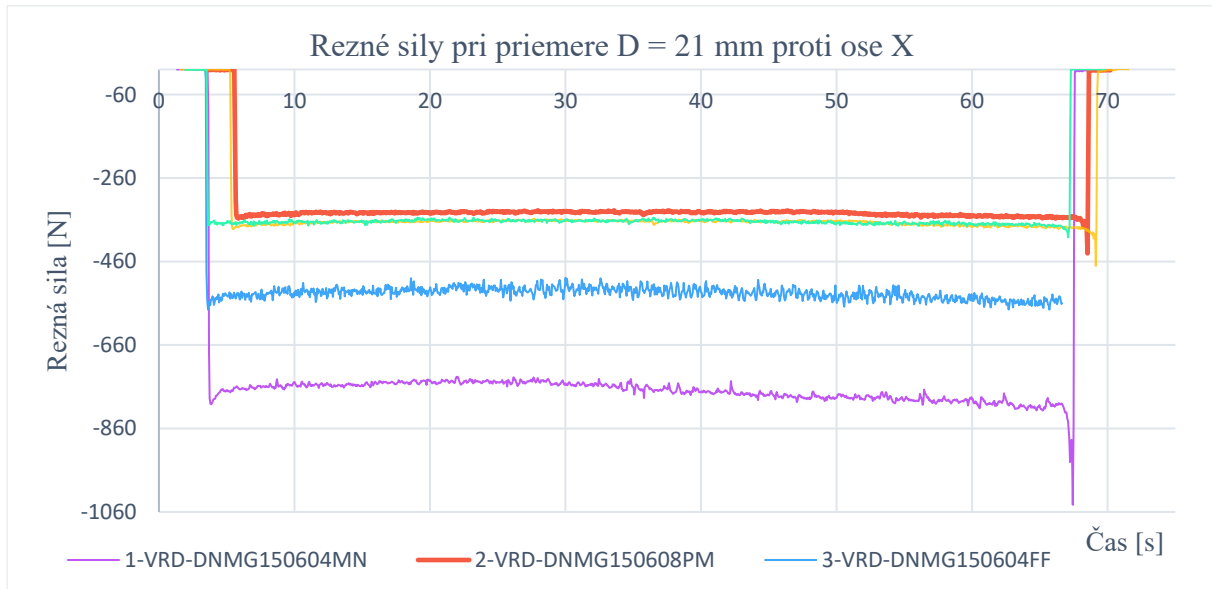


Obr. 44 Graf priebehu rezných síl v ose Z.

Z výslednice rezných síl je zjavný nárast niektorých zložiek napríklad VRD č.1. Taktiež sa to ale prejavilo pri ostatných nástrojoch (Obr. 44). Po dokončení obrábania na tento priemer sa už výrazne prejavili stopy po nástroji na povrchu materiálu pri VRD č.2 a č.3.

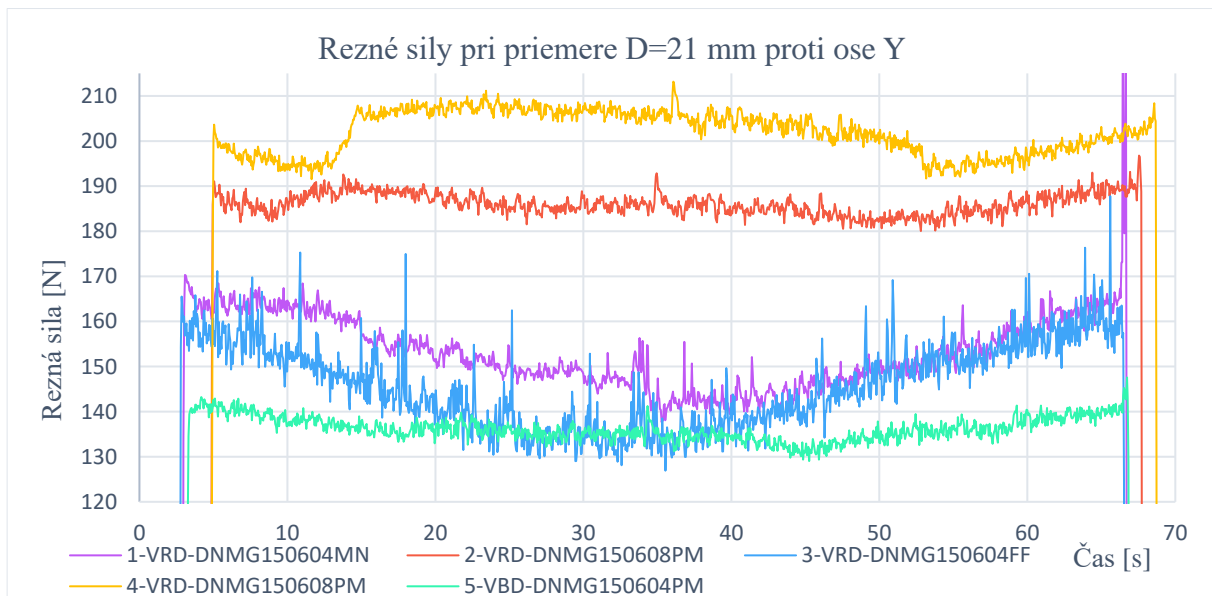
4.3.4 Meranie rezných síl na priemere 21 milimetrov

Najzaujímavejšie výsledky rezných síl je možné vidieť na grafe osi Y. Zatiaľ čo nástroje 2. a 4. s väčším polomerom špičky tlačia do obrobku a vytvárajú vibrácie, pri ostatných doštičkách je vidieť ako sa snažia uhnúť materiálu, nevytvárajú teda tak veľké rezné sily a proces prebiehal hladšie bez výraznejších vibrácií.



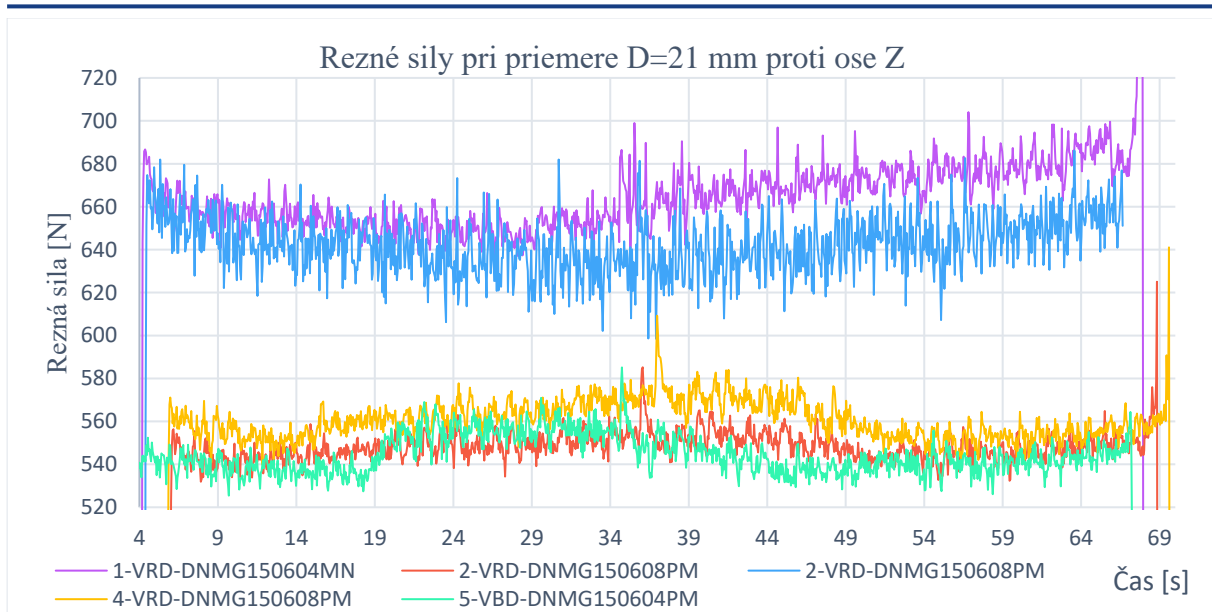
Obr. 45 Graf rezných síl v ose X.

V grafe (Obr. 45) sa rozmiestnenie a priebeh rezných síl nezmenil až na ich veľkosti. Je viditeľné, že si rezné sily v tejto ose udržiavali stabilitu bez výraznejších amplitúd.



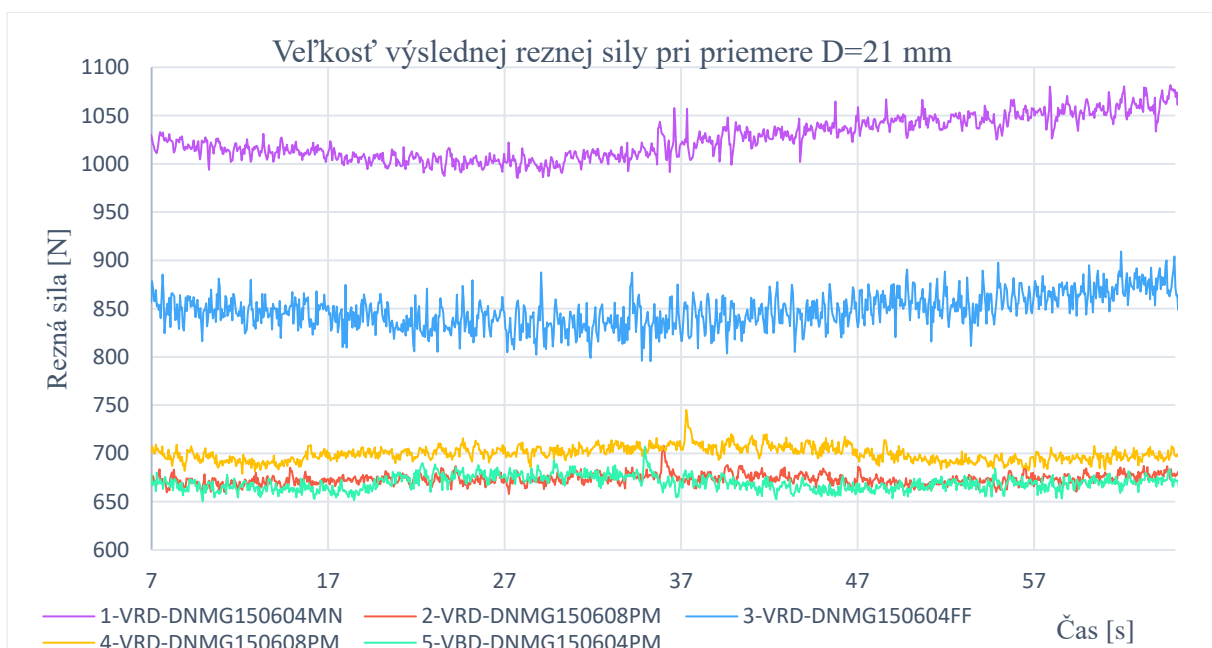
Obr. 46 Graf rezných síl v ose Y.

Osa Y (Obr. 46) pri najnižšom priemere má najzaujímavejší priebeh. Je vidieť veľké výkyvy spôsobené polomerom špičky 0,8 a ich vyššie hodnoty v kritických miestach obrábania. Tá premenlivosť bola spôsobená chvením obrobku. Pri VRD s špičkou 0,4 milimetra je zrejmy pokles a odtlačanie v critickej oblasti s veľkými výkyvmi amplitúd. Aj pro týchto nástrojoch už pravdepodobne vznikali vibrácie.



Obr. 47 Graf rezných síl v ose Z.

Vibrovanie a premenlivé priebehy sú viditeľné aj na grafe osi Z (Obr. 47). Prechodné signály sú veľmi výrazné na úrovniach pod 600 Newtonmi. Práve tieto 3 nástroje č.2, č.4 a č.5 výrazne narušili plynulosť povrchu vyrobených dielov. Pri ich priebehoch je v čase viditeľné, kedy začalo dochádzať k chveniu.



Obr. 48 Graf výslednice rezných síl.

Výsledná rezná síla nebolo výrazne odlišná od predchádzajúceho prejazdu nástroja. Hodnoty boli veľmi podobné, miestami čiastočne premenlivejšie (Obr. 48). Celkový obraz rezných síl sa teda v priebehu obrábania dynamicky menil. Ak by sa chvenie pri obrábaní nevyskytlo, teoretické hodnoty rezných síl by sa tak výrazne nelíšili, a stabilne by sa udržiavali v určitom intervale. Výkyvy, ktoré sa vyskytovali od priemeru 27 mm však dokazujú existenciu kmitania a nestabilitu rezného procesu.

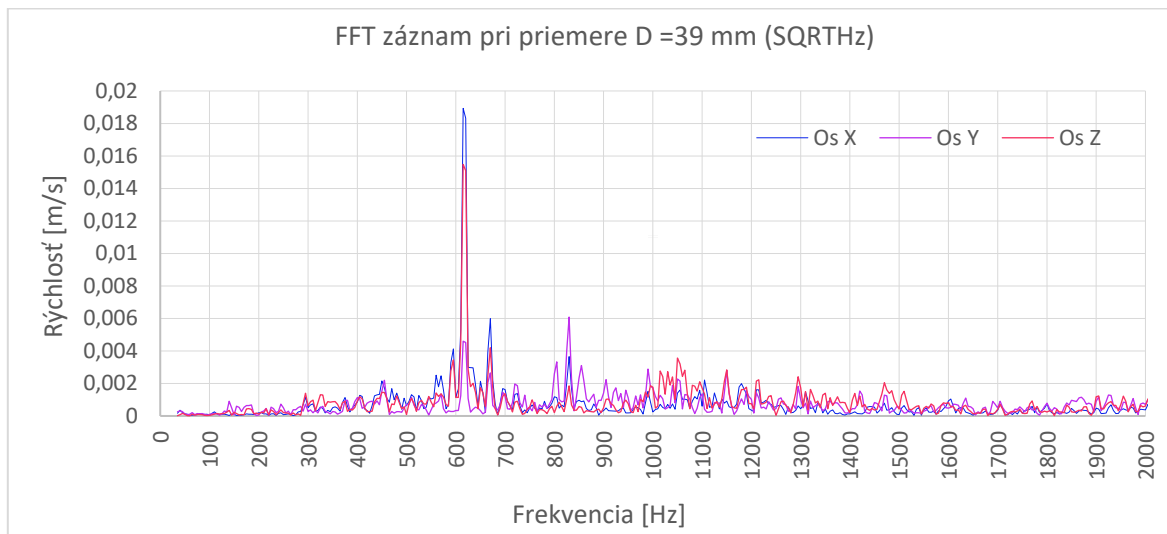
4.4 Výsledky merania vibrácií

Ako aj pri rezných silách, pri každom novom obrábanom priemere boli merané vibrácie pomocou akcelerometra. Meraná bola kritická časť kde je náchylnosť ku chveniu najvýznamnejšia. Taktiež bola meraná aj oblasť nájazdu do obrobku, avšak výrazne zaujímavejšie výsledky boli namerané v strednej časti obrobku. Preto sa ďalšia časť merania zameriavala len na vibrácie v oblasti od 160-250 mm od začiatku obrábania.

