



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ANALÝZA A PROGRAMOVÁNÍ TROCHOIDNÍCH  
INTERPOLACÍ NA CNC STROJI**

ANALYSIS AND PROGRAMMING OF TROCHOID INTERPOLATIONS ON A CNC MACHINE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Ingrid Jílková**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**

**BRNO 2022**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Studentka: **Bc. Ingrid Jílková**  
Studijní program: Strojírenská technologie  
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.**  
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:

## **Analýza a programování trochoidních interpolací na CNC stroji**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Analýza a programování trochoidních interpolací na CNC stroji s ohledem na průřez třísky, silové zatížení a kvalitu opracování frézovaných ploch. Tvorba parametrického programu pro zvolenou aplikaci. Experimentální ověření, vyhodnocení výsledků.

### **Cíle diplomové práce:**

Matematický popis trochoidních trajektorií.  
Tvorba algoritmů pro trochoidní frézování.  
Predikce kvality opracovaných ploch.  
Experimentální ověření zvolených technologií.  
Rozbor dosažených výsledků, doporučení pro praxi.

### **Seznam doporučené literatury:**

SZALÓKI, I., CSESZOK, S., CSUKA, S., SIPOS, S. Can trochoidal milling be ideal? Manufacturing 2012. The XXI. Conference of GTE on Manufacturing and related technologies.

OTKUR, M., LAZOGLU, I. Trochoidal milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, July 2007, Vol. 47(9), pp.1324-1332.

ZHANG, X. H., PENG, F. Y., QIU, F., YAN, R., LI, B. Prediction of cutting force in trochoidal milling based on radial depth of cut. Advanced Materials Research, 2014, Vol.852, pp. 457-462.

IBARAKI, S., YAMAJI, I., MATSUBARA, A. On the removal of critical cutting regions by trochoidal grooving. Precision Engineering-journal Of The International Societies For Precision, 2010, Vol. 34(3), pp. 467-473.

WU, B., ZHENG, C., LUO, M., HE, X. Investigation of trochoidal milling nickel-based superalloy. Materials Science Forum, 2012, Vol. 723, pp. 332-336.

SZALÓKI, I., CSUKA, S., SIPOS, S. New test results in cycloid-forming trochoidal milling. Acta Polytechnica Hungarica, 2014, Vol. 11(2), pp. 215-228.

RAUCH, M., DUC, E., HASCOET, J. Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modeling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 49, Issue 5, April 2009, pp. 375–383.

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

Tato diplomová práce se zabývá analýzou a programováním trochoidního frézování, ověřeného pomocí interpolací na CNC stroji. Teoretická část se zabývá rešerší o dynamickém frézování, zejména o trochoidním. Je zaměřena na jeho matematický popis, tvorbu algoritmů a typy trajektorií. Vysvětluje řezné podmínky jako je průřez třísky, silové zatížení a také predikci kvality opracovaných ploch. Dále objasňuje výhody a důvody použití trochoidního frézování. Praktická část se zabývá analýzou a experimentálním ověřením parametrického programu pro zvolenou aplikaci. Nejdříve je vysvětleno, jakým způsobem bylo jak trochoidní, tak lineární frézování naprogramováno. Dále popisuje programování trochoidních interpolací a jejich analýzu s ohledem na průřez třísky, silové zatížení a kvalitu opracování frézovaných ploch v závislosti na vstupním parametru – posuvové rychlosti. Uvádí porovnání metod trochoidního a lineárního frézování a jejich vyhodnocení také s ohledem na průřez třísky, silové zatížení a kvalitu opracovaných ploch. Navrhuje doporučení pro praxi v závislosti na výsledcích a také obsahuje technicko-ekonomické zhodnocení.

### Klíčová slova

trochoidní, frézování, interpolace, zatížení, tříska, kvalita

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with the analysis and programming of the trochoidal milling which is verified by interpolation in a CNC machine. The theoretical part of thesis deals with the research of the dynamic milling, in particular about the trochoidal milling. This part is focused on the mathematical description, creation of algorithms and the types of trajectories. It explains the cutting conditions as the cutting section of a chip, force loading and as well the quality prediction of the machined surfaces. Furthermore, it clarifies the advantages and the reasons of use of the trochoidal milling. The practical part of the thesis deals with the analysis and the experimental verification of the parametric programme for the selected application. At first, it is explained how were the trochoidal and the linear milling programmed. Next, it describes the programming of the trochoidal interpolations and their analysis with regard to the cutting section of a chip, force loading and the quality of the machined milled surfaces depending on the input parameter – the feed speed. This part presents the comparison of the trochoidal and the linear milling methods and their evaluations which are also done with regard to the cutting section of a chip, force loading and the quality of the machined surfaces. This part also suggests recommendations for practice depending on the results and it also contains the techno-economic assessment.

### Key words

trochoidal, milling, interpolation, loading, chip, quality

---



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

JÍLKOVÁ, Ingrid. *Analýza a programování trochoidních interpolací na CNC stroji*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140111>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.

---



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Analýza a programování trochoidních interpolací na CNC stroji* vypracovala samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 19.05.2022

místo, datum

Bc. Ingrid Jílková

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji panu prof. Ing. Miroslavu Piškovi, CSc. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

Tímto děkuji i rodině za podporu během studia.

---

## OBSAH

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ÚVOD .....                                                                                              | 13 |
| 1 ÚVOD DO PROCESU FRÉZOVÁNÍ .....                                                                       | 14 |
| 1.1 Oblasti plastické deformace při tvorbě třísky .....                                                 | 15 |
| 1.2 Úvod do dynamického frézování .....                                                                 | 16 |
| 1.3 Frézování s vysokým posuvem .....                                                                   | 18 |
| 1.4 Frézování s vysokou řeznou rychlostí .....                                                          | 19 |
| 2 TROCHOIDNÍ FRÉZOVÁNÍ .....                                                                            | 20 |
| 2.1 Matematický popis trochoidních trajektorií při frézování .....                                      | 20 |
| 2.2 Typy trajektorií trochoidního frézování .....                                                       | 23 |
| 2.2.1 Trochoidní frézování s modelem CATIA .....                                                        | 23 |
| 2.2.2 Cykloidní formovací frézování .....                                                               | 24 |
| 2.2.3 Půlkruhové frézování .....                                                                        | 24 |
| 2.2.4 Kývavé frézování .....                                                                            | 24 |
| 2.2.5 Postupově kývavé frézování .....                                                                  | 24 |
| 2.2.6 Konvenční drážkové frézování .....                                                                | 24 |
| 2.2.7 Dvojitě trochoidní frézování – kývavé frézování .....                                             | 25 |
| 2.2.8 Epicykloida vs trochoida .....                                                                    | 25 |
| 2.3 Výhody trochoidního frézování .....                                                                 | 26 |
| 2.4 Vymezení řezných podmínek trochoidního frézování pro CNC stroje .....                               | 28 |
| 2.4.1 Tvorba třísky a průřez třísky pro frézování obecně .....                                          | 28 |
| 2.4.2 Silové zatížení pro frézování obecně .....                                                        | 30 |
| 2.4.3 Silové zatížení pro trochoidní frézování v závislosti na $a_e$ .....                              | 30 |
| 2.5 Struktura povrchu a predikce kvality opracovaných ploch pro CNC stroje .....                        | 33 |
| 2.5.1 Predikce struktury povrchu při čelním trochoidním frézování .....                                 | 34 |
| 2.5.2 Predikce struktury a kvality stěny drážky při trochoidním frézování .....                         | 37 |
| 2.6 Programování a tvorba algoritmů pro trochoidní frézování pro CNC stroje .....                       | 37 |
| 2.6.1 Tvorba algoritmů pro trochoidní frézování .....                                                   | 38 |
| 2.6.2 Analytický algoritmus pro predikci záběru nástroje .....                                          | 38 |
| 2.6.3 Numerická algoritmus pro predikci časového průběhu úběru třísky .....                             | 40 |
| 2.7 Nástroje pro trochoidní frézování .....                                                             | 42 |
| 2.8 Použití trochoidního frézování .....                                                                | 42 |
| 3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ TECHNOLOGIÍ A TROCHOIDNÍCH INTERPOLACÍ NA CNC STROJI .....                     | 44 |
| 3.1 Úvod do experimentu programování trochoidních interpolací pro výrobu drážky na CNC stroji .....     | 44 |
| 3.2 Programování trochoidních interpolací s ohledem na průřez třísky .....                              | 48 |
| 3.3 Programování trochoidních interpolací s ohledem na silové zatížení .....                            | 49 |
| 3.4 Programování trochoidních interpolací s ohledem na kvalitu opracovaných ploch .....                 | 57 |
| 4 ROZBOR A SROVNÁNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ JEDNOTLIVÝCH PROGRAMŮ PRO TROCHOIDNÍ A LINEÁRNÍ FRÉZOVÁNÍ ..... | 65 |
| 4.1 Úvod do experimentu pro výrobu drážek lineárním frézováním .....                                    | 65 |
| 4.2 Srovnání průřezu třísky .....                                                                       | 66 |

---

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 4.3 Srovnání silového zatížení.....           | 66 |
| 4.4 Srovnání kvality opracovaných ploch ..... | 74 |
| 4.5 Doporučení pro praxi.....                 | 80 |
| 5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....        | 81 |
| ZÁVĚR.....                                    | 85 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....                 | 87 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....       | 91 |
| SEZNAM PŘÍLOH .....                           | 94 |

---

## ÚVOD

Trochoidní dráhy nástroje se objevily jako nové typy strategií vysokorychlostního frézování. Lze je programovat díky vysoce dynamickým obráběcím strojům s výkonnými NC řídicími jednotkami [1]. Trochoidní frézování se řadí mezi nekonvenční metody frézování, kterým lze dosáhnout kombinací dráhy nástroje a řezných podmínek velice efektivní výroby [2]. Trochoida vzniká spojením rotačního a translačního pohybu, tedy rotací nástroje a pohybem středu ve směru posuvu [2,3]. Každá nová kružnice je ve vzdálenosti kroku mezi středy po sobě jdoucích trochoid [3]. Tato metoda nabízí mimo jiné také spoustu výhod, zejména díky kratší době nástroje v záběru omezení přehřívání nástroje a větší prostor pro odvod třísek a díky menšímu úhlu záběru omezení vibrací nástroje [4]. Trochoidní křivky lze popsat matematickými interpolacemi a závislostmi, které se dají dále použít v praxi k tvorbě algoritmů a modelování dráhy nástroje [3,5]. Posuvová rychlost je jeden z hlavních vstupních parametrů ovlivňující proces trochoidního frézování. Má vliv na produktivitu výroby jako celek, zejména na silové zatížení, drsnost povrchu obrobku a úběr materiálu za jednotku času.

Diplomová práce se zabývá tím, jak ovlivňuje programování trochoidních interpolací na CNC stroji průřez třísky, silové zatížení a kvalitu opracovaných ploch drážky.

# 1 ÚVOD DO PROCESU FRÉZOVÁNÍ

Pomocí frézování se daný hrubý obrobek obrobí do dokončeného obrobku. Jakost hotového obrobku se odvíjí od zvolené dráhy nástroje, metody frézování, typu nástroje a řezných podmínek. U frézování koná rotační pohyb vícebřitý řezný nástroj tzn. fréza a posuvný pohyb obrobek [6]. Rotační pohyb je zde hlavní pohyb a definuje ho řezná rychlost  $v_c$ . Vedlejší pohyb je posuvový, kde je obvyklý směr posuvu kolmý k ose nástroje a definuje ho posuvová rychlost  $v_f$  [7,8]. Definují je základní vztahy [7]:

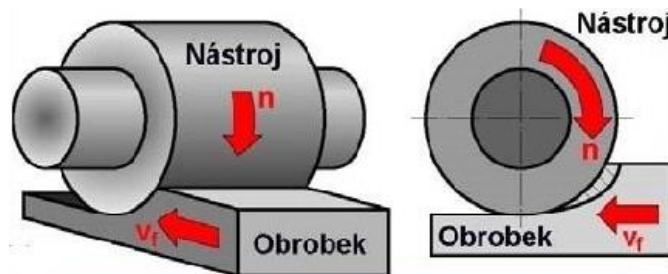
$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}, \quad (1.1)$$

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n, \quad (1.2)$$

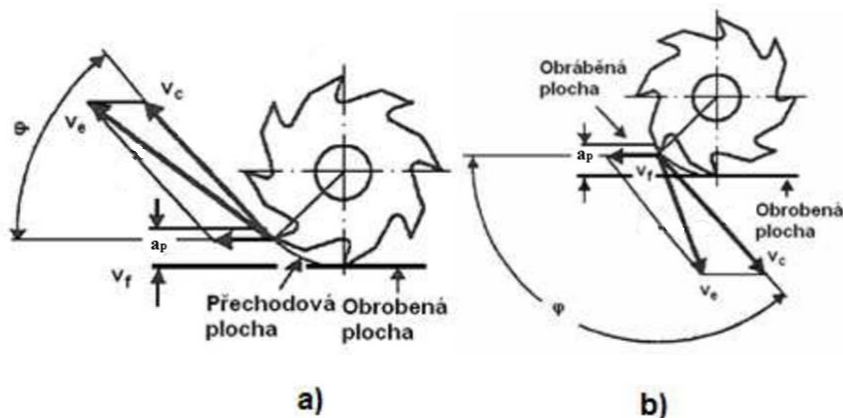
kde  $d$  je průměr nástroje,  $n$  jsou otáčky vřetene,  $f_z$  je posuv na zub a  $z$  je počet zubů nástroje.

Mezi základní druhy frézování patří frézování válcové a frézování čelní. Při frézování válcovém, dochází k obrobení materiálu obvodem nástroje, zatímco při čelním frézováním čelem nástroje [8].

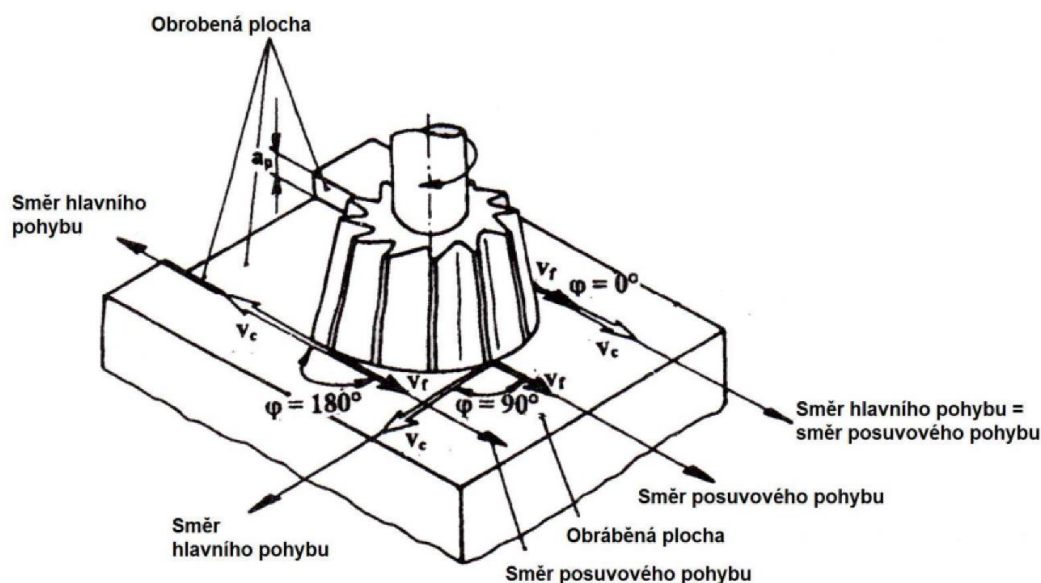
Frézování se rozděluje na frézování sousledné a nesousledné. Sousledné frézování znamená, že je směr otáčení frézy stejný jako směr posuvu obrobku [8]. Tloušťka třísky se během procesu zmenšuje až na nulu. Nevýhodou je, že zmenšování třísky vede k rázovému namáhání břitu. Výhodou je, že je zde menší teplo [7]. Nesousledné frézování znamená, že je směr otáčení frézy proti směru posuvu obrobku [8]. Tloušťka třísky se během procesu naopak zesiluje a na začátku procesu je nulová. Mezi nevýhody patří, že zde dochází k odtlačování břitu ze záběru vlivem silného tlaku mezi obrobkem a frézou. Tříska, která zůstane během procesu nesousledného frézování na břitu až do dalšího záběru, je vtažena mezi obrobek a břit. Tento jev často vede k lomu břitové destičky, což se u sousledného frézování nestává, protože tam je tříska odstraněna z břitu [7].



Obr. 1 Sousledné frézování [8].



Obr. 2 Kinematika válcového frézování: a) sousledného b) nesousledného [7].



Obr. 3 Kinematika čelního frézování [7].

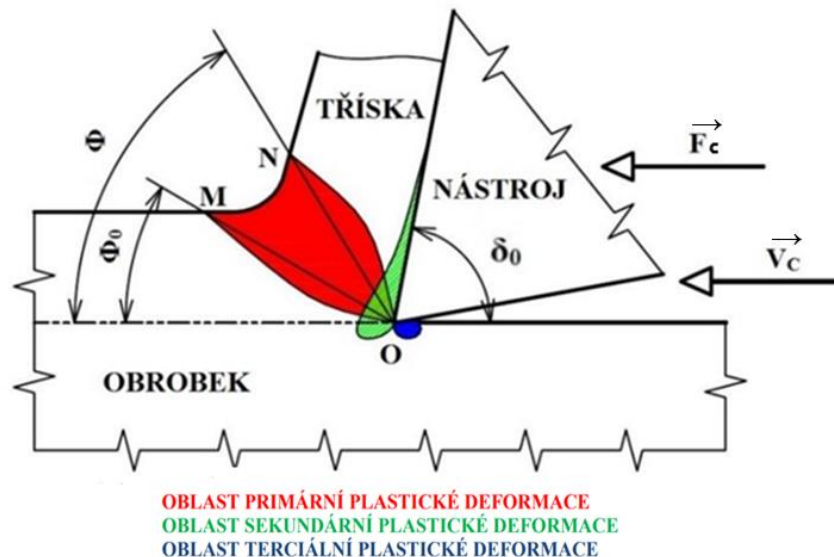
## 1.1 Oblasti plastické deformace při tvorbě třísky

Tříska vzniká zatěžováním řezného nástroje dvěma způsoby [6]:

- odtržením, což je křehký lom v polykrystalu;
- odstřížením, což je tvárný lom v oblasti převládajících smykových napětí.

V průběhu tvorby třísky se materiál na obrobku nachází v mezních stavech pružné napjatosti, plastické deformace a lomového porušení, které vede k oddělení částic materiálu [6]. Plastické deformace jsou rozdělené na 3 oblasti: před břitem nástroje – primární, v oblasti styku čela nástroje a třísky – sekundární a v povrchu obrobené plochy – terciální [24].

Oblast primární deformace je ohraničená body MNO, kdy křivka MO definuje začátek a křivka NO konec plastické deformace. Čím větší je řezná rychlost, tím užší je oblast MNO. Zároveň platí, že čím větší je tvrdost a pevnost materiálu obrobku, tím menší je oblast MNO. Dále čím větší je úhel střižné roviny  $\Phi$ , tím je tříska štíhlejší, proces obrábění všeobecně méně energeticky náročný a povrchové vrstvy obrobku méně ovlivněny. Oblast sekundární plastické deformace se nachází v povrchových vrstvách styku čela nástroje s plochou třísky. Vzniká zde nárůstek, jehož velikost je závislá na řezné rychlosti. Nárůstek je váznoucí vrstva materiálu na čele nástroje, případně i hřbetu nástroje. Oblast terciální plastické deformace je oblastí tření nástroje o povrch obrobeného materiálu. Třením hřbetu nástroje a odpruženého materiálu se ovlivňuje zpevnění povrchové vrstvy obrobku. Tato oblast ovlivňuje kvalitu konečného povrchu obrobku [6].



Obr. 4 Oblasti plastické deformace – primární, sekundární a terciální [6].

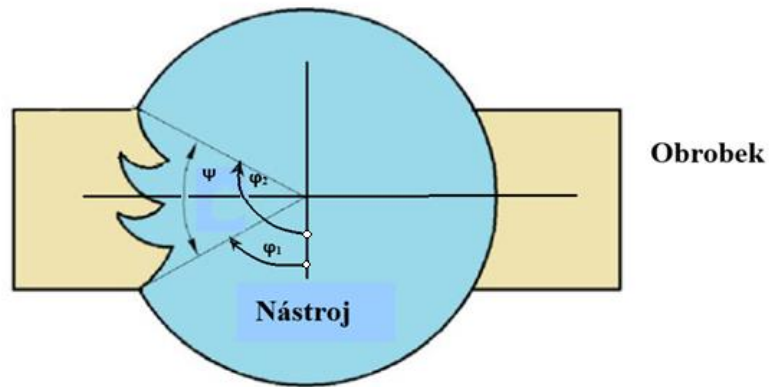
## 1.2 Úvod do dynamického frézování

Dynamické frézování řeší problém, jaké zvolit řezné podmínky, frézu a její dráhu při dosažení vyšší efektivity obrábění, než je dosažitelná konvenčním frézováním. Definuje geometrii frézy a průběh úběru třísky, kterým se dosahuje menší opotřebení nástroje a kvalitnější povrch výsledného obrobku [2,9]. Zlepšuje úběr materiálu při udržení bezpečnosti obráběcího procesu [10]. Tento způsob frézování začala používat firma Seco Tools pro automobilový průmysl v 80. letech ve Velké Británii. V té době CAM softwary ani počítačové numerické řídicí systémy nebyly zdaleka na takové úrovni jako dnes, tedy nemohly tento typ obrábění prakticky využít [2]. Pro výpočet objemu materiálu za jednotku času platí [11]:

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000}, \quad (1.3)$$

kde je  $a_p$  axiální hloubka řezu,  $a_e$  radiální hloubka řezu.

Hlavním smyslem dynamického frézování je konstantní úhel záběru nástroje  $\phi$ , který vede ke konstantnímu zatížení frézy po celou dobu dráhy nástroje [12]. Úhly  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  jsou úhly pootočení frézy do záběru. Úhel opásání nástroje  $\Psi$  zobrazuje část obvodu frézy, kde dochází k úběru materiálu v podobě třísek. Ve vztahu k rozteči zubu  $p$  určuje počet zubů v záběru frézy  $z_z$ . Pokud se jedná o řezné podmínky jako řezná rychlost  $v_c$  a posuv na zub  $f_z$ , ty jsou díky tomu také konstantní. Pokud se jedná o řezné síly, teplotu v řezu, tak tímto frézováním jsou stabilnější [2]. Jako další se zde uplatňuje vytváření menšího průřezu třísky a to tak, že je v záběru méně než polovina průměru nástroje. Průměrná tloušťka třísky  $h_m$  by měla splňovat doporučení výrobce nástroje, co se týče jeho zatížení. Průměrná tloušťka třísky je u tohoto radiálního záběru nástroje menší než posuv na zub [10].



Obr. 5 Úhel záběru nástroje  $\varphi$  a úhel opásání nástroje  $\Psi$  – podle [13].

Pro tento účinný typ frézování je potřeba nejen dostatečně výkonný CAM systém, ale také rychlé přečtení mnoho řádkového programu NC systémem stroje. Nezbytné je také správné zvolení rezného nástroje a řídicího systému stroje. Rezné nástroje jsou ze slinutých karbidů a měly by umožňovat vysoké rychlosti posuvu  $v_f$  bez vlivu s dostatečným prostorem pro odvod třísek. Rychlost posuvu je obvykle rychlost pohybu osy frézy. Obvykle jsou třísky sice štíhlé v radiálním směru a dlouhé v axiálním směru. Třísky se zde oddělují zpravidla v axiálním směru, ve kterém jsou velmi dlouhé, bez porušení kvality povrchu. To zaručuje dělič třísek, který je na ostří v podobě horizontálních drážek [2,10].



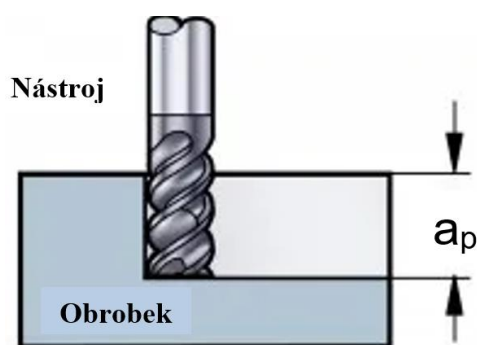
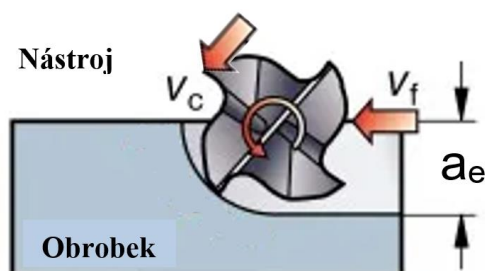
Obr. 6 Rozdíl třísek při použití standardního vs dynamického nástroje [14].



Obr. 7 Dělič třísek – podle [15].

### 1.3 Frézování s vysokým posuvem

Mezi dynamické obrábění patří trochoidní frézování, ale také frézování vysokým posuvem a frézování s vysokou řeznou rychlostí. Frézování vysokým posuvem má zkratku HFM, tedy *High Feed Machining*. Jedná se o obrábění s vysokým posuvem na zub, tedy  $f_z$ . K obrábění s vysokým posuvem se využívá střední až vysoká řezná rychlost  $v_c$ , malá axiální hloubka řezu  $a_p$  a velká radiální hloubka řezu  $a_e$ . Axiální hloubka řezu charakterizuje výšku řezu a je ve směru osy frézy, radiální hloubka řezu charakterizuje šířku řezu a je ve směru poloměru nástroje. Díky těmto podmínkám je dosaženo velkého úběru materiálu z obrobku za jednotku času [2,9]. HFM má zhruba 10krát vyšší posuvy, než je u konvenčního frézování. V závislosti na vyšším posuvu a vyšším úběru materiálu je vyšší drsnost povrchu. Horší kvalita výsledného povrchu obrobku je nevýhodou HFM [16].

Obr. 8 Axiální hloubka řezu  $a_p$  [17].Obr. 9 Radiální hloubka řezu  $a_e$ , [17].

Využití HFM je zejména při hrubovacích operacích, a to na těžko obrobitelné materiály nebo při frézování s dlouhým vyložení nástroje. V důsledku menšího radiálního zatížení na nástroj se nevyskytují tolik vibrace, je zde nižší požadovaný příkon stroj i řezné síly. Díky těmto velice příznivým vlastnostem se dosáhne menšího opotřebení nástroje, lepší životnosti nástroje a větší efektivity obrábění než u konvenčních metod obrábění, které nenásledují nějaké speciální myšlenky [2,9].

#### **1.4 Frézování s vysokou řeznou rychlostí**

Frézování s vysokou řeznou rychlostí  $v_c$  je samozřejmě charakterizované vysokou řeznou rychlostí a malým posuvem na zub  $f_z$ . Nese zkratku HSM, tedy *High Speed Machining*, což znamená vysokorychlostní obrábění. Pro tuto metodu je potřeba řezné nástroje z tvrdých a ostrých materiálů na bázi slinutých karbidů, řezné keramiky a KNB, přičemž se využívá malá axiální i radiální hloubka řezu ( $a_p$ ,  $a_e$ ) [2]. Tento typ frézování byl nejdříve využíván pro výrobu hliníkových komponent do letadel, ale v dnešní době se tímto způsobem dají obrábět například i tvrdé kovy [18].

Díky svým charakteristikám se HSM využívá v širokém spektru průmyslů – v leteckém, automobilovém, optickém, také při výrobě zápustek a forem [18].

Další metodou dynamického frézování je trochoidní frézování, kterému je věnována celá následující kapitola.

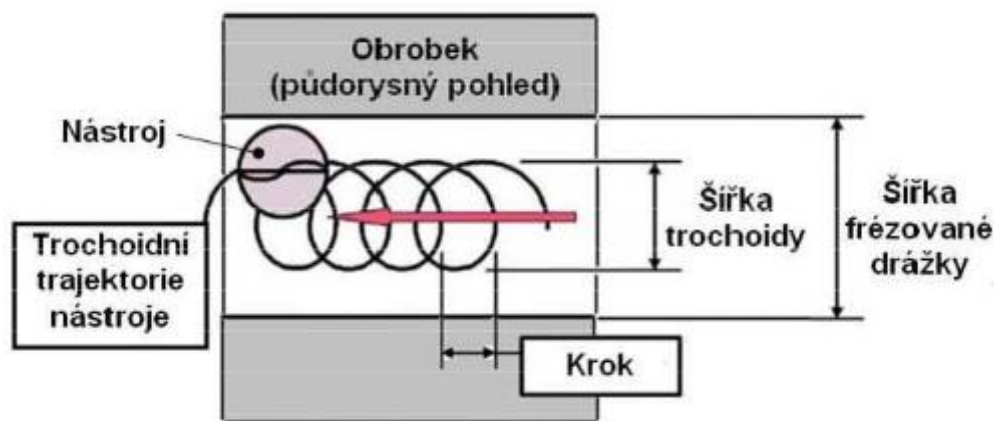
## 2 TROCHOIDNÍ FRÉZOVÁNÍ

Metoda trochoidního frézování se stává kvůli svým vlastnostem stále žádanější a žádanější metodou dynamického obrábění. Tento druh se začal vyvíjet již dříve, ale až v posledních letech díky vyspělejším technologiím jej můžeme využít i v reálné praxi [3]. Výhodně kombinuje dráhu nástroje a řezné podmínky tak, aby se dosáhlo co nejefektivnější výroby [2].

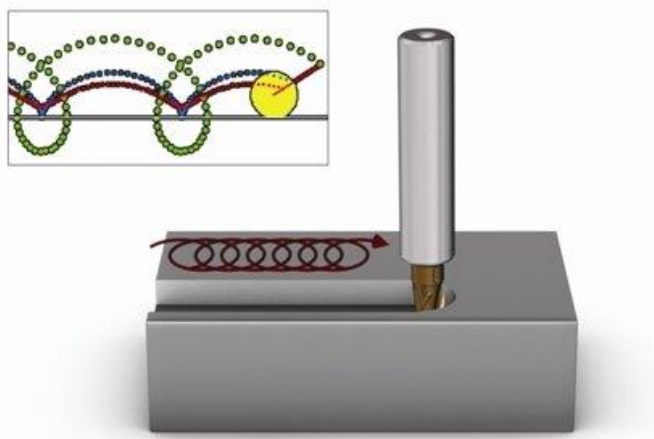
### 2.1 Matematický popis trochoidních trajektorií při frézování

Trochoidní trajektorie je v podstatě spojení kruhového a lineárního pohybu. Tento trochoidní pohyb je tedy spojení rotačního a translačního posuvu řezného nástroje-to znamená, že se nástroj otáčí i posouvá [3].

Křivka zvaná trochoida vzniká bodem na rotujícím kruhu, kterého střed se zároveň i pohybuje ve směru posuvu [2]. Fréza koná planetový pohyb, který se rozděluje na cykly. V každém novém cyklu planetového pohybu vzniká jeden krok  $c$ , který zajišťuje přísuv do záběru [3].



Obr. 10 Trochoidní pohyb [3].



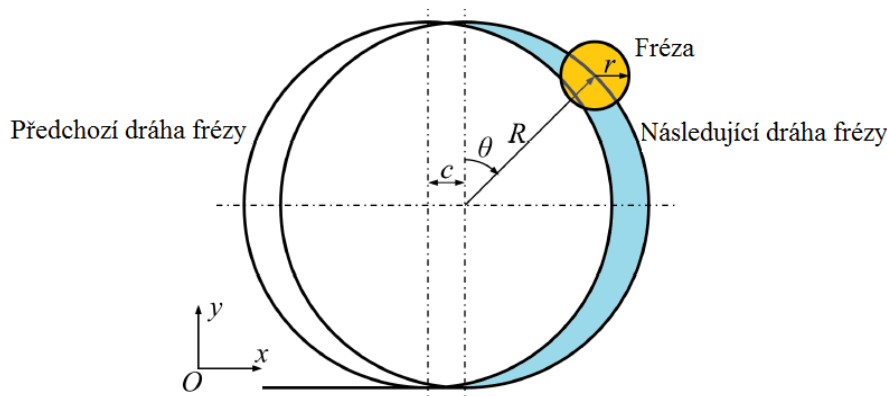
Obr. 11 Ukázka křivky: trochoidy [2].

Trochoida je dána jejím poloměrem, úhlem a krokem posuvu. Poloměr trochoidy  $R$  je tedy poloměr kružnice, která koná kruhový pohyb (valivý) po pevné přímce. Základní přímka vychází ze středu nástroje. Úhel trochoidy  $\theta$  je úhel polohy nástroje záběru. Krok trochoidy  $c$  je vzdálenost stále vznikajících sousedních kružnic. Nová kružnice vždy vznikne posunutá o vzdálenost posunu nástroje [3].

Polohu středu nástroje při samotném procesu frézování v souřadnicovém systému XY popisují následující rovnice [3,5] – viz obr. 12:

$$x_c = R \cdot \sin\theta + \frac{c \cdot \theta}{2 \cdot \pi}, \quad (2.1)$$

$$y_c = R \cdot \cos\theta. \quad (2.2)$$



Obr. 12 Předchozí a následující dráha frézy mezi dvěma kroky [3].

Na obr. 13 je zobrazena trochoidní dráha s úhlem trochoidy  $\theta$ , kde je první kružnice dráhy označena  $C_0$  se středem  $O_0 [0,0]$  a poloměrem  $R$ . Kružnice  $C_1$  se středem  $O_1 [0, c]$  je následující kružnice, která na ni navazuje. Kružnice  $C_{env}$  je získaný tvar drážky, který vznikne pohybem nástroje, se středem  $O_0$  a poloměrem  $R_{env}=R+r$ . Nástroj má střed v bodě  $O_c$  a poloměr  $r$ . Lze vypočítat radiální hloubku řezu podle poloměru trochoidy, nástroje a kroku takzvaně kruhovým modelem anebo trochoidním modelem [1]. Dráha nástroje u kruhového modelu jsou dva po sobě následující kruhy. Tyto dva kruhy jsou spojeny lineárním segmentem. Zatímco dráha nástroje u trochoidního modelu je v bodě dotyku spojitá [6]. Jako první bude popsán kruhový model, pro který platí následující vztahy [1]:

- středová poloha nástroje  $O_c$

$$x_c = R \cdot \cos\theta, \quad (2.3)$$

$$y_c = R \cdot \sin\theta + c, \quad (2.4)$$

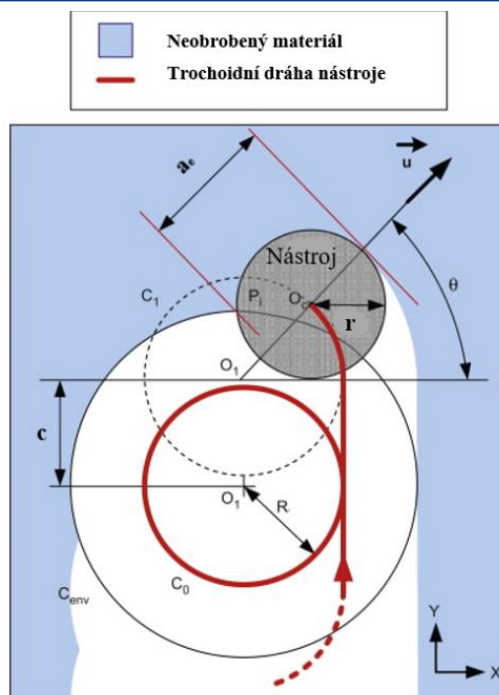
- průsečík  $C_{env}$  a nástroje - bod  $P_i [x_i, y_i]$ :

$$x_i^2 + y_i^2 = R_{env}^2, \quad (2.5)$$

$$(x_i - R \cdot \cos\theta)^2 + (y_i - c - R \cdot \sin\theta)^2 = r^2, \quad (2.6)$$

- radiální hloubka řezu  $a_e$ :

$$a_e = \overrightarrow{PiOc} \cdot \vec{u} + r = (x_i - x_c) \cdot \cos\theta + (y_i - y_c) \cdot \sin\theta + r. \quad (2.7)$$



Obr. 13 Trochoidní dráha nástroje [6].

Trochoidní frézování není vhodné, když je maximální radiální hloubka řezu stejná jako průměr nástroje, jelikož zde dochází k plnému opásání nástroje. Tento stav se nazývá mezní stav, při němž tyto mezní stavy negenerují menší opásání nástroje, než je průměr nástroje. Při určitém poloměru trochoidy i nástroje nastává 5 různých případů frézování, které jsou vidět na obr.13, kde jsou právě i již zmíněné netolerovatelné 3 případy mezních stavů – MS1, MS2, MS3. Další dva případy jsou tolerovatelné u trochoidního frézování a lze u nich řídit radiální hloubku řezu – PS1 a PS2 [6]. Pro PS1 a PS2 platí [1]:

- PS1 je stav, při kterém se tato radiální hloubka řezu zvyšuje na lineárním segmentu plynule až dosáhne maximální hodnoty na začátku kruhu a poté se zase snižuje, tato maximální hloubka řezu je definována:

$$a_{emax} = \left(1 + \frac{r}{R}\right) \cdot c - \left(\frac{1}{2R}\right) \cdot c^2, \quad (2.8)$$

- PS2 je stav, při kterém se radiální hloubka řezu zvyšuje na lineárním segmentu až dosáhne maximální hodnoty při spojení s kruhovým segmentem, pro tento stav platí:

$$r^2 \geq R^2 + (R_{env} - c)^2, \quad (2.9)$$

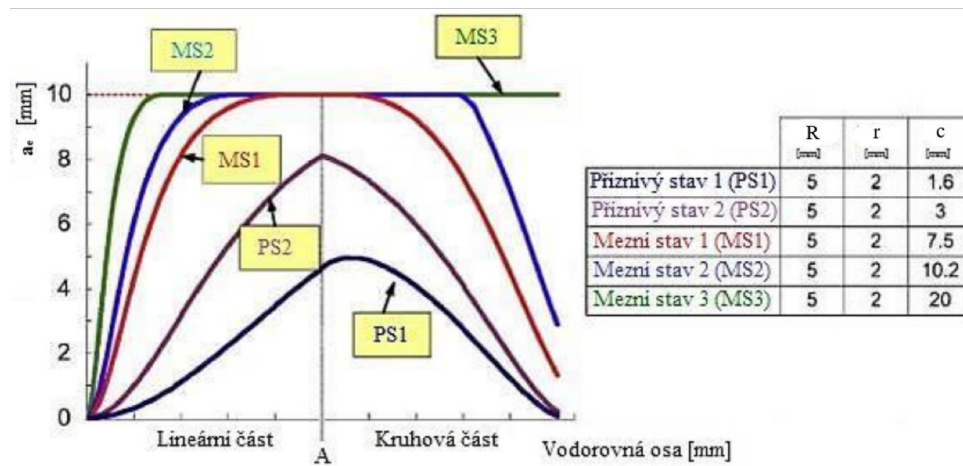
$$c \geq (R + r) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{r - R}{r + R}}\right), \quad (2.10)$$

- u stavu PS2 se zvyšuje trochoidní krok, v tomto případě se maximální radiální hloubka řezu dostane vyřešením obecné rovnice (2.13) při dosazení  $\Theta=0$ :

$$x_i^2 + y_i^2 = R_{env}^2, \quad (2.11)$$

$$(x_i - R)^2 + (y_i - c)^2 = r^2, \quad (2.12)$$

$$a_{emax} = R_{env} - x_i. \quad (2.13)$$

Obr. 14 Průběh radiální hloubky řezu  $a_e$  při nastavení R, r a c [6].

