

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Strojnícka  
fakulta

---

**AUTOREFERÁT  
DIZERTAČNEJ PRÁCE**

---

Žilina, 2024

Ing. Peter Kozový



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Strojnícka  
fakulta

Ing. Peter Kozový

# AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Analýza vplyvu vysokoproduktívnych metód obrábania na  
vybrané parametre integrity povrchu**

Na získanie akademického titulu **d o k t o r**  
**(„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)**  
v študijnom odbore Strojárstvo  
v študijnom programe Automatizácia a výrobné systémy

Žilina 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre obrábania a výrobnjej techniky.

Predkladateľ:

Ing. Peter Kozový

Žilinská univerzita v Žiline

Strojnícka fakulta

Katedra obrábania a výrobnjej techniky

Školiteľ:

doc. Ing. Michal Šajgalík PhD.

Žilinská univerzita v Žiline

Strojnícka fakulta

Katedra obrábania a výrobnjej techniky

Oponenti:

1. prof. Ing. Jozef Pilc, CSc. - Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

2. prof. Ing. Marek Sadílek, Ph.D. - FS VŠB - Technická Univerzita Ostrava, Strojnícka fakulta, 17. listopadu 15/2172, CZ - 708 33

3. doc. Ing. Štefan Václav, PhD. - STU v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave, Ulica Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 15.7.2024

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa  
28.08.2024 o 11:00 hod.

v miestnosti PP101C na SJF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Automatizované výrobné systémy, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SJF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Dr. Ing. Ivan Kuric - Žilinská univerzita v Žiline,  
Strojnícka fakulta, Univerzitná 8215/1, Žilina v. r.  
2024 predseda komisie pre obhajobu dizertačnej  
práce

## Práce publikované v zahraničních časopisech a zbornících

**KOZOVÝ, P.**, MATUŠ, M., BECHNÝ, V., HOLUBJÁK, J., JOCH, R., ŠAJGALÍK, M. 2024 Analysis of Tool Load Concerning the Cross-Sectional Size of Removed Material, J. Manuf. Mater. Process. 2024, 8(3), 92;

**KOZOVÝ, P.**, ŠAJGALÍK, M., DRBÚL, M., HOLUBJÁK, J., MARKOVIČ, J., JOCH, R., BALŠIANKA, R. 2023 Identification of Residual Stresses after Machining a Gearwheel Made by Sintering Metal Powder. Manufacturing Technology, 2023, vol. 23, iss. 4, p. 468-474.

CEDZO, M., HOLUBJÁK, J., CZÁNOVÁ, T., TIMKO, P., **KOZOVÝ, P.**, M., DRBÚL, 2023 Analysis of the Substitutability of Conventional Technologies in the Design of a Clamping Vise for Measurement Using an Optical Measuring System. Manufacturing Technology, 2023, vol. 23, iss. 2, p. 136-142.

SLABEJOVÁ, S., ŠAJGALÍK, M., TIMKO, P., **KOZOVÝ, P.**, NOVÁK, M., CEDZO, M. 2023 Analysis of Cutting Forces during Machining with Additive-Produced Milling Head. Manufacturing Technology, 2023, vol. 23, iss. 2, p. 254-259.

BECHNÝ, V., CZÁN, A., HOLUBJÁK, J., MATÚŠ, M., **KOZOVÝ, P.**, TIMKO, P., BERÁNEK, L. 2023, Roughness surface analysis of samples produced by the additive manufacturing process, Transportation Research Procedia, 74(8):702-708. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.200

CEDZO, M., CZÁN, A., BERÁNEK, L., JOCH, R., TIMKO, P., **KOZOVÝ, P.** 2023, Surface roughness of hardened steel 90MnCrV8 after turning with actively driven tool rotation, Transportation Research Procedia, 74(6):694-701. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.199

**KOZOVÝ, P.**, ŠAJGALÍK, M., HOLUBJÁK, J., JOCH, R., DRBÚL, M., 2023, Influence of trochoidal milling parameters on tool load, Transportation Research Procedia, 74(6):709-716. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.201

**KOZOVÝ, P.**, ŠAJGALÍK, M., HOLUBJÁK, J., SLABEJOVÁ, S., JOCH, R., DRBÚL, M., 2023, Influence of the microgeometry of work tool on generation of residual stress in superficial layers of material after Trochoidal milling, AIP Conference Proceedings, 2976(1). DOI: 10.1063/5.0172791

SLABEJOVÁ, S., ŠAJGALÍK, M., **KOZOVÝ, P.**, HOLUBJÁK, J., JOCH, R., DRBÚL, M., 2023, Simulation of the effect of cutting forces on surface integrity after machining with monolithic ceramic cutters, AIP Conference Proceedings, 2976(1). DOI: 10.1063/5.0172775

# Obsah

	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Súčasný stav problematiky</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Tézy dizertačnej práce</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>Experimentálna časť</b>	<b>15</b>
3.1	Príprava experimentu	15
3.2	Nástroj	16
3.3	Obrábaný materiál	19
3.4	Obrábací stroj	19
<b>4</b>	<b>Vyhodnotenie experimentov</b>	<b>20</b>
4.1	Vyhodnotenie rezných síl	21
4.2	Vyhodnotenie kvality povrchu dna drážok	24
4.3	Vyhodnotenie zvyškových napätí dna drážok	28
4.4	Vyhodnotenie produktivity	31
<b>5</b>	<b>Prínosy práce</b>	<b>33</b>
5.1	Prínosy pre vedu a teóriu	33
5.2	Prínosy pre prax	33
	<b>Záver</b>	<b>34</b>

## Úvod

Strojársky priemysel ako celok, tvorí značnú časť celosvetového hospodárstva, ale aj v rámci našej krajiny, kde tvorí jeho dominantnú časť automobilová výroba. Nielen ekologické požiadavky, ale aj ekonomická podstata výroby si vyžadujú zameranie pozornosti na environmentálny dopad a znižovanie nákladov procesov výroby. Jedna z možností znižovania nákladov môže byť pomocou optimalizovania výrobných procesov.