4.4.1 Meranie vibrácií na priemere 39 milimetrov

Podobne ako pri meraní rezných síl, určíme ako bazálne hodnoty amplitúd a frekvencií. Každá rezná doštička bude porovnaná pri konkrétnom priemere s ostatnými.

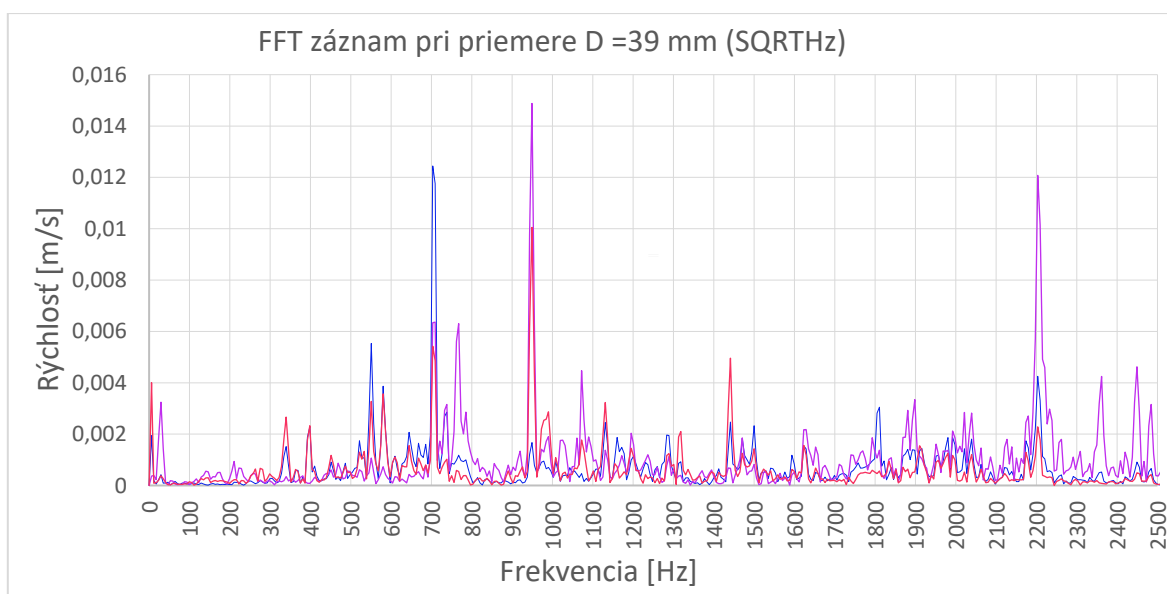
- **1-VBD-R04-DNMG150604MN**



Obr. 49 FFT VRD-DNMG150604MN .

Najvýznamnejšia frekvencia ktorá je dominantná pre obrábaný systém S-N-O je na úrovni 0,019 m/s pri 620 Hz. Zvyšné frekvencie sú viacnásobne nižšie (Obr. 49).

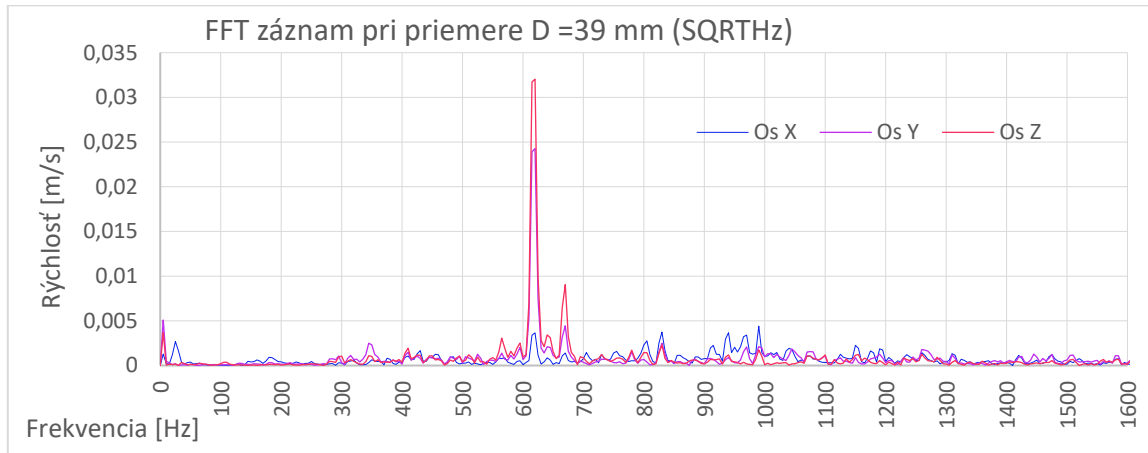
- **2-VBD-R08-DNMG150608PM**



Obr. 50 FFT VRD- DNMG150608PM.

Tento nástroj dosiahol nižších frekvencií ako prvý nástroj. Na druhej strane sa však objavujú iné výrazné frekvencie a to pôvodná frekvencia na úrovni 700 Hz a dve nové frekvencie na úrovni 950 Hz a 2200 Hz.

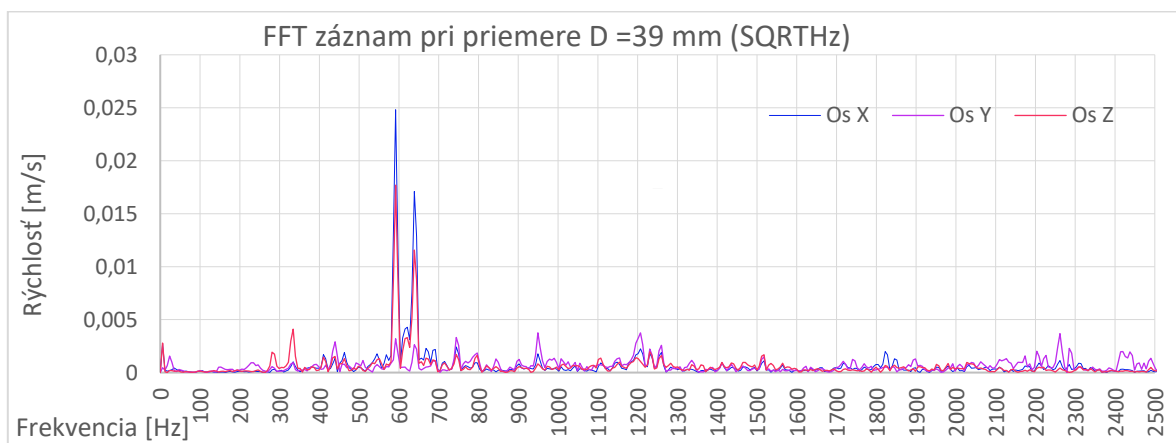
- **3-VBD-R04-DNMG150604FF**



Obr. 51 FFT VRD- DNMG150604FF.

Pri tomto nástroji sa opakuje podobný princíp ako pri VRD č.1 s polomerom špičky 0,4 mm. Najvýznamnejšia frekvencia je opäť na úrovni 620 Hz. Jej veľkosť je výraznejšia ako pri VRD č.1 na úrovni 0,033 m/s (Obr. 51).

- **4-VBD-R08-DNMG150608PM**

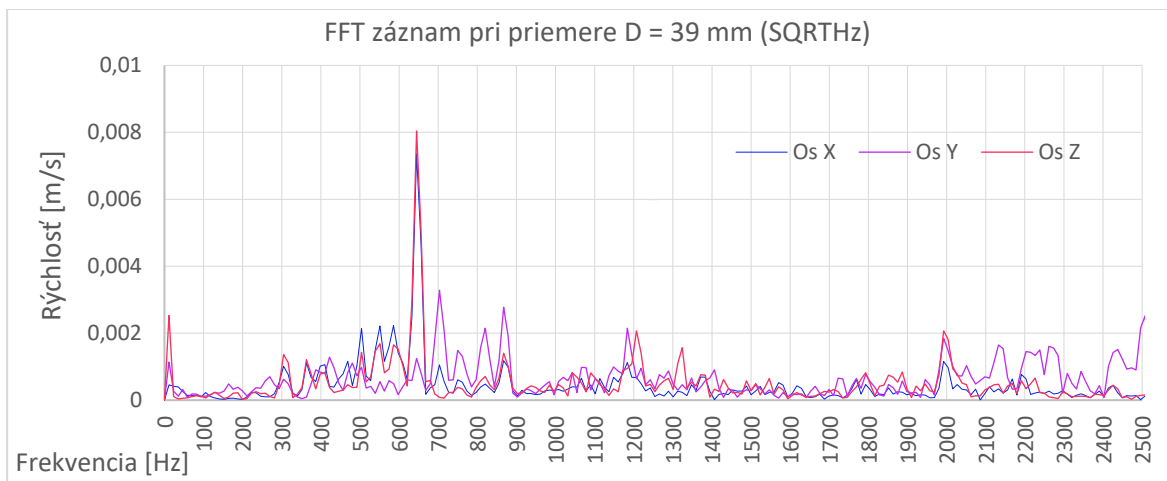


Obr. 52 FFT VRD - DNMG150608PM.

Pri tomto nástroji sa základná vlastná frekvencia čiastočne posunula pod 600 Hz. Ako aj pri iných nástrojoch s polomerom 0,8 mm sa tu začínajú objavovať nové frekvencie. (Obr. 52)

- **5-VBD-R04-DNMG150604PM**

Piaty použitý nástroj dodržiava vlastnú frekvenciu systému. Objavuje sa tu však mnoho nových frekvencií, pravdepodobne spôsobených nepriaznivým odvodom triesky a chvením.

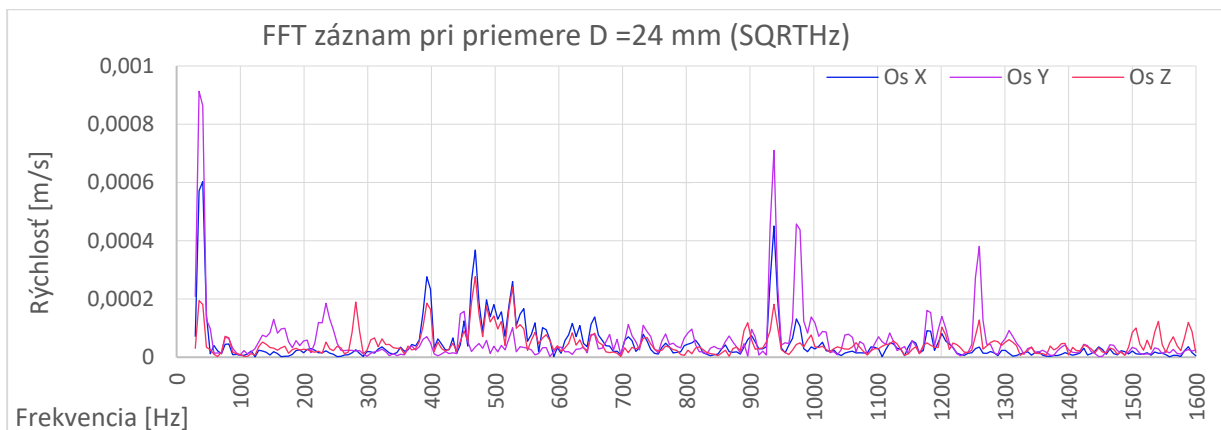


Obr. 53 FFT VRD - DNMG150604PM.

4.4.2 Meranie vibrácií na priemere 24 milimetrov

Pri zohľadňovaní výsledkov zanedbáme zvyšné prejazdy materiálom. Výsledky boli štandardne pomaly klesajúce respektíve pri niektorých grafoch rastúce a dochádzalo k pomalým pohybom vlastnej frekvencie sústavy.

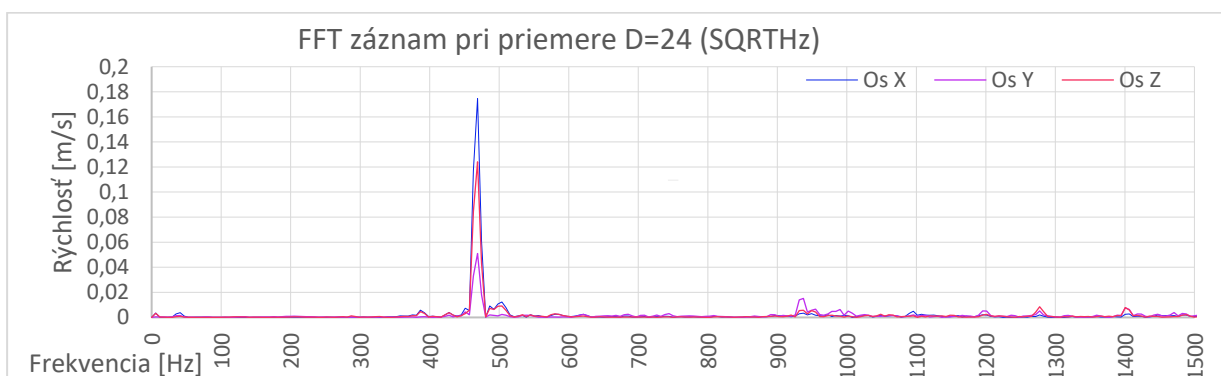
- **1-VBD-R04-DNMG150604MN**



Obr. 54 FFT VRD - DNMG150604MN.

Tento nástroj si stále drží širšie spektrum frekvencií a nízkych amplitúdach (Obr. 54). Pohybujú sa v jednotkách desaťtisíc. Vlastná frekvencia sa znížila a vznikli významné frekvencie v oblasti okolo 40 Hz a 930 Hz.