U určení radiální hloubky řezu trochoidním modelem je potřeba numerický výpočet. U tohoto modelu je trochoida spojitá v tečnosti i zakřivení, takže je zde spojitost posuvové rychlosti i zrychlení a postup výpočtu je následující [1]:

- aktuální bod nástroje  $O_c$ :

$$\overrightarrow{OO_c} = \begin{cases} x_c = 0 + R \cdot \cos\theta \\ y_c = \frac{c \cdot \theta}{2\pi} \cdot R \cdot \sin\theta, \end{cases} \quad (2.14)$$

- aktuální bod drážky nástroje:

$$\overrightarrow{OP_i} = \overrightarrow{OO_c} - c \cdot \vec{j} + r \frac{\vec{n}}{\|\vec{n}\|}, \quad (2.15)$$

kde je  $\vec{n}$  vektor kolmý k trajektorii, která je popsána  $O_c$ ,

- jakýkoliv bod dráhy nástroje  $O_c$  se vypočítá bod  $P_i$  pomocí:

$$\|\overrightarrow{O_c P_i}\| = r. \quad (2.16)$$

- radiální hloubka řezu nakonec:

$$a_e = \left(1 + \frac{r}{R}\right) \cdot c - \left(\frac{1}{2R}\right) \cdot c^2. \quad (2.17)$$

Dále se postupuje numerickým výpočtem k maximální radiální hloubce řezu u stavu PS1 i PS2 [1].

## 2.2 Typy trajektorií trochoidního frézování

Po již proběhnutých výzkumech lze říct, že typů drah trochoidních frézování je více. Tyto dráhy jsou naprogramovány v moderních systémech, ale bývají zjednodušené [3,19]. Jejich souhrn provedli Szalóki, Csuka a Csesznok [3,19]:

### 2.2.1 Trochoidní frézování s modelem CATIA

Zde na obrázku A se dráha nástroje vytvořila „Prismatic Machining“ modulem pomocí CATIA V5R20 CAD/CAM. Dráha je lehce naprogramovatelná a je tvořená interpolací kružnic a křivek. Křivky na sebe navazují. Nejprve se vytvoří kružnice, poté interpolace křivky podél stěny drážky. Díky kruhové interpolaci, která následuje až po lineární se na stěně vytvoří výklenky,

kteří závisí na přesnosti a také na velikosti přísuvu frézy  $c$ . Díky tomuto má jedna stěna drážky lepší povrch než druhá stěna drážky [3,19].

### 2.2.2 Cykloidní formovací frézování

Cykloida na obrázku B se dá použít, pokud se jedná o uzavřenou nebo otevřenou, přímou nebo nespojitou dráhu nástroje. Tuto strategii charakterizuje smyčkový cykloidní tvar, čímž se snižuje zatížení nástroje a také se snižují řezné síly. Na druhou stranu tu kvůli délce cesty – ve tvaru cykloidy, vzniká tzv. „mrtvý čas“, kdy nástroj je mimo záběr. Mrtvý čas tvoří 50 % ze strojního celkového času a je to čas, kdy nástroj není v záběru kvůli opisování cykloidní křivky [3,19].

### 2.2.3 Půlkruhové frézování

Strategie na obrázku C je vyvinuta, aby se snížil mrtvý čas, a to na hodnotu 40 %. Důvodem je co nejkratší cesta nástroje zpátky. Dráha nástroje se tvoří nejdříve pouze po jedné straně drážky a poté po přímce zpět. Vznikne zde dobrá drsnost povrchu a výklenky pouze na jedné ze stran drážky. Tato strategie je vcelku produktivní a lehce naprogramovatelná [3,19].

### 2.2.4 Kývavé frézování

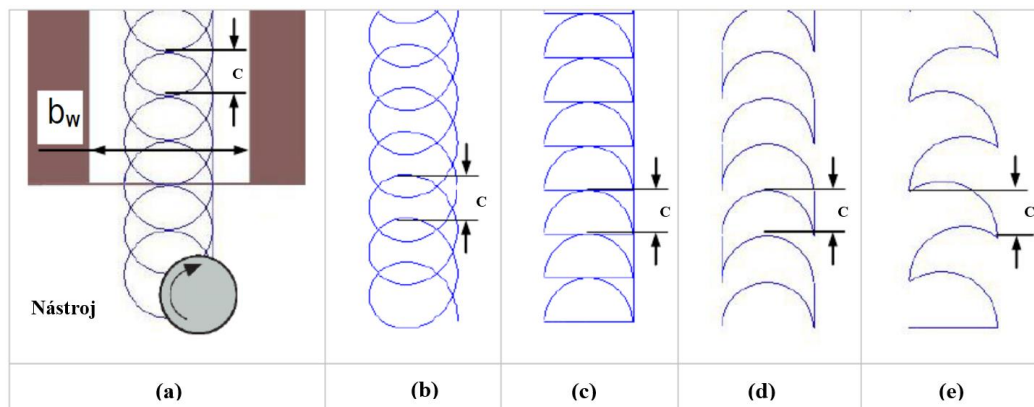
Strategie typu D na obrázku zcela odstraňuje mrtvé časy nástroje, tedy zde není žádný chod nástroje naprázdno bez obrábění. A to tak, že je zde i zpáteční obrábění. Tato dráha složená z interpolací půlkruhů a křivek je také lehce naprogramovatelná. Výhodou je, že tímto lze dosáhnout většího úběru materiálu. Nevýhodou ale je, že se vyskytují výklenky na jedné i druhé straně drážky a také, že nástroj po dokončení půlkruhu provede přísuv  $c$  dopředu [3,19].

### 2.2.5 Postupově kývavé frézování

Tato strategie vychází z kyvadlové strategie viz. obrázek E a je lze také snadno naprogramovat. Není tu žádný mrtvý čas, jelikož zde není žádná interpolace podél přímého úseku, ale pouze podél oblouků s poloměrem  $R$ . Nástroj se tedy pohybuje pouze po obloucích, které závisí na šířce drážky  $b_w$ , průměru nástroje  $d$  a kroku trochoidy nástroje  $c$  [3,19].

### 2.2.6 Konvenční drážkové frézování

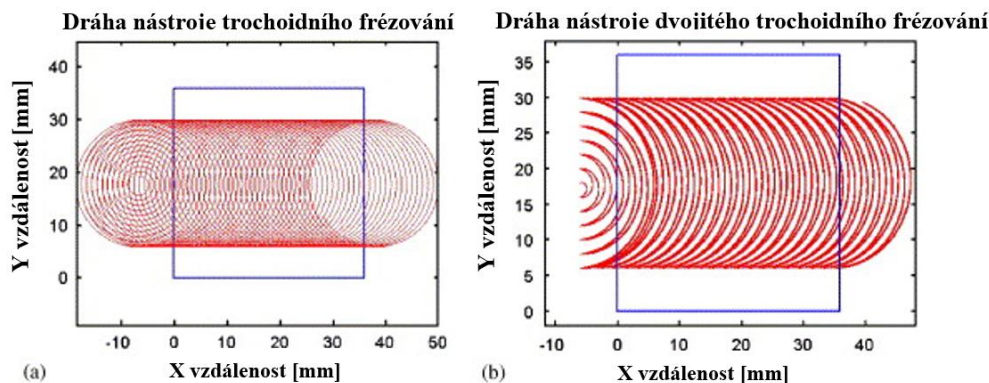
Klasické drážkování je nejobvyklejší metodou pro tvorbu drážek. Je naprosto vhodná pro tvorbu krátkých drážek s malou hloubkou, a naopak naprosto nevhodná pro tvorbu dlouhých drážek s velkou hloubkou. Frézování hlubokých drážek se provádí opakovanými řezy, což může mít negativní dopad na životnost břitu a na produktivitu procesu [3,19].



Obr. 15 Typy drah trochoidního frézování [19].

## 2.2.7 Dvojité trochoidní frézování – kývavé frézování

Tato strategie je viditelně zobrazena na obr.16, kde je k rozeznání dráha nástroje pro trochoidní nebo dvojité trochoidní frézování. U dvojitého trochoidního frézování se provádí obrábění obrobku i v zadní půlce kruhu dráhy nástroje na rozdíl od běžného trochoidního obrábění a tím se sníží výrobní časy [20].



Obr. 16 Rozdíl drah nástroje mezi trochoidním (vlevo) a dvojitým trochoidním frézováním (vpravo) [20].

## 2.2.8 Epicykloida vs trochoida

Trochoidní pohyb byl již popsán a je znovu zaznačen pro porovnání na obr.17. Epicykloidní pohyb je jeden z nových podob dráhy nástroje vycházející z trochoidy a je zobrazen na obr.18. Je to rozděleno na osu X a osu Y, jež v obou případech značí délku neboli polohu v milimetrech. Dráha pro střed nástroje, který je na obr.18 červenou barvou se skládá ze dvou částí tzn. ze dvou oblouků. Boční trochoidní oblouky jsou zaznačeny modrou barvou a hlavní trochoidní oblouk zelenou. Hlavní oblouk určuje, kolik kroků bude probíhat a pro epicykloidní pohyb platí [21]:

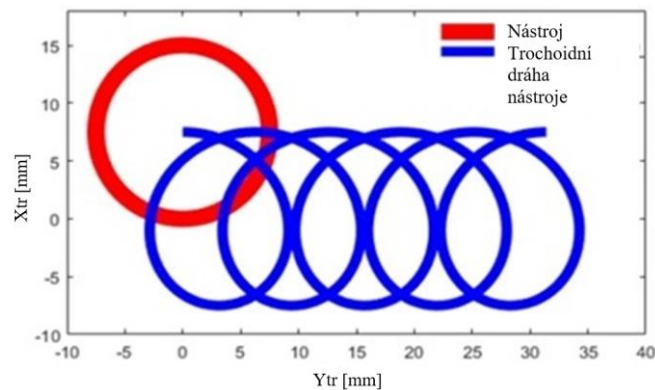
$$X_{epi} = c \cdot \frac{\Phi}{2\pi} + n \cdot U \cdot \sin\Phi + n \cdot U \cdot \sin(m\Phi), \quad (2.18)$$

$$Y_{epi} = n \cdot U \cdot \cos\Phi + n \cdot U \cdot \cos(m\Phi), \quad (2.19)$$

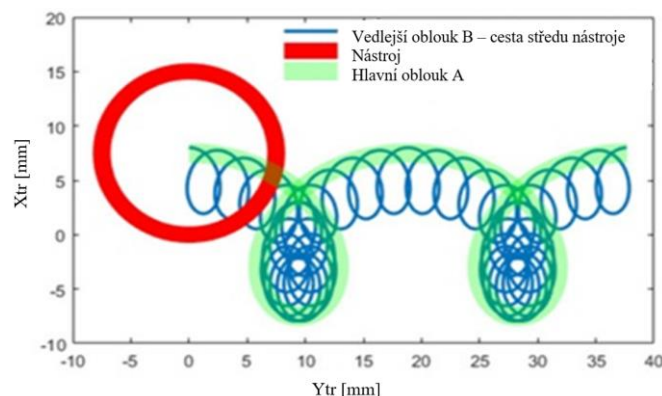
$$U = \frac{bw-d}{2}, \quad (2.20)$$

kde  $X_{epi}$  a  $Y_{epi}$  jsou polohy středu nástroje v souřadnicovém systému XY, U je parametr, c je krok nástroje,  $\Phi$  je úhel epicykloidní dráhy s osou Y,  $b_w$  je šířka drážky, d je průměr nástroje, n vyjadřuje poměr radiálního záběru bočních a hlavních oblouků, m je počet bočních oblouků,  $n = 1/2$ .

Když se srovná epicykloidní a trochoidní dráhu nástroje, dojde se k výsledku, že u epicykloidy lze vybrat daleko větší krok nástroje. Z toho vyplývá, že díky tomu je výsledná epicykloidní dráha kratší než trochoidní. Již v dřívějších experimentech bylo zjištěno, že epicykloidní obrábění ve srovnání s trochoidním nabízí jak zkrácení doby obrábění, která vede k větší produktivitě, tak i zvýšení řezných sil a vibrací, které mohou způsobit větší opotřebení nástroje [21].



Obr. 17 Trochoidní pohyb [21].

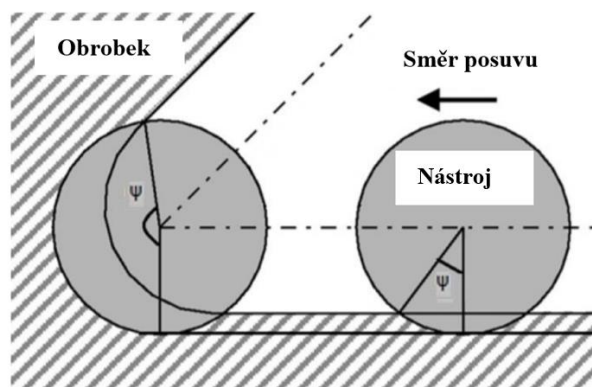


Obr. 18 Epicykloidní pohyb [21].

## 2.3 Výhody trochoidního frézování

Trochoidní frézování se srovnáním s klasickým frézováním nabízí větší produktivitu, efektivitu, a naopak menší výrobní náklady [4]. Mezi hlavní problémy klasického frézování patří přílišné vznikající teplo a přehřívání nástroje, které lze u trochoidního frézování omezit. Pokud se obrábí klasicky, je příliš velká plocha styku materiálu s obrobkem po příliš dlouhou dobu. Přílišné teplo vzniká kvůli tomu, že je nástroj dlouho v záběru [3]. Když nástroj přichází a odchází z řezné zóny, může se vyskytovat častý vznik vibrací a rezonancí [4]. Styčnou plochu obrobku a nástroje lze zmenšit úhlem opásání  $\Psi$  nebo také jinak úhlem záběru nástroje, což je úhel mezi obrobkem a nástrojem a bývá u trochoidního frézování menší [2]. Také jsou menší řezné síly a není zde problém s odvodem třísek ani ochlazováním nástroje, jelikož má dostatek času tak učinit. Tento čas získá díky tzv. přerušovanému obrábění. Čím je nástroj méně přehřátý, tím má delší životnost a menší opotřebení. Na druhou stranu přerušované obrábění v souvislosti s dynamikou časového průběhu sil má i své negativa. V důsledku toho vznikají rázy, které mohou zkrátit životnost břitu [3].

Na obr. 19 je zobrazeno, jak se zvýší úhel opásání v ostrém rohu. Z již provedených výzkumů je zřejmé, že tento úhel je jeden z hlavních činitelů ovlivňujících zatížení nástroje. Závisí na geometrii dráhy frézy, díky které se mění a tím ovlivňuje zatížení na nástroj [22,6].



Obr. 19 Úhel opásání nástroje  $\Psi$  – podle [6].

Úhel záběru nástroje však určuje radiální hloubka řezu  $a_e$ , kterou můžeme u trochoidního obrábění měnit. Radiální hloubka neboli šířka řezu je měřena rovnoběžně s radiální osou a je to vlastně šířka styku materiálu s obrobkem. Čím menší je radiální hloubka řezu, tím menší je úhel záběru nástroje a styčná plocha. To značí menší teplo a menší opotřebení nástroje [2,3].

Pokud je velký poměr hloubky řezu a průměru nástroje  $d$ , nejen, že dochází k velkému teplu, ale také je zde menší prostor pro obvod třísek. Proto je dobré volit průměr nástroje menší než nominální šířku drážky, jelikož pak je v záběru nástroj kratší dobu a tím se omezí vznikající teplo a vznikne místo pro odchod třísek. Nejvhodnější je zde používat sousledné frézování, což jak již bylo zmíněno znamená, že se nástroj otáčí ve stejném směru, jako se posouvá obrobek [4].

Když se použije malá radiální hloubka řezu  $a_e$  a tím pádem nástroj s malou zubovou roztečí  $p$ , u kterého se do záběru nástroje zapojuje více zubů, dosáhne se vyšší posuvová i řezná rychlost [3]. Vyšší posuv lze tedy dosáhnout frézou s větším počtem zubů, která je pro tuto metodu vhodná [23]. Čím vyšší je posuvová rychlost a posuv za minutu, tím větší je úběr materiálu a produktivita výroby.

Díky všem těmto vlastnostem lze optimálně nastavit řezné parametry a zvýšit tak produktivitu výroby [2,3,4,23].

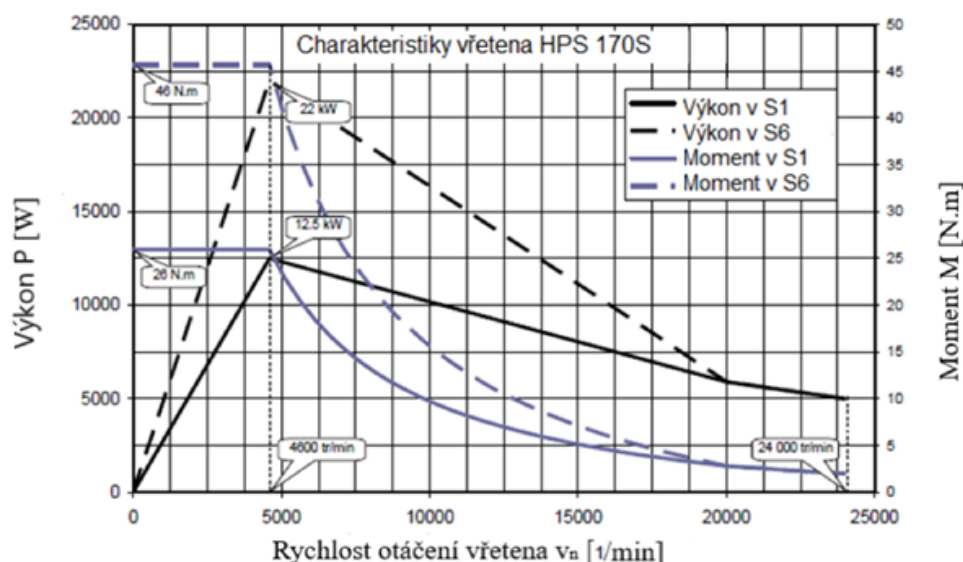
Po zhodnocení drážkování trochoidním způsobem je zřejmé, že nabízí spousta výhod [2,3,4,23]:

- výrobu různých šířek drážek jediným nástrojem, s čímž souvisí menší náklady na nástroje,
- použití nástroje s průměrem menším než nominální šířka drážky, s čímž souvisí více místa pro odchod třísek,
- menší úhel záběru, s čímž souvisí menší styčná plocha, tedy menší vznikající teplo a menší namáhání nástroje,
- přerušované obrábění, s čímž souvisí menší přehřátí a opotřebení nástroje, lepší ochlazování a odvod třísek,
- použití nástroje s malou zubovou roztečí  $p$  díky využití malé radiální hloubky řezu, s čímž souvisí vyšší řezná rychlost a vyšší rychlost posuvu, a tedy vyšší úběr materiálu a tím větší efektivita procesu.

## 2.4 Vymezení řezných podmínek trochoidního frézování pro CNC stroje

Cílem pro nastavení řezných podmínek je nastavit parametry tak, aby se proces stal co nejoptimalizovanějším.

Na obr. 20 je grafické zobrazení výkonu  $P$ , momentu  $M$  a rychlosti otáčení vřetena  $v_n$  u obrábění stroje MIKRON. Z těchto závislostí lze vyvodit, že výkon se mění v závislosti na fréze a řezném materiálu. Při konvenčním frézování je proces limitován režimem stroje. Při trochoidním obrábění lze střídát obráběcí a neobráběcí fázi, což znamená, že se nějakou dobu stroj přetěžuje a nějakou dobu se chladí. To umožňuje přejít na druhý režim, který způsobuje větší výkon a větší úběr třísky, a tedy větší produktivitu výroby.

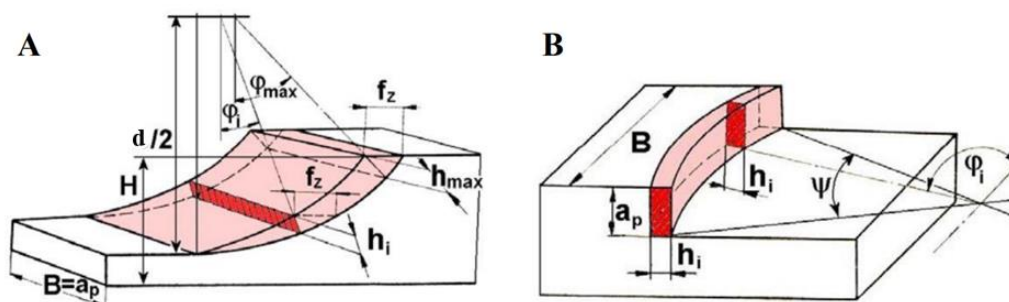


Obr. 20 Charakteristiky obráběcího stroje MIKRON.

Posuv je ideálně měřen jako pohyb středu nástroje a udává i rychlost posuvu. Rychlost posuvu se definuje jako rychlost pohybu nástroje, když je tloušťka třísky optimální a koresponduje s řeznou geometrií. Radiální hloubka řezu  $a_e$  jako šířka záběru nástroje definuje úhel opásání. Tato šířka řezu se měří s radiální osou frézy. Je důležité dbát na její správné určení, jinak je proces naprosto neoptimální. Řezný průměr se může během procesu měnit, a to v závislosti na pohybu frézy a na měnící se axiální hloubce řezu  $a_p$ . Řezný průměr charakterizuje maximální průměr frézy dotýkající se s materiálem obrobku. Poměr tloušťky třísky a posuvu ovlivňuje axiální i radiální hloubka řezu, která závisí na průměru nástroje [2].

### 2.4.1 Tvorba třísky a průřez třísky pro frézování obecně

Frézování je proces, při kterém jsou v záběru bříty periodicky přerušované a může jich být v záběru i více. Během přerušovaného řezného procesu jsou odřezávány krátké třísky proměnné tloušťky, které jsou vždy dělené. Silové zatížení ani průřez třísky není konstantní [7].



Obr. 21 Průřez třísky u: a) válcového b) čelního frézování [6].

U válcového frézování plocha průřezu třísky závisí na úhlu záběru. Na obr. 21 je  $d$  – průměr frézy,  $H$  – výška obrobku,  $B$  – šířka obrobku,  $f_z$  – posuv na zub,  $a_p$  – axiální hloubka řezu. Zde je definice základních závislostí pro válcové frézování [7]:

jmenovitá tloušťka třísky  $h_D$ :

$$h_D = f_z \cdot \sin\varphi, \quad (2.21)$$

maximální tloušťka třísky  $h_{Dmax}$ :

$$h_{Dmax} = 2 \cdot f_z \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D}}, \quad (2.22)$$

průřez třísky  $A_D$ :

$$A_D = f_z \cdot \sqrt{r^2 + \left(\frac{s_s}{2\pi}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^{z_z} (\cos\varphi_{1i} - \cos\varphi_{2i}). \quad (2.23)$$

Další závislosti jsou definovány [25]:

jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$ :

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_i, \quad (2.24)$$

maximální průřez třísky  $A_{Di}$ , pokud je  $\varphi_i = \varphi_{max}$ :

$$A_{Di} = a_p \cdot h_{max} = a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_{max}, \quad (2.25)$$

kde je:

$$\sin\varphi_{max} = \frac{2}{d} \cdot \sqrt{dH - H^2}. \quad (2.26)$$

U čelního frézování tloušťka třísky závisí na úhlu pootočení frézy  $\varphi$  a zároveň tloušťka i tvar průřezu třísky závisí na úhlu nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  a zde je definice základních závislostí [7]:

jmenovitá tloušťka třísky  $h_D$ :

$$h_D = f_z \cdot \sin\kappa_r \cdot \sin\varphi, \quad (2.27)$$

jmenovitá šířka třísky  $b_{Di}$ :

$$b_{Di} = \frac{a_p}{\sin\kappa_r}, \quad (2.28)$$

jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$  je při  $\kappa_r = 90^\circ$ :

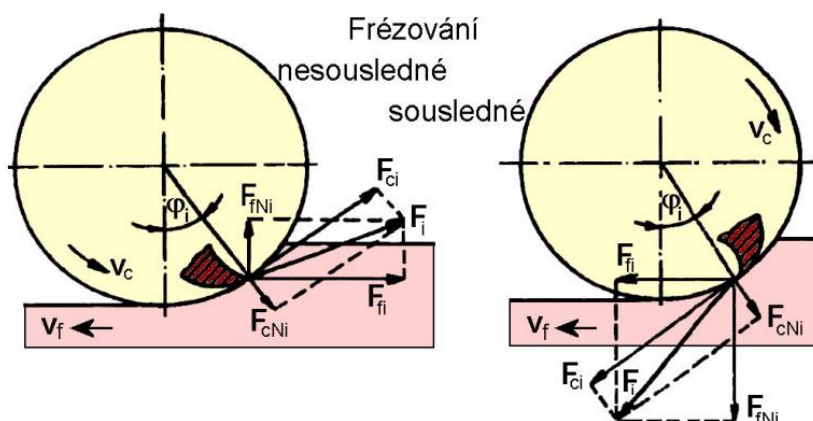
$$A_{Di} = h_{Di} \cdot b_{Di} = f_z \cdot a_p \cdot \sin\varphi_i, \quad (2.29)$$

maximální velikost jmenovitého průřezu třísky  $A_{Dmax}$  je při  $\varphi = 90^\circ$ :

$$A_{Dmax} = f_z \cdot a_p. \quad (2.30)$$

### 2.4.2 Silové zatížení pro frézování obecně

Složky silového zatížení se určují silovými poměry na jednom břitu, jejich rozklad při válcovém frézování je zobrazen na obr.22. Břit je zatížen pod úhlem  $\varphi_i$ . [25].



Obr. 22 Rozklad složek silového zatížení při válcovém frézování na zubu, kde je  $F_i$  celková síla řezání,  $F_{ci}$  řezná složka,  $F_{cNi}$  kolmá řezná složka síly řezání,  $F_{fi}$  posuvová složka síly řezání,  $F_{fNi}$  kolmá posuvová složka síly řezání [25].

Během frézovacího procesu řeznou sílu a celkové silové zatížení nejvíce ovlivňuje úhel záběru  $\varphi$  = úhel opásání nástroje, přičemž se nejvíce zvyšuje při obrábění drážek a rohů. Změny řezné síly vedou k lomům nástroje [6]. Řezné síly mohou narůst až o 200–300 %. Tyto velké nárůsty sil ovlivňují opotřebení nástroje, například u nástrojů s břity do šroubovice jsou nástroje na konci procesu opotřebovány velmi a odtlačuje se od obrobeného povrchu [7]. Pro řeznou sílu  $F_c$  při známosti průběhu řezné síly  $k_{Ci}$  jako funkcí vlastnosti materiálu a tloušťky třísky zde platí vztah [6]:

$$F_C = c_o \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi^{1-mc} d\varphi, \quad (2.31)$$

kde je  $mc$  exponent vlivu tloušťky třísky  $h$  a  $Co$  je konstanta zahrnující obráběný materiál, řezný nástroj a řezné podmínky.

U čelního frézování se nástroje cyklicky zatěžují, což má za následek horší průběh opotřebení břitů a chvění [7]. Řezná síla u čelního frézování je definována [6]:

$$F_C = \sum_{i=1}^{z_z} A_{Di} \cdot k_{Ci}, \quad (2.32)$$

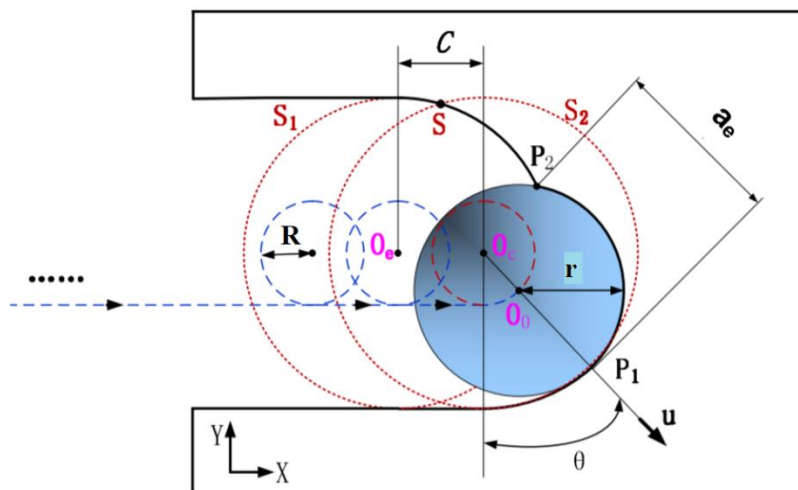
kde je  $z_z$  počet zubů v záběru a  $k_{Ci}$  měrná řezná síla. A dále se dá upravit na vztah silové výslednice [7]:

$$F_C = k_{C1} \cdot a_p \cdot f_z^{1-mc} \cdot \sin \kappa_r^{-mc} \cdot \sin \varphi^{1-mc}. \quad (2.33)$$

### 2.4.3 Silové zatížení pro trochoidní frézování v závislosti na $a_e$

Analytický model řezné síly v čase lze získat transformací souřadnic. Počáteční i konečný úhel nástroje lze dosáhnout z definované radiální hloubky řezu. Na obr. 23 je znázorněn analytický model záběru nástroje, který bude popsán v následující kapitole.  $R$  je poloměr trochoidy,  $r$  je poloměr nástroje, krok je  $c$  a úhel  $\theta$  je úhel nástroje k souřadnici X-Y. Pro pochopení obrázku je důležité vysvětlit význam čar a to, že tečkovaná čára je trajektorie, po které se nástroj bude

pohybovat, zatímco čárkovaná čára je trajektorie středu nástroje  $O_o$ , po které se již pohyboval.  $O_c$  představuje střed současné dráhy a  $O_e$  představuje střed předchozí dráhy. Vektor  $u$  představuje jednotkový vektor ve směru  $O_cO_o$ .  $S_1$  je dříve obrobený povrch a  $S_2$  je aktuálně obrobený povrch, jejichž průsečík je  $S$ .  $P_1$  je radiálně nejvzdálenější bod nástroje a  $P_2$  je průsečík mezi obvodem nástroje a  $S_1$ .  $a_e$  je radiální hloubka řezu a vyjadřuje ji délka  $P_1P_2$  směřující k vektoru  $u$  a počátek souřadnic ( $=O_c$ ) [26].



Obr. 23 Umístění frézy pro dvě sousední otáčky [26].

Obr. 23 lze popsat rovnicemi [26]:

- střed nástroje  $O_o$ :

$$x_o = R \cdot \sin\theta, \quad (2.34)$$

$$y_o = -R \cdot \cos\theta, \quad (2.35)$$

- bod  $P_2$  řešením současně obvodové rovnice nástroje a rovnice dříve obrobené plochy:

$$(x_2 + c)^2 + y_2^2 = (R + r)^2, \quad (2.36)$$

$$(x_2 - x_o)^2 + (y_2 - y_o)^2 = r^2, \quad (2.37)$$

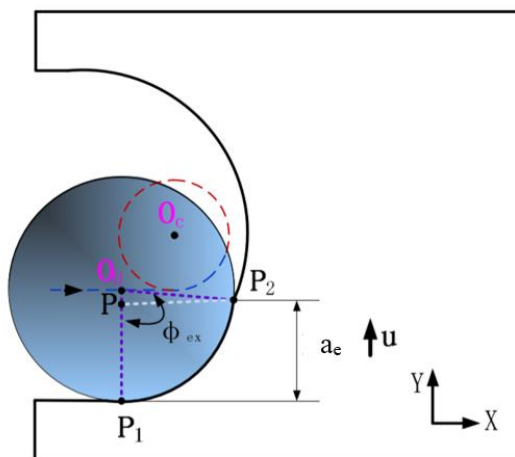
- radiální hloubka řezu  $a_e$ :

$$a_e = P_2P_1 \cdot u = P_2O_o \cdot u + r = (x_o - x_2, y_o - y_2) \cdot (\sin\theta, -\cos\theta) + r. \quad (2.38)$$

Bod  $P_2$  se promítne do bodu  $P$  na přímkce  $O_cO_o$  a že vstupní úhel nástroje je vždy nulový. Výstupní úhel nástroje  $\angle P_2O_oP_1$  lze vypočítat podle radiální hloubky řezu ve dvou situacích [26]:

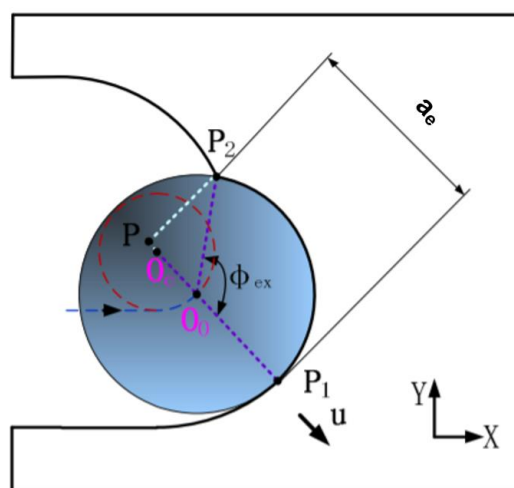
- A.  $a_e < r$ : podle obrázku je patrné, že  $P$  je na úsečce  $P_1O_o$  a výstupní úhel  $\angle P_2O_oP_1$  je hrana  $P_2P$  v trojúhelníku  $\triangle P_2O_oP$ , výstupní úhel se  $\Phi_{ex}$  získá jako:

$$\Phi_{ex} = \arccos \cdot \frac{a_e - r}{r}, \quad (2.39)$$

Obr. 24 Situace  $a_e < r$  [26].

B.  $a_e \geq r$ : podle obrázku je patrné, že P je na prodlužovací čáře úsečky  $P_1O_0$  a výstupní úhel  $\angle P_2O_0P_1$  s úhlem  $\angle P_2O_0P$  se vzájemně doplňují, výstupní úhel  $\Phi_{ex}$  se získá jako:

$$\Phi_{ex} = \pi - \arccos \cdot \frac{a_e - r}{r}. \quad (2.40)$$

Obr. 25 Situace  $a_e \geq r$  [26].

Řezné síly jsou definovány globálním souřadným systémem a platí pro ně [26]:

$$F_x(\theta, \lambda) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{n_{ce}} [-(F_r \cdot \cos \lambda_j - F_t \cdot \sin \lambda_j) \cdot \sin \theta - (F_r \cdot \sin \lambda_j + F_t \cdot \cos \lambda_j) \cdot \cos \theta] = \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{n_{ce}} [-(F_r \cdot \sin(\lambda_j + \theta) - F_t \cdot \cos(\lambda_j + \theta))], \quad (2.41)$$

$$F_x(\theta, \lambda) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{n_{ce}} [-(F_r \cdot \cos \lambda_j - F_t \cdot \sin \lambda_j) \cdot \sin \theta - (F_r \cdot \sin \lambda_j + F_t \cdot \cos \lambda_j) \cdot \cos \theta] = \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{n_{ce}} [-(F_r \cdot \sin(\lambda_j + \theta) - F_t \cdot \cos(\lambda_j + \theta))], \quad (2.42)$$

- síly se dělí na radiální  $F_{rj}$  a tangenciální  $F_{tj}$ , hrana zubu se rozdělí na počet prvků  $n_{ce}$  a platí zde pro axiální výšku  $Z$ :

$$Z = i \cdot \Delta a_e, \quad (2.43)$$

kde je  $i=0,1,2,\dots$ ,

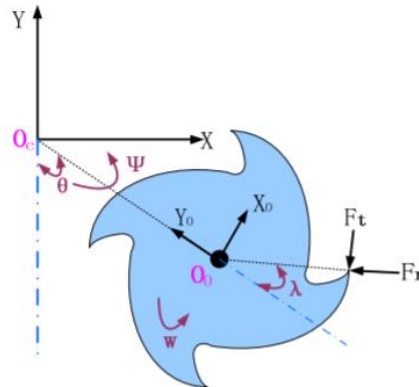
$$\Delta a_e = a_e / n_{ce}, \quad (2.44)$$

kde  $a_e$  je axiální hloubka řezu.

Pro tangenciální a radiální síly platí [21]:

$$\begin{bmatrix} F_{tj} \\ F_{rj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{tc}h_j + K_{te} \\ K_{rc}h_j + K_{re} \end{bmatrix} \cdot \Delta a_e. \quad (2.45)$$

Tyto tangenciální a radiální silové koeficienty  $K_{tc}$ ,  $K_{te}$  a  $K_{rc}$ ,  $K_{re}$  lze hodnotit od ortogonálních do šikmých řezných transformací nebo mechanistických modelů [26].



Obr. 26 Řezné síly v radiálním a tangenciálním směru [26].

Další definovaná vztahy jsou [26]:

- v axiálním směru z se okamžitý úhel zaboření zubu  $j$  nástroje s drážkami  $N$  a úhlem šroubovice  $\beta$  definuje  $\varphi_j$ :

$$\varphi_j(k) = \theta_j(k) + \lambda_j(k) + (j - 1) \cdot \Delta p + Z \cdot \frac{\tan \beta}{r}, \quad (2.46)$$

kde  $\Delta p = 2\pi / N$ ,

- tloušťka třísky  $h_D$  v každém umístění frézy lze vypočítat dle vstupního a výstupního úhlu nástroje  $\Phi_{st}$  a  $\Phi_{ex}$ , ale aby nástroj a zub  $j$  řezal třísku, musí platit podmínky:

$$0 \leq \theta_j(k) \leq \theta_s, \quad (2.47)$$

$$\Phi_{st} \leq \varphi_j(k) \leq \Phi_{ex}, \quad (2.48)$$

$$h_D = f_z \cdot \sin(\varphi_j(k)), \quad (2.49)$$

kde je úhel prodlení  $\Delta = f \cdot Z \cdot N / 2\pi \cdot R$  podle [26].

## 2.5 Struktura povrchu a predikce kvality opracovaných ploch pro CNC stroje

Stěny drážek po výrobě drážek trochoidním frézováním charakterizují kruhové oblouky, nikoli rovný povrch. Struktura a kvalita povrchu se odvíjí od zvolení parametrů – poloměru a kroku trochoidy, posuvové rychlosti. Čím větší poloměr  $R$  a krok trochoidy  $c$ , tím horší kvalita povrchu. Pokud se porovná trochoidní a konvenční frézování ve stejných podmínkách a zamezí se vzniku samobuzeného chvění, tak trochoidní frézování vykazuje lepší kvalitu povrchu výsledného obrobku [3].

### 2.5.1 Predikce struktury povrchu při čelním trochoidním frézování

Úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  ovlivňuje výsledný povrch po procesu, tedy zda bude rovný [27]. Dříve provedené výzkumy se zabývaly trochoidním frézováním a jeho vlivy a důsledky na obrobek. Avšak zde bude popsán experiment, který zkoumá a vyhodnocuje, jaký je vliv řezné a posuvové rychlosti, ale i vliv kroku trochoidních smyček na drsnost povrchu. Tedy jako nový vstupní parametr byla zde vzdálenost jednotlivých trochoidních smyček  $c$ . Z 20 experimentálních zkoušek se vyvinuly matematické modely pro predikce drsnosti povrchu [28].

Pokud je velký krok trochoidy  $c$ , tak se zvyšují řezné síly a opotřebení nástroje a vede to ke špatné kvalitě povrchu. Se zvýšením těch řezných sil dochází kromě vibrací nástroje také k jeho deformaci (ohnutí) ve směru opačném k záběru nástroje. Dochází tak k jeho vyosení a šikmému zarývání nástroje do obrobku po úhlem, který takto vznikne [27].

Materiál obrobku na experiment je nástrojová ocel AISI D3. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu a jeho chemické složení je popsáno tab.1 a tab. 2. Nástroje byly z karbidu wolframu o délce 50 mm a průměru 4 mm [28].