Frézovanie je rozšírená a často používaná technológia obrábania, najmä pri obrábaní zložitých tvarov, foriem a pod.

Pri hrubovacom frézovaní patrí medzi hlavné požiadavky rýchlosť úberu materiálu – produktivita procesu. Nelineárna dráha nástroja pri frézovaní umožňuje, okrem zvýšenia produktivity procesu, predĺžiť životnosť nástroja. Technológia trochoidného frézovania, ako jedna z metód vysokoproduktívneho obrábania, vznikla hlavne ako technológia pre obrábanie progresívnych materiálov, ktoré môžeme radiť materiáli so zvýšenými mechanickými vlastnosťami.

Predchádzajúce výskumy preukazujú výhody použitia trochoidného frézovania. Predtým, ako je však možné začať obrábať materiál, je potrebné vygenerovať trochoidnú dráhu. Touto problematikou sa už zaoberali viacerí autori výskumov. Avšak chýbalo porovnanie samotných softvérov, ktoré generovanie trochoidnej dráhy umožňujú.

Cieľom práce je analyzovať vplyv voľby CAM softvéru, či už na zaťaženie alebo kvalitu povrchu. Môže tiež priniesť nový pohľad na prípadné ďalšie experimenty. Analýzou výsledkov je možné prísť k záverom, ktorý CAM softvér umožňuje výhodnejšie (podrobnejšie/rozsiahlejšie) nastavenie. Takýto softvér je vhodnejší pre programovanie trochoidnej dráhy, napr. pri skúmaní životnosti nástroja.



## 1 Súčasný stav problematiky

Trochoidným frézovaním, ako nosnou časťou dizertačnej práce, som sa zaoberal už v priebehu inžinierskeho štúdia v rámci mojej diplomovej práce. Výskum pozostával z porovnania vplyvu zmeny mikrogeometrie na kvalitu obrobeného povrchu dna drážky a zaťaženie nástroja. Zväčšením polomeru zaoblenia hlavnej reznej hrany, pomocou rektifikácie nástroja, sa dosiahlo spevnenie povrchu, v zmysle zväčšenia tlakových napätí na povrchu dna obrábaných drážok. Už pri samotnom návrhu experimentu bolo jedným z problémov programovanie trochoidnej dráhy, preto sa v tejto práci budeme venovať porovnaniu jednotlivých CAM modulov a porovnáme ich výstupy na základe rezných síl, napätí a integrity povrchu. (Kozový, 2023) (Kozový, 2023)

Rýchly technologický pokrok, integrácia inteligentných systémov spolu s princípmi Industry 4.0. posúvajú vývoj obrábania rýchlym tempom. Vo výrobnom priemysle sa riešia dva hlavné problémy – zvyšovanie produktivity a zlepšovanie kvality obrobku. Štúdie procesov obrábania ukazujú, že miera produktivity obrábacích strojov závisí od reznej rýchlosti a spoľahlivosti rezných nástrojov. (Usumatov, 2024)

Technológie ako HSM sa čoraz viac sústreďujú na obrábanie s využitím nástrojových materiálov schopných zvládať vysoké rezné rýchlosti. Vývoj sa zameriava na zlepšenie výkonnosti obrábacích strojov, pričom sa zachováva kvalita vyrobených dielcov. Celkovo je vysokoproduktívne obrábanie kľúčovým sektorom vo výrobnom priemysle, ktorý sa neustále vyvíja s cieľom zvýšiť efektívnosť a kvalitu výrobných procesov. Využívanie pokročilých technológií a optimalizácia obrábacích procesov predstavujú pre priemysel výzvy aj príležitosti pre budúci rast a inovácie. Trochoidné frézovanie si získalo popularitu pri vysokorýchlostnom frézovaní vďaka svojej schopnosti znížiť reznú silu, urýchliť odvod tepla a zvýšiť životnosť nástroja. (Gu, 2024) (Ma, 2024)

Výskumníci z Maďarska, sa zaoberali frézovaním drážok do superzliatiny na báze niklu. Tieto superzliatiny patria medzi najťažšie obrábatelné materiály a sú široko používané v leteckom a energetickom

priemysle. Použitá stratégia má tiež veľký vplyv na životnosť nástroja a kvalitu obrobeného povrchu, preto autori vybrali pre porovnanie dve tradičné trochoidné stratégie, kruhovú a výkyvnú dráhu nástroja a modernú dráhu nástroja, adaptívnu stratégiu Autodesk Inventor HSM. Cieľom bolo určiť najlepšiu stratégiu pre dané obrábanie, pričom sa sledovali rezné sily, krútiace momenty a priemerná drsnosť povrchu na dne frézovaných drážok. (Kónya, 2023)

Pri obrábaní ťažko obrábateľných materiálov dochádza k rýchlemu opotrebovaniu rezného nástroja v dôsledku zvýšených rezných síl. Aplikáciou trochoidného spôsobu frézovania je možné výrazne zlepšiť životnosť nástroja a skrátiť celkový čas výrobného cyklu. V danom článku autori definovali koeficienty sily pre trochoidnú dráhu nástroja, čo môže pomôcť pri predpovedaní opotrebenia na základe hodnôt sily pri trochoidnom frézovaní. (Shah, 2023)