- **2-VBD-R08-DNMG150608PM**

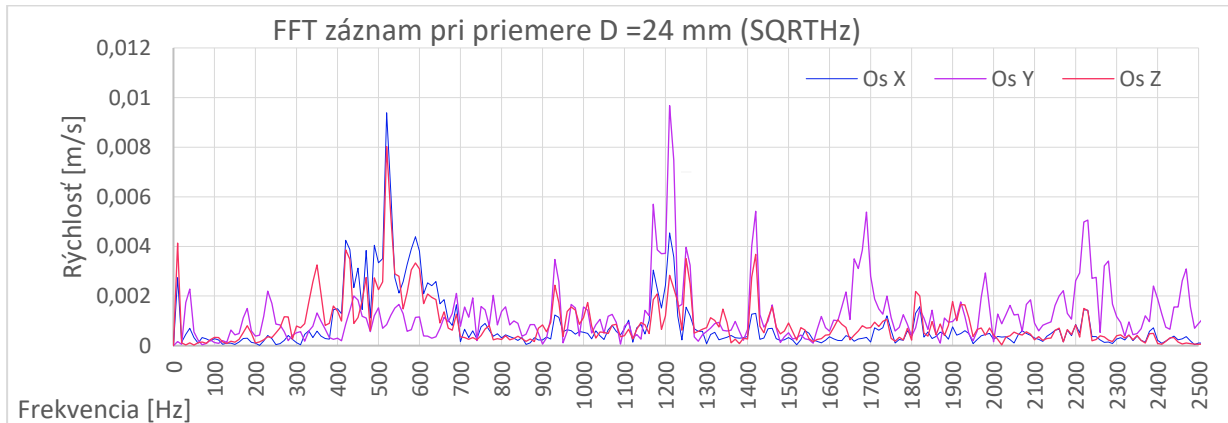


Obr. 55 FFT VRD - DNMG150608PM.

Tento nástroj s polomerom špičky 0,8 mm má vlastnú frekvenciu, a teda frekvenciu kmitanie už niekoľko rádov vyššiu ako nástroje s polovičným polomerom. Jej amplitúda na frekvencii 480 Hz je tak markantná, že prekryla ostatné frekvencie a niekoľkonásobne ich prekonalala. Pri porovnaní s priemerom 39 mm sa hodnoty zvýšili viac ako 10 násobne. Pri obrábacom procese dochádzalo k vibráciám, hluku a výsledky boli znateľné aj na povrchu materiálu (Obr. 55).

- **3-VBD-R04-DNMG150604FF**

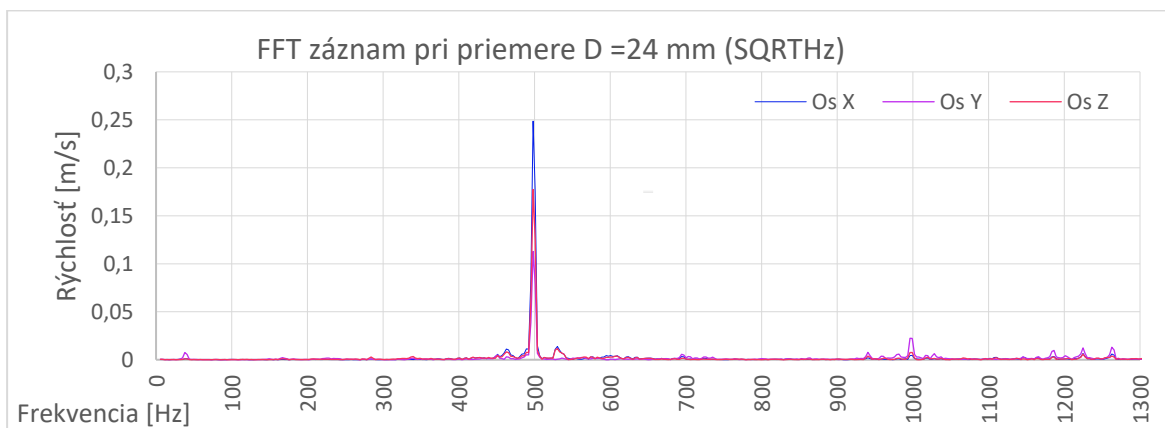
Tento nástroj s polomerom špičky 0,4 mm zaznamenal výrazne nižšie frekvencie ako nástroje s väčším polomerom. Pri obrábaní vznikali amplitúdy na frekvenciách 520 Hz, 1200 Hz 1700 Hz etc viz graf (Obr. 56). Dá sa povedať, že vibrácie spracované FFT boli dokonca nižšie, ako pri väčších priemeroch.



Obr. 56 FFT VRD - DNMG150604FF.

- **4-VBD-R08-DNMG150608PM**

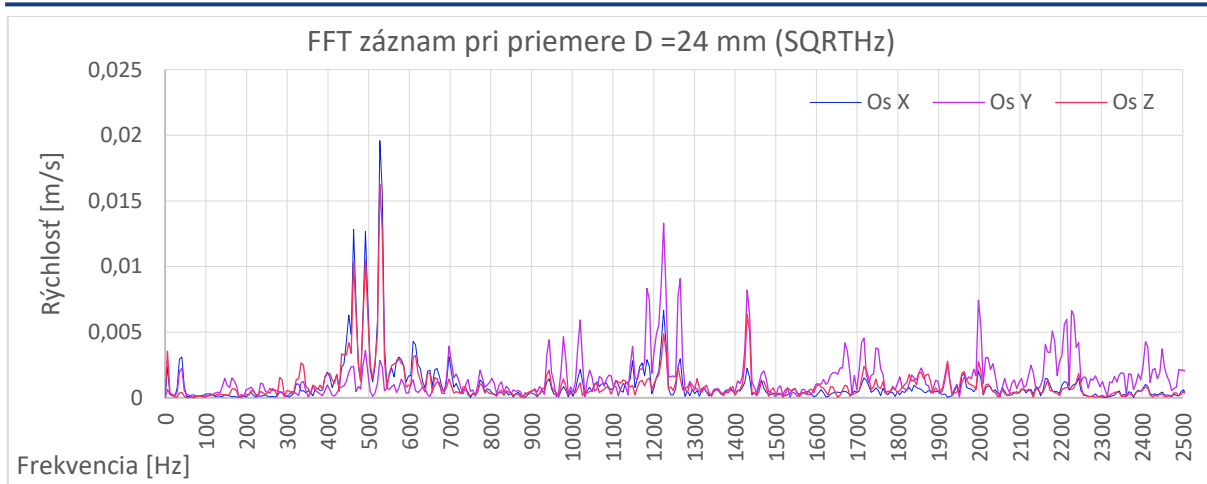
Pri tomto nástroji sa znova prejavuje veľkosť jeho špičky. Násobne sa prekonávajú vlastné frekvencie na úrovni 500 Hz. Obrábanie sprevádzalo viditeľné kmitanie a deje s ním spojené. Vlastná frekvencia výrazne zatienila ostatné frekvencie (Obr. 57).



Obr. 57 FFT VRD - DNMG150608PM.

- **5-VBD-R04-DNMG150604PM**

Napriek tomu, že tento nástroj má geometriu podobnú ako VRD č.1 a č.3, dochádzalo pri obrábaní ku vibráciám. Tie sú výrazné a znateľné na grafe (Obr. 58).



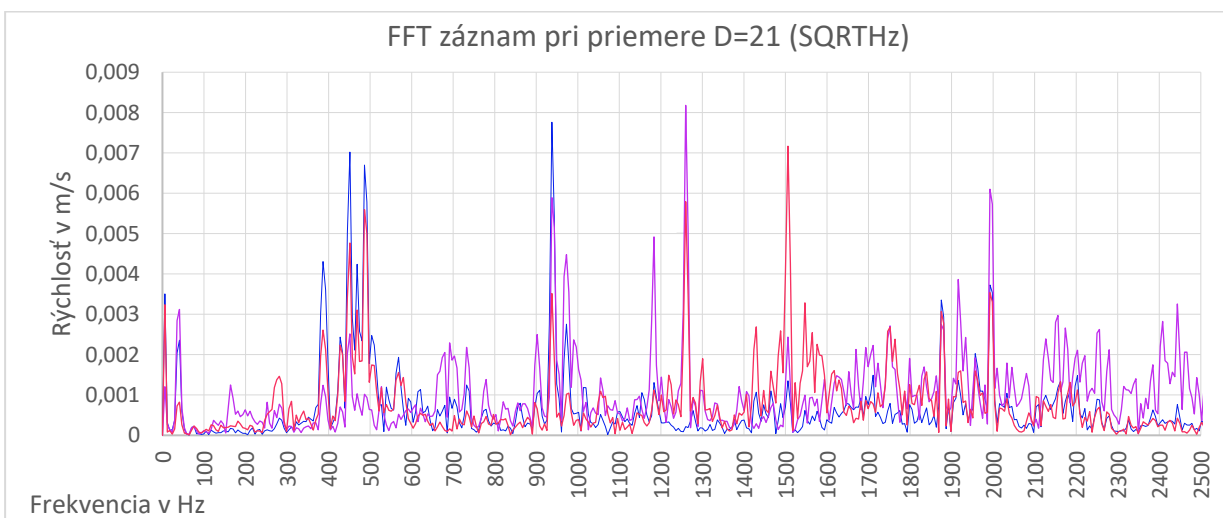
Obr. 58 FFT VRD - DNMG150604PM.

4.4.3 Meranie vibrácií na priemere 21 milimetrov

Na priemere 21 mm sa vykonal posledný prejazd s odberom 3 mm na priemer. Po tomto prejazde boli po 3 nástrojoch viditeľné stopy, akoby špirálovité zahĺbenia a nerovnosť povrchu. To sa zobrazilo aj grafoch vibrácií.

- **1-VBD-R04-DNMG150604MN**

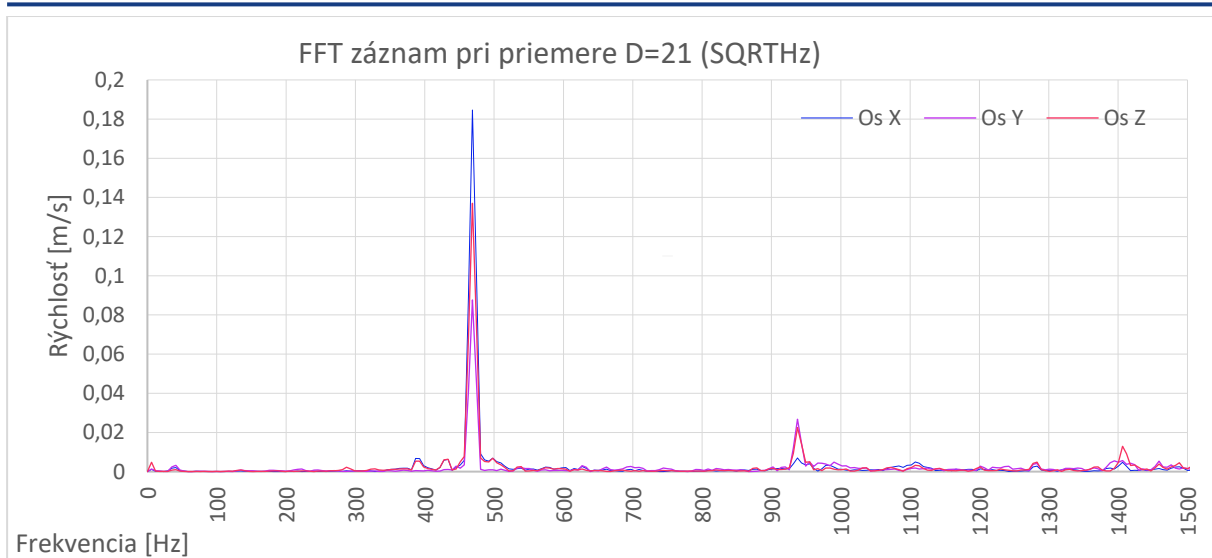
Prvý nástroj vytvoril veľmi dobrý povrch materiálu. Na frekvenciách a ich amplitúdach (Obr. 59) sa dá pozorovať, že sa zdvihli o jeden rád, avšak sú amplitúdy stále stovky krát menšie ako pri predchádzajúcich prejazdoch iných nástrojov. Najvyššou frekvenciou v ose Y 0,0083 m/s je možné vidieť na 1275 Hz.



Obr. 59 FFT VRD - DNMG150604MN.

- **2-VBD-R08-DNMG150608PM**

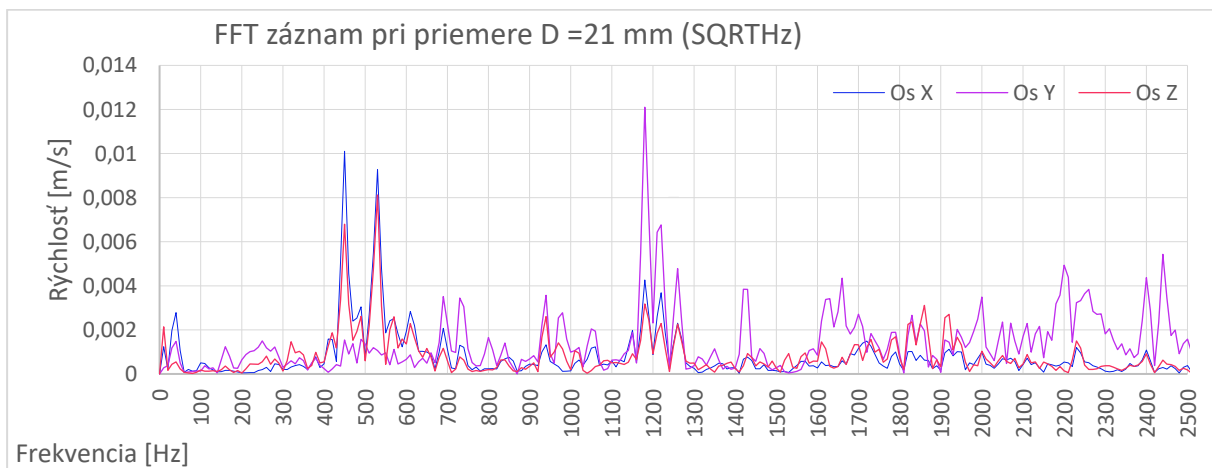
Nástroj č.2 má viditeľne vyššie vibrácie ako prvý nástroj. V porovnaní s prejazdom nástroja na priemere 24 mm, sa veľkosť amplitúdy na vlastnej frekvencii zvýšila len o 4 stotiny. Napriek tomu sú už vibrácie výrazné, a spôsobovali chvenie (Obr. 60). Vlastná frekvencia sa pri úbytku hmotnosti posunula len minimálne, avšak je možné pozorovať klesajúcu tendenciu.