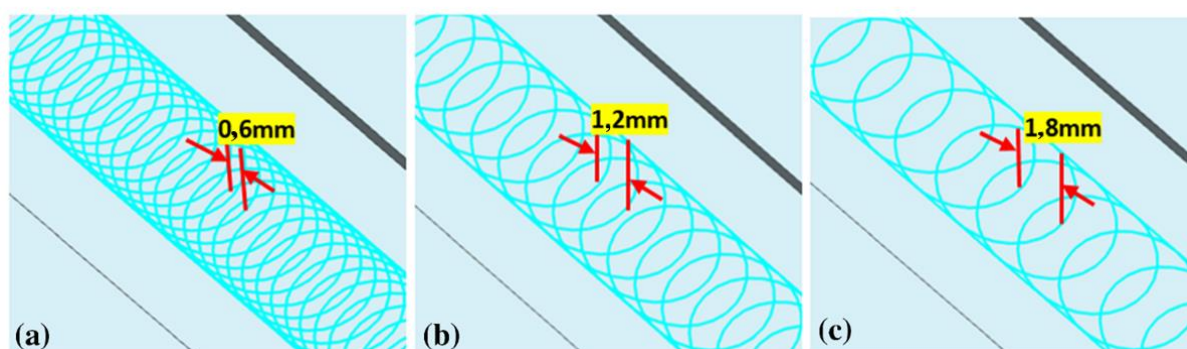
Tab. 1 Chemické složení AISI D3 [28].

| Prvek           | C   | Cr   | Ni   | Si  | Mn  | V    | Fe       |
|-----------------|-----|------|------|-----|-----|------|----------|
| Obsah (hmot. %) | 2,1 | 11,5 | 0,31 | 0,3 | 0,4 | 0,25 | Zůstatek |

Tab. 2 Mechanické vlastnosti AISI D3 [28].

| Materiál obrobku | Mechanické vlastnosti nástrojové oceli pro tváření za studena |                                          |                         |                              |               |
|------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------|
|                  | Mez kluzu (N/mm <sup>2</sup> )                                | Mez pevnosti v tahu (N/mm <sup>2</sup> ) | Tepelná vodivost (W/mK) | Hustota (kg/m <sup>3</sup> ) | Tvrdost (HRC) |
| AISI D3          | 850                                                           | 970                                      | 20                      | 7700                         | 30–35         |

Axiální hloubka řezu byla nastavena na 0,5 mm a vzdálenosti smyček na 0,6 mm, 1,2 mm a 1,8 mm. Průměr nástroje je v rozmezí 4 mm a vzdálenosti smyček jsou funkcí průměru nástroje, proto jsou vzdálenosti smyček menší než polovina průměru nástroje a jsou znázorněny na obr. 27. Pro simulace trochoidních drah byl použit CAM software (NX.10). Procesní parametry a jejich zvolení v tomto experimentu jsou rozebrány v tab. 3. Pro návrh experimentu byl použit *Face Central Composite Design RSM* [28].



Obr. 27 Vzdálenosti smyček trochoidního pohybu: a)  $c = 0,6$  mm b)  $c = 1,2$  mm c)  $c = 1,8$  mm [28].

Tab. 3 Procesní parametry a jejich úrovně [28].

| Parametry                       | Úroveň |     |       |
|---------------------------------|--------|-----|-------|
|                                 | (- 1)  | (0) | (+ 1) |
| Rychlost řezání, $v_c$ (m/min)  | 15     | 30  | 45    |
| Rychlost posuvu, $v_f$ (mm/min) | 120    | 240 | 360   |
| Rozteč smyček, $c$ (mm)         | 0,6    | 1,2 | 1,8   |

Samotné frézování ve směru šířky obrobku probíhalo na tříosém stroji BFW Gaurav BMV 35 T12 s řídicí jednotkou Siemens Sinumerik 828D. Obráběla se úzká štěrbina 75x30 mm. Pro každý vzorek o délce 4 mm se měřila drsnost povrchu zařízením Surfcom 1400 G. Na snímky obrobeného povrchu se použil měřicí systém Optive Lite Model 3020 Vision s CCD kamerou. Drsnost povrchu se měřila na spodní části obrobeného materiálu, a díky softwaru Accretech byl vytvořen graf drsnosti povrchu z měření. Měření se provádělo třikrát a z těchto hodnot se vytvořila aritmetická průměrná hodnota  $R_a$  drsnosti povrchu [27,28].

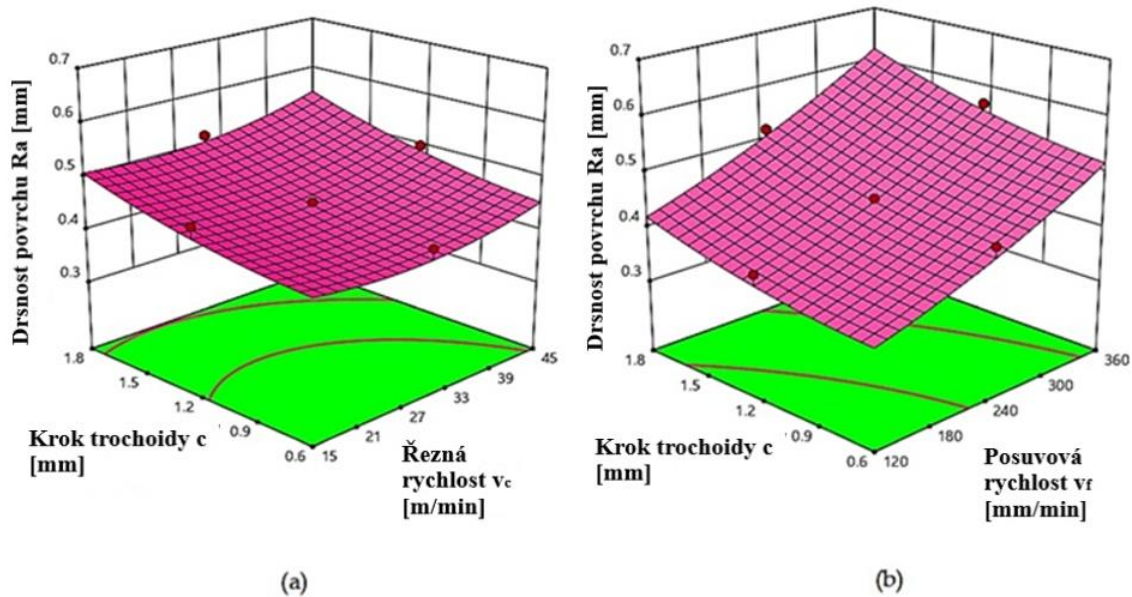
Experiment probíhal na základě CCD a RSM. Technika RSM používá k definování matematických modelů 6 kroků – definování vstupních a výstupních parametrů, měření výstupních parametrů na základě CCD, vícenásobná regresní analýza, určení faktorů významnosti vstupních parametrů statistickou analýzou ANOVA. Vstupní parametry tedy byla řezná a posuvová rychlost a trochoidní krok. Výstupní parametry jsou drsnost povrchu a efektivní úhel nastavení hlavního ostří, pro níž jsou matematické vztahy na základě významnosti a regresivní analýzy [27]:

$$\begin{aligned}
 R_a = & 0,3980 + 0,0172 \cdot v_c + 0,0936 \cdot v_f + 0,0447 \cdot c + 0,0050 \\
 & \cdot v_c \cdot v_f + 0,0050 \cdot v_c \cdot c + 0,0075 \cdot v_f \cdot c \\
 & + 0,0240 \cdot v_c^2 + 0,0140 \cdot v_f^2 + 0,0140 \cdot c^2,
 \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Úhel nastavení hlavního ostří } \kappa_{re} \\
 = & 1,45 + 0,0530 \cdot v_c - 0,0630 \cdot v_f + 0,0310 \cdot c \\
 & + 0,0113 \cdot v_c \cdot v_f + 0,0038 \cdot v_c \cdot c + 0,0213 \cdot v_f \cdot c \\
 & - 0,0005 \cdot v_c - 2 \cdot 0,0205 \cdot v_f^2 - 0,0105 \cdot c^2.
 \end{aligned} \quad (2.51)$$

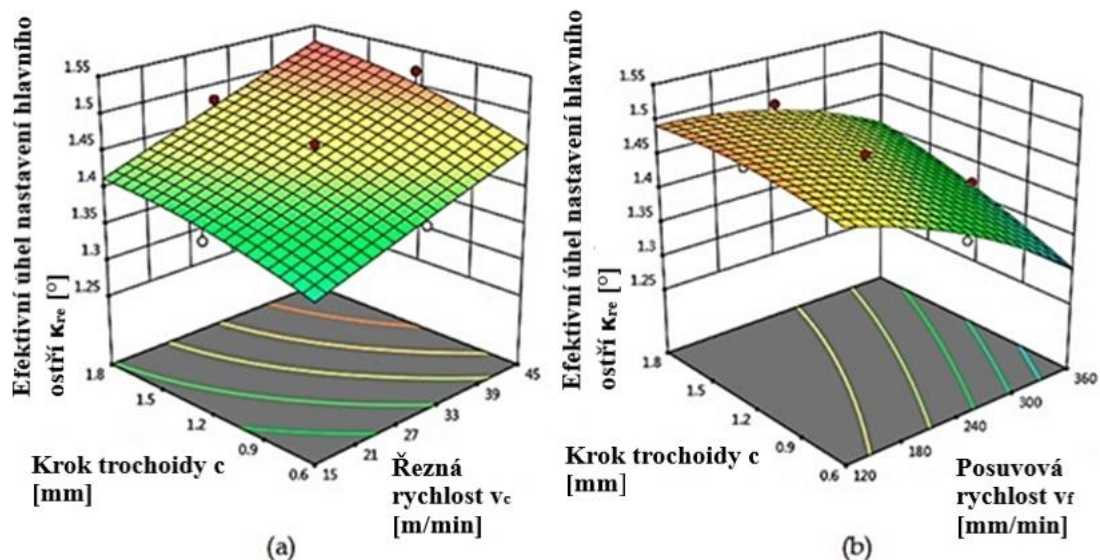
Na drsnost povrchu  $R_a$  má největší vliv součin vstupních parametrů posuvové rychlosti a kroku trochoidy ( $v_f \cdot c$ ) a součin řezné a posuvové rychlosti s krokem trochoidy ( $v_c \cdot v_f \cdot c$ ) má největší vliv na efektivní úhel nastavení hlavního ostří [27].

Po provedení měření je zřejmé, že čím větší je řezná i posuvová rychlost, ale i zároveň vzdálenost smyček (krok trochoidy  $c$ ), tím je drsnost povrchu také větší. Tento fakt je znázorněn na 3D grafu na obr. 28. Mnohem více tedy záleží na kombinaci posuvové rychlosti a roztečí smyček, kdy se zvyšující posuvovou rychlostí dochází k rychlejšímu nájezdu do záběru a tím většímu okamžitému namáhání nástroje. Profil nástroje se tedy může změnit již během operace, a tak zhoršit drsnost povrchu. Zároveň však drsnost povrchu  $R_a$  při konstantním kroku trochoidy klesá, pokud se zvyšuje řezná rychlost [27,28].



Obr. 28 3D Grafy drsnosti povrchu v závislosti na parametrech: a) na vzdálenosti smyček a řezné rychlosti, b) na vzdálenosti smyček a posuvové rychlosti [28].

Na obr. 29 je 3D graf závislosti efektivního úhlu nastavení hlavního ostří na kroku trochoidy  $c$  a řezné rychlosti nebo kroku trochoidy a posuvové rychlosti. Z tohoto grafu vyplývá, že se efektivní úhel nastavení hlavního ostří zvětšuje, pokud roste krok trochoidy i řezná rychlost. Naopak však klesá, pokud se zvyšuje posuvová rychlost. Se zvyšováním kroku trochoidy a řezné rychlosti a snižováním posuvové rychlosti dochází k lepšímu odvodu tepla nástrojem. Tím se snižuje opotřebení nástroje a zvyšuje tak jeho životnost. To je ale v rozporu s předchozím grafem, protože touto kombinací se zhoršuje kvalita povrchu. Proto se provedla regresní analýza, aby bylo dosaženo optimálních kombinací řezných parametrů pro nejlepší možnou drsnost povrchu a životnost nástroje [27].



Obr. 29 Závislost úhlu nastavení hlavního ostří: a) na kroku trochoidy a řezné rychlosti, b) na kroku trochoidy a posuvové rychlosti [27].

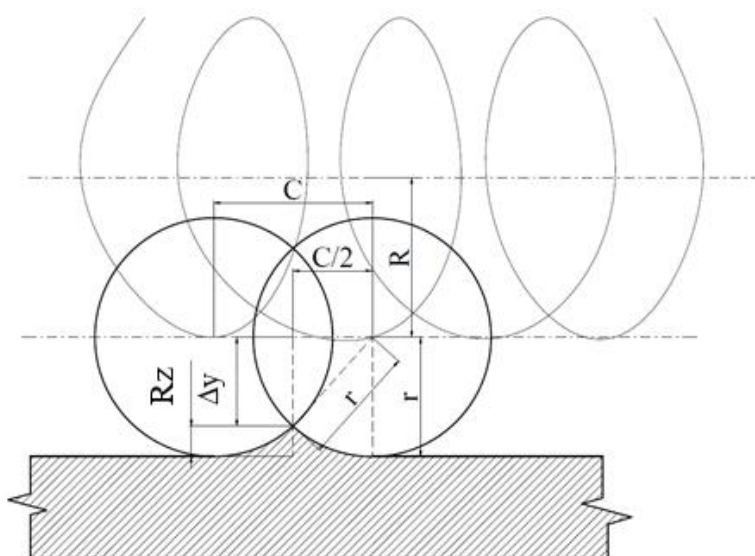
Kvalitu opracované plochy zhoršují trhliny, stopy po posuvu a přilnavosti třísek, přičemž se zvyšující vzdáleností trochoidních smyček pohybu se zvyšuje i drsnost povrchu [27,28].

### 2.5.2 Predikce struktury a kvality stěny drážky při trochoidním frézování

Struktura stěn drážek se odvíjí od kroku trochoidy a poloměru řezného nástroje. Průmět pohybu nástroje k obrobení stěny se dá zobrazit jako kruhové průměty nástroje ležící na spirále trochoidy. V okamžiku krajní polohy nástroje u stěny drážky se jedná o dvě kružnice ležící na přímce rovnoběžné s teoretickou požadovanou rovinnou stěnou drážky, které jsou od sebe vzdáleny o krok trochoidy [29]. Z Pythagorovy věty lze poté spočítat výšku materiálu, který bude mezi těmito kružnicemi vynechán a neobroben, což je zbytková nerovnost povrchu  $R_z$ . K tomu je třeba započítat drsnost povrchu způsobená řeznou rychlostí daného nástroje. Dle obr. 30 budou platit rovnice pro predikci kvality opracovaných ploch:

$$\Delta y = \sqrt{r^2 - \left(\frac{c}{2}\right)^2} \quad (2.52)$$

$$R_z = r - \Delta y \quad (2.53)$$



Obr. 30 Kolmá vzdálenost od osy trochoidy k průsečíku předchozí a následující krajní polohy nástroje trochoidy na kruhovém průmětu pohybu nástroje.

Kde  $\Delta y$  je kolmá vzdálenost od osy trochoidy k průsečíku předchozí a následující krajní polohy nástroje trochoidy. Poloměr nástroje je označen  $r$  a poloměr trochoidy  $R$ . Pokud by byl krok trochoidy  $c$  nekonečně malý, tak by nerovnost  $R_z$  byla nulová nebo pouze ovlivněná řeznou rychlostí.

## 2.6 Programování a tvorba algoritmů pro trochoidní frézování pro CNC stroje

Dříve se v CAM systému trochoidní pohyb nenaprogramoval, místo toho se to muselo dělat ručně. Kde se tímto stylem naprogramovala manuálně celá dráha nástroje, což bylo velice časově náročné. Velká nevýhoda v tom je to, že na chybu programu se přijde až při samém běhu dráhy. Dnes je trochoidní frézování jeden z programů na CNC, kdy se dá graficky simulovat a také zkontrolovat již před samým během dráhy [4,23]. Co se týče programování dráhy, tak se nastavuje ve spirálovitém pohybu. Dráha vytváří kruhy v každém cyklu, kdy se posouvá dopředu do záběru [4].

### 2.6.1 Tvorba algoritmů pro trochoidní frézování

Algoritmus pro trochoidní frézování lze vytvořit více způsoby, buď je nějaký předem určený postup, jak tuto trajektorii naprogramovat nebo k tomu lze použít algoritmus, který obsahuje rovnice popisující trochoidu. U tvorby algoritmu pro trochoidní frézování je důležité znát rovnice popisující parametricky pohyb středu nástroje, čímž se docílí trochoidní trajektorie na CNC strojích. Nejdříve se definují uživatelsky definované proměnné a parametry, které lze měnit. Poté se pomocí rovnic popisující pohyb nástroje vytvoří trochoidní interpolace. Parametry tyto trochoidní interpolace na CNC strojích ovlivňují.

Řadu let se výzkumy zabývají, jak optimalizovat proces frézování několika rozdílnými dráhami nástroje. Kruhová dráha nástroje zvyšuje efektivitu obrábění a to tak, že je u ní malý záběr nástroje, a tedy malé řezné síly, díky čemuž se dá optimalizovat rychlost posuvu [20]. Pro výrobu úzkých a dlouhých kapes je nejvýhodnější algoritmus MATHSM. Algoritmus MATHSM generuje spojitou a souvislou dráhu nástroje v podobě spojitých kruhových oblouků [30].

V aplikacích CAM se již dá programovat trochoidní frézování, tedy algoritmy lineární a kruhové interpolace na strojích CNC, což znamená, že se pohybují jen po přímých nebo kruhových dráhách [31]. Tyto algoritmy nedosahují požadované přesnosti geometrie. Z těchto důvodů se dráha nástroje dá parametricky zobrazit pomocí NURBS křivek. Modelování trochoidního frézování a jejich řezných sil analytickou metodou je omezen na jednoduché povrchy bez děr anebo existuje nový algoritmus pro složitější povrchy [20].

### 2.6.2 Analytický algoritmus pro predikci záběru nástroje

Tento algoritmus může sloužit i pro predikce řezných sil. Dráha nástroje je zobrazena na obr. 31 a zahrnuje tyto parametry:  $R$  – poloměr kruhové otáčky,  $r$  – poloměr nástroje,  $c$  – přísuv při každé otáčce neboli krok,  $\theta$  – úhel frézy vzhledem k souřadnicovému systému XYZ (úhel trochoidy),  $b_1$  a  $b_2$  – velikosti obrobku neboli vertikální vzdálenosti středu kruhu k horní a spodní části obrobku, body  $P_c$  i  $P_1$  pro další otáčku mají přírůstek  $2\pi$  v úhlu  $\theta$  a tento algoritmus je definován [20]:

- umístění středu nástroje  $P_c$ :

$$x_c = R \cdot \sin\theta + \frac{c \cdot \theta}{2\pi}, \quad (2.54)$$

$$y_c = R \cdot \cos\theta, \quad (2.55)$$

- obvodová rovnice frézy:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2, \quad (2.56)$$

- parametrické vyjádření rovnice geometrie obrobku, která je vytvořená dřívějším rotačním bodem  $P_1$ :

$$x_1 = (R + r) \cdot \sin\theta + \frac{c\theta}{2\pi}, \quad (2.57)$$

$$y_1 = (R + r) \cdot \cos\theta, \quad (2.58)$$

$$\left(x_1 - \frac{c \cdot \theta}{2\pi}\right)^2 + y_1^2 = (R + r)^2, \quad (2.59)$$

- postupným spojením a řešením rovnic se dojde k výsledným parametrům pro modelování pohybu frézy. Souřadnice x bodů  $P_{en}$  a  $P_{ex}$  dostaneme dosazením  $y_{en} = b_1$  a  $y_{ex} = -b_2$  a body  $P_{en}$  a  $P_{ex}$  jsou na dříve obrobene geometrii, přičemž platí:

$$y_{en} = b_1 = (R + r) \cdot \cos\theta_{en}, \quad (2.60)$$

$$\theta_{en} = \arccos\left(\frac{b_1}{R + r}\right), \quad (2.61)$$

$$x_{en} = \sqrt{(R + R_c)^2 - b_1^2} + \frac{c \cdot \arccos\left(\frac{b_1}{R+r}\right)}{2\pi}, \quad (2.62)$$

$$y_{ex} = -b_2 = (R + r) \cdot \cos\theta_{ex}, \quad (2.63)$$

$$\theta_{ex} = \arccos\left(\frac{-b_2}{R + r}\right), \quad (2.64)$$

$$x_{ex} = \sqrt{(R + r)^2 - b_2^2} + \frac{c \cdot \arccos\left(\frac{-b_2}{R+r}\right)}{2\pi}. \quad (2.65)$$

- souřadnice vstupního a výstupního bodu  $P_{ent}$  a  $P_{ext}$  dostaneme dosazením  $y_{ent} = b_1$  a  $y_{ext} = -b_2$  do obvodové rovnice a výsledkem jsou řešení dvou kvadratických rovnic, ze kterých se vyberou body s největšími hodnotami, přičemž platí:

$$x^2 - 2 \cdot x_c \cdot x + x_c^2 + b_1^2 + y_c^2 - 2 \cdot b_1 \cdot y_c - r^2 = 0, c_2 \cdot x^2 + c_1 \cdot x + c_0 = 0, \quad (2.66)$$

$$c_2 = 1, c_1 = -2x_c, c_0 = x_c^2 + b_1^2 + y_c^2 + 2b_1y_c - r^2, \\ x_{ent} = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 - 4c_2c_0}}{2c_2}, \quad (2.67)$$

$$x^2 - 2 \cdot x_c \cdot x + x_c^2 + b_2^2 + y_c^2 - 2 \cdot b_2 \cdot y_c - r^2 = 0, c_2 \cdot x^2 + c_1 \cdot x + c_0 = 0, \quad (2.68)$$

$$c_2 = 1, c_1 = -2 \cdot x_c, c_0 = x_c^2 + b_2^2 + y_c^2 + 2 \cdot b_2 \cdot y_c - r^2, x_{ent} \\ = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 - 4 \cdot c_2 \cdot c_0}}{2 \cdot c_2} \quad (2.69)$$

- pokud se řeší obvodová rovnice a rovnice geometrie obrobku současně dostane se bod  $P_2$ :

$$((R + r) \cdot \sin\theta - x_c)^2 + ((R + r) \cdot \cos\theta - y_c)^2 = r^2, \quad (2.70)$$

$$\theta^2 \cdot \left(\frac{c^2}{4\pi^2}\right) + \theta \left(\frac{-x_c \cdot c}{\pi}\right) + \theta \cdot \sin\theta \cdot \left(\frac{(R + r) \cdot c}{\pi}\right) + \sin\theta \\ \cdot (-2 \cdot (R + r) \cdot x_c) + \cos\theta \cdot (-2 \cdot (R + r) \cdot y_c) \\ + (R + r)^2 + x_c^2 + y_c^2 - r^2 = 0. \quad (2.71)$$

- k bodu  $P_2(x_2, y_2)$  - bod s nejnižší souřadnicí y na obvodu nástroje protínajíc se s obrobenu plochou se dostane numerickými metodami, kde je úhel  $\theta$  počáteční odhad

v aktuální otáčce, poté se řešení  $\theta$  dosadí do rovnice geometrie obrobku a získá se bod  $P_2(x_2, y_2)$ .

Modelování záběru frézy je definováno v 5 částech [20]:

- před vstupem do obrobku ( $y_c - r \geq b_1$ ,  $y_c + r \geq b_1$  a  $x_{ent} \leq x_{en}$ ), kde je počáteční i konečný úhel záběru ostří rovno 0 ( $\Phi_{st}=0$ ,  $\Phi_{ex}=0$ ),
- vstup do obrobku ( $y_c + r \geq b_1$  a  $x_{ent} > x_{en}$ ), kde je počáteční úhel záběru definován úhlem ( $P_1P_cP_{ent}$ ) a konečný ( $P_1P_cP_2$ ):

$$\Phi_{st} = \arccos\left(\frac{L_{entc}^2 + L_{1c}^2 - L_{1ent}^2}{2 \cdot L_{1c} \cdot L_{entc}}\right), \quad (2.72)$$

$$\Phi_{ex} = \arccos\left(\frac{L_{1c}^2 + L_{2c}^2 - L_{12}^2}{2 \cdot L_{1c} \cdot L_{2c}}\right), \quad (2.73)$$

přičemž pro délky úseček  $|P_1P_c|$ ,  $|P_{ent}P_c|$ ,  $|P_2P_c|$ ,  $|P_1P_{ent}|$  a  $|P_1P_2|$  platí:

$$L_{1c} = L_{entc} = L_{2c} = r, \quad (2.74)$$

$$L_{1ent} = \sqrt{(x_1 - x_{ent})^2 + (y_1 - y_{ent})^2}, \quad (2.75)$$

$$L_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (2.76)$$

- záběr nástroje ( $y_1 \leq b_1$  a  $y_2 \geq -b_2$ ), kde je počáteční úhel záběru nulový a konečný jako v předchozí oblasti ( $\Phi_{st}=0$  a

$$\Phi_{ex} = \arccos\left(\frac{L_{1c}^2 + L_{2c}^2 - L_{12}^2}{2 \cdot L_{1c} \cdot L_{2c}}\right); \quad (2.77)$$

- výstup z obrobku ( $y_2 \leq -b_2$  a  $y_1 \geq b_1$ ), kde je počáteční úhel nulový ( $\Phi_{st}=0$ ) a konečný úhel zobrazený jako ( $P_1P_cP_{ext}$ ) blíží se k nule, platí zde:

$$\Phi_{ex} = \arccos\left(\frac{L_{extc}^2 + L_{1c}^2 - L_{1ext}^2}{2 \cdot L_{1c} \cdot L_{extc}}\right). \quad (2.78)$$

přičemž pro délky úseček  $|P_{ext}P_c|$  a  $|P_1P_{ext}|$  platí:

$$L_{extc} = \sqrt{(x_{ext} - x_c)^2 + (y_{ext} - y_c)^2}, \quad (2.79)$$

$$L_{1ext} = \sqrt{(x_1 - x_{ext})^2 + (y_1 - y_{ext})^2}; \quad (2.80)$$

- po výstupu z obrobku ( $y_1 \leq -b_2$ ), kde jsou opět nulové počáteční i konečné úhly, dokud není další záběr nástroje ( $\Phi_{st}=0$ ,  $\Phi_{ex}=0$ ).

### 2.6.3 Numerická algoritmus pro predikci časového průběhu úběru třísky

Nový numerický algoritmus je vhodný pro predikci záběru pro jakýkoliv povrch, který má díry a výstupky. Pomocí softwaru Unigraphics se generuje G-kód pomocí křivek NURBS, který charakterizuje body pro lokaci frézy pro polohy úhlu  $\theta$ . Dále se získá bod  $P_1(x_1, y_1)$  viz obr. 31 z  $R$  a středu a střed planetárních otáček  $P_{c0}(x_{c0}, y_{c0})$  je definován rovnicemi [20]:

$$x_1 = x_{c0} + (R + r) \cdot \cos\theta, \quad (2.81)$$

$$y_1 = y_{c0} + (R + r) \cdot \sin\theta, \quad (2.82)$$

$$x_c = f(t), y_c = g(t), \quad (2.83)$$

$$R = \frac{(f'^2 + g'^2)^{\frac{3}{2}}}{|f'g'' - f''g'|}, \quad (2.84)$$

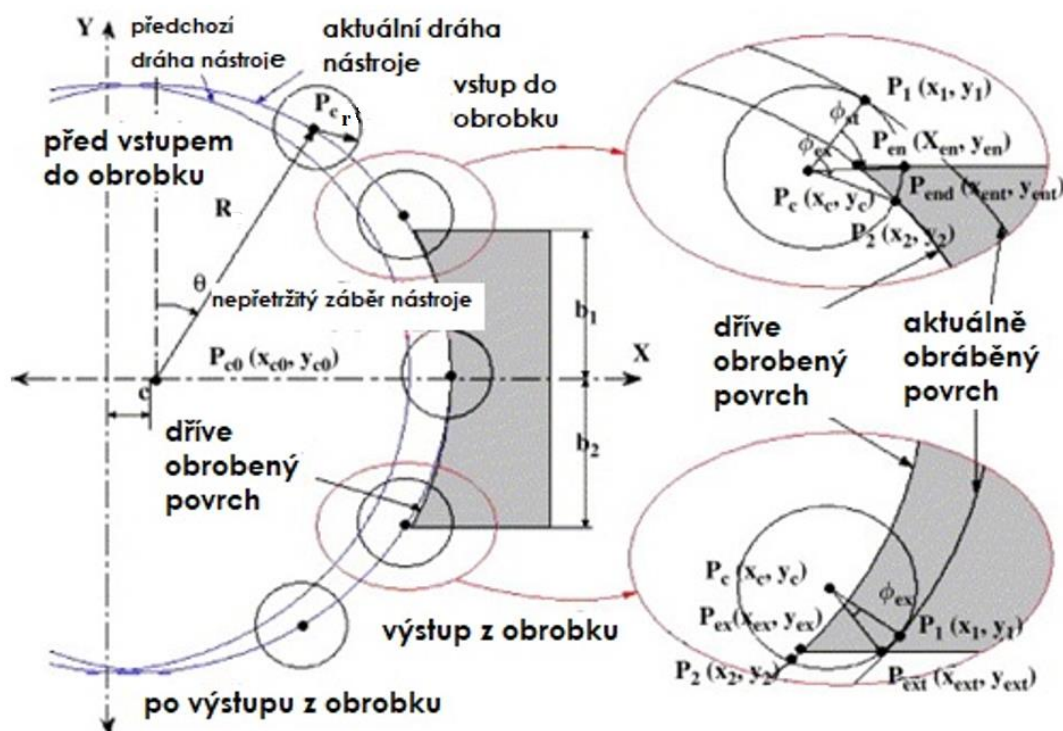
$$x_{c0} = f - \frac{(f'^2 + g'^2) \cdot g'}{f'g'' - f''g'}, \quad (2.85)$$

$$y_{c0} = g + \frac{(f'^2 + g'^2) \cdot f'}{f'g'' - f''g'}, \quad (2.86)$$

kde je  $f' = x'_c = \frac{dx_c}{dt}$ ,  $f'' = x''_c = \frac{d^2x_c}{dt^2}$ ,  $g' = y'_c = \frac{dy_c}{dt}$ ,  $g'' = y''_c = \frac{d^2y_c}{dt^2}$  a  $R$  je poloměr zakřivení.

Tento nový typ algoritmu se skládá ze 3 skutečností [20]:

- pro každý bod pro lokaci frézy se definují body na povrchu, které jsou v dosahu obvodu nástroje,
- pomocí těchto bodů na tom obvodu nástroje je spočítán záběr frézy a to: pomocí bodu, který je nejbližší k bodu  $P_1$  a nejvzdálenější od středu rotace se vypočítá počáteční úhel záběru frézy a pomocí bodu, který je nejdále k bodu  $P_1$  se vypočítá konečný úhel záběru frézy,
- po výpočtu záběru frézy pro jeden bod lokace frézy se body v obvodu nástroje vymažou a celý proces se opakuje pro výpočet pro další bod pro lokaci frézy.



Obr. 31 Dřívější a aktuální trochoidní dráhy nástroje [20].

## 2.7 Nástroje pro trochoidní frézování

Tato metoda byla nejdříve vyvinuta, aby se lépe využily monolitní karbidové frézy [2]. Monolitní karbidové frézy jsou jednolitě, celé z karbidu a nabízí tím spousta vlastností. Dostupné jsou například monolitní karbidové frézy názvu CHATTERFREE. Mají variabilní zubovou rozteč a jsou odolné vůči vibracím, také je charakterizuje vysoká životnost. Na strojích ISO40/BT40 lze drážkovat do plna tzn. do úplné hloubky té drážky, do hloubky  $2xD$  čtyř nebo pětibřitou frézou [23]. Je zde používán karbid IC900 se uspokojivou jakostí a povlak PVD TiAlN, jejichž kombinace nabízí mechanické vlastnosti pro trochoidní frézování [4].

Zajímavou možností je sedmibřitá stopková fréza CHATTERFREE s nepravidelným šroubovitým stoupáním pro hrubovací a polodokončovací operace pro průměry 6-16 mm v délkách  $3xD$ ,  $4xD$  a  $6xD$  a pro průměr 20 mm v délkách  $3xD$  a  $4xD$ . Tyto nástroje řady ECP-H7-CF vynikají svými vlastnostmi, produktivitou a výkonností díky svému dělenému ostří. [32] Na jejich výrobu je používán karbid jakosti IC902 s povlakem PVD TiAlN. Je určen pro vysokorychlostní frézování, má velkou zubovou rozteč, která napomáhá lepšímu odchodu třísky a většímu úběru materiálu. Má ostří rozdělené do více částí, takže má výsledný obrobek dobrou drsnost povrchu i při velkých hloubkách řezu [32].



Obr. 32 Fréza ECP-H7 po deseti minutách frézování oceli [32].

Pro tuto strategii lze také využít čelní válcové frézy s vyměnitelnými destičkami, které mají destičky z karbidu. U těchto nástrojů je ostří na břitě rozdělena do více částí skládající se z těchto destiček. Díky tomuto se tepelně méně namáhá a opotřebovává nástroj, jelikož do něj vstupuje méně tepla [4,23].

## 2.8 Použití trochoidního frézování

Tato metoda byla původně vyvinuta pro obrábění materiálu s tvrdostí nad 45 HRC, to znamená poměrně tvrdých materiálů [2]. Zkratka HRC, tedy *hardness Rockwell C* označuje tvrdost dle Rockwella C. Existuje také stupnice HRB, která má ovšem zase svoje charakteristiky. V těchto stupnicích platí pravidlo, že čím vyšší číslo, tím vyšší tvrdost v závislosti na ostatní čísla pouze v dané stupnici. Při zkoušce tvrdosti podle Rockwella u stupnice C vniká do materiálu indentor ve tvaru kužele s diamantovým hrotem zatížením hmotnosti 150 kg. Tvrdost se zde vyhodnocuje jako nepřímo úměrná hloubce vtisku, to znamená, že čím větší hloubka vtisku,

tím menší tvrdost [33]. Co se týče frézování kapes, tak se trochoidně obrábí ve tvrdých materiálech. Výhodně působí to, že nástroj není celou dobu v záběru, tudíž nedochází k velkému namáhání nástroje [34].

Dříve se trochoidní frézování vyvinulo pro obtížně frézování drážek a kapes a dnes se dále používá zejména pro těžko obrobitelné materiály, zejména kde dochází k vyššímu úhlu opásání. V tomto směru jde převážně o hrubování, a to díky velkému úběru materiálu za jednotku času. Mezi těžkoobrobitelné materiály patří také nikl a titan [3].

Mezi hlavní využití trochoidního frézování patří obrábění drážek přímých i křivočarých a obrábění kapes. Trochoidním frézováním lze zhotovit drážku, která je širší, než je průměr nástroje a takto lze vyrobit jediným nástrojem různé šířky drážek. Na stěnách drážky jsou viditelné kruhové stopy frézování [3].



Obr. 33 Viditelné kruhové stopy na výsledné drážce po procesu trochoidního frézování.

Čím větší počet zubů na fréze, tím se dá dosáhnout větší posuv za minutu a tím větší úběr materiálu. A trochoidní frézování více zubů dovoluje, jelikož zde působí malé radiální síly. Z dřívějšího výzkumu plyne, že pokud je třeba drážkovat do plna konvenční metodou, je nutné snížit posuv na zub  $f_z$  o 20 % oproti běžnému posuvu při bočním frézování. Zatímco trochoidní frézování je schopno vynaložit 80 % běžného posuvu při bočním frézování [4].

Tab. 4 Porovnání standartního a trochoidního frézování drážky v titanové slitině [4].

|                                           | <b>Standardní frézování</b>           | <b>Trochoidní frézování</b>           |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Materiál obrobku</b>                   | Titan, Ti-6Al-4V (Grade 5),<br>žíhaný | Titan, Ti-6Al-4V (Grade 5),<br>žíhaný |
| <b>Stopková monolitní fréza<br/>Iscar</b> | EFS-B44-16-34W16-92                   | ECH160B32-6C16                        |
| <b>Jakost karbidu</b>                     | IC900                                 | IC900                                 |
| <b>Průměr nástroje</b>                    | 16 mm                                 | 16 mm                                 |
| <b><math>v_c</math></b>                   | 45 m.min <sup>-1</sup>                | 115 m.min <sup>-1</sup>               |
| <b><math>f_z</math></b>                   | 0,04 mm                               | 0,12 mm                               |
| <b><math>a_p</math></b>                   | 12 mm                                 | 22 mm                                 |
| <b><math>a_e</math></b>                   | 12 mm                                 | 1 - 1,5 mm                            |
| <b>Adaptér</b>                            | BT40                                  | BT40                                  |
| <b>Chlazení</b>                           | Emulze 5%                             | Emulze 5%                             |
| <b>Čas výroby</b>                         | 55 min                                | 33 min                                |
| <b>Trvanlivost nástroje</b>               | 4 ks                                  | 4 ks                                  |
| <b>Poznámka</b>                           |                                       | Podstatné snížení zatížení<br>stroje  |

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ TECHNOLOGIÍ A TROCHOIDNÍCH INTERPOLACÍ NA CNC STROJI

V rámci experimentu byly naprogramovány čtyři trochoidní interpolace k vyfrézování čtyř různých drážek trochoidním způsobem. Proces probíhal na jedné straně obráběné desky. Drážky byly předmětem k dalším analýzám s ohledem na průřez třísky, silové zatížení a kvalitu opracovaných ploch.

#### 3.1 Úvod do experimentu programování trochoidních interpolací pro výrobu drážky na CNC stroji

Jako materiál obrobku byla vybrána uhlíková ocel ČSN 41 2050, která je vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Má široké spektrum využití a byla tedy vhodná i pro tento typ experimentu [35].

Tab. 5 Chemické složení oceli ČSN 41 2050 [35].

| Prvek       | C         | Mn        | Si        | Cr       | W | Mo       | V | Ni       | Co    | Fe  |
|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|---|----------|---|----------|-------|-----|
| Složení (%) | 0,42-0,50 | 0,50-0,80 | max. 0,40 | max 0,40 | - | max 0,10 | - | max 0,40 | 0,045 | zb. |

Trochoidní dráha nástroje byla naprogramovaná na obráběcím stroji MCV 1210 od výrobce TAJMAC ZPS, a.s., Zlín. Je to 5osé obráběcí centrum, které nabízí vysokou přesnost, produktivitu a velmi ekonomický provoz. Dále nabízí obrábění ve 3–5 osách, přímé odměřování ve všech osách a lze u něj využít i HSC technologie [36].



Obr. 34 CNC stroj MCV 1210.

Nástroj pro výrobu drážek byla zvolena válcová čelní čtyřbřitá fréza s kódem 140618.160 z materiálu HSS s Co8 od výrobce ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s. Fréza má průměr 16 mm a 2 zuby přes střed.

Jako řídicí systém byl použit SINUMERIK 840 od výrobce SIEMENS. Tento řídicí systém pro CNC obráběcí stroje se vyznačuje tím, že pozitivně ovlivňuje automatizaci, digitalizaci a technologickou stránku výroby. Dokáže zvýšit produktivitu výroby. Je vhodný pro kusovou i sériovou výrobu, pro jednoduché či složité výrobky. SINUMERIK má široké spektrum využití, mezi jeho hlavní oblasti využití patří automobilový, elektronický či letecký průmysl, dále výroba nástrojů či forem [37].

Trochoidní dráha byla naprogramována do NC programu pomocí příkazů. Byly využity následující příkazy G-kódů [38,39]:

- G17: volba pracovní roviny X/Y, směr přísuvu osa Z;
- G54: nastavitelná posunutí počátku (nulového bodu), volba nulového bodu;
- G90: způsob zadávání souřadnic v Z ose pro polohování rezného nástroje – absolutní programování;
- G94: programování rychlosti posuvu v mm za minutu;
- G64: režim řízení pohybu po dráze se snižováním posuvové rychlosti podle faktoru přetížení;
- G40: deaktivování korekcí nástroje;
- G1: aktivování přímkové interpolace kartézskými souřadnicemi, lineární interpolace pracovním posuvem;
- S: otáčky vřetene v  $\text{min}^{-1}$ ;
- F: posuvová rychlost v mm/min;
- DEF: definice proměnných;
- DIAMOF: vypnutí způsobu zadávání souřadnic v X ose pro polohování rezného nástroje – průměrové programování vypnuto;
- SOFT: zrychlení po dráze s omezením vypočtené přesnosti;
- M6: upnutí nástroje do vřetena;
- M3: otáčení vřetene ve směru hodinových ručiček;
- M8: zapnutí chlazení procesní kapalinou
- M30: konec hlavního programu a přesun kurzoru na začátek programu;
- T=: volba nástroje
- FOR: smyčka se zadaným počtem průchodů;
- ENDFOR: konec pro smyčku FOR se zadaným počtem průchodů;
- XV: uživatelsky definovaná proměnná;
- YV: uživatelsky definovaná proměnná;
- UHEL: uživatelsky definovaná proměnná.