Predikciu, resp. simulovanie reznej sily a iných parametrov procesu riešili aj Zhou a ďalší, pričom vychádzali z komplikovaného priebehu odrezávanej triesky pri trochoidnom frézovaní. Tradičná hrúbka triesky nespĺňa potrebné presnosti výpočtu a preto bolo potrebné opísať hrúbku triesky podľa skutočnej trajektórie pomocou metódy numerického riešenia. Model hrúbky triesky v tomto článku porovnávajú s tradičným modelom hrúbky triesky a zistili, že daný model môže lepšie odrážať hrúbku triesky pri trochoidnom frézovaní. (Zhou, 2022)

Grimm a iní skúmali náhodné variácie trochoidnej dráhy. Kľúčovým parametrom bol povolený rozsah polomerov kruhových oblúkov. Zistili, že najefektívnejšia dráha využíva strednú hodnotu parametra, čo ilustruje celkový negatívny vzťah medzi účinnosťou dráhy a polomerom dráhy nástroja. Taktiež dokázali, že menšie oblúky znižujú chvenie. (Grimm, 2022) Tieto práce sa však zvyčajne zameriavali len na cykloidné a kruhové tvarové trochoidné stratégie a nebrali do úvahy možnosti optimalizácie tvaru dráhy. Dôvodom je skutočnosť, že optimalizácia trochoidnej dráhy nástroja predstavuje dvojité výzvu. Najskôr

je potrebné modelovať proces úberu materiálu, aby boli splnené geometrické a technologické podmienky. Následne, je ale vzťah medzi tvarom dráhy nástroja a účinnosťou obrábania veľmi zložitý, preto nie je možné použiť priame optimalizačné riešenia. (Jacso, 2023)

Goméz a ďalší (Goméz, 2021), sa venovali porovnaniu efektivity trochoidného frézovania v porovnaní s konvenčným a ponorným frézovaním, pričom dospeli k záveru, že trochoidné frézovanie je nielen produktívnejšie, ale vďaka využitiu väčšej dĺžky reznej hrany tiež vplýva pozitívne na opotrebenie nástroja. V neposlednom rade zistili pozitívne ovplyvnenie opracovaného povrchu. (Goméz, 2021) Nikolaos Karkalos a ďalší skúmali trochoidné frézovanie s cieľom vyhodnotiť vplyv rezných podmienok na výslednú drsnosť povrchu frézovaných drážok na obrobku z hliníkovej zliatiny. Porovnanie hodnôt parametrov Ra a Rz získaných pri lineárnom aj trochoidnom frézovaní odhalilo, že vo väčšine prípadov môže trochoidná stratégia frézovania poskytnúť lepšie výsledky pre Ra aj Rz, najmä pri vyšších hodnotách  $f_z$ . Je teda možné použiť väčšie hodnoty posuvu a zároveň zachovať kvalitu povrchu na prijateľnej úrovni. (Karkalos, 2021) Taktiež tureckí výskumníci, sa zaoberali skúmaním a predpovedaním rezných síl pri frézovaní zliatiny horčíka a zliatiny titánu. Pomocou trochoidného frézovania obrábali drážky pri rozličných otáčkach vretena. Zistili, že rezná sila je väčšia pri nižších otáčkach a so zvyšovaním otáčok postupne klesá, a to najmä pri obrábaní titánovej zliatiny Ti6Al4V. (Aydin, 2022)

Viacere výskumy v oblasti trochoidného frézovania uskutočnili poľskí vedci (Influence of technological parameters on the cutting temperature during trochoidal milling, 2024), ktorí experimentom potvrdili zníženie teploty rezania. Taktiež v skorších článkoch riešili napríklad vplyv zvolenej dráhy na kvalitu povrchu, kde zistili, že zvýšenie posuvu z 0,03 na 0,06 a reznej rýchlosti zo 100 na  $150\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  malo väčší vplyv na vlnitosť ako na drsnosť povrchu. (Waszczuk, 2020) (Waszczuk, 2019) Poľskí vedci, z univerzity v Lubline vykonali analýzu vplyvu reznej rýchlosti a kroku trochoidy na vybrané parametre obrobitelnosti

(rezné sily a vibrácie), pri horčíkových zliatinách AZ91D a AZ31. Výsledky ich experimentu demonštrujú významný vplyv zvýšenia vc na zníženie zložiek reznej sily. Taktiež potvrdili vhodnosť použitia neurónových sietí ako nástroja vhodného na predikciu reznej sily a vibrácií pri frézovaní. (Zagórski, 2019) Ich ďalší výskum sa zaoberal vplyvom zmien parametrov obrábania a typov nástrojových držiakov na stabilitu frézovania. V štúdií boli použité tri typy nástrojových držiakov, ktoré sa najčastejšie používajú v priemysle. Jadrom výskumu bolo meranie posunutia a zrýchlenia vibrácií analyzované v časovej oblasti. Vykonávala sa aj spektrálna analýza signálov na základe rýchlej Fourierovej transformácie s cieľom identifikovať zložky signálu a zistiť náchylnosť na vznik chvenia.