Obr. 60 FFT VRD - DNMG150608PM.

- **3-VBD-R04-DNMG150604FF**

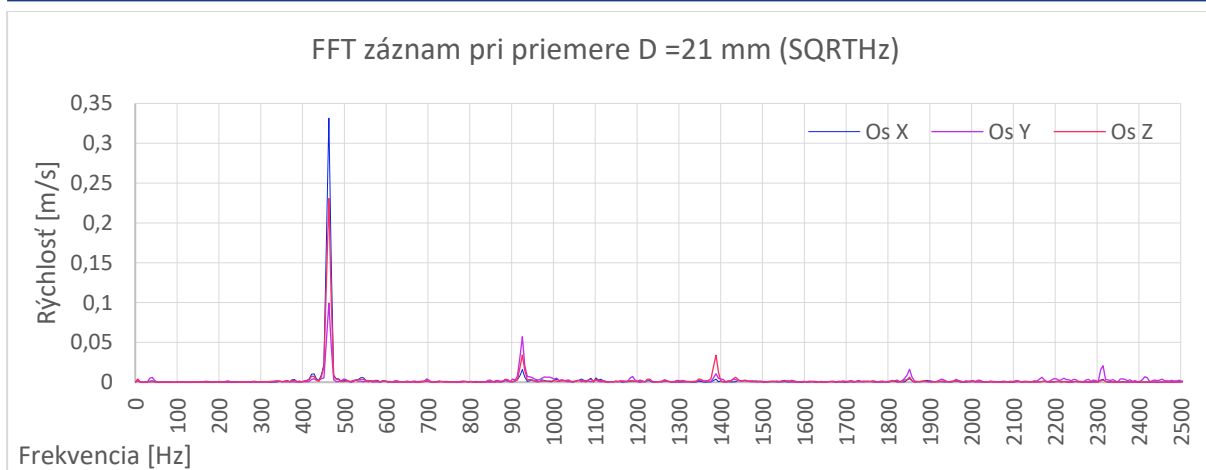
Ako aj pri predchádzajúcich nástrojoch, je možné pozorovať mierne zväčšenie amplitúd rýchlosti vibrácií (Obr. 61). Zvýšili sa približne o 5 tisícín m/s. Je nutné podotknúť, že najvyššie hodnoty nie sú na vlastnej frekvencii pri 450 Hz ale na úrovni 1190 Hz. Pri nižších veľkostiach rýchlosti je možné pozorovať aj iné amplitúdy, ktoré mohli byť spôsobené utváračom nástroja, ložiskami stroja alebo inými aspektami systému N-S-O. Zohľadňujúc maximá v osi Y, mohlo sa jednať o geometriu nástroja.



Obr. 62 FFT VRD - DNMG150604FF.

- **4-VBD-R08-DNMG150608PM**

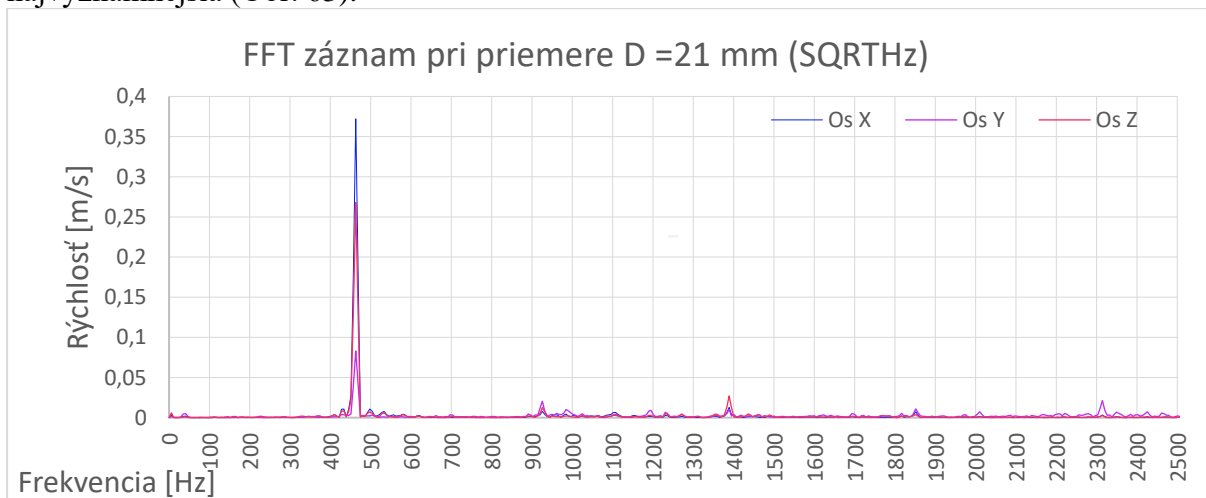
Nástroj č.4 má veľmi podobné správanie ako nástroj č.2. Vzhľadom na podobnosť ich geometrie je dominantná vlastná frekvencia. Tá je po úbytku hmotnosti z predchádzajúceho obrábania posunutá o 40 Hz na úroveň 470 Hz. Veľkosť amplitúdy je 0,33 m/s. Je to jedna z najväčších nameraných hodnôt zo všetkých priebehov merania. Výsledok sa samozrejme prejavil aj na povrchu obrobku.



Obr. 62 FFT VRD - DNMG150608PM.

- **5-VBD-R04-DNMG150604PM**

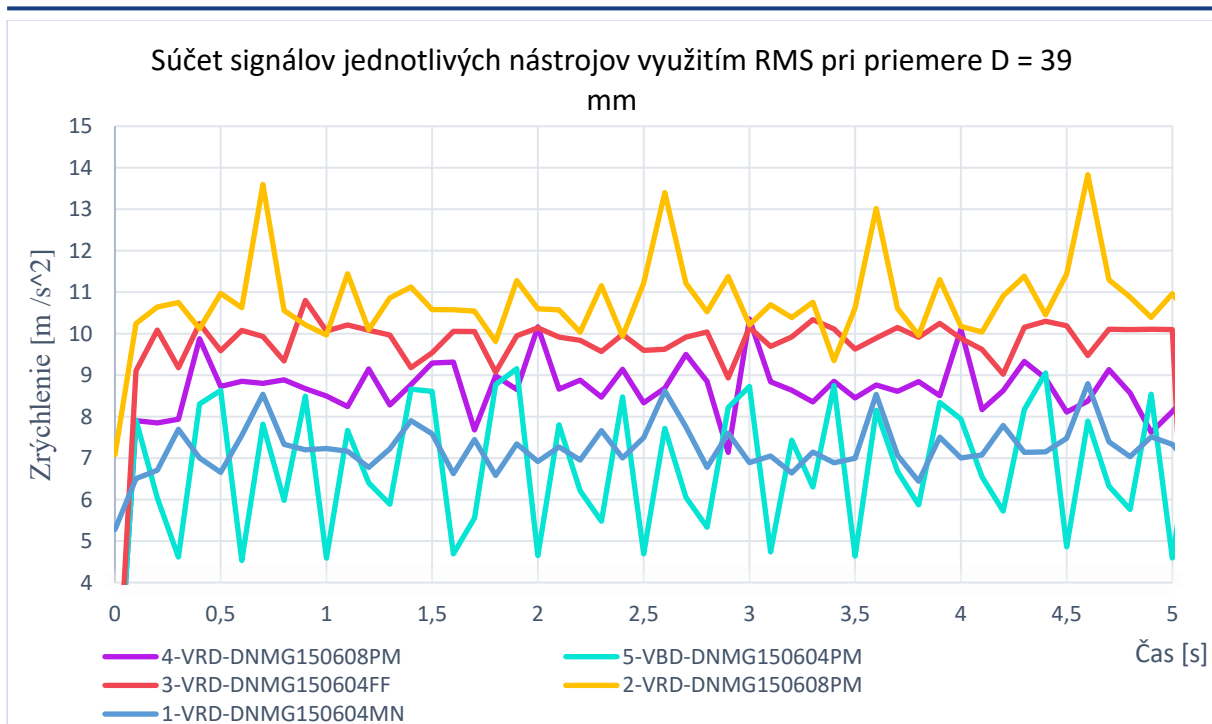
Z porovnanie medzi nástrojmi so špičkou 0,4 a 0,8 mm je nekonvenčný nástroj č.5. Napriek tomu, že je jeho rezná špička menšia, mal by mať menej výraznú vlastnú frekvenciu ako VRD č.1 a č.3 prejavila sa tu najväčšia dominantná vlastná frekvencia z celého obrábacieho procesu. Táto výrazná amplitúda sa prejavila aj na výslednom povrchu obrobku. Ako jediný z nástrojov kategórie polomeru špičky 0,4 mm zanechal na povrchu výrazné stopy spôsobené regeneratívnym kmitaním. Zmena pri tomto prejazde bola voči priemeru 24 milimetrov najvýznamnejšia (Obr. 63).



Obr. 63 FFT VRD - DNMG150604PM.

4.4.4 RMS vibrácií na priemere 39 mm

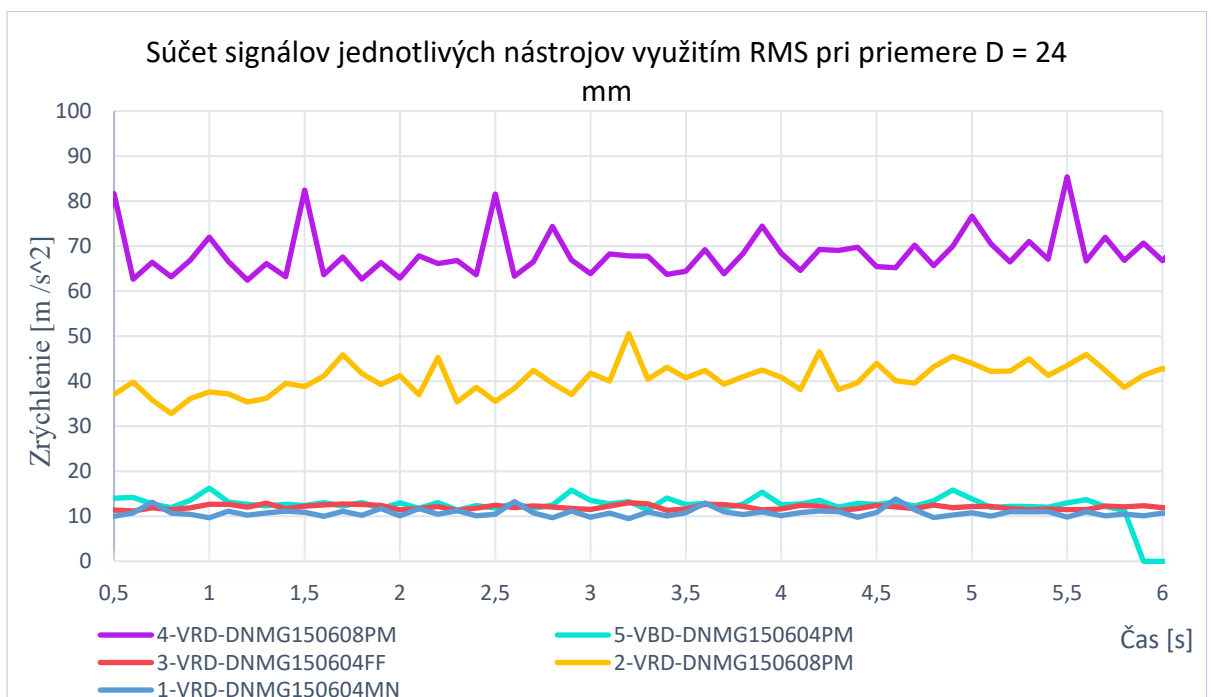
Využitím RMS bolo možné vyfiltrovať najdominantnejšie signály a sčítať ich veľkosť. Výslednica signálov od všetkých 3 ôs pre jednotlivé nástroje je zaznamenaná na grafe (Obr.64). Graf je určený časom a zrýchlením. Porovnávajúc FFT a RMS nebolo možné RMS vytvoriť ako amplitúdu rýchlosti ale zrýchlenia. Ako základnú pozíciu opäť využijeme prejazd nástrojov pri priemere 39 mm. Z grafu je možné vidieť, že rozdiel medzi najsilnejším a najslabším signálom je približne okolo 8 m/s^2 . Najvyšší signál je od nástrojov s špičkou 0,8 mm a opäť najslabšie 3 signály sú od špičky nástroja s polomerom 0,4 mm.



Obr. 64 RMS signálov priemer 39 mm.

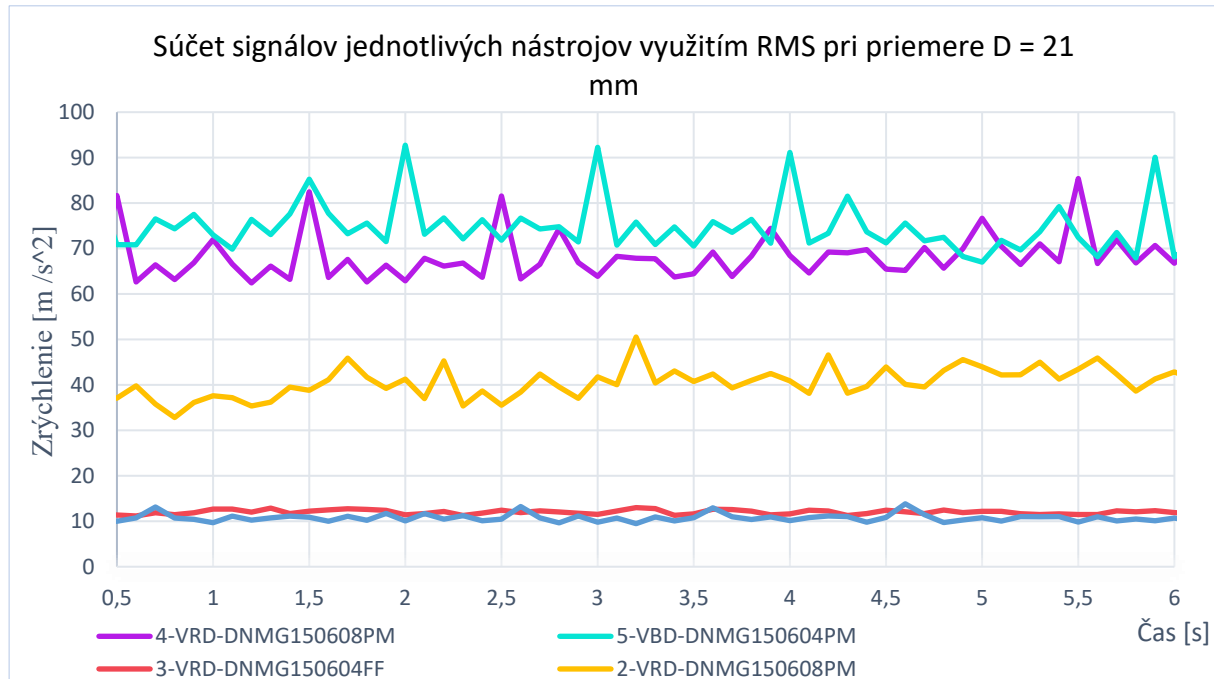
4.4.5 RMS vibrácií na priemere 24 mm

Pri reprezentácií výrazných zmien je možné pozorovať priemer 24 mm. Rozloženie síl sa dynamicky zmenilo (Obr. 65). Nástroje s polomerom 0,4 mm č.1, č.3, č.5 sa udržiavali na hodnotách okolo 10 m/s². Pri týchto nástrojoch na tomto priemere neboli na povrchu stopy. Markantná zmena sa udiala s nástrojmi č.2 a č.4. Priemerný výkon sa zvýšil až na úrovne 40 – 80 m/s². Na obrobenej ploche pri týchto nástrojoch boli viditeľné stopy.