Znalosti G-kódů a trochoidního obrábění jsou důležité pro praxi. Čtyři odlišné drážky byly vytvořeny tím, že byl změněn u každého programu vstupní parametr - posuvová rychlost - v programu tzn.  $F$ . První ze čtyř posuvů byl zvolen na 150 mm/min, tedy  $F150$ . Pro čtyři odlišné posuvy byla zvolena geometrická řada s koeficientem 1,26. Tento koeficient je vyvozen z charakteristik strojů v dílně, u kterých je tento koeficient osvědčen. Výpočty posuvových rychlostí, když je  $F_1 = 150$ , podle geometrické řady byly následující:

$$F_2 = F_1 \cdot t = 150 \cdot 1.26 = 189, \quad (3.1)$$

$$F_3 = F_2 \cdot t = 189 \cdot 1.26 = 238,14 \doteq 238, \quad (3.2)$$

$$F_4 = F_3 \cdot t = 238 \cdot 1.26 = 299,88 \doteq 300, \quad (3.3)$$

kde je  $F_1$  - posuvová rychlost v prvním programu,  $F_2$  - posuvová rychlost v následujícím druhém programu,  $F_3$  - posuvová rychlost v následujícím třetím programu,  $F_4$  - posuvová rychlost v následujícím čtvrtém programu a  $t$  je koeficient 1,26. Hlavními parametry v programu je  $a_p$ ,  $v_f$  a  $UHEL$ .

Frekvence snímání dat byla zvolena 100 Hz pro každou osu, doba 30 sekund, dolnoprostopustný filtr 60 Hz a dlouhá časová konstanta, tzn. byly upřednostněny statisticky zpracovatelné střední hodnoty měřených veličin. Axiální šířka řezu byla zvolena 2 mm – tzn. v programu  $G1\ Z=-2\ F500$ . Parametr  $UHEL$  by nastaven v rozsahu od 0 do 3200, aby byl vyfrézován maximální počet kroků trochoidy a drážky, které byly frézovány proti sobě se zároveň nespojily. Počet kroků trochoidy byly vypočteny podle:

$$\text{Počet kroků trochoidy} = \frac{3200}{360} = 8,89. \quad (3.4)$$

Rovnice XV a YV určují parametricky polohu středu frézy v trochoidní interpolaci:

$$XV = 2 \cdot \sin(UHEL) + 0,02 \cdot UHEL, \quad (3.5)$$

$$YV = 2 \cdot \cos(UHEL). \quad (3.6)$$

Rovnice:

$$X = -20 + XV, \quad (3.7)$$

$$Y = 16 + YV, \quad (3.8)$$

definují v jakých souřadnicích  $X$  a  $Y$  má nástroj začít frézovat trochoidními interpolacemi.

```

N10 DEF INT UHEL
N20 DEF REAL YV
N30 DEF REAL XV
N40 G17 G54 G90 DIAMOF
N50 G94
N60 G64
N70 SOFT
N80 G40
N90 T="FR_16"
N100 M6
N110 G1 Z100 F2000
N120 M3 S700
N130 M8
N140 G1 X-40 Y16 F2000
N150 G1 Z10
N160 G1 Z-2 F500
N170 FOR UHEL=0 TO 3200
N180 XV=2*SIN(UHEL)+(0.02*UHEL)
N190 YV=2*COS(UHEL)
N200 G1 X=-20+XV Y=16+YV F150
N210 ENDFOR
N220 G1 Z100 F500
N230 M30

```

Obr. 35 Ukázka prvního programu s posuvem 150 mm/min.

Před výrobou každé drážky se musel obrobek mechanicky otočit a znovu upnout. Čímž se vymezilo obrábění na jedné ploše bez výrazné změny programu. Poté se změnil posuv, který byl násoben daným koeficientem. Během procesu docházelo také k chlazení emulzí CIMSTAR 560-6 % (obj.).



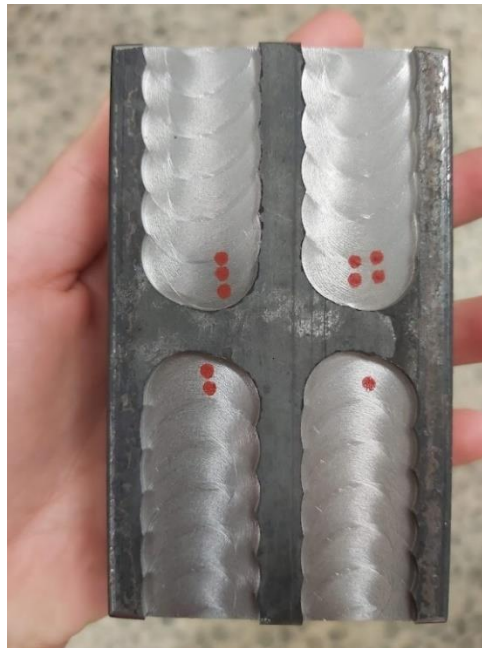
Obr. 36 Ukázka z procesu trochoidního frézování a vnějšího chlazení frézy a obrobku.



Obr. 37 Ukázka z experimentu trochoidního obrábění po výrobě třetí drážky.

Pouhým okem je vizuálně patrné, že jednotlivé drážky se liší svým výsledným povrchem na dnu i stěně drážky. Na obrobku jsou znatelné kruhové stopy vytvořené kruhovým pohybem, které vytváří na povrchu drážky rýhy a další nerovnosti, které mohou být stěžejní pro vyhodnocení drsnosti. Pokaždé, když zajedu nástrojem do obrobku, dochází k deformaci nástroje a tím se ve směru pohybu zaryje do vodorovné plochy materiálu, čímž vznikají půlkruhové stopy. Na tomto lze simulovat krok trochoidy c. Pro jednoznačnější další

zpracování byly jednotlivé drážky označeny (počtem teček) podle jejich pořadí výroby a posuvové rychlosti na obr. 38.



Obr. 38 Čtyři odlišné drážky vyrobené procesem trochoidního frézování.

### 3.2 Programování trochoidních interpolací s ohledem na průřez třísky

Maximální průřez třísky souvisí s maximálními složkami silového zatížení. Při maximálním silovém zatížení je průřez třísky největší, jelikož dochází k největší hloubce řezu nástroje do obrobku. Na základě závislostí lze interpretovat programování trochoidních interpolací s ohledem na průřez třísky. Nejdříve se vypočítaly posuvy na zub  $f_z$  pro jednotlivé drážky a jejich posuvové rychlosti podle [7]:

$$f_{z1} = \frac{v_f}{z \cdot n} = \frac{150}{4 \cdot 700} \doteq 0,054, \quad (3.9)$$

$$f_{z2} = \frac{v_f}{z \cdot n} = \frac{189}{4 \cdot 700} \doteq 0,0675, \quad (3.10)$$

$$f_{z3} = \frac{v_f}{z \cdot n} = \frac{238}{4 \cdot 700} \doteq 0,085, \quad (3.11)$$

$$f_{z4} = \frac{v_f}{z \cdot n} = \frac{300}{4 \cdot 700} \doteq 0,107. \quad (3.12)$$

Poté se v návaznosti na získané hodnoty vypočítaly maximální velikosti jmenovitého průřezu třísky  $A_{Dmax}$  pro jednotlivé drážky podle [7]:

$$A_{Dmax1} = f_z \cdot a_p = 0,054 \cdot 2 = 0,108, \quad (3.13)$$

$$A_{Dmax2} = f_z \cdot a_p = 0,0675 \cdot 2 = 0,135, \quad (3.14)$$

$$A_{Dmax3} = f_z \cdot a_p = 0,085 \cdot 2 = 0,17, \quad (3.15)$$

$$A_{Dmax4} = f_z \cdot a_p = 0,107 \cdot 2 = 0,214. \quad (3.16)$$

S ohledem na výsledky je největší maximální průřez třísky při posuvové rychlosti 300 mm/min, který vede k největšímu úběru materiálu, a tedy k největší produktivitě za jednotku času.

### 3.3 Programování trochoidních interpolací s ohledem na silové zatížení

Silové zatížení se během celého frézování drážek měřilo pomocí dynamometru KISTLER 9257B, vybaveným nábojovými zesilovači KISTLER 2825A, počítačem a SW DynoWare.

Na dynamometru byl upnut pomocí ručního svěráku obrobek. Dynamometr měřil silové zatížení  $F_x$ , které bylo kladné ve směru doprava,  $F_y$ , které bylo kladné ve vodorovném směru kolmo na směr posuvu drážek a  $F_z$ , které bylo kladné směrem dolů (kartézský systém).



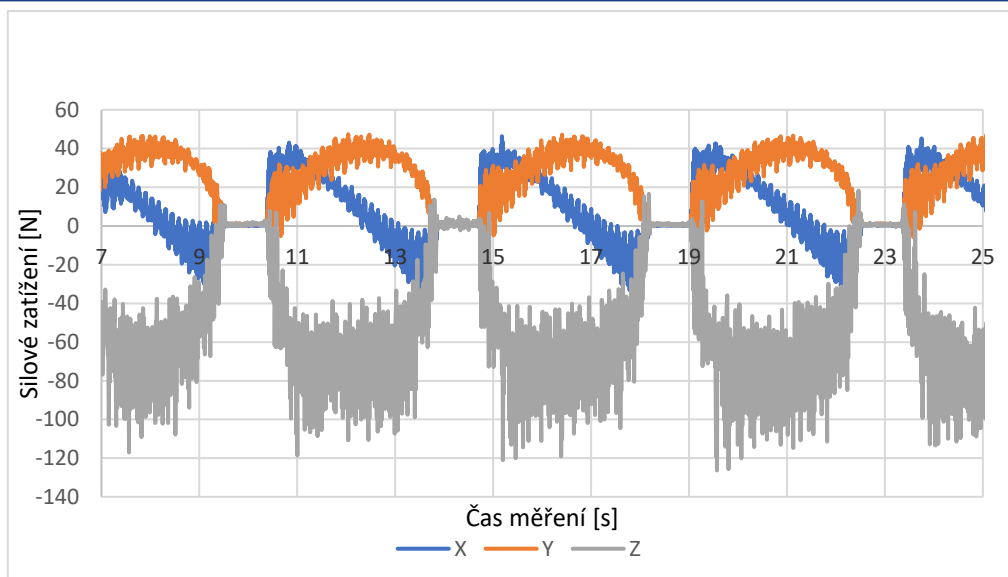
Obr. 39 Směry silového zatížení na dynamometru u měření.

Silové zatížení se díky dynamometru měřilo pomocí programu DynoWare, což je software, který díky dynamometru sbírá a vyhodnocuje data. Během procesu byly pomocí softwaru zaznamenány a zobrazeny data řezných sil.

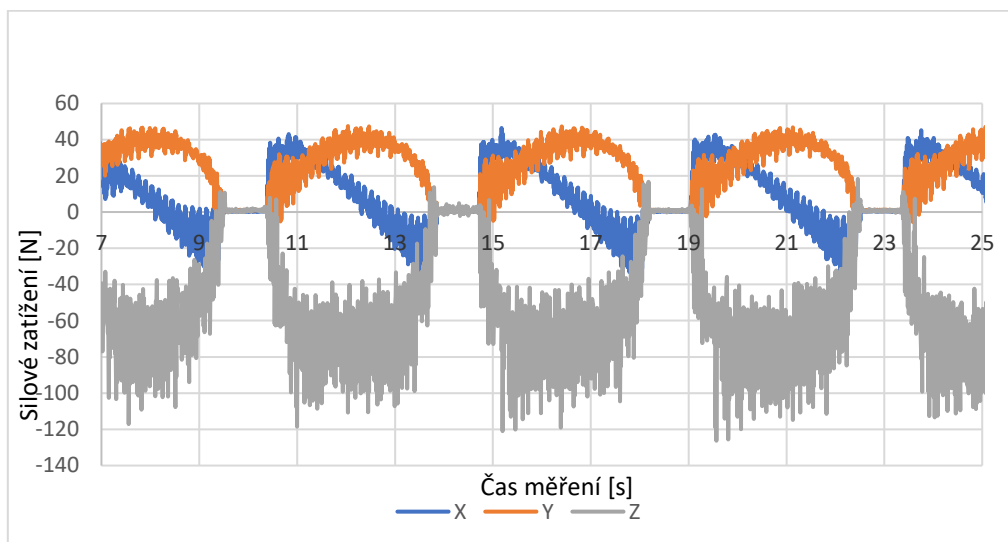
Jednotlivé drážky byly vyhodnoceny postupně a poté byly z vyhodnocení učiněny závěry. Pro jednotlivé síly platí:

- Síla  $F_x$  je  $F_{cn}$  – síla posuvového namáhání;
- Síla  $F_y$  je  $F_c$  – síla řezání;
- síla  $F_z$  je  $F_p$  – síla pasivní, která nejvíce namáhá nástroj;
- síla  $F$  – celková síla.

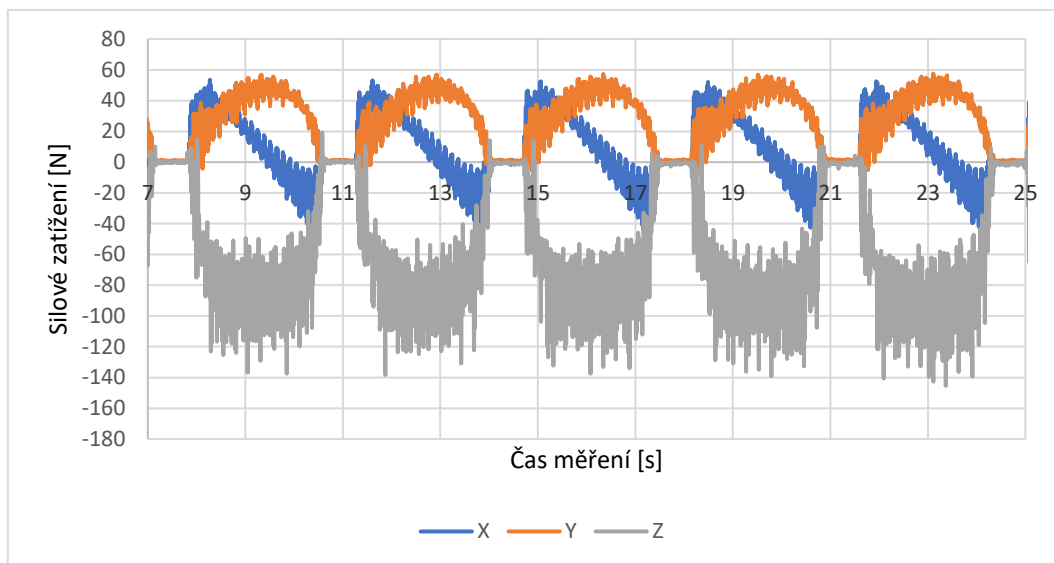
První drážka byla vytvořena rychlostí posuvu 150 mm/min, druhá 189 mm/min, třetí 238 mm/min, čtvrtá 300 mm/min. Na obr. 40,41,42,43 lze vidět grafy řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  i  $F_z$  v závislosti na čase  $t$ , které byly měřeny v čase od 7 do 25 sekund pro jednotlivé výroby drážek. Pomocí Microsoft Office Excel lze ze zaznamenaných dat pomocí analýzy dat získat popisnou statistikou střední hodnoty, směrodatné odchylky, minimum, maximum i součet sil. Tyto hodnoty v tabulkách bez i s celkovou silou  $F$  jsou v čase od 8 do 20 sekund a od 9 do 21 sekund pro každé drážkování přiloženy v přílohách.



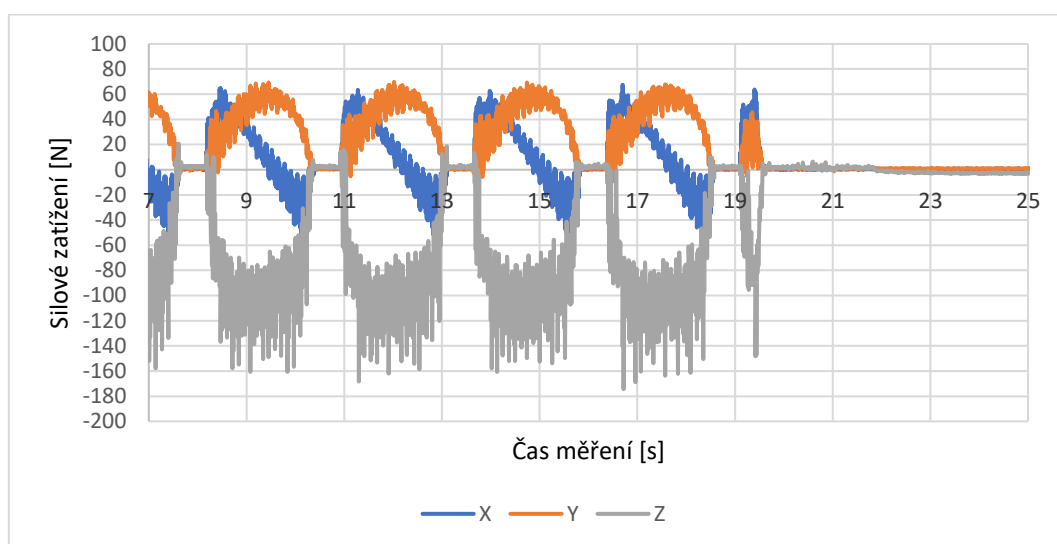
Obr. 40 Závislost sil na čase pro první drážkování v čase od 7 do 25 sekund.



Obr. 41 Závislost sil na čase pro druhé drážkování v čase od 7 do 25 sekund.



Obr. 42 Závislost sil na čase pro třetí drážkování v čase od 7 do 25 sekund.



Obr. 43 Závislost sil na čase pro čtvrté drážkování v čase od 7 do 25 sekund.

Tab. 6 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro první drážkování.

|                           | <b>F<sub>x</sub>=F<sub>cn</sub></b> |                           | <b>F<sub>y</sub>=F<sub>c</sub></b> |                           | <b>F<sub>z</sub>=F<sub>p</sub></b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 7,226174                            | <b>Stř. hodnota</b>       | 16,44984                           | <b>Stř. hodnota</b>       | -25,0987                           | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>35,47882</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,344172                            | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,383122                           | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,777625                           | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,784186        |
| <b>Medián</b>             | 2,73132                             | <b>Medián</b>             | 19,1498                            | <b>Medián</b>             | -25,7874                           | <b>Medián</b>             | 38,18018        |
| <b>Modus</b>              | 0,289917                            | <b>Modus</b>              | 0,961304                           | <b>Modus</b>              | 3,9978                             | <b>Modus</b>              | 4,540408        |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 11,92745                            | <b>Směr. odchylka</b>     | 13,27725                           | <b>Směr. odchylka</b>     | 26,94893                           | <b>Směr. odchylka</b>     | 27,17633        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 142,2641                            | <b>Rozptyl výběru</b>     | 176,2854                           | <b>Rozptyl výběru</b>     | 726,245                            | <b>Rozptyl výběru</b>     | 738,553         |
| <b>Špičatost</b>          | -0,04436                            | <b>Špičatost</b>          | -1,59911                           | <b>Špičatost</b>          | -1,03249                           | <b>Špičatost</b>          | -1,1722         |
| <b>Šikmost</b>            | 0,163218                            | <b>Šikmost</b>            | -0,0289                            | <b>Šikmost</b>            | -0,34894                           | <b>Šikmost</b>            | 0,233883        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 66,8946                             | <b>Rozdíl max-min</b>     | 43,3502                            | <b>Rozdíl max-min</b>     | 112,4268                           | <b>Rozdíl max-min</b>     | 99,13913        |
| <b>Minimum</b>            | -31,0822                            | <b>Minimum</b>            | -3,7384                            | <b>Minimum</b>            | -91,095                            | <b>Minimum</b>            | 0,658077        |
| <b>Maximum</b>            | 35,8124                             | <b>Maximum</b>            | 39,6118                            | <b>Maximum</b>            | 21,3318                            | <b>Maximum</b>            | 99,7972         |
| <b>Součet</b>             | 8678,635                            | <b>Součet</b>             | 19756,25                           | <b>Součet</b>             | -30143,6                           | <b>Součet</b>             | 42610,06        |
| <b>Počet</b>              | 1201                                | <b>Počet</b>              | 1201                               | <b>Počet</b>              | 1201                               | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 7 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro druhé drážkování.

|                           | <b>F<sub>x</sub>=F<sub>cn</sub></b> |                           | <b>F<sub>y</sub>=F<sub>c</sub></b> |                           | <b>F<sub>z</sub>=F<sub>p</sub></b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 6,921519                            | <b>Stř. hodnota</b>       | 22,22902                           | <b>Stř. hodnota</b>       | -45,8865                           | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>55,17524</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,523871                            | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,443686                           | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,971139                           | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,041069        |
| <b>Medián</b>             | 0,518799                            | <b>Medián</b>             | 26,7792                            | <b>Medián</b>             | -52,948                            | <b>Medián</b>             | 64,53221        |
| <b>Modus</b>              | 0,335693                            | <b>Modus</b>              | 1,08337                            | <b>Modus</b>              | 0,640869                           | <b>Modus</b>              | 1,010773        |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 18,15499                            | <b>Směr. odchylka</b>     | 15,37615                           | <b>Směr. odchylka</b>     | 33,65527                           | <b>Směr. odchylka</b>     | 36,07873        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 329,6036                            | <b>Rozptyl výběru</b>     | 236,426                            | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1132,677                           | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1301,675        |
| <b>Špičatost</b>          | -0,67403                            | <b>Špičatost</b>          | -1,40061                           | <b>Špičatost</b>          | -1,05488                           | <b>Špičatost</b>          | -1,06992        |
| <b>Šikmost</b>            | 0,068687                            | <b>Šikmost</b>            | -0,30125                           | <b>Šikmost</b>            | 0,133668                           | <b>Šikmost</b>            | -0,31366        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 83,786                              | <b>Rozdíl max-min</b>     | 52,78016                           | <b>Rozdíl max-min</b>     | 143,0056                           | <b>Rozdíl max-min</b>     | 133,5895        |
| <b>Minimum</b>            | -37,4298                            | <b>Minimum</b>            | -5,31006                           | <b>Minimum</b>            | -126,282                           | <b>Minimum</b>            | 0,752028        |
| <b>Maximum</b>            | 46,3562                             | <b>Maximum</b>            | 47,4701                            | <b>Maximum</b>            | 16,7236                            | <b>Maximum</b>            | 134,3416        |
| <b>Součet</b>             | 8312,744                            | <b>Součet</b>             | 26697,05                           | <b>Součet</b>             | -55109,7                           | <b>Součet</b>             | 66265,46        |
| <b>Počet</b>              | 1201                                | <b>Počet</b>              | 1201                               | <b>Počet</b>              | 1201                               | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 8 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro třetí drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 10,55137      | <b>Stř. hodnota</b>       | 29,18038     | <b>Stř. hodnota</b>       | -61,5206     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>72,67656</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,62221       | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,52396      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,100907     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,195177        |
| <b>Medián</b>             | 6,8512        | <b>Medián</b>             | 34,6985      | <b>Medián</b>             | -68,0237     | <b>Medián</b>             | 81,62412        |
| <b>Modus</b>              | 0,411987      | <b>Modus</b>              | 0,869751     | <b>Modus</b>              | -0,27466     | <b>Modus</b>              | #####           |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 21,56297      | <b>Směr. odchylka</b>     | 18,15806     | <b>Směr. odchylka</b>     | 38,15244     | <b>Směr. odchylka</b>     | 41,41938        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 464,9618      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 329,7153     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1455,609     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1715,565        |
| <b>Špičatost</b>          | -0,59879      | <b>Špičatost</b>          | -1,16299     | <b>Špičatost</b>          | -0,8463      | <b>Špičatost</b>          | -0,72466        |
| <b>Šikmost</b>            | -0,18891      | <b>Šikmost</b>            | -0,49842     | <b>Šikmost</b>            | 0,380009     | <b>Šikmost</b>            | -0,59313        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 100,5554      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 65,21611     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 158,3251     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 149,5685        |
| <b>Minimum</b>            | -47,0428      | <b>Minimum</b>            | -7,99561     | <b>Minimum</b>            | -139,099     | <b>Minimum</b>            | 0,4176          |
| <b>Maximum</b>            | 53,5126       | <b>Maximum</b>            | 57,2205      | <b>Maximum</b>            | 19,2261      | <b>Maximum</b>            | 149,9861        |
| <b>Součet</b>             | 12672,19      | <b>Součet</b>             | 35045,64     | <b>Součet</b>             | -73886,2     | <b>Součet</b>             | 87284,54        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 9 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro čtvrté drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 10,10799      | <b>Stř. hodnota</b>       | 31,03987     | <b>Stř. hodnota</b>       | -64,7018     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>77,97449</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,742222      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,667468     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,424613     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,52836         |
| <b>Medián</b>             | 0,793457      | <b>Medián</b>             | 37,4603      | <b>Medián</b>             | -76,1719     | <b>Medián</b>             | 93,66801        |
| <b>Modus</b>              | 0,350952      | <b>Modus</b>              | 1,00708      | <b>Modus</b>              | 2,16675      | <b>Modus</b>              | 2,26679         |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 25,72203      | <b>Směr. odchylka</b>     | 23,13139     | <b>Směr. odchylka</b>     | 49,3706      | <b>Směr. odchylka</b>     | 52,966          |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 661,6229      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 535,0614     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2437,457     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2805,397        |
| <b>Špičatost</b>          | -0,50705      | <b>Špičatost</b>          | -1,4931      | <b>Špičatost</b>          | -1,19599     | <b>Špičatost</b>          | -1,2224         |
| <b>Šikmost</b>            | -0,0303       | <b>Šikmost</b>            | -0,17841     | <b>Šikmost</b>            | 0,167569     | <b>Šikmost</b>            | -0,29402        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 125,7324      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 78,87263     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 192,9322     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 187,5182        |
| <b>Minimum</b>            | -58,1207      | <b>Minimum</b>            | -9,17053     | <b>Minimum</b>            | -174,286     | <b>Minimum</b>            | 0,824257        |
| <b>Maximum</b>            | 67,6117       | <b>Maximum</b>            | 69,7021      | <b>Maximum</b>            | 18,6462      | <b>Maximum</b>            | 188,3425        |
| <b>Součet</b>             | 12139,69      | <b>Součet</b>             | 37278,88     | <b>Součet</b>             | -77706,9     | <b>Součet</b>             | 93647,36        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

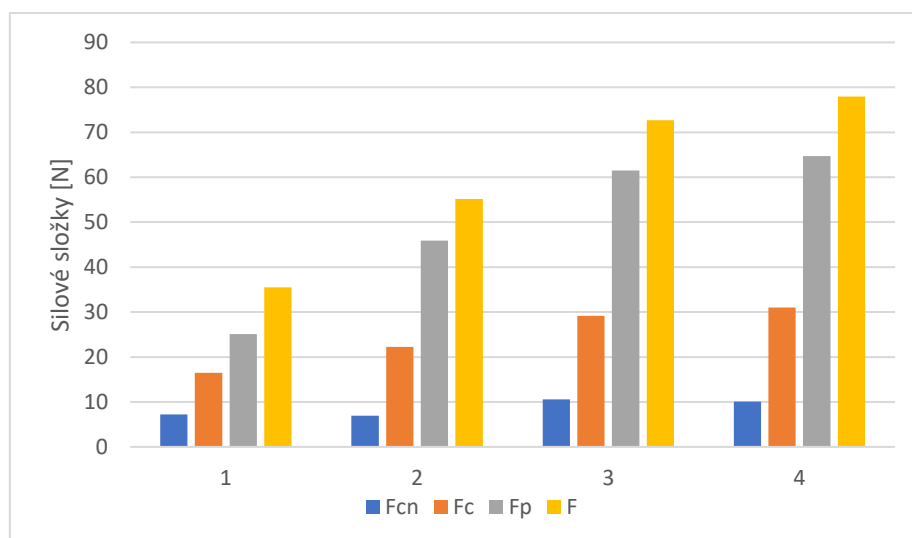
Z těchto grafů a hodnot z analýzy dat v Microsoft Office Excel je patrné, že drážky se vyfrézují rychleji s větší posuvovou rychlostí. Posuvové síly  $F_x$  neboli  $F_{cn}$ , nabývají nejprve kladné hodnoty a poté záporné. Tedy v kladných hodnotách nástroj tlačí do obrobku při nájezdu ve směru osy  $x$  a v záporných hodnotách tlačí do obrobku při výjezdu, ale proti směru osy  $x$ . V nulových hodnotách mezi trochoidními cykly je tzv. *mrtvý čas*, kdy se obrobek neobrábí a nástroj je mimo záběr, takže nástroj netlačí na obrobek, neopotřebovává a nepřehřívá se a uzavírá se trochoida. I přes výrazné záporné síly je střední hodnota i součet sil kladných hodnot. To je dáno faktem, že nástroj vykonává v průběhu trochoidy významnější posuv ve směru frézování, než je posuv ve chvílích vracení nástroje.

Řezné síly  $F_y$  neboli  $F_c$  začínají v záporných hodnotách, což je v počátku nájezdu nástroje od osy do stěny drážky. Narůstající kladné hodnoty se vyskytují v první části oblouku trochoidy, kdy nástroj vykonává půloblouk do směru osy  $y$ . Poté se kladné hodnoty snižují, což zobrazuje pohyb nástroje a jeho tlačení na obrobek v druhé části trochoidy, kde se směr srovnává s osou  $x$ . V nulových hodnotách mezi trochoidními cykly je tzv. *mrtvý čas*, kdy se obrobek neobrábí a nástroj je mimo záběr, tudíž nedochází k tak velkému namáhání nástroje.

Axiální síly  $F_z$  neboli  $F_p$  – síly pasivní jsou převážně v záporných hodnotách – jejich střední hodnota, minimum i součet, což znamená, že nástroj nadzdvihuje obrobek. Na začátku a konci každého kroku trochoidy jsou síly kladné, tedy nástroj tlačí do obrobku. To je dáno tím, že nejprve dojde k deformaci nástroje, který se svým prohnutím lehce zaryje do dna drážky, čímž vznikají typické oblouky na dně. Kladné hodnoty sil těchto vrypů jsou pak přetlačeny odběrem třísek po šroubovici nástroje, která strhává třísky směrem nahoru a tím obrobek také nadzvedává.

Složky  $F_y$  se se zvyšujícím posuvem zvyšují. Stejná závislost platí i pro maximální hodnoty sil  $F_y$  – se zvyšujícím posuvem nabývají vyšších hodnot. Složky  $F_z$  a minimální hodnoty  $F_z$  se se zvyšujícím posuvem snižují a nabývají zápornějších hodnot, tedy jejich absolutní hodnoty se zvyšují, takže působící síla je větší do záporného směru. To odpovídá většímu úběru, kdy třísky s větší tloušťkou budou více nadzdvihovat obrobek, resp. když dochází k jejich oddělování.

Na obr.44 je graf středních hodnot silových složek, na kterých jde vidět porovnání silových složek na celkovou sílu. Celkové střední hodnoty sil se se zvyšující posuvovou rychlostí také zvyšuje.

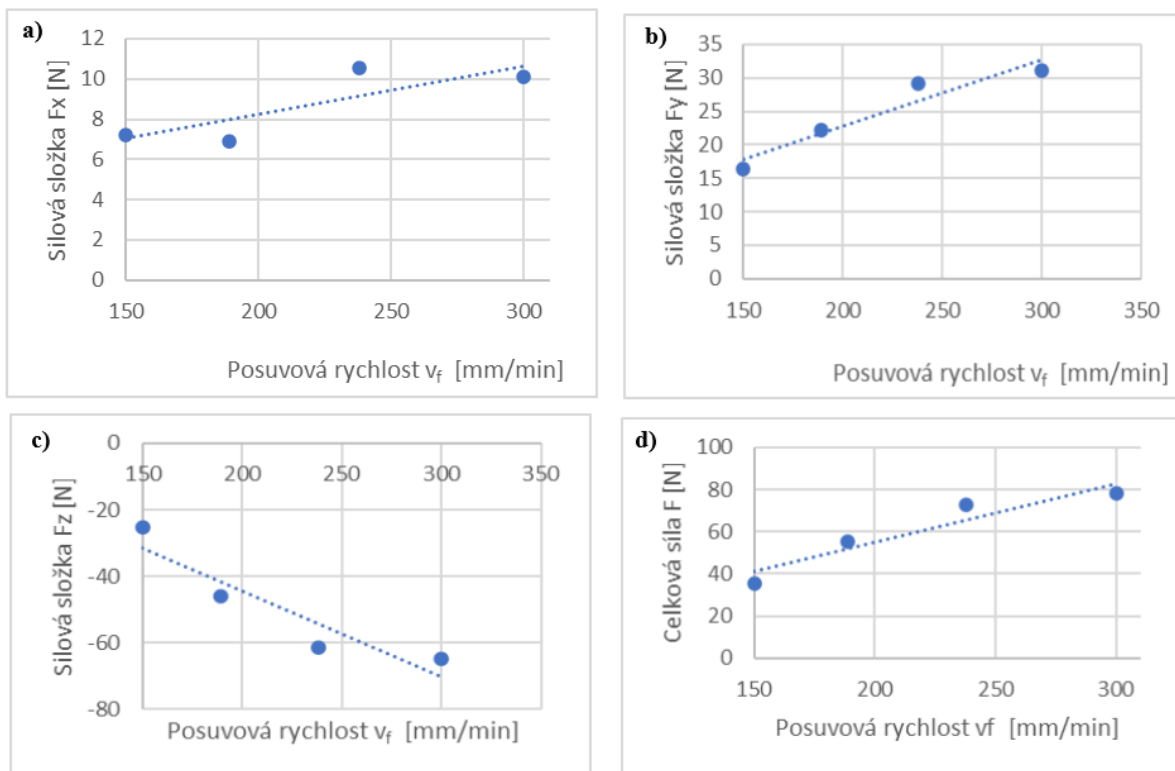


Obr. 44 Porovnání středních hodnot silových složek v čase od 8 do 20 sekund pro první, druhé, třetí a čtvrté drážkování.

Na základě výsledků se v čase od 8 do 20 sekund byla odvozena závislost programování trochoidních interpolací s ohledem na silové zatížení. Pomocí naměřených středních hodnot silových složek k určitým posuvovým rychlostem lze definovat závislost silového zatížení na zvoleném parametru trochoidního frézování – posuvové rychlosti  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min. Tyto závislosti jsou založené na spojnici trendu, která byla zvolena lineární.

Tab. 10 Střední hodnoty silových složek pro určitou posuvovou rychlost.

| $v_f$ [mm/min] | $F_x$ [N] | $F_y$ [N] | $F_z$ [N] | $F$ [N]  |
|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 150            | 7,226174  | 16,44984  | -25,0987  | 35,47882 |
| 189            | 6,921519  | 22,22902  | -45,8865  | 55,17524 |
| 238            | 10,55137  | 29,18038  | -61,5206  | 72,67656 |
| 300            | 10,10799  | 31,03987  | -64,7018  | 77,97449 |

Obr. 45 Závislost středních hodnot složek: a)  $F_x$ , b)  $F_y$ , c)  $F_z$ , d)  $F$  na posuvové rychlosti  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min.

Ze získaných grafů lze závislosti programování trochoidních interpolací se vstupním parametrem  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min s ohledem na střední hodnoty silového zatížení popsat následujícími rovnicemi:

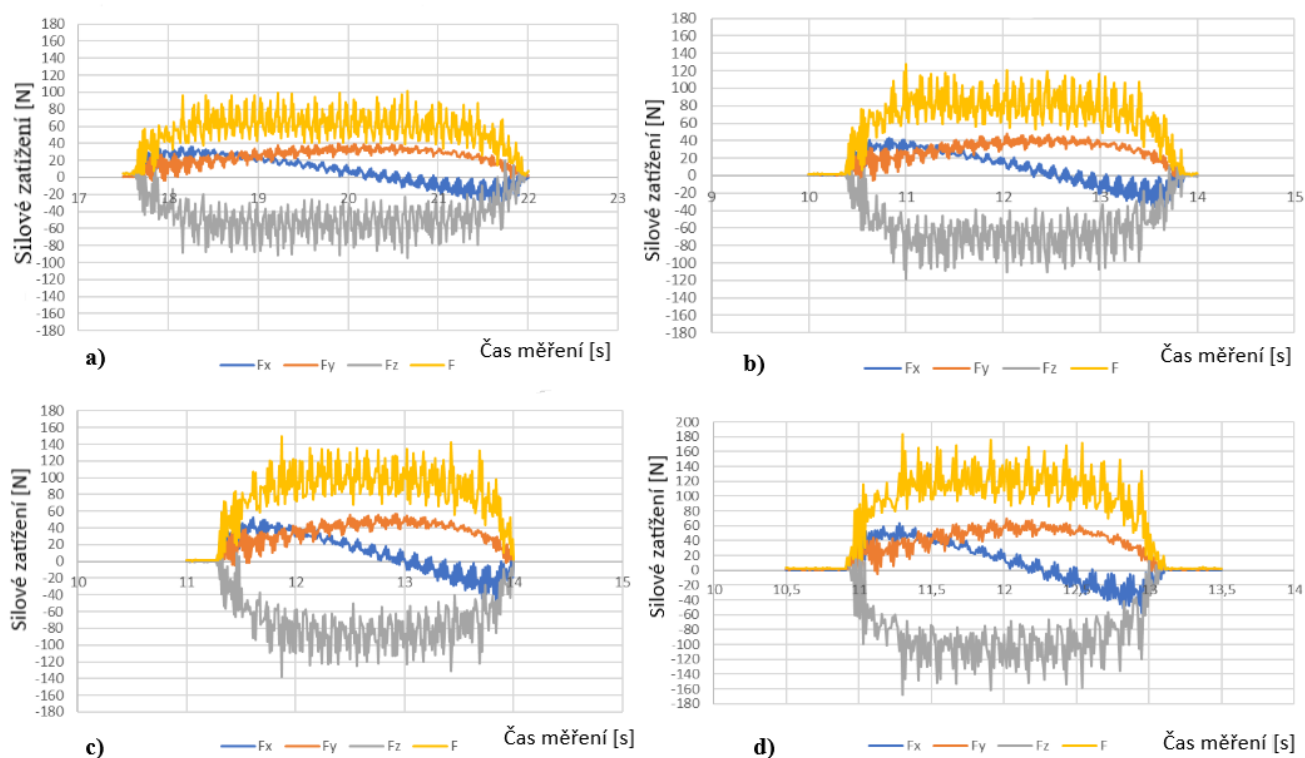
$$F_x = 0,0242 \cdot v_f + 3,4, \quad (3.17)$$

$$F_y = 0,0987 \cdot v_f + 3,083, \quad (3.18)$$

$$F_z = -0,2585 \cdot v_f + 7,3636, \quad (3.19)$$

$$F = 0,2808 \cdot v_f - 1,2379. \quad (3.20)$$

Pro všechny čtyři typy drážek byla z grafů vybrána jedna z oblastí, kdy je nástroj v záběru. Z prvního drážkování je to interval od 17 až 22 sekund, z druhého 10 až 14 sekund, z třetího 11 až 14 a ze čtvrtého 10,5 až 13,5 sekund. Z těchto hodnot se vybraly maximální hodnoty silových složek, ke kterým patří posuvová rychlost. Výjimkou je složka  $F_z$ , u které se vzaly maximální záporné hodnoty, jelikož v té chvíli nástroj nazdvihuje obrobek.