Trochoidným frézovaním sa zaoberali aj egyptskí vedci – ich článok sa zaoberá analytickým a experimentálnym preskúmaním dopadu parametrov trochoidného frézovania na profil a hrúbosť povrchu drážok vytvorených v legovanej oceli P20. Medzi skúmané parametre procesu patria šírka drážky, axiálna hĺbka rezu, trochoidný krok a rýchlosť posuvu. Aby sa objasnila vlnitosť a hrúbosť povrchov na bočných stenách a dne drážky, bol vypracovaný geometrický analytický model, ktorý simuluje odtlačky rezných hrán nástroja. Zistenia z tohto modelu ukázali, že rozšírenie šírky drážky významne redukuje vlnitosť na jej stenách, zatiaľ čo zvýšenie rýchlosti posuvu alebo trochoidného kroku zvyšuje vlnitosť na ľavej a pravej stene drážky. Experimentálne údaje potvrdili, že axiálna hĺbka rezu nemá podstatný vplyv na vlnitosť stien drážky a že odtlačky hrán nástroja majú primárny vplyv na hrúbosť dna drážky. Hrubosť dna sa znižuje smerom zľava doprava. Navyše, zvýšenie rýchlosti posuvu viedlo k výraznému zvýšeniu drsnosti dna o 25 %, 29 % a 29 % na ľavej, strednej a pravej stene obrábanej drážky. Zvýšenie axiálnej hĺbky rezu malo významný vplyv na zvýšenie drsnosti dna len na ľavej stene a v strede obrábanej drážky o 11 %, resp. 19 %. (Wagih, 2023)

V štúdií (Szalóki, 2012) sa autori zamerali aj na porovnanie rýchlosti odoberania materiálu. Pre porovnanie použili objem odobratého materiálu za

čas v  $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ , avšak vo viacerých článkoch, (indexovaných v preferovaných databázach) boli použité jednotky  $\text{mm}^3 \cdot \text{min}$ . (de Lacalle, 2011) (Swift, 2013) Preto sme vo vyhodnotení produktivity jednotlivých experimentov zvolili tieto jednotky.

Teplota reznej hrany nástroja je dôležitým faktorom vplyvujúcim na rezný proces samotný, ale aj na opotrebenie nástroja. Predpovedaním teploty sa zaoberali výskumníci z Číny a Kanady, ktorých výskum umožňuje optimalizovať rezné parametre pri trochoidnom obrábaní. (Deng, 2020) Čínski vedci (Gu, 2024) skúmali prispôbenie kriviek dráhy trochoidného frézovacieho nástroja, ktoré sú predmetom zlepšenia účinnosti obrábania prostredníctvom riadenia zmeny krivosti pri súčasnom splnení vopred definovaných kritérií uhla CWE. Kvantitatívne sa stanovil vzťah medzi okamžitým uhlom CWE a zmenou krivosti krivky dráhy nástroja. Potom sa zaviedla riadiaca funkcia založená na zápornej exponenciálnej funkcii na reguláciu zmeny krivosti. Nakoniec sa navrhnutá metóda experimentálne overila prostredníctvom trochoidného frézovania zakrivených drážok vyhodnotením účinnosti obrábania a kvality povrchu. Výsledky ukázali, že v porovnaní s kruhovou, eliptickou a polynomicou dráhou nástroja sa priemerný uhol CWE súvisiaci s prispôbenou dráhou nástroja zvýšil o 40,5 %, 17,9 % a 6,3 %, zatiaľ čo účinnosť obrábania sa zvýšila o 25 %, 16 % a 14 %. Hoci kvalita povrchu (drsnosť povrchu sa pohybuje v rozmedzí 5 % a rovinnosť sa zvýšila o 27 %) je horšia ako pri ostatných troch vzoroch dráhy nástroja, ťaží z vysoko zvýšenej účinnosti obrábania, stále je použiteľná pre vysokoúčinné hrubovacie frézovanie súčiastok. (Gu, 2024)

## 2 Tézy dizertačnej práce

Na základe predchádzajúcich výskumov je cieľom dizertačnej práce analyzovať vplyv generovania dráhy nástroja pri aplikácii vybraných vysokoproduktívnych metód obrábania a ich vplyv na zaťaženie sústavy a integritu povrchu. Pri vykonávaní experimentov budú sledované nasledujúce faktory a javy, ktoré budú následne rozpracované v jednotlivých kapitolách:

- Analýza geometrie a mikrogeometrie reznej hrany.
- Analýza kinematickej schémy a schémy zaťaženia nástroja pri trochoidnom frézovaní.
- Analýza topografie povrchu a následné vyhodnotenie základných charakteristík v 2D a 3D priestore.
- Identifikácia zvyškových napätí po ukončení procesu obrábania.
- Štatistické a experimentálne vyhodnotenie jednotlivých vykonaných metodík, experimentov a pokusov za účelom implementácie výstupov pre vedecký výskum s aplikáciou pre nové technológie využívané v praxi.

Jednotlivé experimenty z praktickej časti dizertačnej práce boli vykonávané v laboratóriách Katedry obrábania a výrobnéj techniky, ktorá je súčasťou Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

### 3 Experimentálna časť

Táto kapitola sa venuje experimentálnemu skúmaniu aplikácie rôznych CAM systémov v strojárskom priemysle. Všetky CAM-y umožňovali rozdielne nastavenia a teda generovali rozdielnu trochoidnú dráhu. Tá mala vplyv nielen na skúmané faktory, ale taktiež na čas obrábania, ktorý je dôležitou súčasťou optimalizácie výroby. Jednou z úloh praktickej časti experimentu je porovnanie dráh nástroja naprogramovaných v rôznom softvéri. V praxi sa často používajú rôzne pojmy, ako napr. frézovanie s konštantným záberom, adaptívne frézovanie a pod. Podstatou týchto technológií je zvyšovať životnosť nástroja tak, aby bol proces obrábania efektívnejší, no každá technológia má svoje odlišnosti. Z tohto dôvodu bolo dôležité vybrať parametre, ktoré môžeme meniť naprieč rôznymi softvérmi, tak aby sme dostali hodnoty, ktoré možno navzájom porovnať a ďalej analyzovať.