Obr. 65 RMS signálov priemer 24 mm.

4.4.6 RMS vibrácií na priemere 21 mm



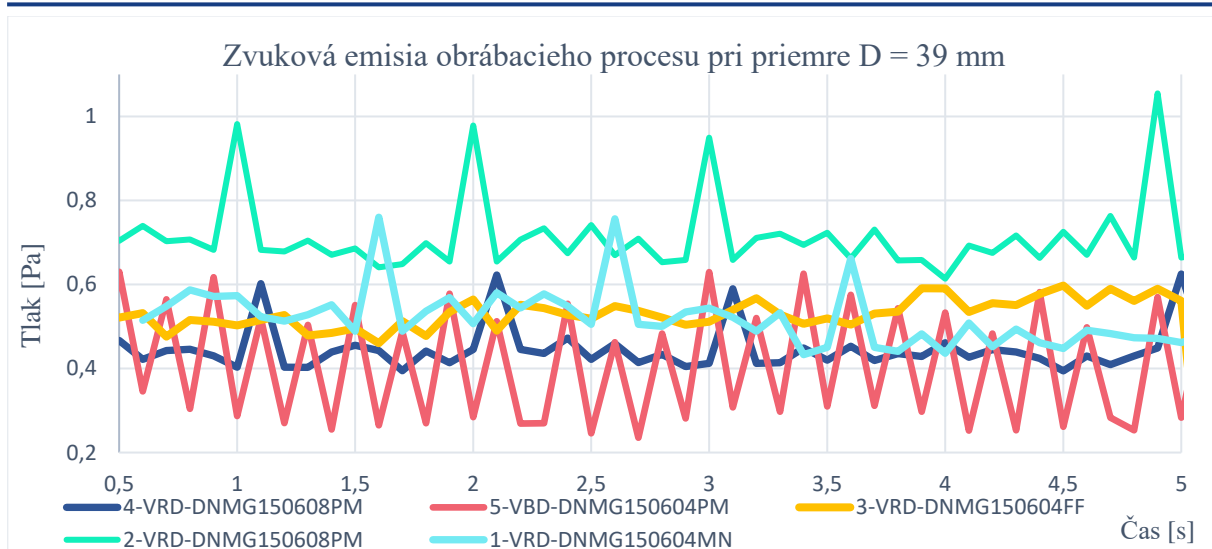
Obr. 66 RMS signálov priemer 21 mm.

Na priemere 21 mm sa efektívna hodnota oproti základnému priemeru pri nástrojoch č.2, č.4, a č.5 výrazne zmenila (Obr. 66). Najvýraznejšie stúpala hodnota pri VRD č.5 na takmer 90 m/s^2 . Nástroj číslo 4 dosiahol v priemere zrýchlenie na 70 m/s^2 a nástroj č. 2 50 m/s^2 . Pri všetkých týchto VRD sa neobrábanom povrchu objavili šróbovité stopy po vibráciách nástroja. Nástroje s menšou reznou špičkou svoju uchovali svoj priemerný výkon na približne 10 m/s^2 , čo znamená, že stúpol len minimálne voči základnej hodnote na priemere 39 mm.

4.5 Meranie zvukovej emisie

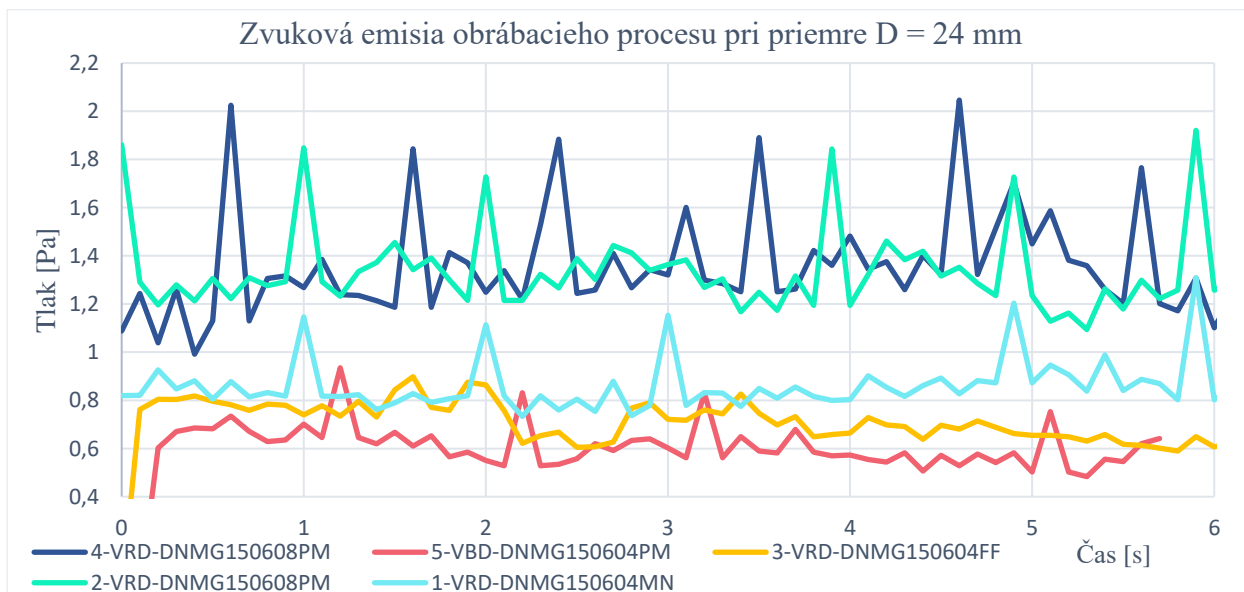
4.5.1 Spracovanie zvukovej emisie pri priemere 39 mm

Meranie zvuku prebiehalo pri obrábaní rovnako ako meranie signálov. Na ich vyhodnocovanie bol použitý rovnaký software. Meraný zvuk nie je spracovaný v decibeloch, ale je reprezentovaný ako zmena atmosférického tlaku v čase. Pri obrábaní na 39 mm je možné pozorovať (Obr. 67) koreláciu so základnými krivkami v RMS. Signály sa pohybujú v rozmedzí $0,2 - 1 \text{ Pa}$. Samotný hluk od stroja bol veľmi veľký, avšak pri znižovaní priemeru bolo možné jasne rozlíšiť zvuk obrábania od hluku stroja. Pri tomto priemere nástroje nepískali a proces prebiehal správne.

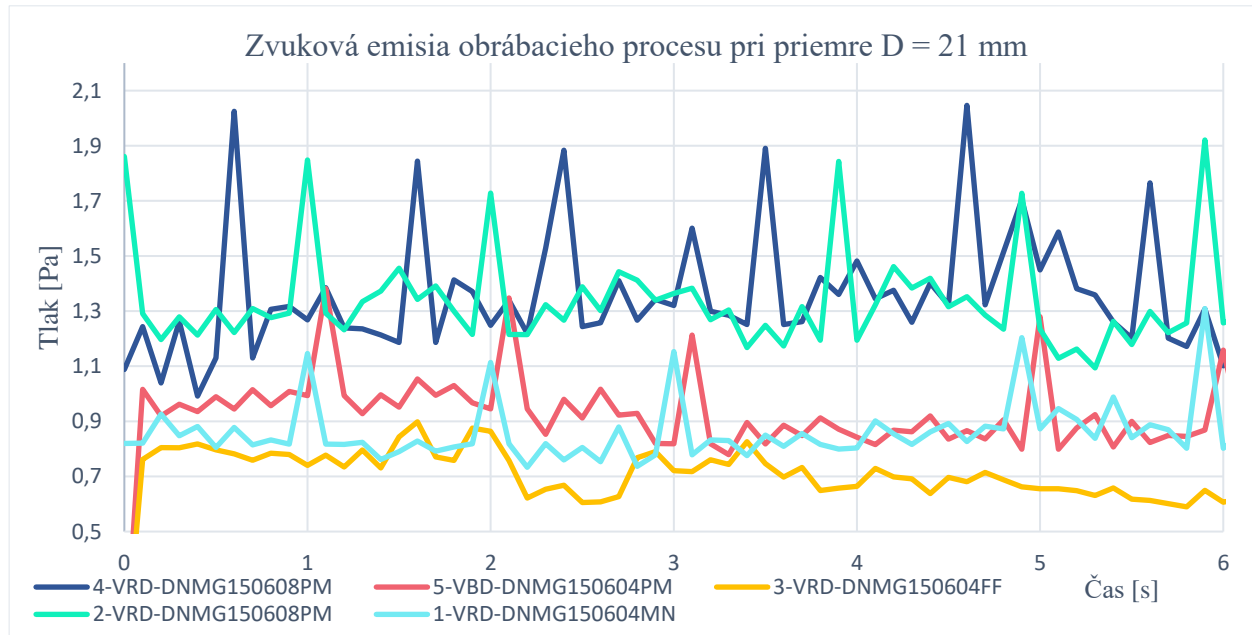


4.5.2 Spracovanie zvukovej emisie pri priemere 24 mm

Zvuková emisia merania nástrojov pri priemere 24 mm dosahovala výrazne vyšších hodnôt ako predchádzajúce merania. Počas obrábania nástrojom č. 2 a č. 4 vydával rezný proces výrazný pískavý zvuk. Bzučanie a pískot, ktorý bolo možné počuť aj voľným ušom sa prejavili v náraste tlaku až na 2 Pa (Obr. 68).



4.5.3 Spracovanie zvukovej emisie pri priemere 21 mm

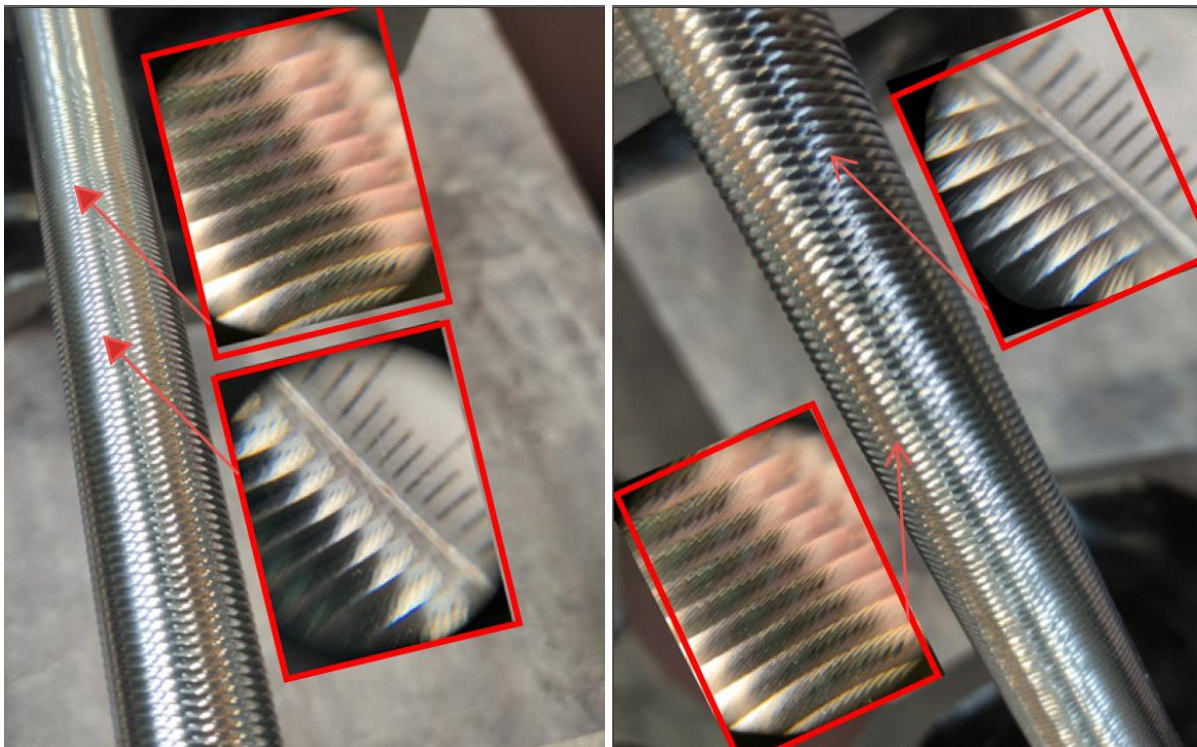


Obr. 69 Zvuková emisia pri priemere 21 mm.