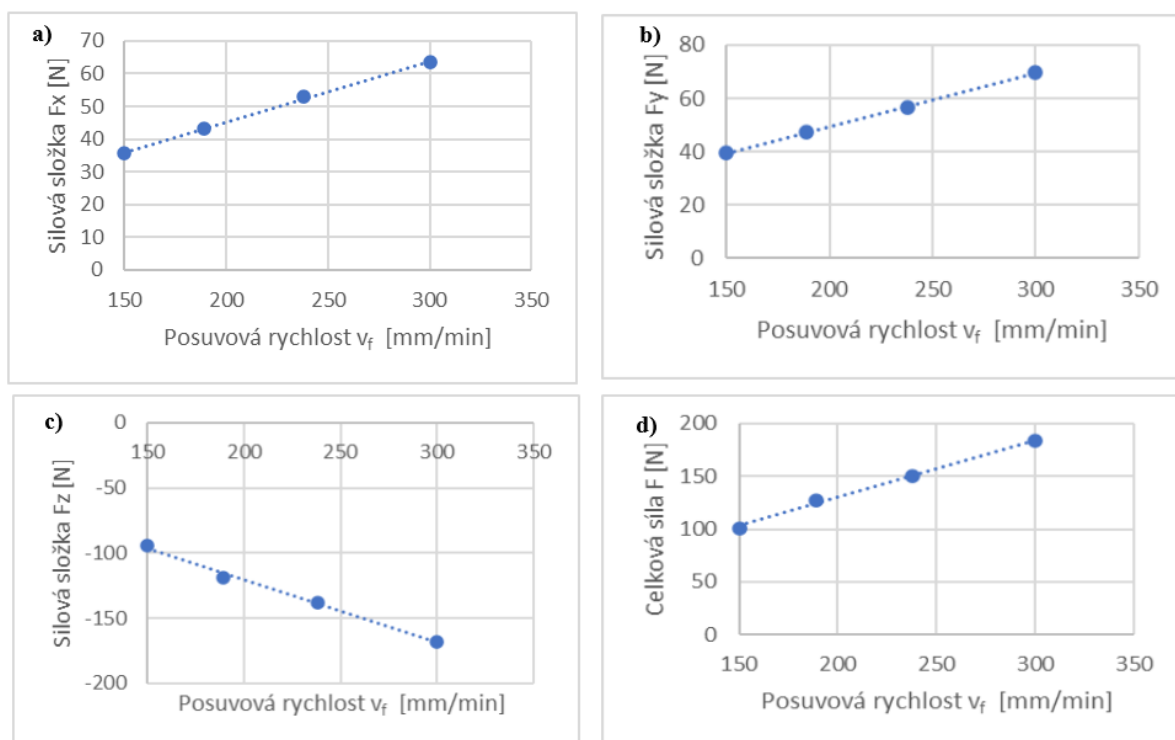


Obr. 46 Silové zatížení ve vybraných oblastech, když je nástroj v záběru: a) první drážkování 17 až 22 sekund, druhé drážkování 10 až 14 sekund, třetí drážkování 11 až 14 sekund a čtvrté drážkování 10,5 až 13,5 sekund.

Tab. 11 Maximální hodnoty silových složek z vybraných oblastí pro danou posuvovou rychlost.

| $v_f$ [mm/min] | $F_x$ [N] | $F_y$ [N] | $F_z$ [N] | $F$ [N]  |
|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 150            | 35,8124   | 39,6118   | -94,6655  | 100,9886 |
| 189            | 43,0908   | 47,4701   | -118,561  | 127,2888 |
| 238            | 53,1311   | 56,8237   | -138,306  | 149,8369 |
| 300            | 63,5223   | 69,7021   | -168,182  | 183,3833 |

Z těchto hodnot se udělaly lineární závislosti silových složek na posuvové rychlosti  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min:



Obr. 47 Závislost maximálních hodnot složek: a)  $F_x$ , b)  $F_y$ , c)  $F_z$ , d)  $F$  na posuvové rychlosti  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min.

Na základě výpočtu spojnice trendu lze interpretovat programování trochoidních interpolací se vstupním parametrem  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min s ohledem na silové zatížení. Závislosti maximálních hodnot silových složek na posuvové rychlosti  $v_f$  jsou podle rovnic:

$$F_x = 0,1861 \cdot v_f + 8,0784, \quad (3.21)$$

$$F_y = 0,1999 \cdot v_f + 9,5824, \quad (3.22)$$

$$F_z = -0,4794 \cdot v_f - 24,825, \quad (3.23)$$

$$F = 0,5383 \cdot v_f + 22,345. \quad (3.24)$$

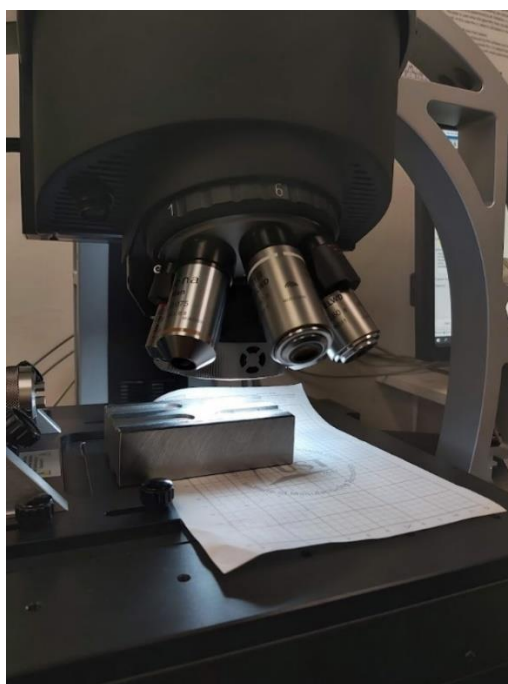
Závěrem je, že nejmenší celkové silové zatížení jak středních, tak i maximálních složek je při nejmenší posuvové rychlosti a to 150 mm/min. Při nejmenším silovém zatížení dochází k menším vibracím, a tedy menšímu namáhání nástroje.

### 3.4 Programování trochoidních interpolací s ohledem na kvalitu opracovaných ploch

Kvalitu opracování ploch lze interpretovat díky drsnostím povrchů jednotlivého drážkování. Drsnosti se měřili pomocí přístroje Infinite Focus Generation 5 od společnosti Alicona, což je vysoce přesný a rychlý optický 3D měřicí systém [40]. Naměřená data se zpracovala softwarem IF Laboratory Measurement.



Obr. 48 Přístroj Infinite Focus Generation 5 od společnosti Alicona, Graz, Rakousko.



Obr. 49 Měření drsností drážek.

Z měření jako výstup slouží R-parametry, tedy  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_q$ . Pro tyto parametry platí [41]:

*" $R_a$  je průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu".*

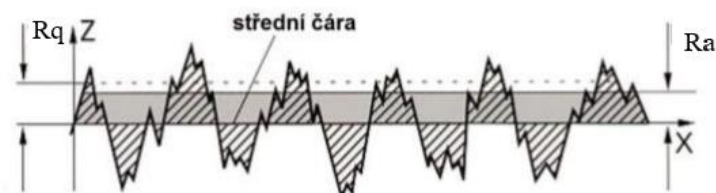
*" $R_z$  je největší výška profilu".*

*" $R_q$  je průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu".*

$R_a$  se využívá pro vyhodnocení drsnosti neperiodických povrchů,  $R_z$  pro změny výškových textur povrchů a  $R_q$  pro jemně obrobené povrchy, přičemž ukazuje více výstupky nebo prohlubně než  $R_a$ , jelikož je umocněna na druhou [42].



Obr. 50 Ra parametr [42].



Obr. 51 Srovnání Ra a Rq parametrů [42].

Na následujících grafech je zobrazena závislost délky cesty měření  $l$  v jednotkách mm na ose  $x$  na členitosti povrchu  $z'$  v jednotkách  $\mu\text{m}$  na ose  $y$ . Výsledky se zaznamenaly pro každé drážkování zvlášť.

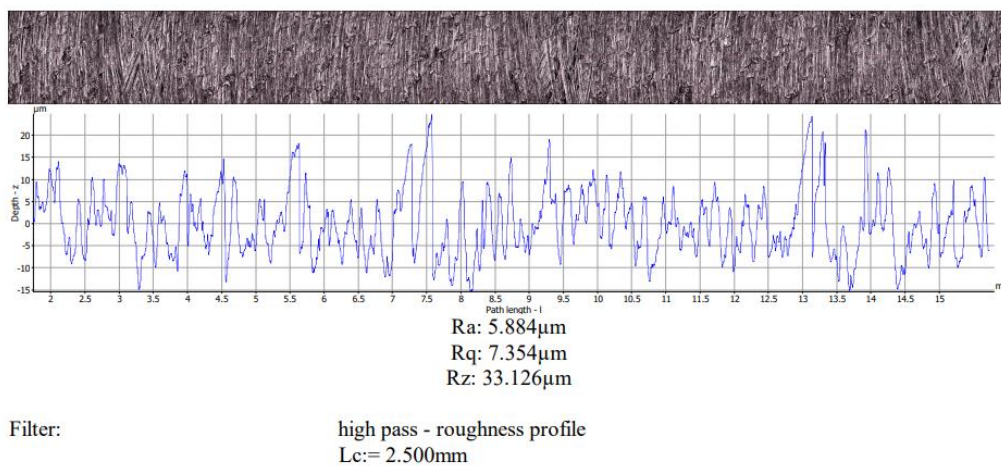
Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

## Measurement Report

## Profile Measurement

TR1



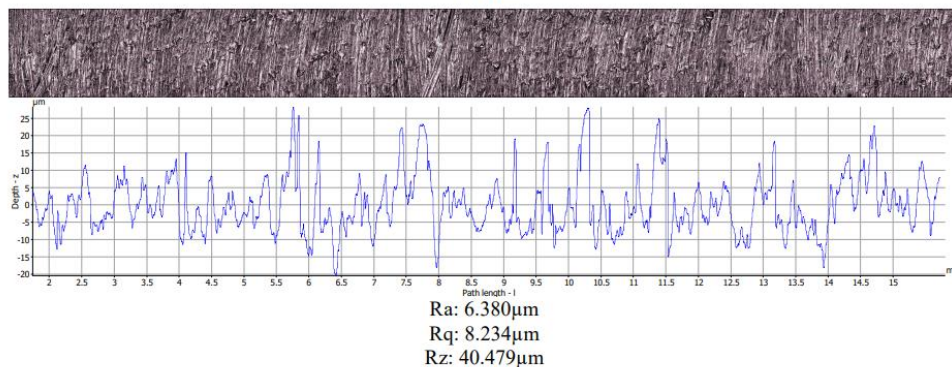
Obr. 52 Naměřená drsnost profilu prvního drážkování.

Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

## Measurement Report Profile Measurement

TR2



Filter: high pass - roughness profile  
Lc:= 2.500mm

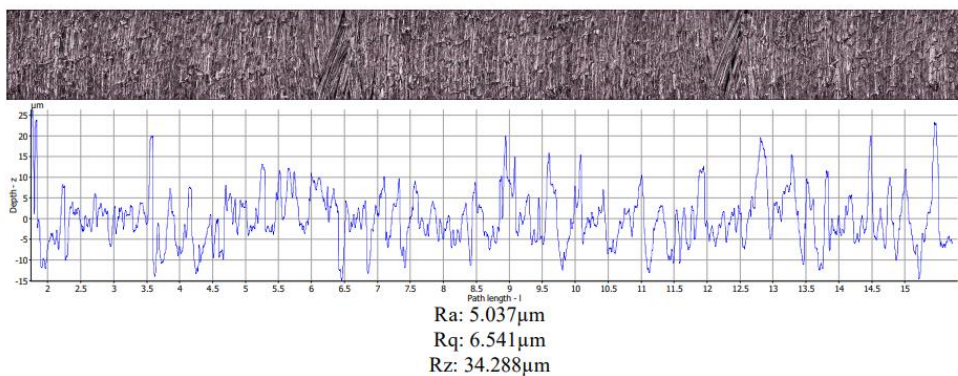
Obr. 53 Naměřená drsnost profilu druhého drážkování.

Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

## Measurement Report Profile Measurement

TR3



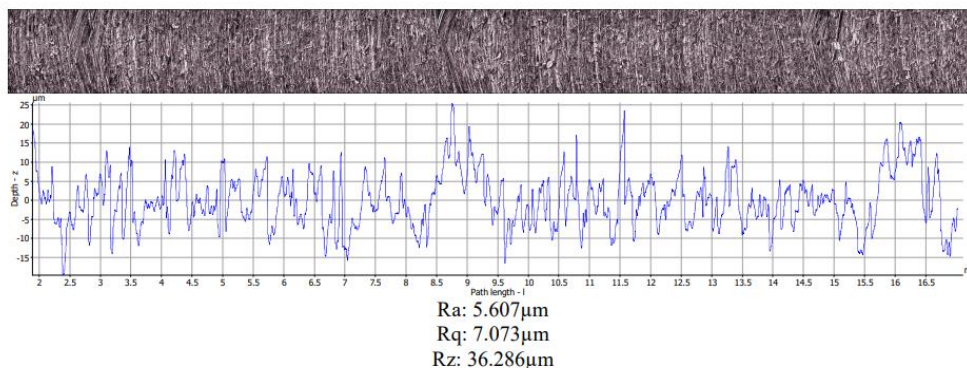
Filter: high pass - roughness profile  
Lc:= 2.500mm

Obr. 54 Naměřená drsnost profilu třetího drážkování.

# Measurement Report

## Profile Measurement

TR4



Filter: high pass - roughness profile  
Lc:= 2.500mm

Obr. 55 Naměřená drsnost profilu čtvrtého drážkování.

Na základě hodnot naměřených drsností povrchu lze interpretovat závěry vlivu posuvové rychlosti na kvalitě opracovaných ploch. Co se týká Ra je patrné, že má nejmenší hodnoty u třetího drážkování a následně u čtvrtého, tedy u rychlostí posuvu 238 a 300 mm/min. Hodnota Rq má také nejmenší hodnoty u třetího a poté čtvrtého drážkování. Tyto dva parametry se vztahují na celou měřenou plochu obrobene drážky a jsou tedy nejrelevantnějšími ukazateli.

Co se týká parametru Rz, které se vztahuje pouze ke konkrétnímu místu povrchu, je nejmenší u prvního drážkování. Tedy nejmenší výška profilu vznikla s nejmenší posuvovou rychlostí. Nedochozí totiž k tak rychlému nájezdu nástroje do záběru a následnému zhoršení kvality povrchu vlivem jeho zatížení a vzniklých vibrací.

V dalším měření se porovnávala vlnitost, kterou charakterizují následující parametry [41]:

*"Wa je průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti".*

*"Wq je průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti".*

*"Wz je největší výška profilu vlnitosti".*

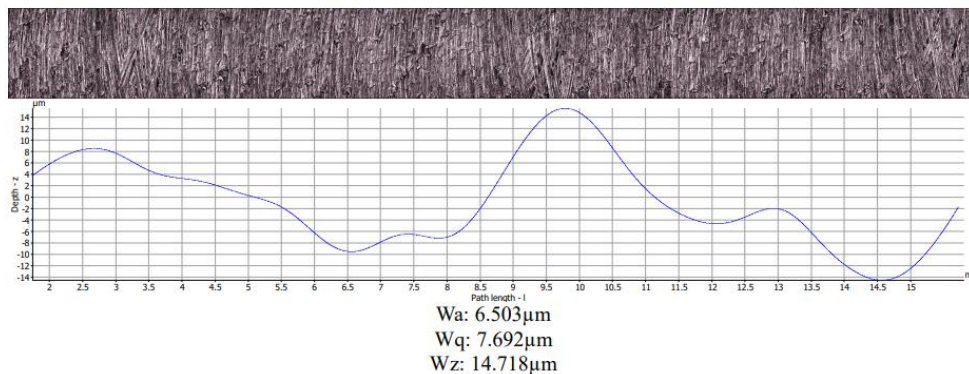
Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

# Measurement Report

## Profile Measurement

TR1



Filter: low pass - waviness profile  
Lc:= 2.500mm

Obr. 56 Naměřená vlnitost povrchu pro první drážkování.

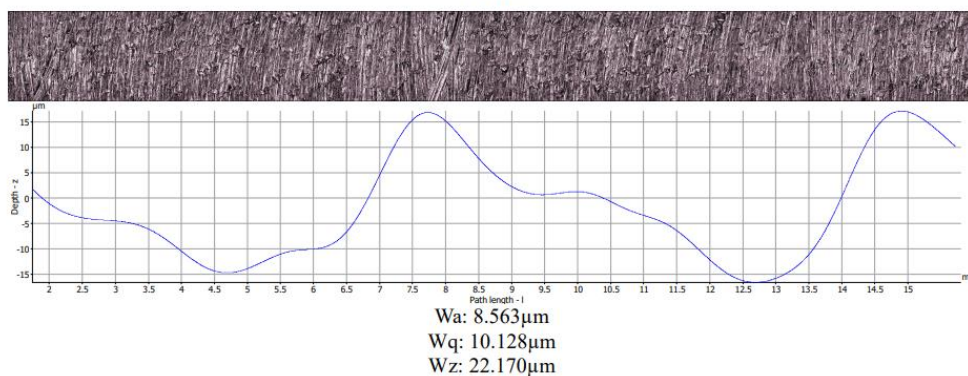
Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

# Measurement Report

## Profile Measurement

TR2



Filter: low pass - waviness profile  
Lc:= 2.500mm

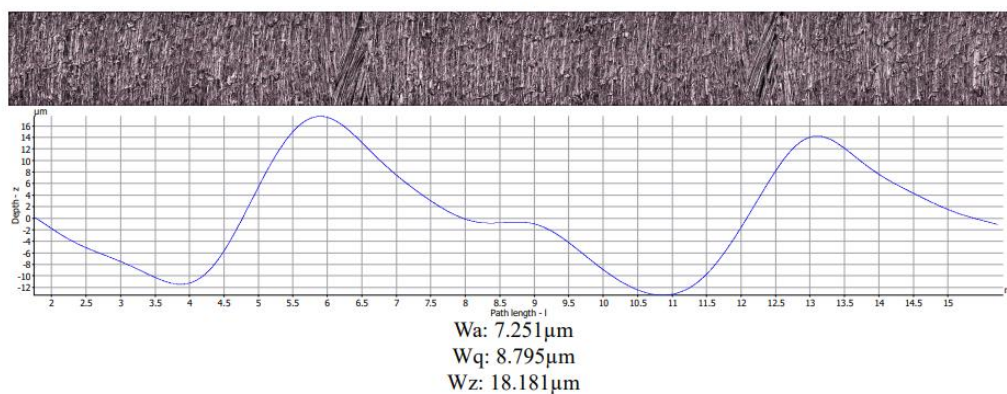
Obr. 57 Naměřená vlnitost povrchu pro druhé drážkování.

Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

## Measurement Report Profile Measurement

TR3



Filter: low pass - waviness profile  
Lc:= 2.500mm

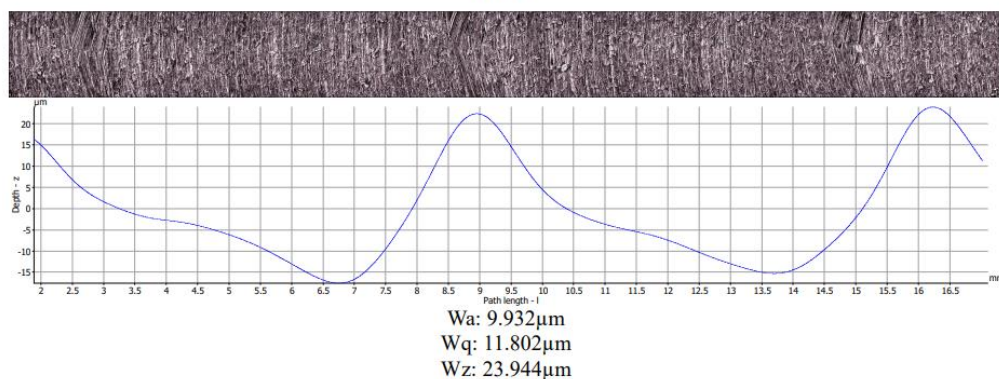
Obr. 58 Naměřená vlnitost povrchu pro třetí drážkování.

Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

## Measurement Report Profile Measurement

TR4



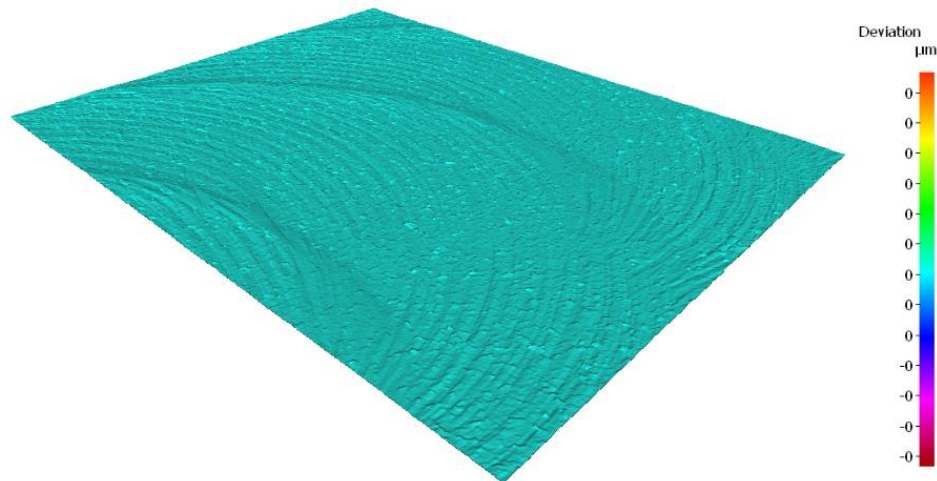
Filter: low pass - waviness profile  
Lc:= 2.500mm

Obr. 59 Naměřená vlnitost povrchu pro čtvrté drážkování.

S ohledem na vlnitost povrchu má nejmenší hodnoty  $W_a$ ,  $W_q$  i  $W_z$  první obrobená drážka. To znamená, že při nejmenší posuvové rychlosti vzniká nejmenší vlnitost, a tedy je kvalita povrchu v závislosti na vlnitost nejlepší. Na obrobku jsou dobře viditelné periodicky se opakující odchylky, které se nacházejí vždy v místě, přes které vedla trajektorie okraje nástroje. Při deformaci nástroje vytvoří jeho obvodový okraj rýhu ve vodorovném povrchu drážky, jak je

možné vidět na následujícím obrázku. Při větším zatížení nástroje se zvyšuje jeho deformace, a proto je rýha a tím i  $W_z$  větší. Zároveň je však s větší deformací nástroje tato rýha kratší ve směru posuvu, jelikož vzniká ostřejší špička, která se do povrchu zarývá.

Jelikož se obrábí v kruhovém pohybu, tak i na výsledné ploše lze vidět trajektorie pohybu nástroje. Jsou to oblouky, které jsou od sebe vzdálené o krok trochoidy  $c$ . Kvalita opracování frézovaných ploch se tedy odvíjí hlavně od poloměru a kroku trochoidy, čímž je dána deformace nástroje, která tyto obloukové stopy způsobuje.



Obr. 60 Viditelné stopy frézy na obrobeném povrchu čtvrté drážky.



Obr. 61 Obrobený povrch čtvrté drážky po trochoidním frézování.

Výsledná kvalita povrchu dosahuje relativně špatné kvality, což mohlo být způsobeno relativně velmi malou řeznou rychlostí, která se v případě trochoidního frézování volí až 11x vyšší.

## 4 ROZBOR A SROVNÁNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ JEDNOTLIVÝCH PROGRAMŮ PRO TROCHOIDNÍ A LINEÁRNÍ FRÉZOVÁNÍ

V rámci druhého experimentu byly naprogramovány čtyři lineární programy k vyfrézování čtyř různých drážek konvenčním způsobem. Drážky vytvořené konvenčním způsobem frézování byly předmětem k dalším analýzám, a hlavně k srovnání s nekonvenčním trochoidním frézováním. Hlavní charakteristiky k srovnání byly průřez třísky, silové zatížení a kvalita opracovaných ploch lineární vs trochoidní frézování.

### 4.1 Úvod do experimentu pro výrobu drážek lineárním frézováním

Proces probíhal za stejných podmínek jako u trochoidního frézování na jedné straně obráběné desky. Lineární dráha byla naprogramována do NC programu pomocí příkazů G-kódů.

Čtyři odlišné drážky se vytvořily stejně jako u trochoidního frézování tím, že se u každého programu měnil vstupní parametr - posuvová rychlost - v programu tzn.  $F$ . První ze čtyř rychlostí posuvů byl opět zvolen na 150 mm/min - v programu  $F150$ . Pro čtyři odlišné posuvy byla zvolena geometrická řada s koeficientem 1,26, pro který platí stejné odůvodnění jako u trochoidního procesu stejně jako pro výpočty posuvových rychlostí. Takže je kde je  $F_1 = 150\text{mm/min}$ ,  $F_2 = 189\text{ mm/min}$ ,  $F_3 = 238\text{ mm/min}$ ,  $F_4 = 300\text{ mm/min}$ . Hloubka řezu byla zvolena na 2 mm - v programu  $G1\ Z=-2\ F500$ .

```
N10 G17 G54 G90 DIAMOF
N20 G94
N30 G64
N40 SOFT
N50 G40
N60 T="FR_16"
N70 M6
N80 G1 Z100 F2000
N90 M3 S700
N100 M8
N110 G1 X-40 Y43 F2000
N120 G1 Z10
N130 G1 Z-2 F500
N140 G1 X40 F300
N150 G1 Z100 F500
N160 M30
```

Obr. 62 Ukázka programu pro lineární frézování s posuvovou rychlostí 300 mm/min.

Tento program se použil pro všechny čtyři drážky, přičemž se v něm změnila pouze násobená posuvová rychlost a obrobek se mechanicky otočil a upnul.



Obr. 63 Čtyři odlišné drážky vyrobené procesem lineárního frézování.

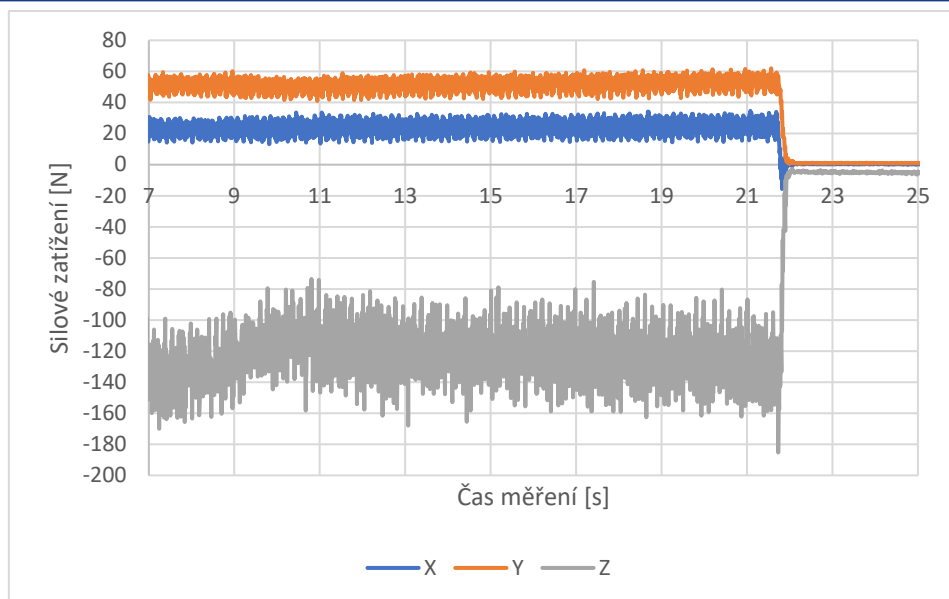
## 4.2 Srovnání průřezu třísky

Maximální průřezy třísky jsou pro lineární drážkování stejné jako pro trochoidní. Při srovnání je rozdíl v tom, že u trochoidního frézování je díky pohybu nástroje dopředu a dozadu maximální průřez třísky proměnný od nuly po jeho maximální hodnotu po dobu procesu obrábění, zatímco u lineárního je maximální průřez třísky neměnný. Maximální průřez třísky, kterého je dosaženo v obou metodách obrábění, se spočítá pomocí stejných rovnic, uvedených v kapitole 3.2

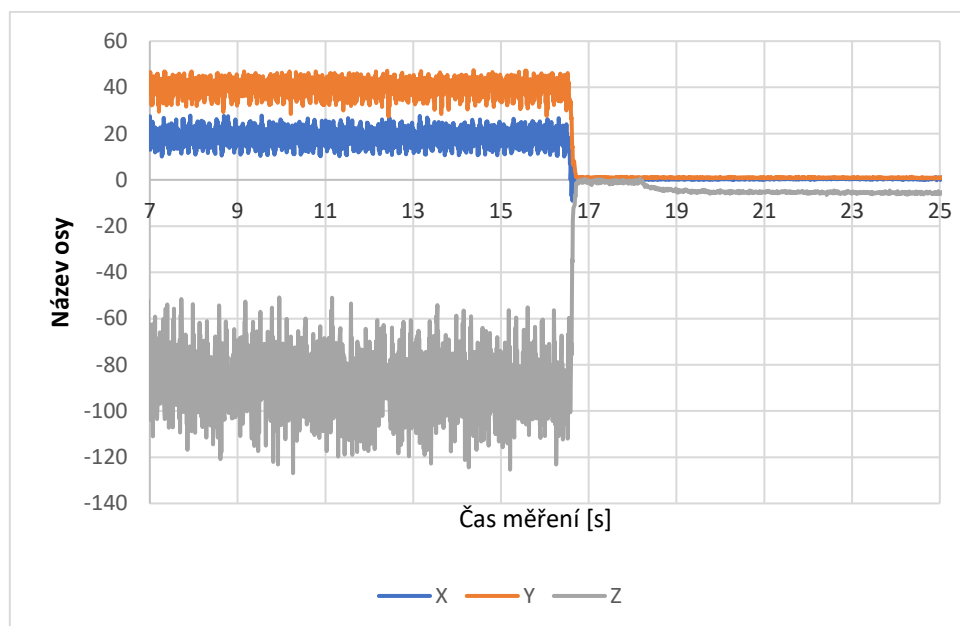
## 4.3 Srovnání silového zatížení

Měření silového zatížení během konvenčního procesu bylo srovnáno s trochoidním drážkováním. Probíhalo za stejných podmínek a s využitím stejného dynamometru a softwaru. Pro silové zatížení a jeho složky platí také stejné náležitosti jako u vyhodnocení silových složek u trochoidního obrábění.

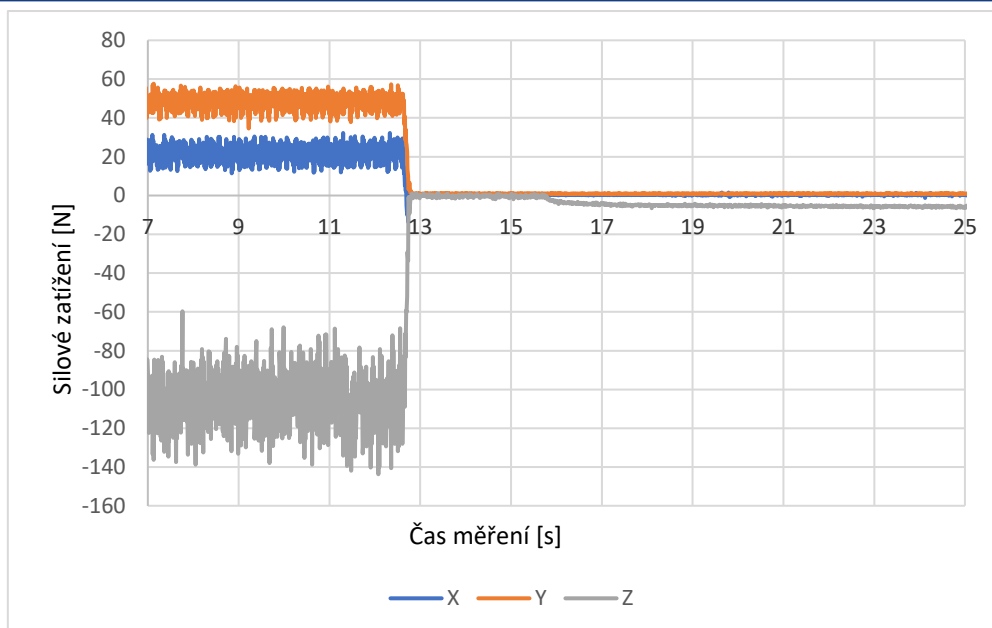
První drážka byla vytvořena rychlostí posuvu 150 mm/min, druhá 189 mm/min, třetí 238 mm/min a čtvrtá 300 mm/min. Na následujících obrázcích jsou grafy silových složek jednotlivých drážek a tabulky hodnot popisných statistik i s celkovou silou  $F$ , které byly vytvořeny analýzou dat v Microsoft Office Excel. Další tabulky použité pro vyhodnocení jsou přiloženy v přílohách.



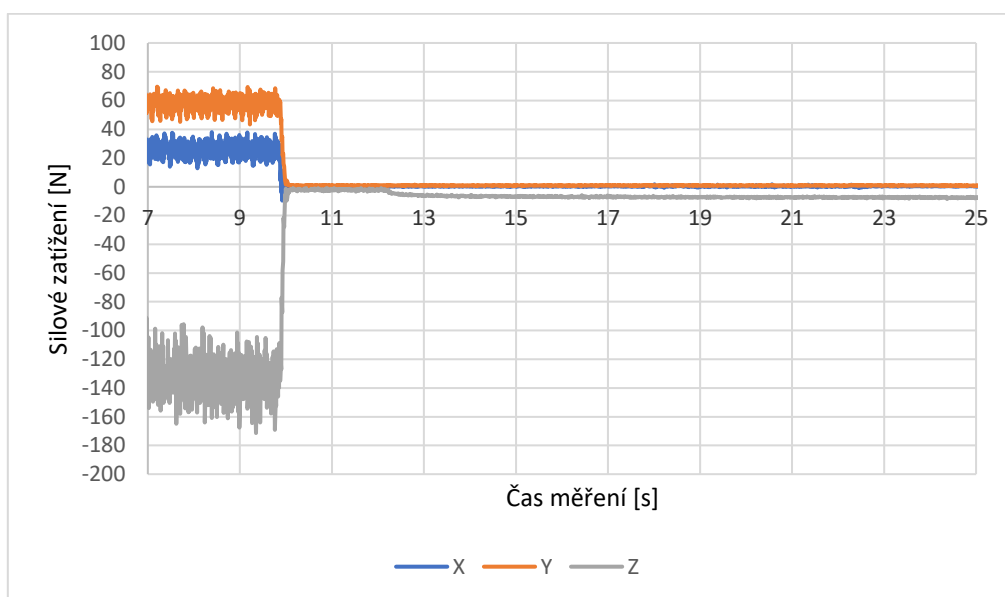
Obr. 64 Závislost sil na čase pro první lineární drážkování v čase od 7 do 25 sekund.



Obr. 65 Závislost sil na čase pro druhé lineární drážkování v čase od 7 do 25 sekund.



Obr. 66 Závislost sil na čase pro lineární třetí drážkování v čase od 7 do 25 sekund.



Obr. 67 Závislost sil na čase pro čtvrté lineární drážkování v čase od 7 do 25 sekund.

Tab. 12 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro první lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 24,01376      | <b>Stř. hodnota</b>       | 51,64081     | <b>Stř. hodnota</b>       | -119,528     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>132,6905</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,147384      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,130212     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,48034      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,453611        |
| <b>Medián</b>             | 24,3225       | <b>Medián</b>             | 52,1851      | <b>Medián</b>             | -119,537     | <b>Medián</b>             | 132,8788        |
| <b>Modus</b>              | 29,1443       | <b>Modus</b>              | 57,1289      | <b>Modus</b>              | -147,43      | <b>Modus</b>              | #####           |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 5,107668      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 4,512544     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 16,64639     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 15,72008        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 26,08827      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 20,36305     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 277,1022     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 247,1209        |
| <b>Špičatost</b>          | -1,248        | <b>Špičatost</b>          | -0,9772      | <b>Špičatost</b>          | -0,21907     | <b>Špičatost</b>          | -0,22998        |
| <b>Šikmost</b>            | -0,10272      | <b>Šikmost</b>            | -0,29965     | <b>Šikmost</b>            | -0,11107     | <b>Šikmost</b>            | 0,147329        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 20,9503       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 19,7297      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 94,3607      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 89,37944        |
| <b>Minimum</b>            | 13,1989       | <b>Minimum</b>            | 41,0461      | <b>Minimum</b>            | -167,847     | <b>Minimum</b>            | 89,58765        |
| <b>Maximum</b>            | 34,1492       | <b>Maximum</b>            | 60,7758      | <b>Maximum</b>            | -73,4863     | <b>Maximum</b>            | 178,9671        |
| <b>Součet</b>             | 28840,53      | <b>Součet</b>             | 62020,61     | <b>Součet</b>             | -143553      | <b>Součet</b>             | 159361,3        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 13 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro druhé lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 13,30704      | <b>Stř. hodnota</b>       | 28,88496     | <b>Stř. hodnota</b>       | -64,128      | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>71,85097</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,26115       | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,51257      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,162989     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,284982        |
| <b>Medián</b>             | 15,6708       | <b>Medián</b>             | 37,4756      | <b>Medián</b>             | -79,8645     | <b>Medián</b>             | 90,38329        |
| <b>Modus</b>              | 0,289917      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -1,00708     | <b>Modus</b>              | #####           |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 9,050285      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 17,76334     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 40,3039      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 44,53164        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 81,90766      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 315,5362     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1624,405     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1983,067        |
| <b>Špičatost</b>          | -1,2488       | <b>Špičatost</b>          | -1,118       | <b>Špičatost</b>          | -1,16024     | <b>Špičatost</b>          | -1,13717        |
| <b>Šikmost</b>            | -0,46724      | <b>Šikmost</b>            | -0,84599     | <b>Šikmost</b>            | 0,659716     | <b>Šikmost</b>            | -0,73838        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 36,91104      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 46,81397     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 127,4113     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 135,0867        |
| <b>Minimum</b>            | -9,09424      | <b>Minimum</b>            | 0,656128     | <b>Minimum</b>            | -126,923     | <b>Minimum</b>            | 0,831569        |
| <b>Maximum</b>            | 27,8168       | <b>Maximum</b>            | 47,4701      | <b>Maximum</b>            | 0,488281     | <b>Maximum</b>            | 135,9182        |
| <b>Součet</b>             | 15981,75      | <b>Součet</b>             | 34690,84     | <b>Součet</b>             | -77017,7     | <b>Součet</b>             | 86293,02        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 14 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro třetí lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 8,631888      | <b>Stř. hodnota</b>       | 19,51029     | <b>Stř. hodnota</b>       | -42,6991     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>48,02858</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,31485       | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,670122     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,455015     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,625307        |
| <b>Medián</b>             | 0,457764      | <b>Medián</b>             | 1,08337      | <b>Medián</b>             | -5,15747     | <b>Medián</b>             | 5,242054        |
| <b>Modus</b>              | 0,335693      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -0,36621     | <b>Modus</b>              | 0,993229        |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 10,91127      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 23,22338     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 50,42419     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 56,32574        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 119,0557      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 539,3252     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2542,599     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 3172,589        |
| <b>Špičatost</b>          | -1,25378      | <b>Špičatost</b>          | -1,6986      | <b>Špičatost</b>          | -1,54718     | <b>Špičatost</b>          | -1,61431        |
| <b>Šikmost</b>            | 0,679552      | <b>Šikmost</b>            | 0,490574     | <b>Šikmost</b>            | -0,54875     | <b>Šikmost</b>            | 0,522116        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 45,8069       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 56,94583     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 144,8672     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 154,2131        |
| <b>Minimum</b>            | -13,5803      | <b>Minimum</b>            | 0,38147      | <b>Minimum</b>            | -143,677     | <b>Minimum</b>            | 0,784901        |
| <b>Maximum</b>            | 32,2266       | <b>Maximum</b>            | 57,3273      | <b>Maximum</b>            | 1,19019      | <b>Maximum</b>            | 154,998         |
| <b>Součet</b>             | 10366,9       | <b>Součet</b>             | 23431,85     | <b>Součet</b>             | -51281,6     | <b>Součet</b>             | 57682,32        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 15 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro čtvrté lineární drážkování.