Experimentálna časť dizertačnej práce sa vykonávala v laboratóriách Katedry obrábania a výrobnjej techniky. Taktiež sa v priestoroch laboratórií vykonávali merania jednotlivých kvalitatívnych charakteristík.

#### 3.1 Príprava experimentu

Primárnou stránkou experimentu je vysokoproduktívna metóda frézovania drážok, pomocou trochoidnej dráhy nástroja. Generovanie dráhy sa realizovalo pomocou rôznych CAM softvérov, kde boli nastavené procesné parametre.

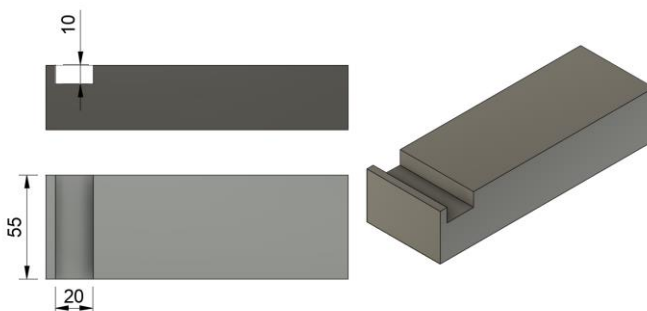
Pre generovanie dráh boli použité programy FUSION, SolidCAM a CATIA (v tabuľke označené ako A, B a C).

*Tabuľka 3. 1 Nastavenie experimentov*

Číslo experimentu	AM	Spôsob frézovania	Krok s [mm]
1	A	Súbežné	0,2
2	A	Súbežné	0,6
3	A	Súbežné	1
4	A	Nesúbežné	0,2

5	A	Nesúbežné	0,6
6	A	Nesúbežné	1
7	B	Súbežné	0,2
8	B	Súbežné	0,6
9	B	Súbežné	1
10	B	Nesúbežné	0,2
11	B	Nesúbežné	0,6
12	B	Nesúbežné	1
13	C	Súbežné	0,2
14	C	Súbežné	0,6
15	C	Súbežné	1
16	C	Nesúbežné	0,2
17	C	Nesúbežné	0,6
18	C	Nesúbežné	1

Experimenty prebiehali formou frézovania drážok, s určenými rozmermi ako znázorňuje obrázok 3.1. Frézovalo sa 18 drážok, rozdelených do troch skupín.



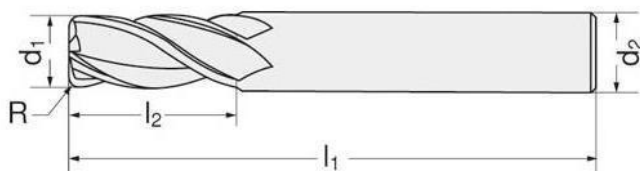
*Obr. 3.1 Znárodnenie drážky frézovanej v praktickej časti (s rozmermi v mm)*

### 3.2 Nástroj

Pre obrábanie drážok boli použité rovnaké nástroje tak, aby sme eliminovali ďalšie faktory, ktoré by mohli ovplyvniť výsledky experimentov. Pre každú skupinu dráh, generovanú rovnakým CAM softvérom bol použitý jeden nástroj, dokopy teda 3 nástroje Na obrázku je znázornený nástroj (Obr. 3.2) s



popisom jednotlivých konštrukčných rozmerov (Tabuľka 3.2). Pre obrábanie drážok boli použité rovnaké nástroje tak, aby sme eliminovali ďalšie faktory.

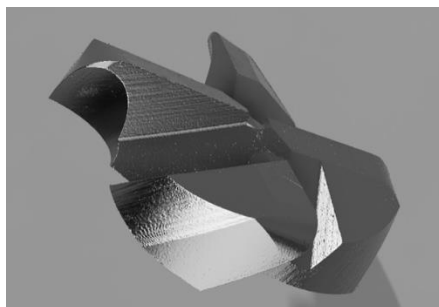


Obr. 3.2 Nástroj použitý pri experimentoch

Tabuľka 3.2 Parametre nástroja udané výrobcom

Parameter	Veľkosť [mm]
D1	10
D2	10
R	1
L1	22
L2	75

Použitými nástrojmi boli frézy so štyrmi reznými hranami s konštantným sklonom skrutkovice  $40^\circ$ . Frézy sú vyrobené zo spekaného karbidu a povlakované AlTiN. Výrobca ich odporúča na obrábanie ocele tvrdosti až 52 HRC a pevnosti max. 1600 MPa. Sú teda vhodné pre náš experiment. Pred obrábaním boli nástroje naskenované (Obr. 3.3) aby bolo možné ich následné skúmanie.



### 3.3 Obrábaný materiál

Obrábaným materiálom bude oceľ 15 142.7 (zušľachtená), resp. 42CrMo4/AISI 4140. Jedná sa o legovanú oceľ s vysokým obsahom chrómu a molybdénu (Tabuľka 3.3), tiež je známa svojimi vynikajúcimi mechanickými vlastnosťami.