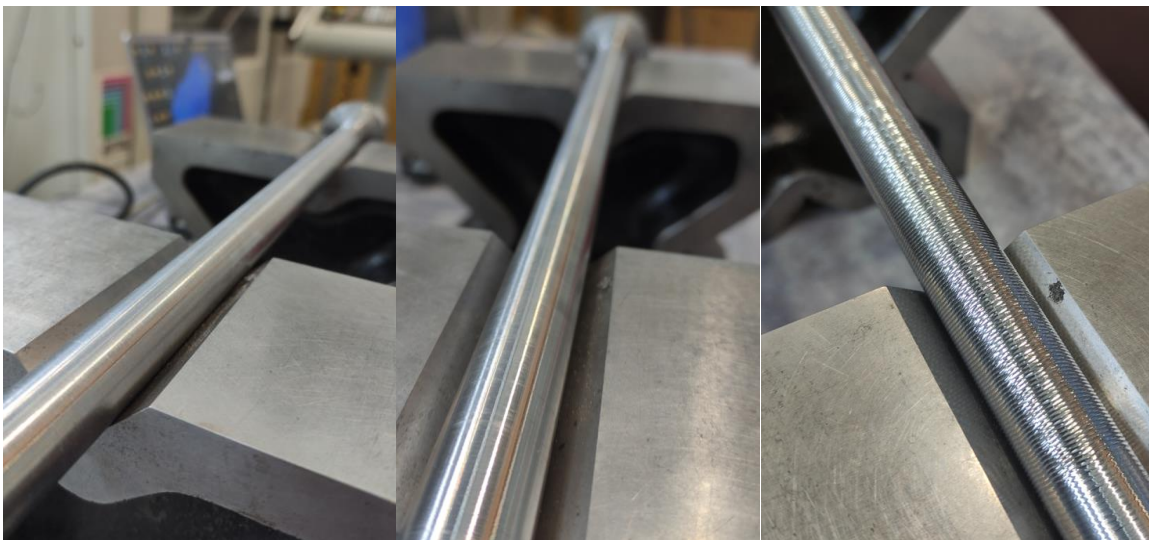
Doštičky s menšou reznou špičkou začínajú aj končia na nižších amplitúdach, zatiaľ čo doštičky, pri ktorých vznikalo evidentné kmitanie, dochádzalo k výraznejším zvukovým amplitúdach. K pískaniu, drnčaniu a hluku začalo dochádzať pri niektorých nástrojoch už pri priemere 27 mm. Tento dej sa opakoval pri každom prejazde, po ktorom sa na povrchu materiálu začali objavovať stopy chvenia, a to špirálovité zárezy. Na amplitúdach v grafe (Obr. 69) sa nástroj č.5 v porovnaní s priemerom 39 mm zvýšila zvuková emisia takmer dvojnásobne. Tento nástroj taktiež po poslednom prejazde zanechal na obrobku výraznejšiu stopu avšak nie tak zásadnú ako VRD s väčšou špičkou.

4.5.4 Drsnosť povrchu

Meranie drsnosti bolo vykonávané Vreckovým drsnomerom TR100. Prebiehalo meraním každých 10 mm z 4 strán. Vo výsledku bolo teda vykonaných 200 meraní na obrobku, ktorý meranie umožňoval. Niektoré obrobky, mali tak veľkú drsnosť v podobe vln na obrobenej ploche, že nebolo možné týmto zariadením drsnosť povrchu zmerať (Obr. 73). Výsledné meraniach po každých 50 mm sú spriemerované v tabuľkách spolu s výslednou drsnosťou celého obrobku. Jediné dva nástroje, ktorý povrch obrobili správne, a bolo možné na nich vykonať meranie drsnosti sú nástroj č.1 DNMG-150604-MN (Tab. 3) a nástroj č.3 VRD DNMG-150604-FF (Tab. 4). Výsledné drsnosti povrchu po prejazdoch týmito dvoma nástrojmi sa pohybovali medzi 3,15-3,2 μm . Zvyšné nástroje vytvorili tak veľké deformácie, že ich nebolo možné meraním pomocou TR100 vyhodnotiť. Opticky a dotykom však bolo možné posúdiť, ktoré deformácie spôsobené vibráciami boli najmenšie a ktoré naopak najväčšie. Pri použití nástroja č.2 DNMG-150608-PM začalo zvlnenie narušovať integritu povrchu vo vzdialenosti 29 mm od počiatku obrábania (Obr.70). Drsnosť R_a však v tejto oblasti bola priemerne 1,3 μm . Povrch bol hladký bez triesok a na dotyk nerezal. Zvlnenie povrchu skončilo vo vzdialenosti 255 mm od počiatku obrábania a za touto hranicou povrch dosiahol drsnosti $R_a = 1,0$ μm . Nástroj č. 2 DNMG-150608-PM začal vytvárať zvlnenia vo vzdialenosti 44 mm. Pred týmto úsekom sa v prvých centimetroch drsnosť R_a pohybovala okolo 1,9 μm . Vo vzdialenosti 255 mm sa vlnenie povrchu ukončilo. Vo vzdialenosti 350 mm povrch dosahoval priemernej drsnosti $R_a = 1,5$ μm . Tento nástroj vytvoril na pohľad a dotyk tie najvýraznejšie medzery medzi



Obr. 71 Zvlnenie na povrchoch po obrábaní nástrojmi č.4 (naľavo) č.2 (napravo).

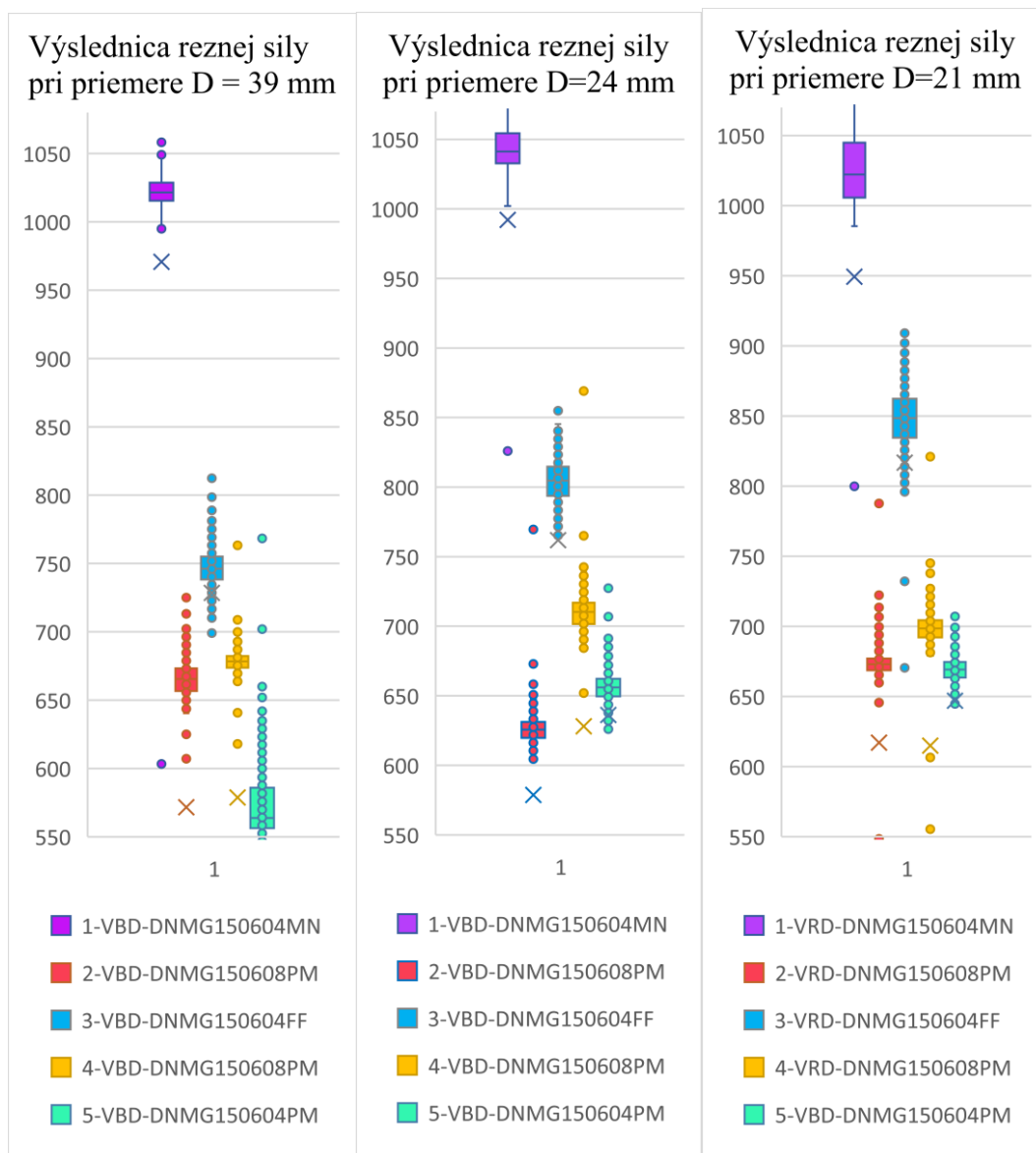


Obr. 72 Zvlnenie na povrchoch po obrábaní nástrojmi č.1 (naľavo) č.3 (stred) č.5 (napravo).

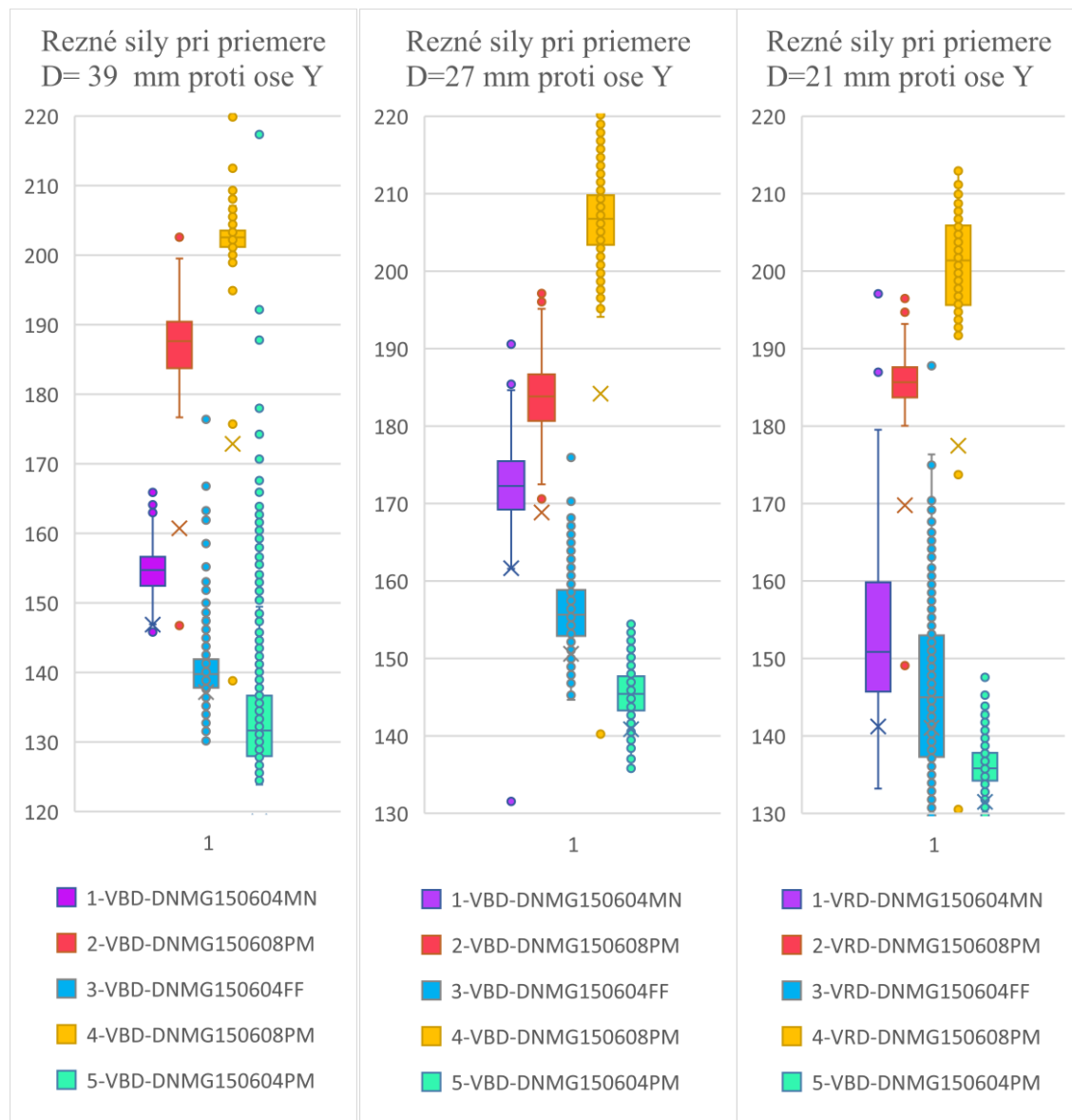
4.6 Porovnanie výsledkov

Pri obrábaní sa na nepatrné odchýlky a zmeny správajú nástroje pri priemere od 45 – 30 mm veľmi podobne. Po prekročení priemeru 30 milimetrov a nižšie sa začali výsledné zmeny ukazovať na meraní. Dochádzalo k poklesom, výkyvom a zmenám rezných síl, ako bolo možné vidieť v kapitole 4.3 (Obr. 71). Pri meraní vibrácií a vyhodnocovaní pomocou FFT dominovali vlastné frekvencie, ktoré sa pri niektorých nástrojoch dostali až na úrovne jednotiek desiatin m/s. Tieto výkyvy vibrácií taktiež korelovali s priemerným výkonom signálu vyhodnocovaným pomocou výpočtu RMS. Bolo jasne ukázané, ako sa vysoké amplitúdy zrýchlenia zobrazili v priemeroch. Spolu zo signálmi vibrácií je možné tento predpoklad potvrdiť aj na meraní hluku. Súdiac ako empiricky, tak aj snímačom zvuku bolo zjavné, že nástroje s väčšou reznou špičkou a geometriou typu PM vytvárali silný hluk. Ten je v literatúre popisujúcej samobudené kmitanie popisovaný ako drnčanie ale aj intenzívny piskot. Najvýznamnejším výsledkom však

bolo porovnanie drsnosti povrchu obrábaných súčiastok. Pri nástroji č.1 a č.3 (Obr. 72), ktoré majú menší polomer reznej špičky, sa nijako zvláštne neprejavil a meraním nepotvrdil vznik samobudených kmitov. Aj napriek tvarom rezných síl, a štíhlostnému pomeru 20 je možné povedať, že nástroje pracovali správne prehladnuc poklesy rezných síl v ose Y. Na druhej strane nástroje č. 2, č. 4 a č.5 vytvárali silný hluk sprevádzaný poškodením výsledného povrchu, ktorý by bol pre technickú prax neprijateľný. Na grafe (Obr. 73) výsledných rezných síl je možné pozorovať, ako sa menila celková rezná sila pri znižovaní priemeru. Na grafe (Obr. 74) je možné vidieť zmenu v ose Y, ktorá bola v predchádzajúcich grafoch najvýznamnejšia. Do priemeru 24 mm rezné sily narastali. Je to sila, ktorou nástroj tlačil do osi obrobku. Po obrobení povrchu 24 mm pri priemere 21 mm však sila začala klesať. Obrobok začal byť pravdepodobne menej menej stabilný a nechal sa tlakom od nástroja prehýbať. Kmitanie a výkyvy je možné sledovať a intervaly znázornenom v krabicovom grafe osi Y.