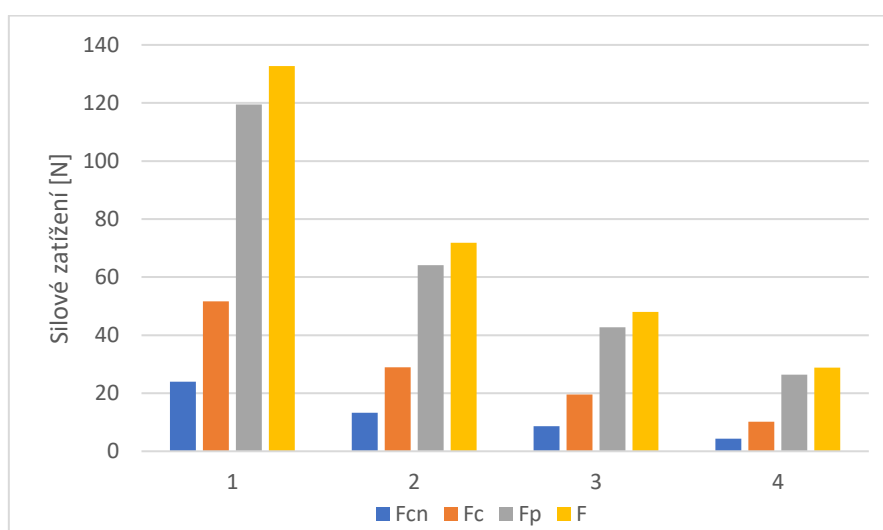
|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 4,341792      | <b>Stř. hodnota</b>       | 10,16742     | <b>Stř. hodnota</b>       | -26,374      | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>28,83246</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,279518      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,60725      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,368513     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,519363        |
| <b>Medián</b>             | 0,350952      | <b>Medián</b>             | 0,976563     | <b>Medián</b>             | -6,86646     | <b>Medián</b>             | 6,93401         |
| <b>Modus</b>              | 0,289917      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -7,04956     | <b>Modus</b>              | 2,041994        |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 9,686812      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 21,04454     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 47,42643     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 52,65422        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 93,83433      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 442,8725     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2249,266     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2772,467        |
| <b>Špičatost</b>          | 2,894285      | <b>Špičatost</b>          | 1,703325     | <b>Špičatost</b>          | 1,846774     | <b>Špičatost</b>          | 1,74385         |
| <b>Šikmost</b>            | 2,113695      | <b>Šikmost</b>            | 1,897468     | <b>Šikmost</b>            | -1,91924     | <b>Šikmost</b>            | 1,901781        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 47,68372      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 68,80191     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 170,4715     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 179,9584        |
| <b>Minimum</b>            | -9,58252      | <b>Minimum</b>            | 0,595093     | <b>Minimum</b>            | -171,387     | <b>Minimum</b>            | 1,32048         |
| <b>Maximum</b>            | 38,1012       | <b>Maximum</b>            | 69,397       | <b>Maximum</b>            | -0,91553     | <b>Maximum</b>            | 181,2788        |
| <b>Součet</b>             | 5214,493      | <b>Součet</b>             | 12211,07     | <b>Součet</b>             | -31675,2     | <b>Součet</b>             | 34627,78        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Drážky lineárním frézováním jsou se zvyšující se posuvovou rychlostí také dříve obrobene. Ze srovnání s trochoidním obráběním lze vyvodit následující závěry:

- u lineárního obrábění posuvové síly  $F_x$  neboli  $F_{cn}$  nabývají pouze kladné hodnoty. Tedy v kladných hodnotách nástroj tlačí do obrobku ve směru osy  $x$  po celou dobu obrábění. Je tedy zřejmé, že je nástroj celou dobu v záběru a nevzniká zde žádný tzv. *mrtvý čas*, což nástroj namáhá více než u trochoidního drážkování.

- Řezné síly  $F_y$  neboli  $F_c$  nabývají pouze kladné hodnoty ve směru osy  $y$ , tedy ve směru otáčení frézy. Nevzniká tu tzv. *mrtvý čas*, takže opět větší namáhání nástroje než u trochoidních interpolací.
- Axiální síly  $F_z$  neboli  $F_p$  – síly pasivní jsou v záporných hodnotách po celou dobu drážkování – jejich střední hodnota, minimum, maximum i součet. Po celou dobu procesu zde tyto síly nástrojem obrobek nazdvihují. Zatímco u trochoidního se obrobek chvíli nenazdvihuje, ale deformací nástroje je nejprve tlačén v kladném směru osy  $z$  dolů. Po celou dobu je nástroj namáhán, což znamená, že dochází k vyšší únavě nástroje než u trochoidního obrábění.
- Střední složky  $F_x$  a  $F_y$  se se zvyšujícím posuvem snižují. Složky  $F_z$  se zvyšují a nabývají větších hodnot, tedy jejich absolutní hodnoty se snižují a působí tam menší absolutní síly. Což je přesně naopak než u trochoidního obrábění.

Poté se ze středních hodnot silových složek udělal graf porovnání silových složek.

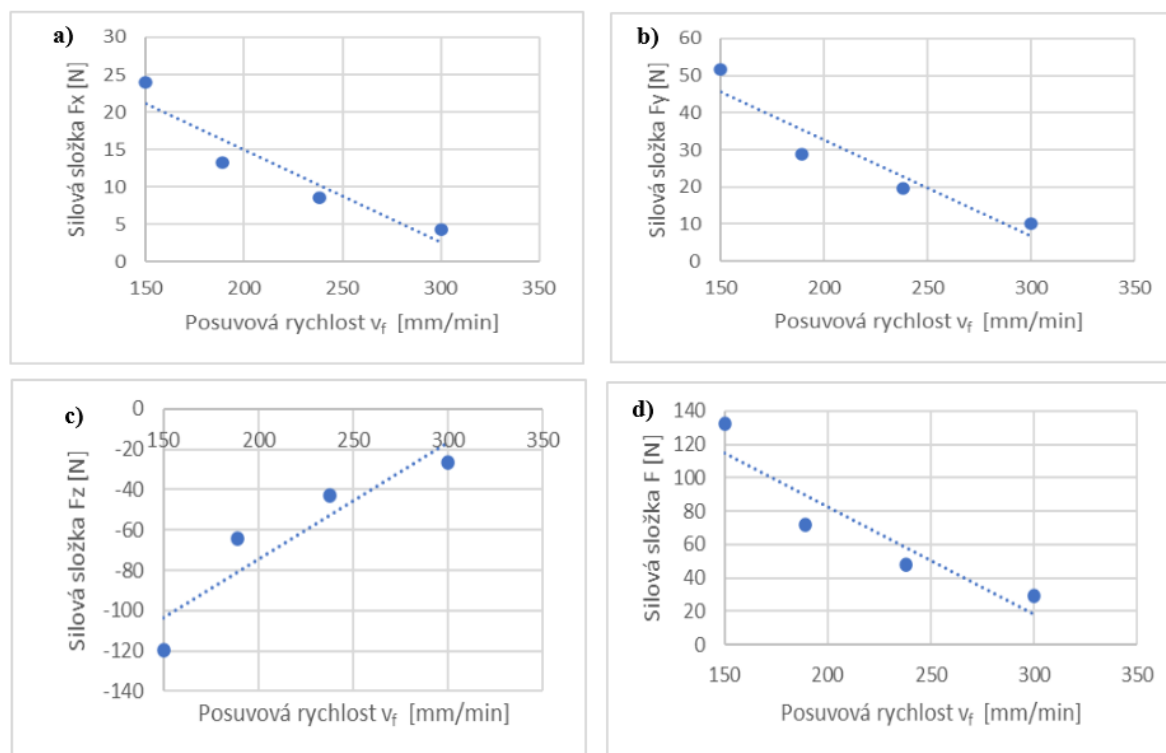


Obr. 68 Porovnání středních hodnot silových složek v čase od 8 do 20 sekund pro první, druhé, třetí a čtvrté lineární drážkování.

Grafy závislosti v čase od 8 do 20 sekund programování lineárních interpolací s ohledem na silové zatížení jsou vytvořeny z naměřených výsledků na základě spojnice trendu. Je to závislost středních hodnot silových složek na posuvové rychlosti  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min.

Tab. 16 Střední hodnoty silových složek lineárního drážkování pro určitou posuvovou rychlost.

| $V_f$ [mm/min] | $F_x$ [N] | $F_y$ [N] | $F_z$ [N] | $F$ [N]  |
|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 150            | 24,01376  | 51,64081  | -119,528  | 132,6905 |
| 189            | 13,30704  | 28,88496  | -64,128   | 71,85097 |
| 238            | 8,631888  | 19,51029  | -42,6991  | 48,02858 |
| 300            | 4,341792  | 10,16742  | -26,374   | 28,83246 |



Obr. 69 Závislost středních hodnot složek: a)  $F_x$ , b)  $F_y$ , c)  $F_z$ , d)  $F$  na posuvové rychlosti  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min pro lineární drážkování.

Programování lineárního drážkování se vstupním parametrem  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min s ohledem na střední hodnoty silové zatížení lze definovat rovnicemi:

$$F_x = -0,1234 \cdot v_f + 39,635, \quad (4.1)$$

$$F_y = -0,2593 \cdot v_f + 84,409, \quad (4.2)$$

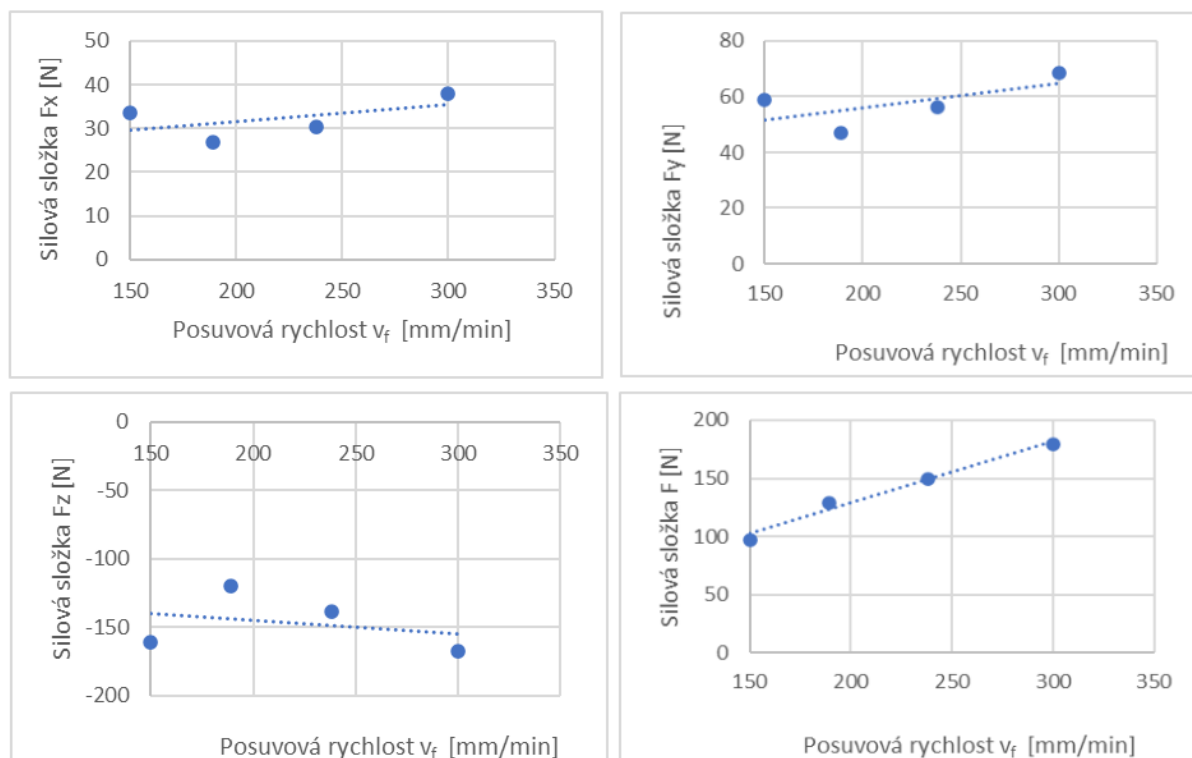
$$F_z = 0,5791 \cdot v_f - 190,15, \quad (4.3)$$

$$F = -0,6464 \cdot v_f + 212,07. \quad (4.4)$$

Ze statistik byly vybrány maximální silové složky z měření v čase pro první od 11 do 13 sekund, pro druhé též od 11 do 13 sekund, pro třetí od 9 až 11 sekund a pro čtvrté od 7,5 do 9 sekund, jelikož než se drážka udělá, tak je nástroj v záběru konstantně. Opět platí pro sílu  $F_z$  výjimka, že se vybraly maximální záporné síly. Tyto maximální síly souvisí s největším průřezem třísky.

Tab. 17 Maximální hodnoty silových složek lineárního drážkování pro určitou posuvovou rychlost.

| $v_f$ [mm/min] | $F_x$ [N] | $F_y$ [N] | $F_z$ [N] | $F$ [N]  |
|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 150            | 33,6609   | 58,9294   | -161,407  | 97,42716 |
| 189            | 26,8707   | 47,1802   | -119,72   | 129,0743 |
| 238            | 30,4871   | 56,2439   | -138,672  | 149,9541 |
| 300            | 38,1012   | 68,6035   | -167,572  | 179,5663 |



Obr. 70 Závislost maximálních hodnot složek: a)  $F_x$ , b)  $F_y$ , c)  $F_z$ , d)  $F$  na posuvové rychlosti  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min pro lineární drážkování.

Na základě závislostí posuvové rychlosti  $v_f$  na maximálních hodnotách silových složek lze interpretovat programování lineárního drážkování se vstupním parametrem  $v_f$  v intervalu od 150 do 300 mm/min rovnicemi:

$$F_x = 0,0401 \cdot v_f + 23,49, \quad (4.5)$$

$$F_y = 0,0863 \cdot v_f + 38,812, \quad (4.6)$$

$$F_z = -0,1059 \cdot v_f - 123,62, \quad (4.7)$$

$$F = 0,5293 \cdot v_f + 22,952. \quad (4.8)$$

Tab. 18 Srovnání středních hodnot silových složek: a) trochoidní, b) lineární frézování.

a)

| $v_f$ [mm/min] | $F_x$ [N] | $F_y$ [N] | $F_z$ [N] | $F$ [N]  |
|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 150            | 7,226174  | 16,44984  | -25,0987  | 35,47882 |
| 189            | 6,921519  | 22,22902  | -45,8865  | 55,17524 |
| 238            | 10,55137  | 29,18038  | -61,5206  | 72,67656 |
| 300            | 10,10799  | 31,03987  | -64,7018  | 77,97449 |

b)

| $v_f$ [mm/min] | $F_x$ [N] | $F_y$ [N] | $F_z$ [N] | $F$ [N]  |
|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 150            | 24,01376  | 51,64081  | -119,528  | 132,6905 |
| 189            | 13,30704  | 28,88496  | -64,128   | 71,85097 |
| 238            | 8,631888  | 19,51029  | -42,6991  | 48,02858 |
| 300            | 4,341792  | 10,16742  | -26,374   | 28,83246 |

Ze srovnání středních hodnot silových složek lze vyvodit, že jsou síly při posuvové rychlosti 150 a 189 mm/min mnohem menší u trochoidního než u lineárního frézování.

Tab. 19 Srovnání maximálních hodnot silových složek: a) trochoidní, b) lineární frézování.

a)

| $v_f$ [mm/min] | $F_x$ [N] | $F_y$ [N] | $F_z$ [N] | $F$ [N]  |
|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 150            | 35,8124   | 39,6118   | -94,6655  | 100,9886 |
| 189            | 43,0908   | 47,4701   | -118,561  | 127,2888 |
| 238            | 53,1311   | 56,8237   | -138,306  | 149,8369 |
| 300            | 63,5223   | 69,7021   | -168,182  | 183,3833 |

b)

| $V_f$ [mm/min] | $F_x$ [N] | $F_y$ [N] | $F_z$ [N] | $F$ [N]  |
|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 150            | 33,6609   | 58,9294   | -161,407  | 97,42716 |
| 189            | 26,8707   | 47,1802   | -119,72   | 129,0743 |
| 238            | 30,4871   | 56,2439   | -138,672  | 149,9541 |
| 300            | 38,1012   | 68,6035   | -167,572  | 179,5663 |

Ze srovnání maximálních hodnot silových složek lze vyvodit, že při nejmenší posuvové rychlosti dochází u trochoidního obrábění k menší síle  $F_z$ , tedy k menšímu nazdvihování obrobku. Jinak jsou maximální hodnoty sil téměř stejné až na rozdíl jednotek N, nutno však podotknout, že do vyhodnocení středních i maximálních hodnot sil u trochoidního frézování není zahrnut *mrtvý čas*.

#### 4.4 Srovnání kvality opracovaných ploch

Kvalita opracování ploch se měřila stejným přístrojem za stejných podmínek jako u trochoidního frézování.

Parametry z pozorování jsou na následujících obrázcích, kde je závislost délky cesty měření  $l$  v jednotkách mm na ose x na členitosti povrchu  $z'$  v jednotkách  $\mu\text{m}$  na ose y:

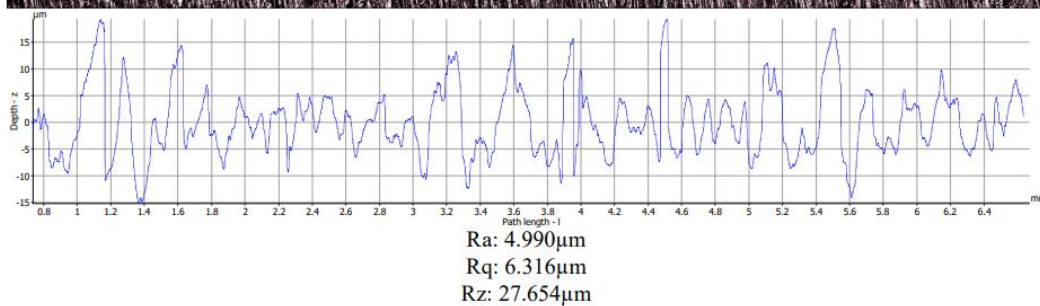
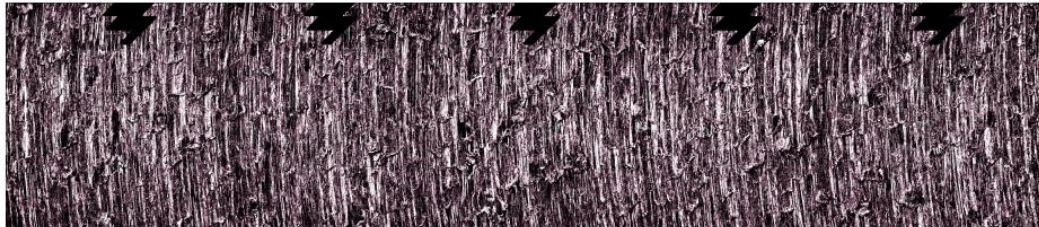
Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

# Measurement Report

## Profile Measurement

LIN1



Filter: high pass - roughness profile  
Lc:= 800.000µm

Obr. 71 Naměřená drsnost profilu prvního lineárního drážkování.

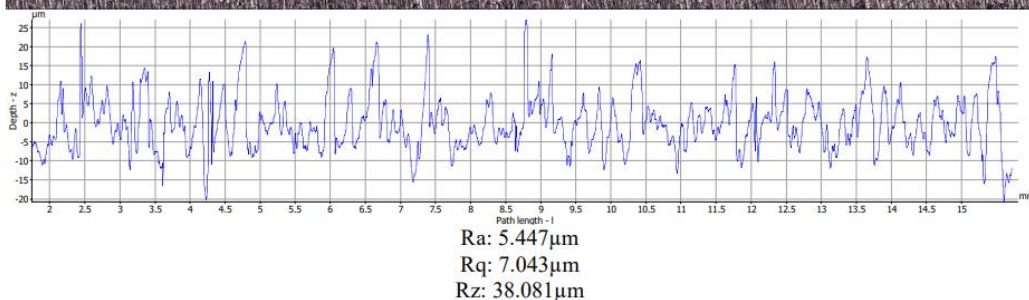
Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

# Measurement Report

## Profile Measurement

LIN2



Filter: high pass - roughness profile  
Lc:= 2.500mm

Obr. 72 Naměřená drsnost profilu druhého lineárního drážkování.

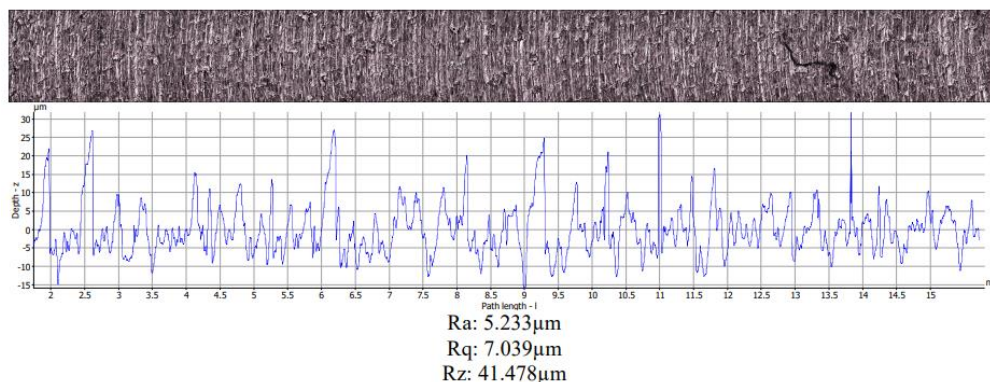
Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

## Measurement Report

### Profile Measurement

LIN3



Filter: high pass - roughness profile  
Lc:= 2.500mm

Obr. 73 Naměřená drsnost profilu třetího lineárního drážkování.

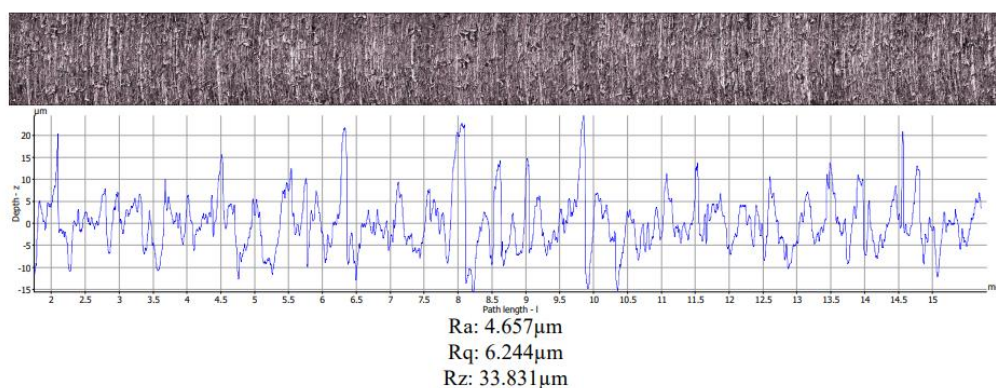
Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

## Measurement Report

### Profile Measurement

LIN4



Filter: high pass - roughness profile  
Lc:= 2.500mm

Obr. 74 Naměřená drsnost profilu čtvrtého lineárního drážkování.

Hodnota Ra je nejmenší u čtvrtého drážkování a poté následuje je o něco větší u prvního drážkování, což je jinak než u trochoidního drážkování.

Hodnota Rq je nejmenší u čtvrtého drážkování a až pak je první drážkování, což ukazuje, že u první drážky jsou více výstupky a prohlubně. U drážky vyrobené trochoidním způsobem je právě třetí drážka s nejmenšími hodnotami Ra i Rq.

Hodnota Rz je nejmenší u prvního drážkování, což značí, že nejmenší výška profilu je u nejmenší posuvové rychlosti. Tento fakt se shoduje s trochoidním frézováním, kde byl tento jev způsobený deformací nástroje rozebrán.

Celkově se u lineárního frézování jedná o rozdíl jednoho  $\mu\text{m}$  mezi první s poslední drážkou a druhou a třetí. Jediný výrazný rozdíl je v hodnotách Rz, které jsou ovlivněny deformací nástroje a vibracemi.

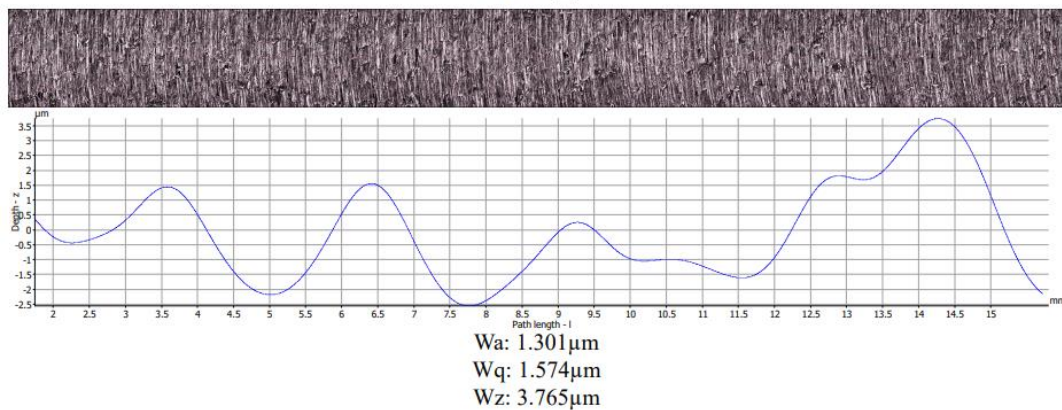
V dalším měření se porovnával profil vlnitosti jednotlivých obrobených ploch.

Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

## Measurement Report Profile Measurement

LIN1\_1



Filter: low pass - waviness profile  
Lc:= 2.500mm

Obr. 75 Naměřená vlnitost prvního lineárního drážkování.

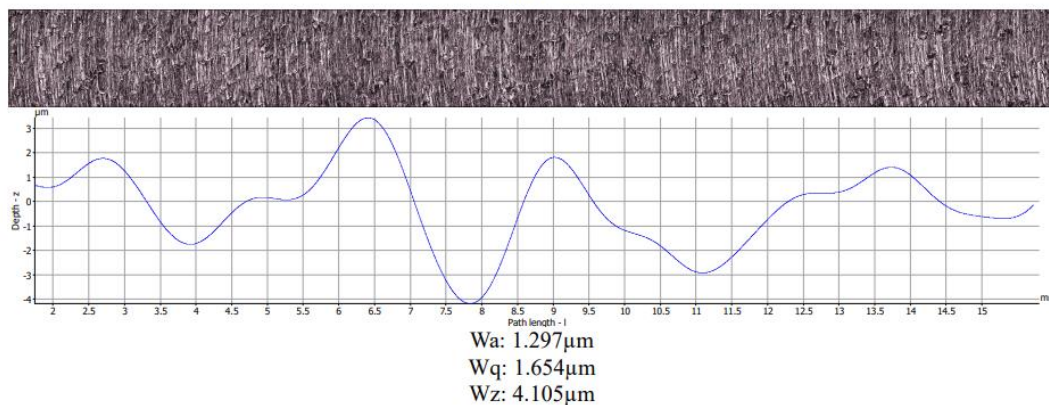
Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

**alicon**a

## Measurement Report

### Profile Measurement

LIN2



Filter: low pass - waviness profile  
Lc:= 2.500mm

Obr. 76 Naměřená vlnitost druhého lineárního drážkování.

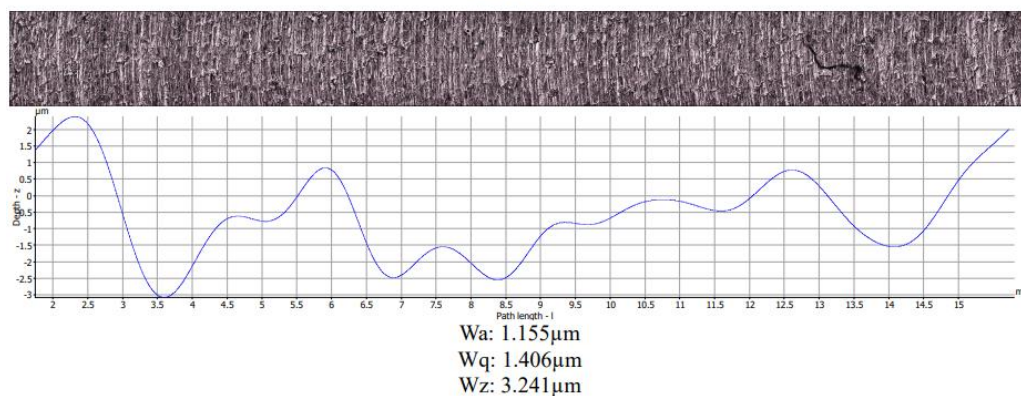
Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

**alicon**a

## Measurement Report

### Profile Measurement

LIN3



Filter: low pass - waviness profile  
Lc:= 2.500mm

Obr. 77 Naměřená vlnitost třetího lineárního drážkování.

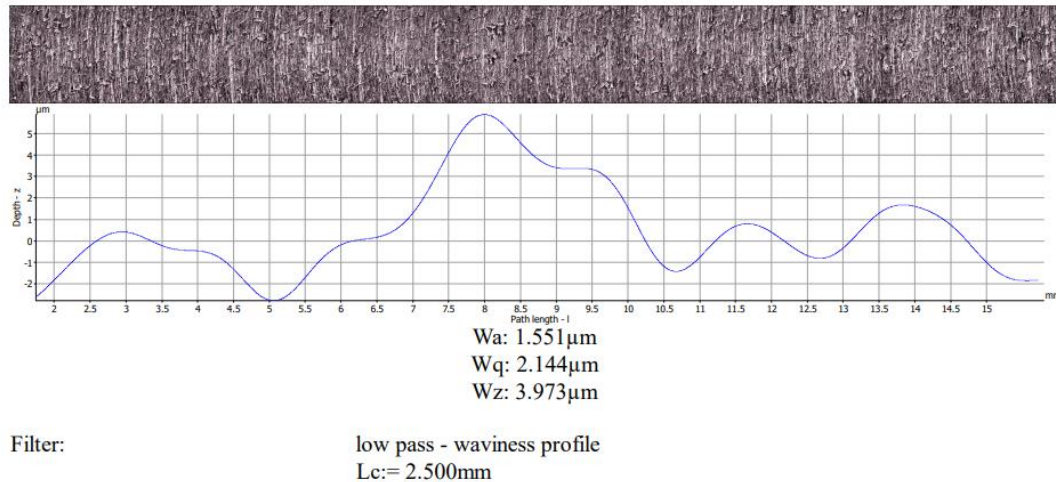
Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

aliconona

## Measurement Report

### Profile Measurement

LIN4

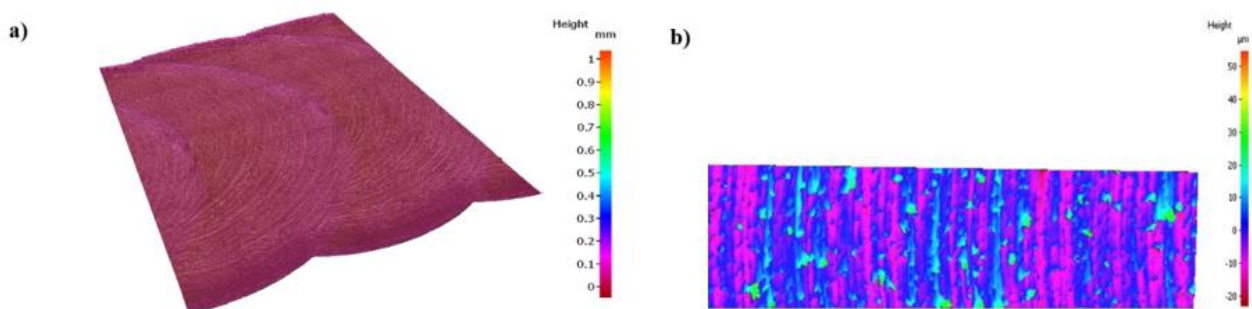


Obr. 78 Naměřená vlnitost čtvrtého lineárního drážkování.

Z grafů popisující vlnitost je po srovnání s trochoidním frézováním viditelné, že u lineárního je vlnitost mnohem nižší. Jednotlivé parametry mají podobné hodnoty. To je dáno konstantní deformací nástroje v opačném směru posuvu, díky čemu nevznikají vrypy do dna drážek.

Wa má nejmenší druhá obrobená plocha, Wq třetí obrobená plocha a Wz opět třetí obrobená plocha.

Srovnání kvality opracování frézovaných ploch je zobrazené na obr. 79, kde se jedná o čtvrté drážky z obou typu procesů, tzn. s posuvovou rychlostí 300 mm/min. Lze říct, že drážka vytvořená lineárním frézováním vykazuje mnohem menší rozptyl drsnosti povrchu, díky čemuž je automaticky vyhodnocené měřítko přístrojem Alicona v  $\mu\text{m}$ . Zatímco u trochoidního bylo měřítko automaticky vyhodnoceno v mm, jelikož rozptyl drsnosti povrchu je výrazně větší.



Obr. 79 Srovnání kvality opracovaných ploch čtvrté drážky vytvořené a) trochoidním b) lineárním způsobem.

## 4.5 Doporučení pro praxi

V rámci doporučení pro praxi je nutné se zamyslet nad více faktory trochoidního frézování v závislosti na výsledcích z experimentální části. Je nutné zvolit vstupní parametry tak, aby byl získán co nejoptimálnější proces výroby. Praktická část této diplomové práce je však zaměřena pouze na jeden vstupní parametr, kterým je posuvová rychlost. Lze vybrat nejlepší možnost programu pro drážku v závislosti na posuvové rychlosti. Co se týká maximálního průřezu třísky, kdy je i největšího úběru materiálu je to posuvová rychlost největší a to 300 mm/min. Co se týká silového zatížení, tak jsou střední i maximální hodnoty celkového silového zatížení nejmenší při rychlosti 150 mm/min. Tedy zde bude docházet k menšímu zatěžování a opotřebením nástroje a k menším vibracím. V závislosti na kvalitě opracované plochy nejnižší hodnoty  $R_a$  i  $R_z$  vykazovala třetí drážka, tedy posuvová rychlost 238 mm/min. Z hlediska technicko-ekonomického zhodnocení, které je na následující straně plyne, že rozdíl doby obrábění na jeden kus činí 0,22 min mezi použitou nejnižší a nejvyšší posuvovou rychlostí. Rozdíl počtu vyrobených drážek za klasickou 7,5hodinovou směnu je 635 kusů. Rozdíl mezi osobními náklady na jeden kus drážky je mezi nejnižší a největší posuvovou rychlostí 1,1 Kč. Rozdíl mezi náklady na stroj na jeden kus drážky je mezi nejnižší a největší posuvovou rychlostí 7,3 Kč a rozdíl na celkové náklady je ve výši 7,3 Kč/ks. Dle důležitosti výstupních faktorů lze zvážit nastavení posuvové rychlosti.

Ze srovnání s lineárním frézováním lze vyhodnotit jako závěry výhody a nevýhody použití trochoidního frézování. Maximální průřez třísky je u obou způsobů stejný, tedy nejefektivnější úběr materiálu bude při největší posuvové rychlosti - 300 mm/min. Střední složky silového zatížení jsou u trochoidního frézování při posuvových rychlostech 150 a 189 mm/min výrazně menší než u lineárního frézování. Načež tyto menší hodnoty omezují vznik vibrací nástroje a také omezují namáhání nástroje. Z hlediska produktivity je nejlepší vybrat posuvovou rychlost 189 mm/min, která má jak malé hodnoty středního silového zatížení, tak má i větší úběr materiálu. Maximální hodnoty silového zatížení jsou naopak menší u lineárního frézování. Velkou výhodou trochoidního frézování je, že při procesu vzniká tzv. „mrtvý čas“, při kterém nástroj není v záběru. Nástroj netlačí na obrobek a nepřehřívá se. Díky tomuto vzniká místo a čas pro odvod třísek, ochlazování a také se omezuje opotřebením nástroje. Kvalita povrchu je výrazně horší u trochoidního frézování, zde by se pro trochoidní frézování museli zvolit jiné řezné podmínky, specifické pro tento typ frézování. Za účelem srovnání byly řezné podmínky nastavené stejné pro oba typy frézování, přičemž jsou více použitelné u lineárního frézování, zejména co se týče výstupní kvality opracované plochy. Z technicko-ekonomického zhodnocení plyne, že je výhodnější lineární obrábění, ale to je způsobeno zejména kratší dobou lineárního obrábění drážek kvůli zpětnému chodu u trochoidního obrábění. Trochoidní obrábění by mohlo být výhodné v praxi, ale musely by se provést další experimenty, z kterých by se vyhodnotily výhodnější vstupní řezné podmínky.

## 5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Produktivitu a jednoduchost výroby požadují ve všech firmách. V tomto případě je nutno podotknout, že při správném zvolení vstupních parametrů, může trochoidní způsob výroby vykazovat velkou produktivitu výroby. Jednoduchost programování již není takový problém, jelikož se dá naprogramovat jak ručně, tak je i součástí programů na CNC stroji.

Názorným ukazatelem pro ekonomické výpočty je také čas obrábění, který je potřeba na vyrobení daného výrobku. Menší doba obrábění značí vyšší počet kusů vyrobených za jednotku času, čímž se zvýší produktivita a sníží výrobní náklady na jeden kus, co se týče rozpočítání hodinových fixních sazeb na stroje nebo mzdy pracovníků.

Výpočet doby obrábění se počítá [43]:

$$t_{AS} = \frac{l_m}{v_f}. \quad (5.1)$$

Nebo se také dají odečíst jako doby obrábění jednoho kusu drážky od doby, kdy byl nástroj v záběru z průběhu měření experimentu pro čtyři typy drážkování:

$$t_{AS} = t_{ASK} - t_{ASP}, \quad (5.2)$$

kde je  $t_{ASK}$  konečný bod doby obrábění a  $t_{ASP}$  počáteční bod doby obrábění. Po dosazení doba obrábění na drážku:

$$t_{AS1} = \frac{39,61 - 8,53}{60} = \frac{31,08}{60} = 0,52, \quad (5.3)$$

$$t_{AS2} = \frac{33,04 - 3,79}{60} = \frac{29,25}{60} = 0,49, \quad (5.4)$$

$$t_{AS3} = \frac{25,96 - 2,9}{60} = \frac{23,06}{60} = 0,38, \quad (5.5)$$

$$t_{AS4} = \frac{20,04 - 1,45}{60} = \frac{18,59}{60} = 0,3. \quad (5.6)$$

Výpočty dokazují, že čím je posuvová rychlost vyšší, tím je menší doba obrábění a náklady na jeden kus výroby. Po srovnání nejvyšší a nejnižší posuvové rychlosti lze specifikovat rozdíl ve výši doby obrábění v relaci 0,22 min/ks. Podle doby obrábění a maximálního průřezu třísky vychází ekonomicky nejvýhodněji posuvová rychlost 300 mm/min.