Tabuľka 3.3 Chemické zloženie materiálu 42CrMo4

označenie	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	S [%]	Iné prvky
42CrMo4	0,42	0,25	0,75	1,10	0,22	<0,035	(Pb)

Na experimenty bol zvolený daný materiál vďaka svojej zvýšenej húževnatosti a vlastnosti nevytvárať nárastok. Tento materiál je ideálny pre množstvo použití, kde je kľúčová vyššia odolnosť a schopnosť odolať opotrebeniu. Svoje využitie nájde v automobilovom, leteckom ale aj energetickom priemysle. Medzi bežné využitia tejto ocele patria komponenty ako hriadele, ozubené kolesá, upínacie zariadenia, držiaky nástrojov, skľučovadlové čeluste, vretená, vodiace tyče či kľukové hriadele a podobne. Pre dosiahnutie požadovaných vlastností sa často materiál ďalej tepelne spracuje.

Materiál sa bude obrábať zušľachtený (po kalení a popúšťaní) na pevnosť 900 až 1200 MPa. Má veľmi dobré fyzikálne vlastnosti, tvrdosť materiálu je približne 300 HBW, ťažnosť 12 % a minimálna hodnota medze klzu dosahuje 569 MPa.

### 3.4 Obrábací stroj

Experimenty trochoidného frézovania prebiehali v priestoroch laboratórií Katedry obrábania a výrobnjej techniky. Samotné obrábanie drážok sa vykonávalo na frézovacom centre HURCO VMX30t (Obr. 3.4). Frézovacie centrum dovoľuje rozsah frekvencie otáčania vretena od  $10 \text{ min}^{-1}$  až do  $12\,000 \text{ min}^{-1}$ . Maximálne rýchlosti v rámci x a y osí sú  $35 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  a v ose z  $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Generovanie dráh prebiehalo v CAM softvéroch. Pre experiment boli vybrané tie CAM softvéry, ktoré okrem trochoidného frézovania poskytovali aj

postprocesor pre konkrétny stroj. Výber bol zúžený na tri softvéri, z ktorých boli úspešne vygenerované NC programy pre experimenty. Použitie ďalších softvérov, ako napr. Autodesk PowerMill, ovplyvnilo práve použitie postprocesora, ktorým nebolo možné generovať NC program vhodný pre HURCO.



*Obr. 3.4 CNC Obrábacie centrum HURCO VMX30t*

#### **4 Vyhodnotenie experimentov**

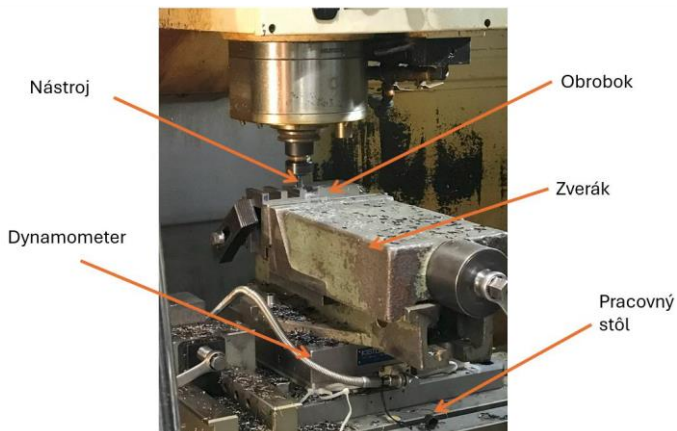
Táto kapitola sumarizuje a analyzuje výsledky uskutočnených experimentov, ktoré boli navrhnuté s cieľom analyzovať proces vysokoproduktívneho obrábania. Na začiatku sú spomenuté rezné sily, ktoré ovplyvňujú životnosť nástroja a celkové zaťaženie stroja, čo sa môže prejavíť na nákladoch spojených s nákupom nástrojov, resp. pri údržbe stroja. Ďalšia časť kapitoly sa venuje kvalite obrobeného povrchu, ktorá priamo súvisí s efektívnosťou jednotlivých procesov výroby. V závere kapitoly sa nachádza podrobná analýza výsledkov získaných meraním a výpočtami. Výsledky sú porovnávané so stanovenými cieľmi a očakávaniami, pričom sa identifikujú trendy a vzory v dátach. Diskutuje sa o účinnosti zvolených techník a faktorov ovplyvňujúcich kvalitu obrábania a efektívnosť procesu. Kapitola tiež zahŕňa identifikáciu chýb,

nepresností a možností ďalšieho zlepšenia. Na záver sú prezentované hlavné závery a odporúčania pre budúce experimenty či aplikácie.

#### 4.1 Vyhodnotenie rezných síl

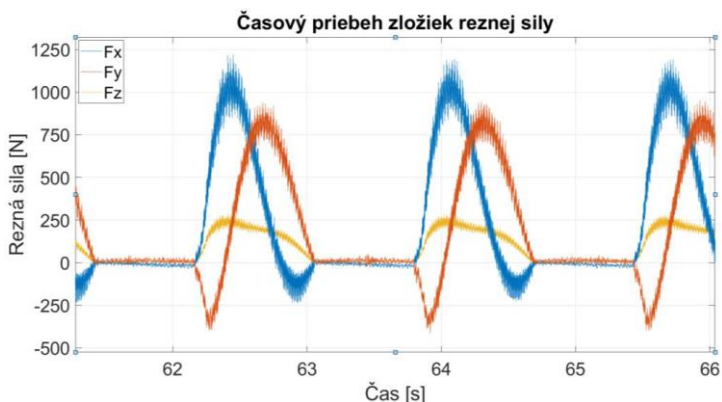
Vyhodnotenie rezných síl pri obrábaní bolo jedným z cieľov práce. Pre dôsledné porovnanie experimentov boli údaje spracované do tabuliek a grafov.

Rezné sily sa merali priamo pri obrábaní pomocou trojzložkového dynamometra KISTLER 9255 A. Dynamometer bol upevnený na pracovnom stole, ako je prezentované na obrázku (Obr. 4.1).