Obr. 73 Porovnanie rezných síl pri priemeroch 21, 24 a 39 mm.

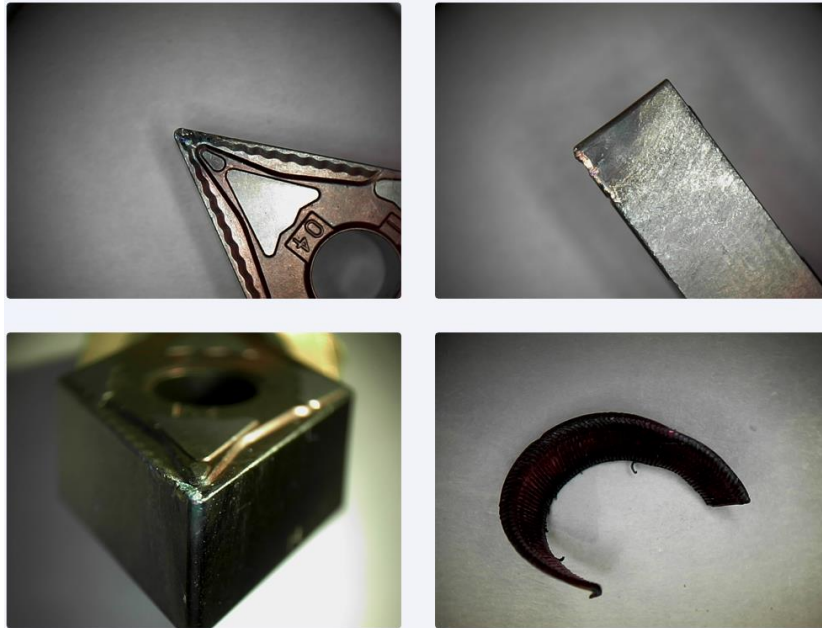


Obr. 74 Porovnanie rezných síl v ose Y pri priemeroch 21, 24 a 39 mm.

4.6.1 Opatrenie a triesky

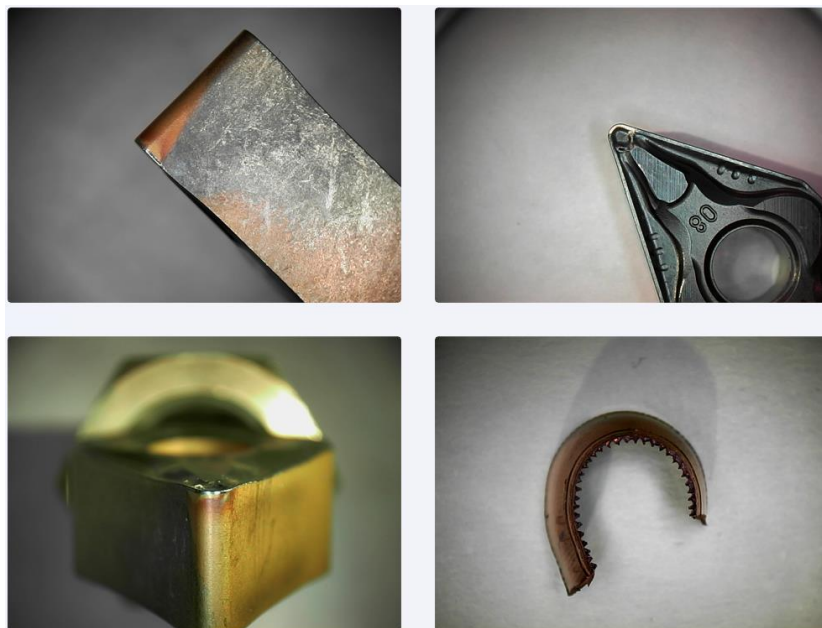
- **1-VRD-R04-DNMG150604MN**

Vo všeobecnosti mali doštičky so špičkou 0,4 mm väčšie opotrebenie po 12 minútach v reze ako doštičky s väčšou reznou špičkou. V porovnaní s drsnosťou povrchu však toto opotrebenie nehralo rolu a drsnosť bola lepšia vždy pri ostrejšom nástroji. Nástroj dosiahol veľmi dobrých výsledkov a hladkého povrchu. Na povrchu je možné vidieť známky malého nárastu materiálu (Obr. 75). Triesku oddeľoval správne bez namotávania sa na obrobok. Tento nástroj zaznamenal najväčšiu reznú silu z porovnávaných VRD. Je to pravdepodobne spôsobené celkovou geometriou nástroja, jeho plochou časťou a rýchlejšim odtlačaním triesky z miesta rezu ako nástroje s hlbšou časťou pre obvod triesky.



Obr. 75 Mikroskopický obraz 1-VBD-R04-DNMG150604MN a jej triesky.

- **2-VRD-R08-DNMG150608PM**



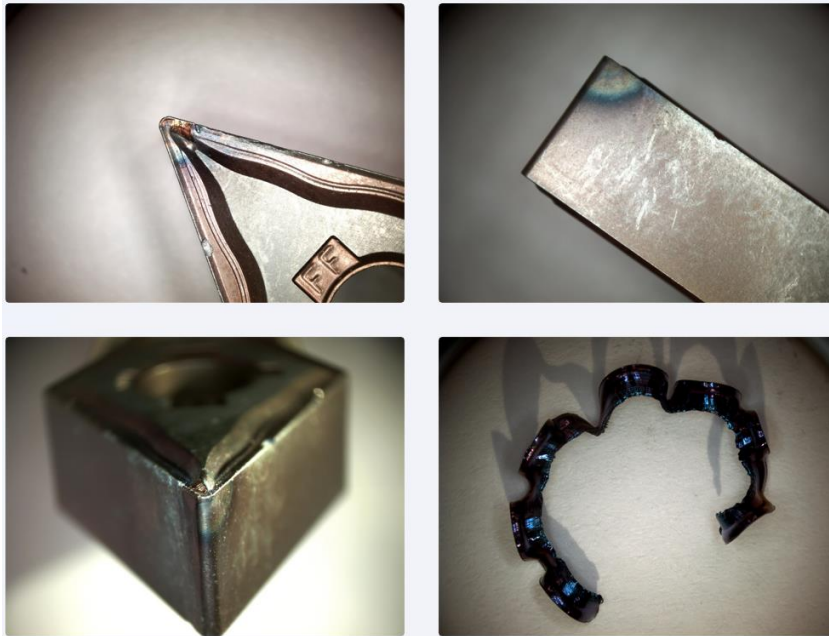
Obr. 76 Mikroskopický obraz 2-DNMG150608PM a jej triesky.

Na doštičkách so špičkou 0,8 mm sa po obrábaní neprejavilo takmer žiadne opotrebenie. Sú geometriou ďaleko odolnejšie a húževnatejšie. Triesku tento nástroj oddeľoval veľmi dobre s veľkosťou do 7 mm (Obr. 76). Pri priemere 27 mm sa však začali objavovať vlny na povrchu obrobku a pokračovaním v odoberaní materiálu sa prehlbovali. Výsledok nespĺňal konvenčné presnosti pre hotový výrobok.

- **3-VBD-R04-DNMG150604FF**

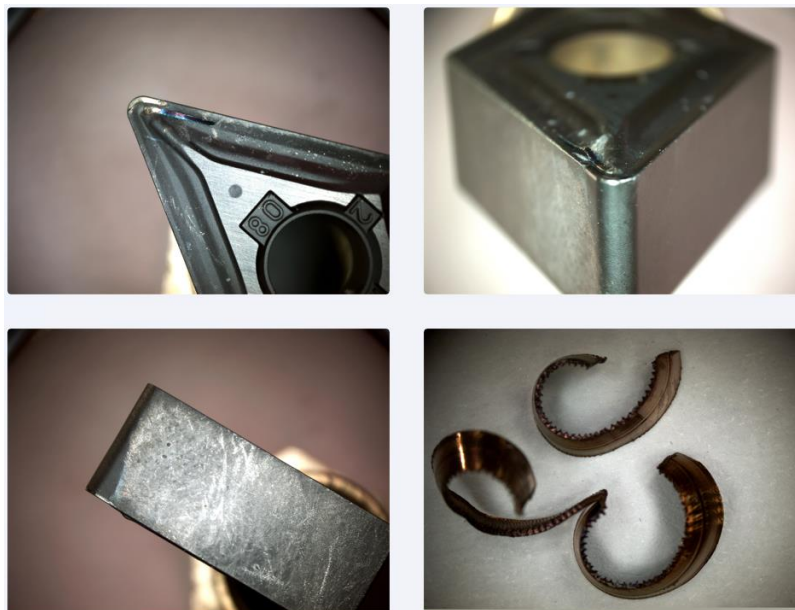
Opäť sa pri malom rádiuse prejavilo výraznejšie opotrebenie. Pri tejto polo-hrubovacej doštičke však boli zaznamenané veľmi priaznivé výsledky na povrchu dielu. Pri priemere 27 sa aj pri tejto VRD objavoval piskot, nie však tak markantný ako pri ostatných nástrojoch. Veľmi dobrá tvorba triesky pri priemere 24 sa však začali niekoľkonásobne predlžovať, avšak opisovali vždy

menšiu kružnicu ako priemer obrábaného materiálu (Obr. 77). To prispelo k veľmi dobrému výsledku a kvalitnému povrchu.



Obr. 77 Mikroskopický obraz 3-DNMG150604FF a jej triesky.

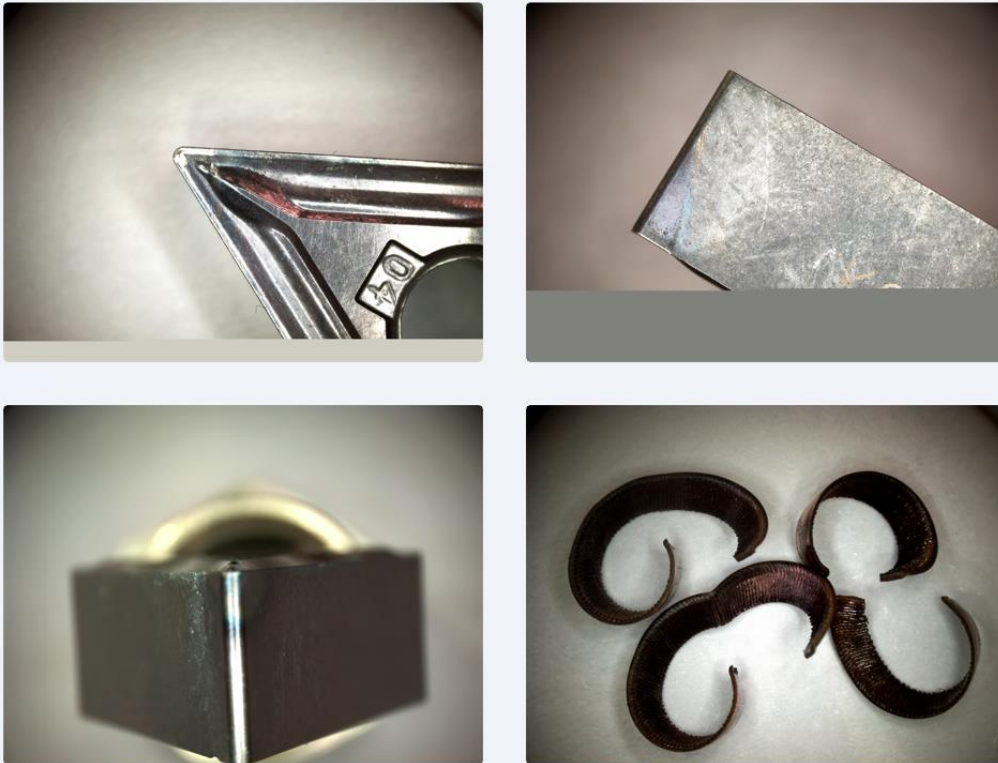
- **4-VBD-R08-DNMG150608PM**



Obr. 78 Mikroskopický obraz 4-DNMG150608PM a jej triesky.

Táto VBR s rádiusom 0,8 mm prejavila najmenšia známky opotrebenia. Rezný proces od priemeru 27 mm sprevádzal piskot a viditeľné známky počiatočného zvlnenia povrchu boli pozorovateľné už na tomto priemere (Obr. 78). Obrábací proces však do tohto momentu prebiehal veľmi dobre. Trieska bola správne oddeľovaná a utvárač pracoval správne. Chvenie a výsledný povrch však sú pre technickú prax nepoužiteľné.

- **5-VBD-R04-DNMG150604PM**



Obr. 79 Mikroskopický obraz 5-DNMG150604PM a jej triesky.

Tento nástroj mal najnižšie opotrebenie zo všetkých VRD s rádiusom 0,4 mm. Je to čiastočne spôsobené aj tým, že prvý prejazd materiálom nebol vyhotovený touto VRD. Prvý prejazd bol vykonaný nástrojom s veľmi ostrým utváračom, ktorý však nedokázal pri nastavenom posuve a reznej rýchlosti triesku deliť, tak bol nahradený touto VBD (Obr. 79). Ako jediný nástroj s týmto priemerom však vytvoril na povrchu obrobku poškodenie, aj keď nie tak významne ako iné nástroje s rádiusom 0,8 mm. Tvorba triesky zo začiatku nebola správna, ale pri znižovaní otáčok sa tvorila pravidelná konštantná trieska. Pri priemere 24 milimetrov začal rezný proces písať. Pri poslednom prejazde na priemere 21 mm bol rezný proces sprevádzaný chvením, zápachom a špecifickým hlukom nepripomínajúci pískot.