Počet vyrobených drážek za klasickou 7,5hodinovou směnu pro čtyři typy trochoidních drážek:

$$A_1 = \frac{7,5 \cdot 60}{t_{AS1}} = \frac{7,5 \cdot 60}{0,52} = 865,4 \doteq 865, \quad (5.7)$$

$$A_2 = \frac{7,5 \cdot 60}{t_{AS2}} = \frac{7,5 \cdot 60}{0,49} = 918,4 \doteq 918, \quad (5.8)$$

$$A_3 = \frac{7,5 \cdot 60}{t_{AS3}} = \frac{7,5 \cdot 60}{0,38} = 1184,2 \doteq 1184, \quad (5.9)$$

$$A_4 = \frac{7,5 \cdot 60}{t_{AS4}} = \frac{7,5 \cdot 60}{0,3} = 1500. \quad (5.10)$$

Při předpokládaných osobních hodinových nákladech (přímé mzdové náklady a sociální a zdravotní pojištění) 300 Kč na obsluhu stroje jsou pro jednotlivé posuvové rychlosti přímé osobní náklady na jeden kus:

$$N_{P1} = \frac{7,5 \cdot 300}{A_1} = \frac{7,5 \cdot 300}{865} = 2,6, \quad (5.11)$$

$$N_{P2} = \frac{7,5 \cdot 300}{A_2} = \frac{7,5 \cdot 300}{918} = 2,45, \quad (5.12)$$

$$N_{P3} = \frac{7,5 \cdot 300}{A_3} = \frac{7,5 \cdot 300}{1184} = 1,9, \quad (5.13)$$

$$N_{P4} = \frac{7,5 \cdot 300}{A_4} = \frac{7,5 \cdot 300}{1500} = 1,5. \quad (5.14)$$

Po srovnání nejvyšší a nejnižší posuvové rychlosti lze specifikovat rozdíl ve výši osobních nákladů v relaci 1,1 Kč/ks.

Při předpokládaných nákladech na stroj 2000 Kč/h jsou pro jednotlivé posuvové rychlosti náklady na stroj:

$$N_{S1} = \frac{7,5 \cdot 2000}{A_1} = \frac{7,5 \cdot 2000}{865} = 17,3, \quad (5.15)$$

$$N_{S2} = \frac{7,5 \cdot 2000}{A_2} = \frac{7,5 \cdot 2000}{918} = 16,3, \quad (5.16)$$

$$N_{S3} = \frac{7,5 \cdot 2000}{A_3} = \frac{7,5 \cdot 2000}{1184} = 12,7 \quad (5.17)$$

$$N_{S4} = \frac{7,5 \cdot 2000}{A_4} = \frac{7,5 \cdot 2000}{1500} = 10. \quad (5.18)$$

Po srovnání nejvyšší a nejnižší posuvové rychlosti lze specifikovat rozdíl ve výši 7,3 Kč/ks.

Veškeré další položky nákladů na výrobu jednoho kusu jsou uvažovány pro tento modelový příklad ve stejné výši na jeden kus. Zejména spotřeba energie, kdy kWh stojí 7 Kč. Z technických dat stroje MCV 1210, které jsou v přílohách, jsou maximální otáčky vřetene  $15\,000\text{ min}^{-1}$ , čemuž odpovídá maximální výkon 31 kW. Tedy ke zvoleným otáčkám vřetene v experimentu  $700\text{ min}^{-1}$  na základě přímé úměry odpovídá provozní výkon vřetena:

$$P = \frac{700}{15000} \cdot 31 = 1,45. \quad (5.19)$$

Provozní náklady na spotřebu energie na 7,5hodinovou směnu budou:

$$N_{PE} = 1,45 \cdot 7 \cdot 7,5 = 76. \quad (5.20)$$

Celkové náklady na jednu drážku při jednotlivých posuvových rychlostech budou:

$$N_{C1} = \frac{N_{PE}}{A_1} + N_{P1} + N_{S1} = \frac{76}{865} + 2,6 + 17,3 = 19,99, \quad (5.21)$$

$$N_{C2} = \frac{N_{PE}}{A_2} + N_{P2} + N_{S2} = \frac{76}{918} + 2,45 + 16,3 = 18,83, \quad (5.22)$$

$$N_{C3} = \frac{N_{PE}}{A_3} + N_{P3} + N_{S3} = \frac{76}{1184} + 1,9 + 12,7 = 14,66, \quad (5.23)$$

$$N_{C4} = \frac{N_{PE}}{A_4} + N_{P4} + N_{S4} = \frac{76}{1500} + 1,5 + 10 = 11,55. \quad (5.24)$$

Po srovnání nejvyšší a nejnižší posuvové rychlosti lze specifikovat rozdíl ve výši 8,44 Kč/ks  
Pro srovnání se provedlo stejné technicko-ekonomické zhodnocení pro lineární frézování:

$$t_{ASL1} = \frac{22,06 - 3,6}{60} = 0,31, \quad (5.25)$$

$$t_{ASL2} = \frac{16,69 - 3,08}{60} = 0,23, \quad (5.26)$$

$$t_{ASL3} = \frac{12,77 - 1,9}{60} = 0,18, \quad (5.27)$$

$$t_{ASL4} = \frac{10,02 - 1,28}{60} = 0,14. \quad (5.28)$$

$$A_{L1} = \frac{7,5 \cdot 60}{t_{ASL1}} = \frac{7,5 \cdot 60}{0,31} = 1451,6 \doteq 1451, \quad (5.29)$$

$$A_{L2} = \frac{7,5 \cdot 60}{t_{ASL2}} = \frac{7,5 \cdot 60}{0,23} = 1956,5 \doteq 1956, \quad (5.30)$$

$$A_{L3} = \frac{7,5 \cdot 60}{t_{ASL3}} = \frac{7,5 \cdot 60}{0,18} = 2500, \quad (5.31)$$

$$A_{L4} = \frac{7,5 \cdot 60}{t_{ASL4}} = \frac{7,5 \cdot 60}{0,14} = 3214,3 \doteq 3214. \quad (5.32)$$

$$N_{PL1} = \frac{7,5 \cdot 300}{A_{L1}} = \frac{7,5 \cdot 300}{1451} = 1,55, \quad (5.33)$$

$$N_{PL2} = \frac{7,5 \cdot 300}{A_{L2}} = \frac{7,5 \cdot 300}{1956} = 1,15, \quad (5.34)$$

$$N_{PL3} = \frac{7,5 \cdot 300}{A_{L3}} = \frac{7,5 \cdot 300}{2500} = 0,9, \quad (5.35)$$

$$N_{PL4} = \frac{7,5 \cdot 300}{A_{L4}} = \frac{7,5 \cdot 300}{3214} = 0,7, \quad (5.36)$$

$$N_{SL1} = \frac{7,5 \cdot 2000}{A_1} = \frac{7,5 \cdot 2000}{1451} = 10,3, \quad (5.37)$$

$$N_{SL2} = \frac{7,5 \cdot 2000}{A_2} = \frac{7,5 \cdot 2000}{1956} = 7,7, \quad (5.38)$$

$$N_{SL3} = \frac{7,5 \cdot 2000}{A_3} = \frac{7,5 \cdot 2000}{2500} = 6, \quad (5.39)$$

$$N_{SL4} = \frac{7,5 \cdot 2000}{A_4} = \frac{7,5 \cdot 2000}{3214} = 4,7, \quad (5.40)$$

$$N_{CL1} = \frac{N_{PE}}{A_{L1}} + N_{PL1} + N_{SL1} = \frac{76}{1451} + 1,55 + 10,3 = 11,9 \quad (5.41)$$

$$N_{CL2} = \frac{N_{PE}}{A_{L2}} + N_{PL2} + N_{SL2} = \frac{76}{1956} + 1,15 + 7,7 = 8,9, \quad (5.42)$$

$$N_{CL3} = \frac{N_{PE}}{A_{L3}} + N_{PL3} + N_{SL3} = \frac{76}{2500} + 0,9 + 6 = 6,95, \quad (5.43)$$

$$N_{CL4} = \frac{N_{PE}}{A_{L4}} + N_{PL4} + N_{SL4} = \frac{76}{3214} + 0,7 + 4,7 = 5,45. \quad (5.44)$$

Po srovnání trochoidního vs lineárního frézování jsou ukázány rozdíly na nejvyšší posuvové rychlosti 300 mm/min:

- rozdíl doby obrábění je 0,16 min na jednu drážku, přičemž nižší je u lineárního,
- rozdíl osobních nákladů za směnu je v relaci 0,8 Kč na jednu drážku, přičemž nižší jsou u lineárního,
- rozdíl nákladů na stroj za směnu je v relaci 5,3 Kč na jednu drážku, přičemž nižší jsou u lineárního,
- rozdíl celkových nákladů je 6.1 Kč na jednu drážku, přičemž nižší jsou u lineárního.

Z výsledků je samozřejmé, že doba obrábění u lineárního bude radikálně kratší, jelikož u trochoidního obrábění se zde započítává i zpětný chod. S tím souvisí, že při zvolených podmínkách bude lineární obrábění ekonomicky výhodnější. Je nutno podotknout, že řezné podmínky byly zvoleny pro oba typy frézování stejné záměrně, aby se daly porovnat.

V případě trochoidního frézování by se mohly volit jiné řezné podmínky, například vyšší otáčky vřetene, čímž by se ukázaly výhody trochoidního obrábění. Trochoidní frézování nabízí spousta výhod – jako například obrábění drážek různých šířek jedním nástrojem, jelikož lze použít nástroj s menším průměrem, než je šířka drážky, s čímž by souvisely nižší náklady na nástroje.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo prozkoumat trochoidní frézování při tvorbě drážky. Zejména se zabývat posuvovou rychlostí jako vstupním parametrem a jejím působením na proces obrábění. I přes to, že trochoidní frézování nabízí spousta výhod, také přináší spousta faktů k pozorování. Byly provedeny dva experimenty, první s použitím trochoidních interpolací a druhý jako konvenční lineární frézování. Tyto experimenty byly porovnány a předběžně prozkoumány i se svými charakteristickými rysy, a hlavně s jednotlivými posuvovými rychlostmi. Z každého měření byly vyhodnoceny závěry, jak posuvová rychlost jako vstupní parametr ovlivňuje průřez třísky, silové zatížení a kvalitu povrchu, což jsou jednotlivé výstupní parametry. Největšího průřezu třísky se dosáhne posuvovou rychlostí 300 mm/min, nejmenšího silového zatížení 150 mm/min a nejlepší kvality 238 mm/min v případě trochoidního frézování. Při maximální hloubce řezu dochází k maximálnímu průřezu třísky, který byl při maximálním silovém zatížení a největší posuvové rychlosti 300 mm/min.

Hlavní výhodou trochoidního frézování zůstává fakt, že v průběhu obrábění je v kontaktu menší úhel záběru nástroje. Díky tomu je možné frézovat drážky s větší axiální hloubkou. Radiální hloubka řezu může být volena menší, dáno menším krokem trochoidy, jelikož je možné volit větší axiální hloubku řezu. Výsledný úběr materiálu na plochu třísky je tak stejný, nebo větší v porovnání s lineárním obráběním. V kombinaci s druhou výhodou trochoidního frézování, kterou je ochlazování nástroje v intervalu *mrtvého času*, je tento typ frézování při optimalizaci řezných podmínek výhodnější jak z hlediska řezného času, tak z hlediska opotřebení nástroje. S menším krokem trochoidy a vyšší řeznou rychlostí lze očekávat výrazné zlepšení kvality povrchu. Lze však použít kombinace rychlého trochoidního obrábění s velkým krokem trochoidy a špatnou kvalitou povrchu, na kterou bude navazovat operace dokončování. Tato kombinace může být stále rychlejší než konvenční lineární obrábění. Ochlazování nástroje v intervalu *mrtvého času* vede při vysokých řezných podmínkách k zachování mechanických vlastností nástroje. Kdy naopak při přehřátí nástroje v případě lineárního frézování může vést až k jeho poškození vlivem snížení jeho tuhosti, čímž dojde k větším deformacím a vibracím, až nakonec dojde k lomu nástroje.

Menší silové zatížení značí menší vibrace nástroje. Ze silového zatížení byl dokázán fakt, že u trochoidního obrábění dochází ke vzniku tzv. „*mrtvého času*“. V tomto čase nástroj není v záběru a neobrobí se obrobek, tudíž dochází k ochlazování nástroje. Tedy zde dochází k omezení opotřebení nástroje a také k vytvoření většího místa a času pro odvod třísek. U lineárního drážkování jsou pasivní síly po celou dobu procesu záporné, tedy nazdvihují obrobek po celou dobu, ale se zvyšováním posuvové rychlosti střední hodnoty těchto sil klesají. Tomu se tak děje z důvodu větší deformace nástroje, díky čemuž obvod nástroje tlačí větší silou do dna drážky a nadzdvihování obrobku kompenzuje. Kvalita povrchu se tímto zhoršuje. Zatímco u trochoidního frézování jsou hodnoty pasivní síly jak v záporných, tak kladných hodnotách v době, kdy je deformace nástroje podstatnější než nadzvedávání obrobku procesem oddělování třísek pod úhlem břitu nástroje. Celkové střední hodnoty sil jsou v případě trochoidního frézování se zvyšující se hodnotou posuvové rychlosti větší než u lineárního způsobu obrábění. To je dáno faktem, že byly zvoleny řezné parametry, především řezná rychlost a otáčky, odpovídající spíše lineárnímu obrábění. Tyto řezné parametry byly takto zvoleny, aby bylo možné provést oba typy frézování za stejných podmínek. Řezná rychlost a otáčky u trochoidního frézování dosahují v praxi výrazně vyšších hodnot, se kterými by však nebylo možné provést lineární frézování s dostupnými řeznými nástroji pro tuto diplomovou práci.

Z výsledku experimentu lze vyvodit, že kvalita opracování ploch nezáleží jen na posuvové rychlosti, ale také na ostatních parametrech jako například na vzdálenosti jednotlivých trochoid. Když se zvýší posuvová rychlost, tak nástroj najede do záběru rychleji. Kvůli tomu je nástroj okamžitě namáhán a jeho profil je změněn, čímž je drsnost povrchu okamžitě zhoršena během

procesu frézování. Proces deformace nástroje je patrný z výsledku zaznamenané síly v ose z, kdy je axiální síla nejprve kladná, tedy nástroj tlačí čelem do obrobku. Díky tomu vznikají na vodorovném povrchu drážky obloukové rýhy v místě, kde se nachází trajektorie obvodového kraje nástroje. Později se axiální síly nachází v záporných hodnotách, což je dáno oddělováním třísek pod úlem břitu nástroje. Díky tomu dochází k nadzvedávání obrobku, nebo v opačném pohledu k tlačení nástroje směrem do obrobku. Tomu by napomáhalo zjemnit krok trochoidy na kratší a zvýšit řeznou rychlost a otáčky nástroje.

Každá z metod v závislosti na parametrech má své výhody i nevýhody, nicméně byly navrženy jistá doporučení pro praxi, které se dají praktikovat podle relevantnosti výstupních faktorů. Také bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, které se vztahuje pouze na posuvovou rychlost jako ovlivňující faktor. Vzhledem k obsáhlosti zkoušek je téma vhodné k dalšímu měření a pozorování.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. RAUCH, Matthieu, Emmanuel DUC a Jean-Yves HASCOET. Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2009, **49**(5), 375-383 [cit. 2022-03-12]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2008.12.006
2. VOS DE, Patrik. *Příručka pro technology – Dynamické frézování – využití kompenzačního přístupu*. MM Průmyslové spektrum. 2013, 82.
3. PÍŠKA, Miroslav, Petra SLIWKOVÁ, Aleš POLZER a Ladislav KOLÁŘ. *Trochoidní frézování*. Brno: Intemac Solutions, s.r.o., Kuřim, 2014.
4. HORVÁTH, Evžen. Problematika obrábění titanových leteckých dílů. *MM Průmyslové spektrum – nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah* [online]. 15.5.2012 [cit.2022-26-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-obrabeni-titanovych-leteckych-dilu>
5. WU, Baohai, Chengyu ZHENG, Ming LUO a Xiaodong HE. *Investigation of trochoidal milling nickel-based superalloy*. *Materials Science Forum* [online]. 2012, 723, 332-336 [cit. 2022-03-05]. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.723.332
6. KAKÁČ, Martin. *Technologie frézování na CNC obráběcím centru metodou VoluMill* [online]. Brno, 2016 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/59538>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.
7. VAŠÍČEK, Jiří. *Silové zatížení řezných nástrojů při frézování* [online]. Brno, 2014 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33313>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.
8. Přednáška 9- Frézování. *SlideToDoc.com-one of the largest repository of presentations* [online]. [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://slidetodoc.com/pednka-9-frzovn-druhy-frzovn-sousledn-a-nesousledn/>
9. ZÁVESKÝ, Zbyněk. *Návrh nové technologie výroby vybrané součásti* [online]. Brno, 2016 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/59544>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.
10. POLLOCK, Luke. How Dynamic Milling Produces Superior Results. *SME* [online]. 2019 [cit.2022-26-10]. Dostupné z: <https://www.sme.org/technologies/articles/2019/november/how-dynamic-milling-produces-superior-results/>
11. Výpočty řezných podmínek a posuvů = vzorečky. *MIKON Tools s.r.o. - služby v oblasti strojírenství* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.mikon-tools.cz/vypocety-reznach-podminek-a-posuvu-vzorecky/>
12. SÁDLO, Dominik. *Zefektivnění technologie výroby zadaného pouzdra pastorku* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/82455>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické

- v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.
13. Frézka vertikální a horizontální. *SlidePlayer – Nahrávejte a Sdílejte své PowerPoint prezentace* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/15161890/>
  14. POLLOCK, Luke. How Dynamic Milling Works. *Practical Machinist* [online]. 2019 [cit. 2022-23-10]. Dostupné z: <https://www.practicalmachinist.com/cutting-tools/how-dynamic-milling-works/>
  15. KOR Series. In: *Kennametal* [online]. [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: [https://www.kennametal.com/in/en/products/metalworking-tools/milling/solid-end-milling/high-performance-solid-carbide-end-mills/kor-series.html?fbclid=IwAR12Mvjp716xKuqGBQ4buEZIgE8atHVxrPbXSFaOT-Oqj9R9\\_pW8VrRyYZY](https://www.kennametal.com/in/en/products/metalworking-tools/milling/solid-end-milling/high-performance-solid-carbide-end-mills/kor-series.html?fbclid=IwAR12Mvjp716xKuqGBQ4buEZIgE8atHVxrPbXSFaOT-Oqj9R9_pW8VrRyYZY)
  16. KURUC, Marcel, Marek VOZAR, Vladimír SIMNA, Tomas VOPAT, Robert HRUSECKY a Jan MILDE. Comparison of High Feed Machining with Conventional Milling in Terms of Dimension Accuracy and Productivity. KATALINIC, Branko, ed. *Proceedings of the 29th International DAAAM Symposium 2018* [online]. DAAAM International Vienna, 2018, 2018, s. 0426-0434 [cit. 2022-03-07]. DAAAM Proceedings. ISBN 9783902734204. Dostupné z: doi:10.2507/29th.daaam.proceedings.063
  17. Frézování metodou tenkých řezů a trochoidální frézování. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2022-26-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/slicing-trochoidal-milling.aspx>
  18. JAIN, Ankit a Vivek BAJPAI. Introduction to high-speed machining (HSM). *High Speed Machining* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 1-25 [cit. 2022-03-07]. ISBN 9780128150207. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-815020-7.00001-1
  19. SZALÓKI, Istvan, Sandor CSESZNOK, Sandor CSUKA a Sandor SIPOS. Can trochoidal milling be ideal? *Conference of GTE on Manufacturing and related technologies* [online]. Manufacturing 2012 The XXI [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/275097789\\_Can\\_trochoidal\\_milling\\_be\\_ideal](https://www.researchgate.net/publication/275097789_Can_trochoidal_milling_be_ideal)
  20. OTKUR, Murat a Ismail LAZOGLU. Trochoidal milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2007, 47(9), 1324-1332 [cit. 2022-02-05]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.08.002
  21. SALEHI, Mehdi, M. BLUM, Björn FATH, Tarik P. AKYOL, Ruediger HAAS a Jivka G OVTCHAROVA. Epicycloidal Versus Trochoidal Milling-Comparison of Cutting Force, Tool Tip Vibration, and Machining Cycle Time. *Procedia CIRP* [online]. 2016, 46, 230-233 [cit. 2022-03-05]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.04.001
  22. IBARAKI, Soichi, Iwao YAMAJI a Atsushi MATSUBARA. On the removal of critical cutting regions by trochoidal grooving. *Precision Engineering* [online]. 2010, 34(3), 467-473 [cit. 2022-03-05]. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2010.01.007
  23. Obrábění titanových dílů. *Techmagazín.cz* [online]. 24.8.2012 [cit.2022-26-02]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/666>

- 
24. SZLAUR, Vít. *Analýza procesů obrábění kovových materiálů se zaměřením na energetické aspekty* [online]. Brno, 2012 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/6670>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Chladil.
  25. BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II*. 2. díl. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
  26. ZHANG, Xing Hong, Fang Yu PENG, Feng QIU, Rong YAN a Bin LI. Prediction of Cutting Force in Trochoidal Milling Based on Radial Depth of Cut. *Advanced Materials Research* [online]. 2014, 852, 457-462 [cit. 2022-03-05]. ISSN 1662-8985. Dostupné z: [doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.852.457](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.852.457)
  27. SANTHAKUMAR, J. a U. Mohammed IQBAL. Parametric Optimization of Trochoidal Step on Surface Roughness and Dish Angle in End Milling of AISID3 Steel Using Precise Measurements. *Materials* [online]. 2019, 12(8) [cit. 2022-03-05]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: [doi:10.3390/ma12081335](https://doi.org/10.3390/ma12081335)
  28. SANTHAKUMAR, J. a U. Mohammed IQBAL. Role of trochoidal machining process parameter and chip morphology studies during end milling of AISI D3 steel. *Journal of Intelligent Manufacturing* [online]. 2021, 32(3), 649-665 [cit. 2022-03-05]. ISSN 0956-5515. Dostupné z: [doi:10.1007/s10845-019-01517-5](https://doi.org/10.1007/s10845-019-01517-5)
  29. PLETA, Abram, Farbod Akhavan NIAKI a Laine MEARS. Investigation of Chip Thickness and Force Modelling of Trochoidal Milling. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, 10, 612-621 [cit. 2022-03-05]. ISSN 23519789. Dostupné z: [doi:10.1016/j.promfg.2017.07.063](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.063)
  30. ELBER, Gershon, Elaine COHEN a Sam DRAKE. MATHSM: medial axis transform toward high speed machining of pockets. *Computer-Aided Design* [online]. 2004, 37(2), 241-250 [cit. 2022-03-02]. ISSN 00104485. Dostupné z: [doi:10.1016/j.cad.2004.05.008](https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.05.008)
  31. TSAI, Mi-Ching, Chungwei CHENG a Mingyang CHENG. A real-time NURBS surface interpolator for precision three-axis CNC machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2003, 43(12), 1217-1227 [cit. 2022-03-05]. ISSN 08906955. Dostupné z: [doi:10.1016/S0890-6955\(03\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00154-8)
  32. Nová monolitní karbidová sedmibřitá fréza CHATTERFREE s děleným ostrím. In: *ISCAR.com* [online]. [cit. 2022-16-02]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/lang/cs/newarticleid/3067>
  33. Jak rozumět tvrdosti kovu. *E-konstrukér Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 19.6.2015 [cit. 2022-26-02]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jak-rozumet-tvrdosti-kovu>
  34. WIECKOVÁ, Kateřina. *Frézování kapes v leteckých slitinách* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/83768>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Petra Ohnišťová.
  35. ČSN 12 050/ 1,1191/ C45. *Konstrukční oceli. JKZ Bučovice* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/konstrukcni-oceli/csn-12-050-11191-c45/>
-

- 
36. Vertikální obráběcí centrum. MCV 1210. *Vývoj, výroba a prodej obráběcích strojů. TAJMAC-ZPS* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: [https://www.tajmac-zps.cz/media/files/product/item/files-20/MCV1210\\_CZ\\_092019.pdf](https://www.tajmac-zps.cz/media/files/product/item/files-20/MCV1210_CZ_092019.pdf)
  37. CNC systémy SINUMERIK. Chytrá řešení pro obráběcí stroje. *Siemens Czech Republic* [online]. [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/cz/cs/products/automation/systems/sinumerik-cnc1.html>
  38. POLZER, Aleš, Ph.D. Akademie CNC obrábění. *Technický týdeník* [online]. 27.10.2009 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-17\\_8552.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-17_8552.html)
  39. Programovací příručka – základy. SINUMERIK. *SIEMENS* [online]. 2010 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/635/28705635/att\\_75725/v1/PG\\_0310\\_cs\\_cs-CZ.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/635/28705635/att_75725/v1/PG_0310_cs_cs-CZ.pdf)
  40. Dimensional accuracy & surface finish measurement. InfiniteFocusG5. Dimensional Metrology & Surface Roughness Measurement. Alicona [online]. [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocus/>
  41. METELKOVÁ, Jitka. Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33003>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Piška.
  42. JÍLKOVÁ, Ingrid. Vliv teploty a podmínek skladování pryžových dílů na výslednou soudržnost spoje. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125390>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Piška.
  43. POLZER, Aleš, Ph.D. Akademie CNC obrábění. *Technický týdeník* [online]. 2.1.2010 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-22\\_8557.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-22_8557.html)
-

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Symboly

| Označení             | Legenda                                         | Jednotka               |
|----------------------|-------------------------------------------------|------------------------|
| A                    | počet vyrobených drážek za směnu                | [ks]                   |
| $A_{Dj}$             | jmenovitý průřez třísky                         | [mm <sup>2</sup> ]     |
| $A_{Dj}$             | maximální průřez třísky                         | [mm <sup>2</sup> ]     |
| $a_e$                | radiální hloubka řezu = šířka záběru nástroje   | [mm]                   |
| $a_p$                | axiální hloubka řezu = šířka řezu               | [mm]                   |
| B                    | šířka obrobku                                   | [mm]                   |
| $b_w$                | šířka drážky                                    | [mm]                   |
| $b_{Di}$             | jmenovitá šířka třísky                          | [mm]                   |
| Co                   | konstanta                                       | [-]                    |
| c                    | krok trochoidy nástroje, velikost přísuvu frézy | [mm]                   |
| d                    | průměrná tloušťka nástroje = průměr nástroje    | [mm]                   |
| F                    | celková síla                                    | [N]                    |
| $F_1, F_2, F_3, F_4$ | posuvové rychlosti v trochoidním programu       | [mm/min]               |
| $F_x, F_y, F_z$      | silové složky v ose x, y, z                     | [N]                    |
| $F'$                 | řezný odpor                                     | [N]                    |
| $F_c$                | řezná síla                                      | [N]                    |
| $F_r$                | radiální řezná síla                             | [N]                    |
| $F_t$                | tangenciální řezná síla                         | [N]                    |
| $F_{rj}$             | radiální jmenovitá řezná síla                   | [N]                    |
| $F_{tj}$             | tangenciální jmenovitá řezná síla               | [N]                    |
| $f_z$                | posuv na zub                                    | [mm]                   |
| H                    | výška obrobku                                   | [mm]                   |
| $h_D$                | tloušťka třísky                                 | [mm]                   |
| $h_{Di}$             | jmenovitá tloušťka třísky                       | [mm]                   |
| $h_m$                | průměrná tloušťka třísky                        | [mm]                   |
| j                    | zub                                             | [-]                    |
| $K_{rc}, K_{re}$     | radiální silové koeficienty                     | [-]                    |
| $K_{tc}, K_{te}$     | tangenciální silové koeficienty                 | [-]                    |
| $k_{ci}$             | měrná řezná síla                                | [N.mm-2]               |
| l                    | délka cesty měření                              | [mm]                   |
| $l_m$                | délka obrábění                                  | [mm]                   |
| M                    | moment                                          | [N.m]                  |
| m                    | hmotnost                                        | [kg]                   |
| mc                   | exponent vlivu tloušťky třísky                  | [-]                    |
| N                    | drážky                                          | [-]                    |
| $N_c$                | celkové náklady na výrobu drážky                | [Kč]                   |
| $N_p$                | přímé osobní náklady                            | [Kč]                   |
| $N_{PE}$             | provozní náklady na spotřebu energie            | [Kč]                   |
| $N_s$                | provozní náklady na stroj                       | [Kč]                   |
| n                    | otáčky vřetene                                  | [min <sup>-1</sup> ]   |
| $n_{ce}$             | počet prvků                                     | [-]                    |
| P                    | výkon                                           | [kW]                   |
| p                    | zubová rozteč                                   | [mm]                   |
| Q                    | objem materiálu za jednotku času                | [cm <sup>3</sup> /min] |
| R                    | poloměr trochoidy = poloměr kruhové otáčky      | [mm]                   |
| r                    | poloměr nástroje (frézy)                        | [mm]                   |

|                  |                                                                                              |                      |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Ra               | drsnost povrchu, průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu                           | [ $\mu\text{m}$ ]    |
| Re               | mez kluzu                                                                                    | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| R <sub>env</sub> | poloměr kružnice získané pohybem nástroje                                                    | [mm]                 |
| Rm               | mez pevnosti v tahu                                                                          | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Rq               | průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu                                            | [ $\mu\text{m}$ ]    |
| Rz               | zbytková nerovnost, největší výška profilu                                                   | [ $\mu\text{m}$ ]    |
| S <sub>s</sub>   | stoupání šroubovice                                                                          | [mm]                 |
| t                | koeficient                                                                                   | [-]                  |
| t <sub>AS</sub>  | doba obrábění                                                                                | [min]                |
| t <sub>ASK</sub> | konečný bod doby obrábění                                                                    | [min]                |
| t <sub>ASP</sub> | počáteční bod doby obrábění                                                                  | [min]                |
| T                | teplota                                                                                      | [°C]                 |
| T <sub>c</sub>   | doba obrábění                                                                                | [min]                |
| U                | parametr                                                                                     | [-]                  |
| v <sub>c</sub>   | řezná rychlost                                                                               | [m/min]              |
| v <sub>f</sub>   | posuvová rychlost                                                                            | [mm/min]             |
| v <sub>n</sub>   | rychlost otáčení vřetena                                                                     | [ot/min]             |
| Z                | axiální výška                                                                                | [mm]                 |
| z                | počet zubů nástroje                                                                          | [-]                  |
| z <sub>z</sub>   | počet zubů v záběru                                                                          | [-]                  |
| z'               | členitost povrchu                                                                            | [ $\mu\text{m}$ ]    |
| Δy               | kolmá vzdálenost od osy trochoidy k průsečíku předchozí a následující krajní polohy nástroje | [mm]                 |
| X                | souřadnice v x-ovém směru                                                                    | [mm]                 |
| X <sub>epi</sub> | poloha středu nástroje epicykloidy v souřadnicovém systému XY                                | [mm]                 |
| xc               | poloha středu nástroje při trochoidním frézování v souřadnicovém systému XY                  | [mm]                 |
| XV               | poloha středu frézy v trochoidní interpolaci                                                 | [MM]                 |
| Y                | souřadnice v y-ovém směru                                                                    | [mm]                 |
| Y <sub>epi</sub> | poloha středu nástroje epicykloidy v souřadnicovém systému XY                                | [mm]                 |
| yc               | poloha středu nástroje při trochoidním frézování v souřadnicovém systému XY                  | [mm]                 |
| YV               | poloha středu frézy v trochoidní interpolaci                                                 | [MM]                 |
| Wa               | průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti                                               | [ $\mu\text{m}$ ]    |
| Wq               | průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti                                               | [ $\mu\text{m}$ ]    |
| Wz               | největší výška profilu vlnitosti                                                             | [ $\mu\text{m}$ ]    |
| β                | úhel šroubovice                                                                              | [°]                  |
| Δ                | úhel prodlení                                                                                | [°]                  |
| θ                | úhel trochoidy                                                                               | [°]                  |
| θ <sub>en</sub>  | vstupní úhel frézy k souřadnému systému                                                      | [°]                  |
| θ <sub>ex</sub>  | výstupní úhel frézy k souřadnému systému                                                     | [°]                  |
| κ <sub>r</sub>   | úhel nastavení hlavního ostří                                                                | [°]                  |
| κ <sub>re</sub>  | úhel nastavení hlavního ostří efektivní                                                      | [°]                  |
| λ                | tepelná vodivost                                                                             | [W/mK]               |
| μ                | součinitel tření                                                                             | [-]                  |
| ρ                | hustota                                                                                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Φ                | úhel epicykloidní dráhy s osou Y, úhel střižné roviny                                        | [°]                  |
| Φ <sub>ex</sub>  | výstupní úhel nástroje (počáteční úhel záběru ostří)                                         | [°]                  |
| Φ <sub>st</sub>  | vstupní úhel nástroje (konečný úhel záběru ostří)                                            | [°]                  |

---

|          |                                 |     |
|----------|---------------------------------|-----|
| $\phi_j$ | okamžitý úhel ponoření nástroje | [°] |
| $\phi$   | úhel záběru nástroje            | [°] |
| $\phi_i$ | jmenovitý záběr nástroje        | [°] |
| $\Psi$   | úhel opásání nástroje           | [°] |

### Zkratky

| Označení | Legenda                                                                     |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|
| AISI D3  | označení oceli: AISI- American iron and steel institute, D3- označení oceli |
| CAD      | computer aided design/drafting                                              |
| CAM      | computer aided manufacturing                                                |
| CCD      | central composite design                                                    |
| CNC      | computer numerical control                                                  |
| ČSN      | české technické normy                                                       |
| HSM      | high speed machining                                                        |
| HFM      | high feed machining                                                         |
| HRC      | tvrdost dle Rockwella C                                                     |
| HRB      | tvrdost dle Rockwella B                                                     |
| KNB      | kubický nitrid bóru                                                         |
| MATHSM   | medial axis transform toward high speed machining                           |
| NURBS    | non-uniform rational basis spline                                           |
| PVD      | physical vapour deposition                                                  |
| RSM      | response Surface Methodology                                                |
| TiAlN    | povlak titan aluminium nitrid                                               |
| Al       | hliník                                                                      |
| C        | uhlík                                                                       |
| Cr       | chrom                                                                       |
| Fe       | železo                                                                      |
| Mn       | mangan                                                                      |
| Ni       | nikl                                                                        |
| Si       | křemík                                                                      |
| Ti       | titan                                                                       |
| V        | vanad                                                                       |

---

---

## SEZNAM PŘÍLOH

|           |                                                                             |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Příloha 1 | Technická data MCV 1210                                                     |
| Příloha 2 | Tabulky popisných statistik silového zatížení pro trochoidní drážkování č.1 |
| Příloha 3 | Tabulky popisných statistik silového zatížení pro trochoidní drážkování č.2 |
| Příloha 4 | Tabulky popisných statistik silového zatížení pro lineární drážkování č.1   |
| Příloha 5 | Tabulky popisných statistik silového zatížení pro lineární drážkování č.2   |

# MCV 1210

## TECHNICKÁ DATA

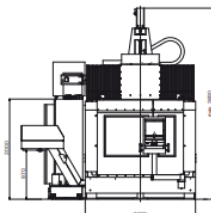
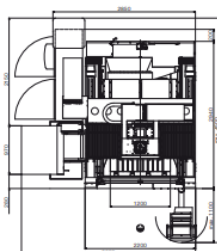


### STANDARDNÍ VYBAVENÍ

- Digitální pohony
- Přímé lineární odměřování
- Teplotní stabilizace vřeten
- Vnější chlazení nástroje
- Kompletně zakrytý pracovní prostor
- Dopravník třísek s integ. nádrží chlad. kapaliny
- Signalizace ukončení pracovního cyklu
- Zásobník nástrojů – 30 míst
- Vibrodiagnostika

### VOLITELNÉ VYBAVENÍ\*

- Chlazení středem vřeten
- Měřicí sonda nástroje
- Měřicí sonda obrobru
- Dvouosá CNC hlava
- Dvouosý otočný stůl
- Ruční oplachovací pistole
- Technologie soustružení
- Regalový zásobník s kapacitou 50 – 130 nástrojů
- Dálková diagnostika



|                        |          |
|------------------------|----------|
| <b>Pracovní pojezd</b> |          |
| Osa X – křížový suport | 1 000 mm |
| Osa Y – příčník        | 800 mm   |
| Osa Z – smykadlo       | 600 mm   |

|                                     |                  |
|-------------------------------------|------------------|
| <b>Pracovní stůl</b>                |                  |
| Pracovní plocha                     | 1 200 × 1 000 mm |
| Počet T-drážek                      | 11               |
| Rozměr drážek – druhá drážka zprava | 18H7 mm          |
| – ostatní drážky                    | 18H8 mm          |
| Rozteč drážek                       | 100 mm           |
| Maximální zatížení                  | 3 000 kg         |

|                      |                               |
|----------------------|-------------------------------|
| <b>Vzdálenosti</b>   |                               |
| Čelo vřeten od stolu | elektrovřetenem 150 – 750 mm  |
|                      | dvouosá CNC hlava 65 – 665 mm |

|                               |                    |
|-------------------------------|--------------------|
| <b>Posuvy v osách X, Y, Z</b> |                    |
| Max. pracovní posuv           | 40 m/min           |
| Rychloposuv                   | 40 m/min           |
| Maximální zrychlení os        | 5 m/s <sup>2</sup> |

|                                                  |          |
|--------------------------------------------------|----------|
| <b>Přesnost</b>                                  |          |
| Odměrovací systém v ose X, Y, Z                  | přímý    |
| Přesnost polohování – VDI/DGQ 3441 v ose X, Y, Z | 0,008 mm |
| Opakovaná přesnost – VDI/DGQ 3441 v ose X, Y, Z  | 0,005 mm |

|                             |                                                                                                           |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Vřetenová jednotka</b>   |                                                                                                           |
| Typ                         | elektrovřetenem                                                                                           |
| Max. otáčky vřeten          | 15 000 min <sup>-1</sup> 18 000 min <sup>-1</sup> * 12 000 min <sup>-1</sup> * 14 000 min <sup>-1</sup> * |
| Max. výkon vřeten           | 31 kW 31 kW 30 kW 37 kW                                                                                   |
| Max. krouticí moment vřeten | 197 Nm 197 Nm 143 Nm 236 Nm                                                                               |
| Upínací kužel               | ISO 40 HSK-A63 HSK-T100 HSK-A100                                                                          |

|                                                   |                                                       |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Automatický zásobník nástrojů</b>              |                                                       |
| Počet nástrojů v zásobníku                        | 30                                                    |
| Čas výměny nástroje (nástroj – nástroj)           | 3,5 s                                                 |
| Maximální průměr nástroje                         | – při obsazených sousedních místech v zásobníku 80 mm |
| – při neobsazených sousedních místech v zásobníku | 115 mm                                                |
| Maximální délka nástroje                          | 250 mm                                                |
| Maximální hmotnost nástroje včetně držáku         | 6,5 kg                                                |

|                            |               |
|----------------------------|---------------|
| <b>Pneumatický agregát</b> |               |
| Tlak vzduchu na vstupu     | 0,6 – 0,8 MPa |
| Provozní tlak              | 0,55 MPa      |

|                                         |                                 |
|-----------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Požadavky na elektrickou energii</b> |                                 |
| Připojovací napětí                      | 3 × 400 V/50 Hz 3 × 480 V/60 Hz |
| Příkon provozní                         | 45 kVA                          |
| Proud při plném zatížení stroje         | 125 A                           |

|                                   |                              |
|-----------------------------------|------------------------------|
| <b>Hmotnosti</b>                  |                              |
| Stroj (včetně zásobníku nástrojů) | 11 500 kg                    |
| <b>Rídicí systém</b>              | HEIDENHAIN, SIEMENS*, FANUC* |

|                                    |                          |
|------------------------------------|--------------------------|
| <b>DVOUOSÁ CNC HLAVA – Vřeten*</b> |                          |
| Maximální výkon                    | 23 kW                    |
| Maximální krouticí moment          | 72 Nm                    |
| Maximální otáčky                   | 18 000 min <sup>-1</sup> |
| Upínací kužel                      | HSK-A63                  |

|                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| <b>Osa A</b>           |                           |
| Rozsah osy A           | ±115 °                    |
| Rychlost otáčení osy A | max. 60 min <sup>-1</sup> |
| Maximální moment       | 538 Nm                    |
| Brzdný moment          | 1 500 Nm                  |

|                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| <b>Osa C</b>           |                           |
| Rozsah osy C           | ±200 °                    |
| Rychlost otáčení osy C | max. 60 min <sup>-1</sup> |
| Maximální moment       | 356 Nm                    |
| Brzdný moment          | 2 000 Nm                  |

|                                                               |              |
|---------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Přesnost (VDI/DGQ 3441)</b>                                |              |
| Přesnost polohování (P) – osa A (bez elektronické kompenzace) | ±20 arc. sec |
| Přesnost polohování (P) – osa C (bez elektronické kompenzace) | ±10 arc. sec |