*Obr. 4.1 Uloženie obrobku s dynamometrom počas obrábania*

Pri vyhodnocovaní rezných síl sme vzali do úvahy priebeh rezných síl pri trochoidnom frézovaní (Obr. 4.2) a zamerali sa na maximálne hodnoty zložiek rezných síl. Z priebehu rezných síl môžeme vidieť že sily nie sú konštantné a ich hodnoty sa menia vplyvom rotácie nástroja. Vyhodnocovať teda priemer, resp. porovnávať jednotlivé experimenty na základe priemerných hodnôt by mohlo negatívne ovplyvniť závery.



Obr. 4.2 Časový priebeh zložiek reznej sily pri 2 rotáciách nástroja exp. 7 (programované v SolidCAMe, súbežné frézovanie, krok trochoidy  $s=0,2$  mm )

Generovanie dráh malo svoje špecifické nastavenia a možnosti v každom CAM softvéri. Softvér, použitý na generovanie dráh pre experimenty skupiny A, používal tzv. adaptívne obrábanie. Dráha generovaná pre túto skupinu experimentov, vykazuje plynulejšie dráhy na bočných stranách drážky. Môžeme teda predpokladať, že kvalita ľavej aj pravej bočnej strany drážky bude opracovaná v porovnateľnej kvalite.

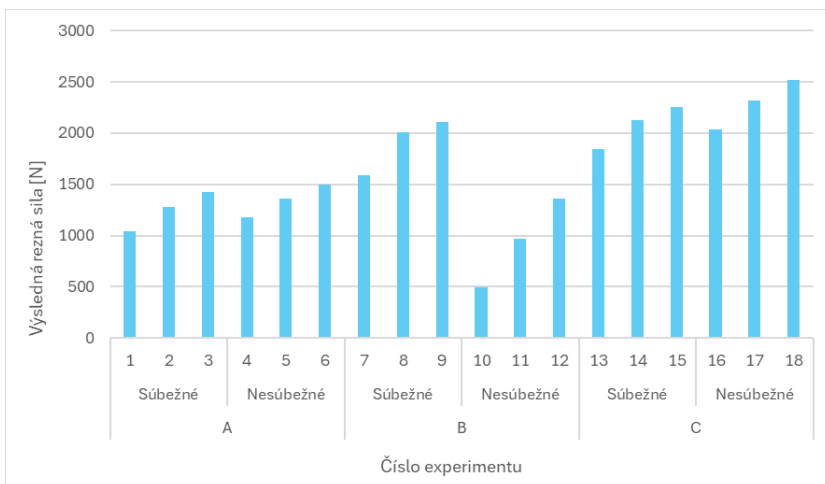
Pre prehľad hodnôt všetkých experimentov bola vytvorená tabuľka (Tabuľka 4.1), ktorá obsahuje maximálne aj minimálne hodnoty zložiek reznej sily. Ako je vidieť z grafov časových priebehov, zložky reznej sily pôsobia počas jedného záberu zároveň v kladnom aj zápornom smere. Je preto štatisticky významné poznať celý rozsah reznej sily (resp. hodnotu). V ďalšom stĺpci je preto vypočítaný súčet A (súčet absolútnych hodnôt), ako znázornenie amplitúdy, ktorá prezentuje celkové silové zaťaženie od najnižšej zápornej po najväčšiu kladnú hodnotu zložky reznej sily.

Tabuľka 4.1 Maximálne a minimálne hodnoty nameraných zložiek reznej sily pre všetky experimenty

Číslo exp.	Fx max	Fx min	A	Fy max	Fy min	A
1	804.67	-168.36	973.03	624.45	-371.98	996.43

2	960.62	-184.23	1144.85	805.14	-432.24	1237.37
3	1073.84	-192.58	1266.42	891.38	-489.79	1381.18
4	853.85	-117.38	971.24	783.77	-393.37	1177.14
5	993.20	-113.97	1107.17	896.01	-488.56	1384.57
6	1102.49	-108.31	1210.79	968.81	-567.19	1536.01
7	1221.20	-246.20	1467.40	971.07	-371.50	1342.58
8	1585.12	-300.83	1885.95	1176.81	-452.52	1629.33
9	1654.30	-314.65	1968.94	1253.45	-509.51	1762.95
10	361.16	-79.83	440.98	332.62	-122.96	455.58
11	788.52	-96.58	885.10	528.92	-271.53	800.45
12	1102.82	-119.64	1222.46	761.49	-375.35	1136.84
13	1472.42	-293.75	1766.17	1048.76	-384.59	1433.35
14	1716.05	-331.85	2047.90	1199.60	-439.48	1639.09
15	1782.66	-355.40	2138.07	1321.47	-482.20	1803.67
16	1654.43	-282.22	1936.64	1118.26	-703.65	1821.91
17	1904.84	-264.18	2169.02	1247.17	-864.04	2111.22
18	2081.95	-265.17	2347.12	1330.75	-819.07	2149.82

Pre jednoduchšie porovnanie bola z maximálnych hodnôt jednotlivých zložiek vypočítaná celková rezná sila (Obr. 4.3). Výsledné rezné sily pri trochoidnom frézovaní nadobudli hodnoty od 498 N po 2523 N, čo predstavuje široký rozsah síl. Najnižšia rezná sila (exp. č. 10) bola ovplyvnená najnižšou šírkou rezu ( $a_{e\max}$ ) ovplyvnenou samotným výpočtom pri generovaní dráhy, kvôli zmene smeru trochoidného frézovania. Toto malo za následok (v porovnaní s exp. č. 7 s rovnakými parametrami pri opačnom smere frézovania) násobné predĺženie času obrábania a zníženie výslednej reznej sily. Najväčšia hodnota výslednej reznej sily bola pri experimente č. 18 (2523 N) pri kroku  $s = 1\text{mm}$  (podľa Tabuľka 3.1).