4.7 Diskusia

Diplomová práca prakticky porovnala rôzne nástroje typu DNMG v rôznych variantoch geometrií. Výsledky sa medzi jednotlivými variantami často výrazne odlišovali. V grafoch rezných síl je možné sledovať, že nie všetky rezné sily majú počiatok a koniec v jednom bode. Bolo to spôsobené zmenou otáčok vretena pri niektorých nástrojoch. Stroj sa v priebehu obrábania pokazil a nebolo možné vykonať experiment na jeden krát. Obrábanie sa vykonávalo počas 3 dní v rozmedzí jedného mesiaca.

Pri meraniach a následnom vyhodnotení získaných bolo možné prakticky porovnať najvhodnejšie nástroje daného typu pri danú aplikáciu. Práca ukázala, že aj napriek štíhlostnému pomeru 20, bolo možné kvalitne obrobiť povrch súčiastky aj bez podopierania alebo drahých tlmiacich zariadení. Z výsledkov práce plyní zjavné odporúčenie pre prax, ktoré nástroje sú na takýto typ obrábania vhodnými.

V tomto experimente sa nevykonávala modálna skúška ani zostrojenie diagramov stability. Vlastná frekvencia a tvary vlastných kmitov sú závislé na hmotnosti a tuhosti pozorovaného

objektu. Vzhľadom na klesajúcu hmotnosť po každom odobraní materiálu nástrojom, by sa modálna skúška musela neustále opakovať. Z časového hľadiska to nebolo možné zrealizovať.

Amplitúdy vlastných frekvencií sústavy N-S-O však bolo možné pozorovať aj na spracovaní vibrácií z akcelerometra pomocou FFT. Na grafoch je možné sledovať trend pohybujúcej sa vlastnej frekvencie. Vlastná frekvencia sa pri znižovaní hmotnosti posúvala z frekvencie 660 Hz až na hodnotu 450 Hz. Pri hodnotení povrchu materiálu v spojení s týmito amplitúdami je zrejmé, že dochádzalo k rezonancii a chveniu.

Pri experimentálnom obrábaní dochádzalo k núteným a samobudeným kmitom. Vlny vzniknuté na povrchu materiálu v kombinácii s premenlivou reznou silou zaznamenanou dynamometrom a vysoké amplitúdy vlastnej frekvencie vo všetkých 3 osiach dokazujú ich prítomnosť. Na analýze signálov pomocou RMS bolo ukázané ako nástroje s väčším polomerom špičky vytvárali väčšie chvenie. Tento predpoklad bol potvrdený aj pri spracovaní zvukovej emisie. Ukázalo sa, že drsnosť povrchu obrobku korelovala s veľkosťou zvukovej stopy, ktorú obrábanie spôsobilo. Taktiež korelovala s veľkosťou amplitúd pri FFT analýze. Čím väčšia bola amplitúda, tým bol obrábací proces hlučnejší a teda drsnosť povrchu sa zväčšovala a naopak.

Nástroj č.5 bol zvolený ako náhradný. Prvý prejazd vykonal nástroj s geometriou typu L-K. Mal veľmi ostrý útvárač a javil sa ako optimálny pre danú aplikáciu. Hĺbkou a veľkosťou plôch pre odvod triesky však nedokázal triesky oddeľovať a vytváral tak jednu súvislú triesku namotávajúcu sa na nástroj. Obrábanie sme prerušili z bezpečnostných hľadísk. Tento nástroj mal však pracovať pri 2 krát väčšej reznej rýchlosti. Po tomto experimente by sa pre budúce testovanie dalo odporučiť použitie nástroja DNMG-150604-MF. Má veľký, plochý, ostrý útvárač s malou medzerou pre odvod triesky. Mohol by vytvárať malé triesky a vzhľadom na veľkosť jeho špičky by obrábanie mohlo byť stabilné. Kvôli obmedzenému prístupu ku polotovarom sa však tento nástroj nepodarilo otestovať. Taktiež pre správny chod vyžaduje takmer 2 krát väčšiu reznú rýchlosť, ako by na stroji bolo možné dosiahnuť.

Pre obrábanie podobného typu, by bolo možné využitie nástrojov s pozitívnou geometriou. Na takéto porovnanie však nebol k dispozícii správny držiak nástroja. Navyše sa tieto nástroje vyrábajú len s dvoma reznými časťami, čo by pre firmy mohlo pri veľkých objemoch spôsobovať zdražovanie výroby. Zaujímavé by bolo taktiež použitie VRD typu V, ktoré majú ešte ostrejší stredný uhol ako VRD typu D. Tie sú však cenovo výrazne drahšie, a ich implementáciu do rezného procesu je nutné nastavovať a odladovať. Primárne neslúžia ako nástroj, schopný odhrubovať tak veľký objem materiálu, ako sa vykonalo počas experimentov tejto diplomovej práce. Drsnosti povrchu dosiahnuté obrábaním nástrojmi č.1 a č.3, dosiahli dostatočných výsledkov pre uplatnenie v strojárskom priemysle ($R_a = 3,2$).

5 ZÁVER

Experimentálne obrábanie dlhých tenkých dielov z martenzitickej žiarupevnej ocele bolo úspešne vyhotovené. Z prevedených meraní boli vytvorené nasledujúce závery:

Rezné nástroje typu D s polomerom špičky 0,8 mm mali na chvenie počas obrábania výrazne horší vplyv ako nástroje s polomerom špičky 0,4 mm. Z meraných hodnôt vibrácií a spracovania signálov bolo viditeľné, že nástroje typu DNMG-150608-PM nie sú pre tento typ obrábania vhodné. Potvrdili to vysoké amplitúdy kmitania, výrazne vyššia zvuková emisia hluku ale najmä poškodenie na povrchu obrobkov. Tieto výrazné vlny na povrchu dielcov ukázali, že tento typ nástroja pre štíhlostný pomer 20 v kombinácii s daným materiálom nie sú vhodnými a sú pre výslednú kvalitu povrchu neprijateľné.

Nástroj DNMG150604PM s rovnakou geometriou plôch pre odvod triesky preukázal podobnú nevhodnosť ako polohrubovacie nástroje s reznou špičkou 0,8 mm. Napriek menšiemu polomeru reznej špičky po finálnom prejazde nástroja vznikli na povrchu vlny spôsobené kmitaním a odtlačaním od svojej osi. Pri tomto type materiálu by ho však bolo možné použiť do priemeru 21 mm nie však 18 mm.

Najlepšie výsledky dosiahli nástroje s polomerom špičky 0,4 mm, a to DNMG150604MN a DNMG150604FF ich geometriou, ostrým utváračom triesky a úzkou plochou pre jej odvod. Vibrácie pri týchto nástrojoch mali rádovo menšie amplitúdy, ich zvuková emisia bola výrazne nižšia a dosiahnutá kvalita povrchu bola v toleranciách bežného obrábania z praxe. Vzhľadom na fakt, že experiment bol postavený ako obrábanie na hotovo s jedným nástrojom, nie je možné vylúčiť, že pri prejazde dokončovania povrchu by bola jeho kvalita výrazne lepšia. To však pri predchádzajúcich nástrojoch pravdepodobne nie je realizovateľné, pretože zvlnenie povrchu by zapríčinilo premenlivosť reznej sily, obrábací proces by sa mohol stať nestabilným a stopy po nástrojoch by bolo náročné odstrániť, keďže by sa predchádzajúce zvlnenie premietlo do dokončovacieho odoberania materiálu. Ukázalo sa, že veľká rezná sila na proces nemá vplyv, a tieto nástroje s najlepšimi výsledkami vykázali najvyššiu reznú silu.

Pre obrábanie dlhých tenkých dielov a využití negatívnych nástrojov typu D je najvhodnejšie voliť geometriu nástroja typu FF alebo MN. Geometria typu PM pre túto aplikáciu nie je vhodná.

ZOZNAM ZDROJOV

- [1] *SÚSTRUŽENIE: Vymeniteľné rezné doštičky* [online]. In: . [cit. 2022-04-09].
Dostupné z: <https://www.panas.sk/storage/app/uploads/public/56e/16e/f31/56e16ef31a36d181481971.pdf>
- [2] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. První. Brno: Cerm, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [3] [online]. In: . [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.amadeusfin.cz/22592/jak-vznika-laser/>
- [4] *Živé ukázky obrábění sledovaly průběh řezných sil* [online]. 2015 [cit. 2022-04-23].
Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zive-ukazky-obrabeni-sledovaly-prubeh-reznych-sil/>
- [5] *Soustružení bez chvění* [online]. In: BACH, Pavel a Ondřej SVOBODA. 15.4.2014. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soustruzeni-bez-chveni>
- [6] *SÚSTRUŽENIE: Vymeniteľné rezné doštičky* [online]. In: . s. 238 [cit. 2022-04-23].
Dostupné z: <https://www.panas.sk/storage/app/uploads/public/56e/16e/f31/56e16ef31a36d181481971.pdf>
- [7] *Volba vhodných soustružnických břitových destiček* [online]. In: . [cit. 2022-04-09].
Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx>
- [8] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [9] Příručka obrábění: kniha pro praktiky. 1. čes. vyd. Praha: Scientia, 1997. ISBN isbn91-972299-4-6.
- [10] *Technická příručka obrábění: soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů* : příručka firmy Sandvik Coromant. Praha: Sandvik Coromant, 2005.
- [11] *STATIONARY TOOLS* [online]. In: . [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.productivity.com/wp-content/uploads/pdfs/Kennametal%20Combined%20Turning%20-%20Master%20Catalog.pdf>
- [12] NAVRÁTIL, Miroslav a Oldřich PLUHAŘ. *Měření a analýza mechanického kmitání: metody a přístroje*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:62104440-b894-11e2-8b87-005056827e51>
- [13] KMITÁNÍ PŘI OBRÁBĚNÍ [online]. Ostrava [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_10.pdf
- [14] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN isbn80-214-2374-9.
- [15] BREPTA, Rudolf, František TUREK a Ladislav PŮST. *Mechanické kmitání*. Vyd. 1. Praha: Sobotáles, 1994. Česká matice technická (Sobotáles). ISBN isbn80-901684-8-5.
- [16] NESLUŠAN, Miroslav. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. Vysokoškolské učebnice. ISBN 978-80-8070-711-8.
-

-
- [17] SCHAUER, PAVEL. MECHANICKE KMITY [online]. BRNO [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/mechanicke_kmity.pdf. DOPLŇKOVÉ TEXTY. VUT FAST.
- [18] LEPIL, Oldřich. *Mechanické kmitání a vlnění: studijní modul*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN isbn978-80-244-3295-3.
- [19] PETR, Fojtů. *Problematika samobuzeného kmitání při obrábění* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>. CVUT.
- [20] TLUSTÝ, Jiří a Ladislav ŠPAČEK. *Samobuzené kmity v obráběcích strojích*. 1. vyd. Praha: Československá akademie věd, 1954. Studie a prameny. Sekce technická. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:6b0b1540-d0b3-11e5-ab98-005056827e52>
- [21] SUCHÁČEK, Roman. *REGENERATIVNÍ KMITÁNÍ PŘI SOUSTRUŽENÍ* [online]. BRNO, 2013 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30293109.pdf>. Bakalářská práce. VUT FSI v BRNE. Vedoucí práce Ing. Zdeněk FIALA.
- [22] Analýza a zpracování signálů [online]. In: . [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: http://proteus.fav.zcu.cz/~mautner/Azs/Azs1_Uvod.pdf
- [23] NOVÁK, Jindřich. *Zpracování signálu a dat*. Zlín, 2010. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [24] JAN, Jiří. *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 1997. Učebnice. ISBN 80-214-0816-2. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:25f84ea0-e3b3-11e6-8010-005056827e51>
- [25] VEJRAŽKA, František. *Signály a soustavy*. Vyd. 4. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN isbn80-01-00450-3.
- [26] ONDRÁČEK, Oldřich. *Signály a systavy*. 3. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2008. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN isbn978-80-227-2956-7.
- [27] MIHALÍK, Ján a Iveta GLADIŠOVÁ. *DISKRÉTNE SPRACOVANIE SIGNÁLOV: Návod na cvičenia* [online]. Košice, 2017 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Jan-Mihalik-3/publication/319482590_DISKRETNE_SPRACOVANIE_SIGNALOV_Navody_na_cvicenia/links/59ae6ef8a6fdcce55a478a3c/DISKRETNE-SPRACOVANIE-SIGNALOV-Navody-na-cvicenia.pdf. Technická univerzita v Košiciach.
- [28] ŠEBESTA, Vladimír. *Systémy, procesy a signály*. 1. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, 1997, . ISBN 80-214-0942-8.
- [29] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [30] RAK, Jan. *Fourierova transformace* [online]. In: . [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://voda235.webnode.cz/fourierova-transformace/>
- [31] STODOLA, Jiří, Alena BREZNICKÁ a Pavel NOVOTNÝ. *Vibrodiagnostika strojů: monografie*. 1. vydání. Brno: MSD, 2017. ISBN 978-80-7392-276-4.
- [32] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost*. II., Vibrodiagnostika. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, . ISBN 80-248-0650-9. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:0b990bf0-6432-11e5-90b1-005056827e52>
-

-
- [33] NESLUŠAN, Miroslav. *Dynamické aspekty brúsenia kovov*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2008. Vedecké monografie. ISBN 978-80-8070-857-3.
- [34] *9. PRÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ* [online]. In: . [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf
- [35] *Multi-Component Dynamometer up to 10 kN: Type 9257B* [online]. In: . [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-9257b/>
- [36] *SILOVÉ ZATÍŽENÍ FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ PŘI OBRÁBĚNÍ* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174391. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [37] *AKO TO FUNGUJE A NAČO SLUŽÍ AKCELEROMETER?* [online]. In: . [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/sk/news/library-articles/page/22568/Ako-to-funguje-a-naco-sluzi-akcelerometer/>
- [38] *Modal Analysis using the Brüel and Kjær Photon+ and Vibrant ME'Scope* [online]. In: . [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Carl-Howard/publication/348945827_Modal_Analysis_using_the_Bruel_and_Kjaer_Photon_and_Vibrant_ME'Scope/links/6018904ba6fdcc071bac2946/Modal-Analysis-using-the-Brueel-and-Kjaer-Photon-and-Vibrant-MEScope.pdf
- [39] *Photon+ dynamic signal analyzer* [online]. In: . [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <http://www.measuretronix.com/files/bruel-and-kjaer/photon-plus-brochure.pdf>