### DVOUOSÝ OTOČNÝ STŮL\*

|                                                    |                           |
|----------------------------------------------------|---------------------------|
| <b>Osa A (naklápěcí osa)</b>                       |                           |
| Rozsah osy A                                       | ±95 °                     |
| Rychlost otáčení osy A                             | max. 25 min <sup>-1</sup> |
| Maximální krouticí moment (M <sub>kmax</sub> )     | 960 Nm                    |
| Maximální hmotnost dílce pro souvislou interpolaci | 560 kg                    |

|                                                |                                                       |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Osa C (rotační osa)</b>                     |                                                       |
| Upínací plocha stolu                           | Ø 600 mm Ø 600* / Ø 800 mm                            |
| Rozsah osy C                                   | 360 ° 360 °                                           |
| Rychlost otáčení                               | max. 400 min <sup>-1</sup> max. 100 min <sup>-1</sup> |
| Maximální krouticí moment (M <sub>kmax</sub> ) | 1 000 Nm 1 000 Nm                                     |
| Brzdný moment                                  | 3 000 Nm 3 000 Nm                                     |

|                                 |             |
|---------------------------------|-------------|
| <b>Přesnost (VDI/DGQ 3441)</b>  |             |
| Přesnost polohování (P) – osa A | 12 arc. sec |
| Přesnost polohování (P) – osa C | 6 arc. sec  |

\*\* v kombinaci s elektrovřetenem s upínáním HSK-T100 dle požadavku zákazníka

Podle vyobrazení a listinné údaje nemusí vždy souhlasit s posledním provedením stroje.

|                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                           |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Výrobce:<br><b>TAJMAC-ZPS, a.s.</b><br>třída 3, kultura 1180<br>763 02 Zlín, Mělnovice<br>ČESKÁ REPUBLIKA<br>Tel.: +420 577 532 072<br>Fax: +420 577 532 626<br>www.tajmac-sp.cz<br>e-mail: info@tajmac-sp.cz | Holding:<br><b>TAJMAC-MTM, s.p.a.</b><br>Via Gran Sasso 15<br>20092 Cinisello Balsamo (MI)<br>ITALY<br>Tel.: +39 02 66017878<br>Fax: +39 02 66011457<br>www.tajmac-mtm.it<br>e-mail: tajmac@tajmac-mtm.it |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

188 G, r. c. o. Zlín 12019

## Tabulky popisných statistik silového zatížení pro trochoidní drážkování č.1

Tab. 20 Popisná statistika silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro první drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 7,226174      | <b>Stř. hodnota</b>       | 16,44984     | <b>Stř. hodnota</b>       | -25,0987     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,344172      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,383122     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,777625     |
| <b>Medián</b>             | 2,73132       | <b>Medián</b>             | 19,1498      | <b>Medián</b>             | -25,7874     |
| <b>Modus</b>              | 0,289917      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | 3,9978       |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 11,92745      | <b>Směr. odchylka</b>     | 13,27725     | <b>Směr. odchylka</b>     | 26,94893     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 142,2641      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 176,2854     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 726,245      |
| <b>Špičatost</b>          | -0,04436      | <b>Špičatost</b>          | -1,59911     | <b>Špičatost</b>          | -1,03249     |
| <b>Šikmost</b>            | 0,163218      | <b>Šikmost</b>            | -0,0289      | <b>Šikmost</b>            | -0,34894     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 66,8946       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 43,3502      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 112,4268     |
| <b>Minimum</b>            | -31,0822      | <b>Minimum</b>            | -3,7384      | <b>Minimum</b>            | -91,095      |
| <b>Maximum</b>            | 35,8124       | <b>Maximum</b>            | 39,6118      | <b>Maximum</b>            | 21,3318      |
| <b>Součet</b>             | 8678,635      | <b>Součet</b>             | 19756,25     | <b>Součet</b>             | -30143,6     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 21 Popisná statistika silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro první drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 7,055469      | <b>Stř. hodnota</b>       | 18,99367     | <b>Stř. hodnota</b>       | -29,6679     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,351192      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,380124     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,775728     |
| <b>Medián</b>             | 3,26538       | <b>Medián</b>             | 23,1323      | <b>Medián</b>             | -32,4097     |
| <b>Modus</b>              | 0,289917      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | 3,44849      |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 12,1707       | <b>Směr. odchylka</b>     | 13,17335     | <b>Směr. odchylka</b>     | 26,88319     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 148,126       | <b>Rozptyl výběru</b>     | 173,5372     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 722,7058     |
| <b>Špičatost</b>          | -0,16111      | <b>Špičatost</b>          | -1,44997     | <b>Špičatost</b>          | -1,04612     |
| <b>Šikmost</b>            | 0,127741      | <b>Šikmost</b>            | -0,3202      | <b>Šikmost</b>            | -0,12383     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 66,8946       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 43,3502      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 115,9973     |
| <b>Minimum</b>            | -31,0822      | <b>Minimum</b>            | -3,7384      | <b>Minimum</b>            | -94,6655     |
| <b>Maximum</b>            | 35,8124       | <b>Maximum</b>            | 39,6118      | <b>Maximum</b>            | 21,3318      |
| <b>Součet</b>             | 8473,618      | <b>Součet</b>             | 22811,4      | <b>Součet</b>             | -35631,2     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 22 Popisná statistika silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro druhé drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 6,921519      | <b>Stř. hodnota</b>       | 22,22902     | <b>Stř. hodnota</b>       | -45,8865     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,523871      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,443686     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,971139     |
| <b>Medián</b>             | 0,518799      | <b>Medián</b>             | 26,7792      | <b>Medián</b>             | -52,948      |
| <b>Modus</b>              | 0,335693      | <b>Modus</b>              | 1,08337      | <b>Modus</b>              | 0,640869     |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 18,15499      | <b>Směr. odchylka</b>     | 15,37615     | <b>Směr. odchylka</b>     | 33,65527     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 329,6036      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 236,426      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1132,677     |
| <b>Špičatost</b>          | -0,67403      | <b>Špičatost</b>          | -1,40061     | <b>Špičatost</b>          | -1,05488     |
| <b>Šikmost</b>            | 0,068687      | <b>Šikmost</b>            | -0,30125     | <b>Šikmost</b>            | 0,133668     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 83,786        | <b>Rozdíl max-min</b>     | 52,78016     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 143,0056     |
| <b>Minimum</b>            | -37,4298      | <b>Minimum</b>            | -5,31006     | <b>Minimum</b>            | -126,282     |
| <b>Maximum</b>            | 46,3562       | <b>Maximum</b>            | 47,4701      | <b>Maximum</b>            | 16,7236      |
| <b>Součet</b>             | 8312,744      | <b>Součet</b>             | 26697,05     | <b>Součet</b>             | -55109,7     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 23 Popisná statistika silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro druhé drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 8,804397      | <b>Stř. hodnota</b>       | 22,09934     | <b>Stř. hodnota</b>       | -46,9843     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,517525      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,441548     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,992368     |
| <b>Medián</b>             | 3,60107       | <b>Medián</b>             | 26,474       | <b>Medián</b>             | -54,1382     |
| <b>Modus</b>              | 0,335693      | <b>Modus</b>              | 1,08337      | <b>Modus</b>              | 0,640869     |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 17,93505      | <b>Směr. odchylka</b>     | 15,30203     | <b>Směr. odchylka</b>     | 34,39094     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 321,6661      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 234,1522     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1182,737     |
| <b>Špičatost</b>          | -0,62693      | <b>Špičatost</b>          | -1,3905      | <b>Špičatost</b>          | -1,0743      |
| <b>Šikmost</b>            | -0,12856      | <b>Šikmost</b>            | -0,2905      | <b>Šikmost</b>            | 0,145499     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 83,786        | <b>Rozdíl max-min</b>     | 52,78016     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 143,0056     |
| <b>Minimum</b>            | -37,4298      | <b>Minimum</b>            | -5,31006     | <b>Minimum</b>            | -126,282     |
| <b>Maximum</b>            | 46,3562       | <b>Maximum</b>            | 47,4701      | <b>Maximum</b>            | 16,7236      |
| <b>Součet</b>             | 10574,08      | <b>Součet</b>             | 26541,31     | <b>Součet</b>             | -56428,2     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 24 Popisná statistika silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro třetí drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 10,55137      | <b>Stř. hodnota</b>       | 29,18038     | <b>Stř. hodnota</b>       | -61,5206     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,62221       | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,52396      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,100907     |
| <b>Medián</b>             | 6,8512        | <b>Medián</b>             | 34,6985      | <b>Medián</b>             | -68,0237     |
| <b>Modus</b>              | 0,411987      | <b>Modus</b>              | 0,869751     | <b>Modus</b>              | -0,27466     |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 21,56297      | <b>Směr. odchylka</b>     | 18,15806     | <b>Směr. odchylka</b>     | 38,15244     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 464,9618      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 329,7153     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1455,609     |
| <b>Špičatost</b>          | -0,59879      | <b>Špičatost</b>          | -1,16299     | <b>Špičatost</b>          | -0,8463      |
| <b>Šikmost</b>            | -0,18891      | <b>Šikmost</b>            | -0,49842     | <b>Šikmost</b>            | 0,380009     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 100,5554      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 65,21611     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 158,3251     |
| <b>Minimum</b>            | -47,0428      | <b>Minimum</b>            | -7,99561     | <b>Minimum</b>            | -139,099     |
| <b>Maximum</b>            | 53,5126       | <b>Maximum</b>            | 57,2205      | <b>Maximum</b>            | 19,2261      |
| <b>Součet</b>             | 12672,19      | <b>Součet</b>             | 35045,64     | <b>Součet</b>             | -73886,2     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 25 Popisná statistika silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro třetí drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 6,467261      | <b>Stř. hodnota</b>       | 29,00368     | <b>Stř. hodnota</b>       | -60,4089     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,622965      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,53239      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,118943     |
| <b>Medián</b>             | 0,778198      | <b>Medián</b>             | 34,9731      | <b>Medián</b>             | -67,2913     |
| <b>Modus</b>              | 0,411987      | <b>Modus</b>              | 0,869751     | <b>Modus</b>              | -0,27466     |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 21,58913      | <b>Směr. odchylka</b>     | 18,45023     | <b>Směr. odchylka</b>     | 38,77749     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 466,0907      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 340,4109     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1503,693     |
| <b>Špičatost</b>          | -0,53938      | <b>Špičatost</b>          | -1,23062     | <b>Špičatost</b>          | -0,94588     |
| <b>Šikmost</b>            | -0,019        | <b>Šikmost</b>            | -0,47864     | <b>Šikmost</b>            | 0,32494      |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 100,6622      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 65,21611     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 158,3251     |
| <b>Minimum</b>            | -47,5311      | <b>Minimum</b>            | -7,99561     | <b>Minimum</b>            | -139,099     |
| <b>Maximum</b>            | 53,1311       | <b>Maximum</b>            | 57,2205      | <b>Maximum</b>            | 19,2261      |
| <b>Součet</b>             | 7767,18       | <b>Součet</b>             | 34833,42     | <b>Součet</b>             | -72551,1     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 26 Popisná statistika silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro čtvrté drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 10,10799      | <b>Stř. hodnota</b>       | 31,03987     | <b>Stř. hodnota</b>       | -64,7018     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,742222      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,667468     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,424613     |
| <b>Medián</b>             | 0,793457      | <b>Medián</b>             | 37,4603      | <b>Medián</b>             | -76,1719     |
| <b>Modus</b>              | 0,350952      | <b>Modus</b>              | 1,00708      | <b>Modus</b>              | 2,16675      |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 25,72203      | <b>Směr. odchylka</b>     | 23,13139     | <b>Směr. odchylka</b>     | 49,3706      |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 661,6229      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 535,0614     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2437,457     |
| <b>Špičatost</b>          | -0,50705      | <b>Špičatost</b>          | -1,4931      | <b>Špičatost</b>          | -1,19599     |
| <b>Šikmost</b>            | -0,0303       | <b>Šikmost</b>            | -0,17841     | <b>Šikmost</b>            | 0,167569     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 125,7324      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 78,87263     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 192,9322     |
| <b>Minimum</b>            | -58,1207      | <b>Minimum</b>            | -9,17053     | <b>Minimum</b>            | -174,286     |
| <b>Maximum</b>            | 67,6117       | <b>Maximum</b>            | 69,7021      | <b>Maximum</b>            | 18,6462      |
| <b>Součet</b>             | 12139,69      | <b>Součet</b>             | 37278,88     | <b>Součet</b>             | -77706,9     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 27 Popisná statistika silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro čtvrté drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 7,407158      | <b>Stř. hodnota</b>       | 28,89401     | <b>Stř. hodnota</b>       | -59,1555     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,701323      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,690681     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,468451     |
| <b>Medián</b>             | 0,427246      | <b>Medián</b>             | 34,2865      | <b>Medián</b>             | -71,8384     |
| <b>Modus</b>              | 0,320435      | <b>Modus</b>              | 1,00708      | <b>Modus</b>              | 2,01416      |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 24,30465      | <b>Směr. odchylka</b>     | 23,93587     | <b>Směr. odchylka</b>     | 50,88983     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 590,7161      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 572,9261     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2589,775     |
| <b>Špičatost</b>          | -0,18346      | <b>Špičatost</b>          | -1,60841     | <b>Špičatost</b>          | -1,34839     |
| <b>Šikmost</b>            | 0,114527      | <b>Šikmost</b>            | -0,02104     | <b>Šikmost</b>            | -0,00333     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 125,7324      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 78,87263     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 192,9322     |
| <b>Minimum</b>            | -58,1207      | <b>Minimum</b>            | -9,17053     | <b>Minimum</b>            | -174,286     |
| <b>Maximum</b>            | 67,6117       | <b>Maximum</b>            | 69,7021      | <b>Maximum</b>            | 18,6462      |
| <b>Součet</b>             | 8895,996      | <b>Součet</b>             | 34701,71     | <b>Součet</b>             | -71045,7     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

## Tabulky popisných statistik silového zatížení pro trochoidní drážkování č.2

Tab. 28 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro první drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 7,055469      | <b>Stř. hodnota</b>       | 18,99367     | <b>Stř. hodnota</b>       | -29,6679     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>40,19165</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,351192      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,380124     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,775728     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,773982        |
| <b>Medián</b>             | 3,26538       | <b>Medián</b>             | 23,1323      | <b>Medián</b>             | -32,4097     | <b>Medián</b>             | 44,93513        |
| <b>Modus</b>              | 0,289917      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | 3,44849      | <b>Modus</b>              | 4,540408        |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 12,1707       | <b>Směr. odchylka</b>     | 13,17335     | <b>Směr. odchylka</b>     | 26,88319     | <b>Směr. odchylka</b>     | 26,82268        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 148,126       | <b>Rozptyl výběru</b>     | 173,5372     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 722,7058     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 719,4559        |
| <b>Špičatost</b>          | -0,16111      | <b>Špičatost</b>          | -1,44997     | <b>Špičatost</b>          | -1,04612     | <b>Špičatost</b>          | -1,11301        |
| <b>Šikmost</b>            | 0,127741      | <b>Šikmost</b>            | -0,3202      | <b>Šikmost</b>            | -0,12383     | <b>Šikmost</b>            | 0,002866        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 66,8946       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 43,3502      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 115,9973     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 100,3305        |
| <b>Minimum</b>            | -31,0822      | <b>Minimum</b>            | -3,7384      | <b>Minimum</b>            | -94,6655     | <b>Minimum</b>            | 0,658077        |
| <b>Maximum</b>            | 35,8124       | <b>Maximum</b>            | 39,6118      | <b>Maximum</b>            | 21,3318      | <b>Maximum</b>            | 100,9886        |
| <b>Součet</b>             | 8473,618      | <b>Součet</b>             | 22811,4      | <b>Součet</b>             | -35631,2     | <b>Součet</b>             | 48270,17        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 29 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro druhé drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 8,804397      | <b>Stř. hodnota</b>       | 22,09934     | <b>Stř. hodnota</b>       | -46,9843     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>56,20262</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,517525      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,441548     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,992368     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,061366        |
| <b>Medián</b>             | 3,60107       | <b>Medián</b>             | 26,474       | <b>Medián</b>             | -54,1382     | <b>Medián</b>             | 65,75886        |
| <b>Modus</b>              | 0,335693      | <b>Modus</b>              | 1,08337      | <b>Modus</b>              | 0,640869     | <b>Modus</b>              | 1,010773        |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 17,93505      | <b>Směr. odchylka</b>     | 15,30203     | <b>Směr. odchylka</b>     | 34,39094     | <b>Směr. odchylka</b>     | 36,78212        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 321,6661      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 234,1522     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1182,737     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1352,924        |
| <b>Špičatost</b>          | -0,62693      | <b>Špičatost</b>          | -1,3905      | <b>Špičatost</b>          | -1,0743      | <b>Špičatost</b>          | -1,08493        |
| <b>Šikmost</b>            | -0,12856      | <b>Šikmost</b>            | -0,2905      | <b>Šikmost</b>            | 0,145499     | <b>Šikmost</b>            | -0,31899        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 83,786        | <b>Rozdíl max-min</b>     | 52,78016     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 143,0056     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 133,5895        |
| <b>Minimum</b>            | -37,4298      | <b>Minimum</b>            | -5,31006     | <b>Minimum</b>            | -126,282     | <b>Minimum</b>            | 0,752028        |
| <b>Maximum</b>            | 46,3562       | <b>Maximum</b>            | 47,4701      | <b>Maximum</b>            | 16,7236      | <b>Maximum</b>            | 134,3416        |
| <b>Součet</b>             | 10574,08      | <b>Součet</b>             | 26541,31     | <b>Součet</b>             | -56428,2     | <b>Součet</b>             | 67499,34        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 30 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro třetí drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 6,467261      | <b>Stř. hodnota</b>       | 29,00368     | <b>Stř. hodnota</b>       | -60,4089     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>71,17817</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,622965      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,53239      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,118943     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,21594         |
| <b>Medián</b>             | 0,778198      | <b>Medián</b>             | 34,9731      | <b>Medián</b>             | -67,2913     | <b>Medián</b>             | 80,90102        |
| <b>Modus</b>              | 0,411987      | <b>Modus</b>              | 0,869751     | <b>Modus</b>              | -0,27466     | <b>Modus</b>              | #####           |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 21,58913      | <b>Směr. odchylka</b>     | 18,45023     | <b>Směr. odchylka</b>     | 38,77749     | <b>Směr. odchylka</b>     | 42,13893        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 466,0907      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 340,4109     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1503,693     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1775,689        |
| <b>Špičatost</b>          | -0,53938      | <b>Špičatost</b>          | -1,23062     | <b>Špičatost</b>          | -0,94588     | <b>Špičatost</b>          | -0,86379        |
| <b>Šikmost</b>            | -0,019        | <b>Šikmost</b>            | -0,47864     | <b>Šikmost</b>            | 0,32494      | <b>Šikmost</b>            | -0,52209        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 100,6622      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 65,21611     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 158,3251     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 149,5685        |
| <b>Minimum</b>            | -47,5311      | <b>Minimum</b>            | -7,99561     | <b>Minimum</b>            | -139,099     | <b>Minimum</b>            | 0,4176          |
| <b>Maximum</b>            | 53,1311       | <b>Maximum</b>            | 57,2205      | <b>Maximum</b>            | 19,2261      | <b>Maximum</b>            | 149,9861        |
| <b>Součet</b>             | 7767,18       | <b>Součet</b>             | 34833,42     | <b>Součet</b>             | -72551,1     | <b>Součet</b>             | 85484,98        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 31 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro čtvrté drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 7,407158      | <b>Stř. hodnota</b>       | 28,89401     | <b>Stř. hodnota</b>       | -59,1555     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>71,44562</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,701323      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,690681     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,468451     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,590314        |
| <b>Medián</b>             | 0,427246      | <b>Medián</b>             | 34,2865      | <b>Medián</b>             | -71,8384     | <b>Medián</b>             | 88,8975         |
| <b>Modus</b>              | 0,320435      | <b>Modus</b>              | 1,00708      | <b>Modus</b>              | 2,01416      | <b>Modus</b>              | 2,26679         |
| <b>Směr. odchylka</b>     | 24,30465      | <b>Směr. odchylka</b>     | 23,93587     | <b>Směr. odchylka</b>     | 50,88983     | <b>Směr. odchylka</b>     | 55,11304        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 590,7161      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 572,9261     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2589,775     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 3037,447        |
| <b>Špičatost</b>          | -0,18346      | <b>Špičatost</b>          | -1,60841     | <b>Špičatost</b>          | -1,34839     | <b>Špičatost</b>          | -1,42545        |
| <b>Šikmost</b>            | 0,114527      | <b>Šikmost</b>            | -0,02104     | <b>Šikmost</b>            | -0,00333     | <b>Šikmost</b>            | -0,10749        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 125,7324      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 78,87263     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 192,9322     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 187,523         |
| <b>Minimum</b>            | -58,1207      | <b>Minimum</b>            | -9,17053     | <b>Minimum</b>            | -174,286     | <b>Minimum</b>            | 0,819441        |
| <b>Maximum</b>            | 67,6117       | <b>Maximum</b>            | 69,7021      | <b>Maximum</b>            | 18,6462      | <b>Maximum</b>            | 188,3425        |
| <b>Součet</b>             | 8895,996      | <b>Součet</b>             | 34701,71     | <b>Součet</b>             | -71045,7     | <b>Součet</b>             | 85806,19        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

## Tabulky popisných statistik silového zatížení pro lineární drážkování č.1

Tab. 32 Popisná statistika silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro první lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 24,01376      | <b>Stř. hodnota</b>       | 51,64081     | <b>Stř. hodnota</b>       | -119,528     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,147384      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,130212     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,48034      |
| <b>Medián</b>             | 24,3225       | <b>Medián</b>             | 52,1851      | <b>Medián</b>             | -119,537     |
| <b>Modus</b>              | 29,1443       | <b>Modus</b>              | 57,1289      | <b>Modus</b>              | -147,43      |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 5,107668      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 4,512544     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 16,64639     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 26,08827      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 20,36305     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 277,1022     |
| <b>Špičatost</b>          | -1,248        | <b>Špičatost</b>          | -0,9772      | <b>Špičatost</b>          | -0,21907     |
| <b>Šikmost</b>            | -0,10272      | <b>Šikmost</b>            | -0,29965     | <b>Šikmost</b>            | -0,11107     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 20,9503       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 19,7297      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 94,3607      |
| <b>Minimum</b>            | 13,1989       | <b>Minimum</b>            | 41,0461      | <b>Minimum</b>            | -167,847     |
| <b>Maximum</b>            | 34,1492       | <b>Maximum</b>            | 60,7758      | <b>Maximum</b>            | -73,4863     |
| <b>Součet</b>             | 28840,53      | <b>Součet</b>             | 62020,61     | <b>Součet</b>             | -143553      |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 33 Popisná statistika silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro první lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 24,15616      | <b>Stř. hodnota</b>       | 51,78392     | <b>Stř. hodnota</b>       | -119,182     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,14849       | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,13121      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,478202     |
| <b>Medián</b>             | 24,5819       | <b>Medián</b>             | 52,2919      | <b>Medián</b>             | -119,385     |
| <b>Modus</b>              | 29,1443       | <b>Modus</b>              | 57,1289      | <b>Modus</b>              | -115,784     |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 5,145996      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 4,547126     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 16,5723      |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 26,48127      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 20,67635     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 274,641      |
| <b>Špičatost</b>          | -1,25863      | <b>Špičatost</b>          | -0,94503     | <b>Špičatost</b>          | -0,19177     |
| <b>Šikmost</b>            | -0,10962      | <b>Šikmost</b>            | -0,29369     | <b>Šikmost</b>            | -0,11524     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 20,9503       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 20,6299      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 94,3607      |
| <b>Minimum</b>            | 13,1989       | <b>Minimum</b>            | 41,0461      | <b>Minimum</b>            | -167,847     |
| <b>Maximum</b>            | 34,1492       | <b>Maximum</b>            | 61,676       | <b>Maximum</b>            | -73,4863     |
| <b>Součet</b>             | 29011,55      | <b>Součet</b>             | 62192,49     | <b>Součet</b>             | -143138      |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 34 Popisná statistika silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro druhé lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 13,30704      | <b>Stř. hodnota</b>       | 28,88496     | <b>Stř. hodnota</b>       | -64,128      |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,26115       | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,51257      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,162989     |
| <b>Medián</b>             | 15,6708       | <b>Medián</b>             | 37,4756      | <b>Medián</b>             | -79,8645     |
| <b>Modus</b>              | 0,289917      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -1,00708     |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 9,050285      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 17,76334     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 40,3039      |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 81,90766      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 315,5362     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1624,405     |
| <b>Špičatost</b>          | -1,2488       | <b>Špičatost</b>          | -1,118       | <b>Špičatost</b>          | -1,16024     |
| <b>Šikmost</b>            | -0,46724      | <b>Šikmost</b>            | -0,84599     | <b>Šikmost</b>            | 0,659716     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 36,91104      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 46,81397     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 127,4113     |
| <b>Minimum</b>            | -9,09424      | <b>Minimum</b>            | 0,656128     | <b>Minimum</b>            | -126,923     |
| <b>Maximum</b>            | 27,8168       | <b>Maximum</b>            | 47,4701      | <b>Maximum</b>            | 0,488281     |
| <b>Součet</b>             | 15981,75      | <b>Součet</b>             | 34690,84     | <b>Součet</b>             | -77017,7     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 35 Popisná statistika silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro druhé lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 11,75997      | <b>Stř. hodnota</b>       | 25,64475     | <b>Stř. hodnota</b>       | -57,338      |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,272901      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,546503     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,226683     |
| <b>Medián</b>             | 14,1449       | <b>Medián</b>             | 36,026       | <b>Medián</b>             | -75,9888     |
| <b>Modus</b>              | 0,228882      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -5,18799     |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 9,457495      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 18,93931     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 42,51124     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 89,44421      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 358,6976     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1807,206     |
| <b>Špičatost</b>          | -1,56627      | <b>Špičatost</b>          | -1,66487     | <b>Špičatost</b>          | -1,59789     |
| <b>Šikmost</b>            | -0,17801      | <b>Šikmost</b>            | -0,46948     | <b>Šikmost</b>            | 0,326871     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 36,91104      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 46,84449     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 127,4113     |
| <b>Minimum</b>            | -9,09424      | <b>Minimum</b>            | 0,62561      | <b>Minimum</b>            | -126,923     |
| <b>Maximum</b>            | 27,8168       | <b>Maximum</b>            | 47,4701      | <b>Maximum</b>            | 0,488281     |
| <b>Součet</b>             | 14123,72      | <b>Součet</b>             | 30799,35     | <b>Součet</b>             | -68862,9     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 36 Popisná statistika silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro třetí lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 8,631888      | <b>Stř. hodnota</b>       | 19,51029     | <b>Stř. hodnota</b>       | -42,6991     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,31485       | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,670122     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,455015     |
| <b>Medián</b>             | 0,457764      | <b>Medián</b>             | 1,08337      | <b>Medián</b>             | -5,15747     |
| <b>Modus</b>              | 0,335693      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -0,36621     |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 10,91127      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 23,22338     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 50,42419     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 119,0557      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 539,3252     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2542,599     |
| <b>Špičatost</b>          | -1,25378      | <b>Špičatost</b>          | -1,6986      | <b>Špičatost</b>          | -1,54718     |
| <b>Šikmost</b>            | 0,679552      | <b>Šikmost</b>            | 0,490574     | <b>Šikmost</b>            | -0,54875     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 45,8069       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 56,94583     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 144,8672     |
| <b>Minimum</b>            | -13,5803      | <b>Minimum</b>            | 0,38147      | <b>Minimum</b>            | -143,677     |
| <b>Maximum</b>            | 32,2266       | <b>Maximum</b>            | 57,3273      | <b>Maximum</b>            | 1,19019      |
| <b>Součet</b>             | 10366,9       | <b>Součet</b>             | 23431,85     | <b>Součet</b>             | -51281,6     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 37 Popisná statistika silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro třetí lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 6,859404      | <b>Stř. hodnota</b>       | 15,5986      | <b>Stř. hodnota</b>       | -34,5704     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,296847      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,634321     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,375547     |
| <b>Medián</b>             | 0,396729      | <b>Medián</b>             | 1,0376       | <b>Medián</b>             | -5,09644     |
| <b>Modus</b>              | 0,320435      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -5,09644     |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 10,28735      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 21,98266     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 47,67019     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 105,8295      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 483,2375     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2272,447     |
| <b>Špičatost</b>          | -0,58543      | <b>Špičatost</b>          | -1,17506     | <b>Špičatost</b>          | -0,98323     |
| <b>Šikmost</b>            | 1,056453      | <b>Šikmost</b>            | 0,873587     | <b>Šikmost</b>            | -0,92757     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 45,8069       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 56,94583     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 144,8672     |
| <b>Minimum</b>            | -13,5803      | <b>Minimum</b>            | 0,38147      | <b>Minimum</b>            | -143,677     |
| <b>Maximum</b>            | 32,2266       | <b>Maximum</b>            | 57,3273      | <b>Maximum</b>            | 1,19019      |
| <b>Součet</b>             | 8238,144      | <b>Součet</b>             | 18733,92     | <b>Součet</b>             | -41519       |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 38 Popisná statistika silového zatížení v čase od 8 do 20 sekund pro čtvrté lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 4,341792      | <b>Stř. hodnota</b>       | 10,16742     | <b>Stř. hodnota</b>       | -26,374      |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,279518      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,60725      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,368513     |
| <b>Medián</b>             | 0,350952      | <b>Medián</b>             | 0,976563     | <b>Medián</b>             | -6,86646     |
| <b>Modus</b>              | 0,289917      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -7,04956     |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 9,686812      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 21,04454     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 47,42643     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 93,83433      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 442,8725     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2249,266     |
| <b>Špičatost</b>          | 2,894285      | <b>Špičatost</b>          | 1,703325     | <b>Špičatost</b>          | 1,846774     |
| <b>Šikmost</b>            | 2,113695      | <b>Šikmost</b>            | 1,897468     | <b>Šikmost</b>            | -1,91924     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 47,68372      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 68,80191     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 170,4715     |
| <b>Minimum</b>            | -9,58252      | <b>Minimum</b>            | 0,595093     | <b>Minimum</b>            | -171,387     |
| <b>Maximum</b>            | 38,1012       | <b>Maximum</b>            | 69,397       | <b>Maximum</b>            | -0,91553     |
| <b>Součet</b>             | 5214,493      | <b>Součet</b>             | 12211,07     | <b>Součet</b>             | -31675,2     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

Tab. 39 Popisná statistika silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro čtvrté lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 2,208217      | <b>Stř. hodnota</b>       | 5,409298     | <b>Stř. hodnota</b>       | -15,8963     |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,201091      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,44071      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,9978       |
| <b>Medián</b>             | 0,335693      | <b>Medián</b>             | 0,961304     | <b>Medián</b>             | -6,86646     |
| <b>Modus</b>              | 0,289917      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -7,2937      |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 6,968904      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 15,27299     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 34,57922     |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 48,56563      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 233,2642     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1195,722     |
| <b>Špičatost</b>          | 11,28799      | <b>Špičatost</b>          | 8,648171     | <b>Špičatost</b>          | 8,802214     |
| <b>Šikmost</b>            | 3,524991      | <b>Šikmost</b>            | 3,227833     | <b>Šikmost</b>            | -3,23622     |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 47,47012      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 68,80191     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 170,4715     |
| <b>Minimum</b>            | -9,58252      | <b>Minimum</b>            | 0,595093     | <b>Minimum</b>            | -171,387     |
| <b>Maximum</b>            | 37,8876       | <b>Maximum</b>            | 69,397       | <b>Maximum</b>            | -0,91553     |
| <b>Součet</b>             | 2652,069      | <b>Součet</b>             | 6496,567     | <b>Součet</b>             | -19091,4     |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         |

## Tabulky popisných statistik silového zatížení pro lineární drážkování č.2

Tab. 40 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro první lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 24,1561<br>6  | <b>Stř. hodnota</b>       | 51,7839<br>2 | <b>Stř. hodnota</b>       | -119,182     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>132,4574</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,14849       | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,13121      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,47820<br>2 | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,452775        |
| <b>Medián</b>             | 24,5819       | <b>Medián</b>             | 52,2919      | <b>Medián</b>             | -119,385     | <b>Medián</b>             | 132,6605        |
| <b>Modus</b>              | 29,1443       | <b>Modus</b>              | 57,1289      | <b>Modus</b>              | -115,784     | <b>Modus</b>              | #####<br>#      |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 5,14599<br>6  | <b>Směr. Odchylka</b>     | 4,54712<br>6 | <b>Směr. Odchylka</b>     | 16,5723      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 15,69111        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 26,4812<br>7  | <b>Rozptyl výběru</b>     | 20,6763<br>5 | <b>Rozptyl výběru</b>     | 274,641      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 246,2108        |
| <b>Špičatost</b>          | -1,25863      | <b>Špičatost</b>          | -0,94503     | <b>Špičatost</b>          | -0,19177     | <b>Špičatost</b>          | -0,20598        |
| <b>Šikmost</b>            | -0,10962      | <b>Šikmost</b>            | -0,29369     | <b>Šikmost</b>            | -0,11524     | <b>Šikmost</b>            | 0,151275        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 20,9503       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 20,6299      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 94,3607      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 89,37944        |
| <b>Minimum</b>            | 13,1989       | <b>Minimum</b>            | 41,0461      | <b>Minimum</b>            | -167,847     | <b>Minimum</b>            | 89,58765        |
| <b>Maximum</b>            | 34,1492       | <b>Maximum</b>            | 61,676       | <b>Maximum</b>            | -73,4863     | <b>Maximum</b>            | 178,9671        |
| <b>Součet</b>             | 29011,5<br>5  | <b>Součet</b>             | 62192,4<br>9 | <b>Součet</b>             | -143138      | <b>Součet</b>             | 159081,3        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 41 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro druhé lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 11,75997      | <b>Stř. hodnota</b>       | 25,64475     | <b>Stř. hodnota</b>       | -57,338      | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>64,16647</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,272901      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,546503     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,226683     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,360064        |
| <b>Medián</b>             | 14,1449       | <b>Medián</b>             | 36,026       | <b>Medián</b>             | -75,9888     | <b>Medián</b>             | 87,35379        |
| <b>Modus</b>              | 0,228882      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -5,18799     | <b>Modus</b>              | 5,261273        |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 9,457495      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 18,93931     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 42,51124     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 47,13364        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 89,44421      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 358,6976     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1807,206     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2221,58         |
| <b>Špičatost</b>          | -1,56627      | <b>Špičatost</b>          | -1,66487     | <b>Špičatost</b>          | -1,59789     | <b>Špičatost</b>          | -1,62239        |
| <b>Šikmost</b>            | -0,17801      | <b>Šikmost</b>            | -0,46948     | <b>Šikmost</b>            | 0,326871     | <b>Šikmost</b>            | -0,38724        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 36,91104      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 46,84449     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 127,4113     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 135,0867        |
| <b>Minimum</b>            | -9,09424      | <b>Minimum</b>            | 0,62561      | <b>Minimum</b>            | -126,923     | <b>Minimum</b>            | 0,831569        |
| <b>Maximum</b>            | 27,8168       | <b>Maximum</b>            | 47,4701      | <b>Maximum</b>            | 0,488281     | <b>Maximum</b>            | 135,9182        |
| <b>Součet</b>             | 14123,72      | <b>Součet</b>             | 30799,35     | <b>Součet</b>             | -68862,9     | <b>Součet</b>             | 77063,94        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 42 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro třetí lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 6,859404      | <b>Stř. hodnota</b>       | 15,5986      | <b>Stř. hodnota</b>       | -34,5704     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>38,83373</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,296847      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,634321     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,375547     | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,537464        |
| <b>Medián</b>             | 0,396729      | <b>Medián</b>             | 1,0376       | <b>Medián</b>             | -5,09644     | <b>Medián</b>             | 5,195206        |
| <b>Modus</b>              | 0,320435      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -5,09644     | <b>Modus</b>              | 0,993229        |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 10,28735      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 21,98266     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 47,67019     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 53,28149        |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 105,8295      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 483,2375     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2272,447     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 2838,917        |
| <b>Špičatost</b>          | -0,58543      | <b>Špičatost</b>          | -1,17506     | <b>Špičatost</b>          | -0,98323     | <b>Špičatost</b>          | -1,06929        |
| <b>Šikmost</b>            | 1,056453      | <b>Šikmost</b>            | 0,873587     | <b>Šikmost</b>            | -0,92757     | <b>Šikmost</b>            | 0,902648        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 45,8069       | <b>Rozdíl max-min</b>     | 56,94583     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 144,8672     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 154,2131        |
| <b>Minimum</b>            | -13,5803      | <b>Minimum</b>            | 0,38147      | <b>Minimum</b>            | -143,677     | <b>Minimum</b>            | 0,784901        |
| <b>Maximum</b>            | 32,2266       | <b>Maximum</b>            | 57,3273      | <b>Maximum</b>            | 1,19019      | <b>Maximum</b>            | 154,998         |
| <b>Součet</b>             | 8238,144      | <b>Součet</b>             | 18733,92     | <b>Součet</b>             | -41519       | <b>Součet</b>             | 46639,31        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |

Tab. 43 Popisná statistika celkového silového zatížení v čase od 9 do 21 sekund pro čtvrté lineární drážkování.

|                           | <b>Fx=Fcn</b> |                           | <b>Fy=Fc</b> |                           | <b>Fz=Fp</b> |                           | <b>F</b>        |
|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| <b>Stř. hodnota</b>       | 2,208217      | <b>Stř. hodnota</b>       | 5,409298     | <b>Stř. hodnota</b>       | -15,8963     | <b>Stř. hodnota</b>       | <b>17,13384</b> |
| <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,201091      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,44071      | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 0,9978       | <b>Chyba stř. hodnoty</b> | 1,10664         |
| <b>Medián</b>             | 0,335693      | <b>Medián</b>             | 0,961304     | <b>Medián</b>             | -6,86646     | <b>Medián</b>             | 6,930399        |
| <b>Modus</b>              | 0,289917      | <b>Modus</b>              | 0,961304     | <b>Modus</b>              | -7,2937      | <b>Modus</b>              | 2,041994        |
| <b>Směr. Odchylka</b>     | 6,968904      | <b>Směr. Odchylka</b>     | 15,27299     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 34,57922     | <b>Směr. Odchylka</b>     | 38,3511         |
| <b>Rozptyl výběru</b>     | 48,56563      | <b>Rozptyl výběru</b>     | 233,2642     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1195,722     | <b>Rozptyl výběru</b>     | 1470,807        |
| <b>Špičatost</b>          | 11,28799      | <b>Špičatost</b>          | 8,648171     | <b>Špičatost</b>          | 8,802214     | <b>Špičatost</b>          | 8,630255        |
| <b>Šikmost</b>            | 3,524991      | <b>Šikmost</b>            | 3,227833     | <b>Šikmost</b>            | -3,23622     | <b>Šikmost</b>            | 3,219375        |
| <b>Rozdíl max-min</b>     | 47,47012      | <b>Rozdíl max-min</b>     | 68,80191     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 170,4715     | <b>Rozdíl max-min</b>     | 179,9584        |
| <b>Minimum</b>            | -9,58252      | <b>Minimum</b>            | 0,595093     | <b>Minimum</b>            | -171,387     | <b>Minimum</b>            | 1,32048         |
| <b>Maximum</b>            | 37,8876       | <b>Maximum</b>            | 69,397       | <b>Maximum</b>            | -0,91553     | <b>Maximum</b>            | 181,2788        |
| <b>Součet</b>             | 2652,069      | <b>Součet</b>             | 6496,567     | <b>Součet</b>             | -19091,4     | <b>Součet</b>             | 20577,74        |
| <b>Počet</b>              | 1201          | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201         | <b>Počet</b>              | 1201            |