Obr. 4.3 Graf výslednej reznej sily  $F$  pre všetky skupiny experimentov

## 4.2 Vyhodnotenie kvality povrchu dna drážok

Drsnosť a vlnitosť bola meraná na optickom mikroskope Alicona InfiniteFocus G5. Technológia Focus Variation poskytuje takmer neobmedzený rozsah merateľných povrchov. Pre komplexné výsledky sme porovnávali okrem priamkovej aj plošnú drsnosť, aby sme mohli komplexne zhodnotiť vplyv jednotlivých nastavení dráh na kvalitu obrobeneho povrchu.

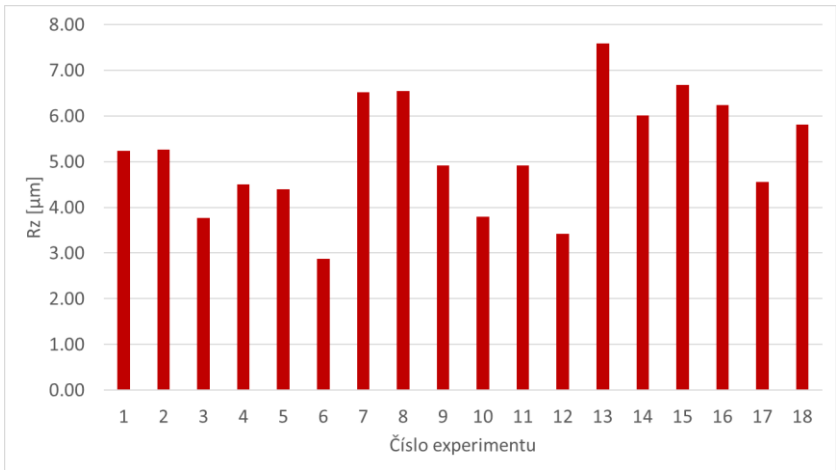
*Tabuľka 4.2 Prehľad vyhodnocovaných parametrov drsnosti, vlnitosti a primárneho profilu pre všetkých 18 experimentov*

Číslo experimentu	Ra	Rz	Sa	S10z	Pz	Wz
1	0.8562	5.2391	0.8473	11.2231	5.7273	1.2903
2	0.7974	5.2576	0.9018	11.3015	6.2404	1.6033
3	0.5956	3.7651	0.7804	11.5031	4.6093	0.8507
4	0.6544	4.4958	0.7925	10.6601	5.4873	1.4571
5	0.6671	4.3914	0.8301	10.6168	5.1791	1.1788

6	0.4970	2.8782	0.6191	7.6964	3.8157	1.1866
7	1.0419	6.5123	1.1488	12.5984	8.3325	3.2494
8	1.1673	6.5417	1.1673	11.8928	10.7631	4.4578
9	0.9752	4.9185	1.0038	10.0391	10.9737	6.1626
10	0.6428	3.8004	0.6188	9.1444	4.0673	0.4206
11	0.7130	3.8602	0.6494	6.0089	5.5800	0.6628
12	0.5301	3.1997	0.5629	7.0003	4.4959	1.4739
13	1.5192	7.5911	1.4080	13.5931	12.8769	5.3985
14	1.1319	6.0116	1.4218	16.6572	13.6895	8.7073
15	1.2366	6.6852	1.2692	15.0079	13.1565	5.6696
16	0.9437	6.2355	1.2000	15.3941	7.8008	2.3845
17	0.7391	4.5582	1.1626	14.2600	7.6775	3.4583
18	0.8899	5.8114	1.0873	15.0396	8.5756	2.3104

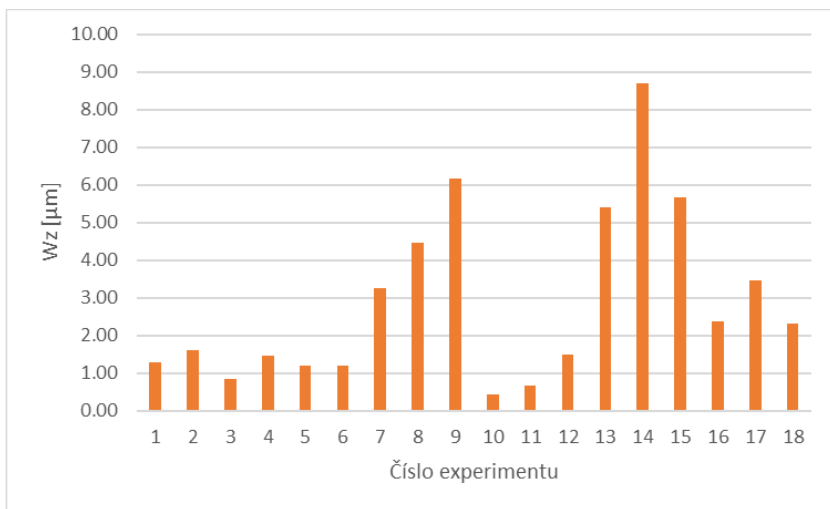
Graf, parametra drsnosti Rz (Obr. 4.4), prezentuje hodnoty 18 experimentov kde môžeme vidieť klesajúcu drsnosť Rz so zväčšujúcim sa krokom trochoidy  $s$ . Experiment č. 6 vykazuje najmenšie hodnoty drsnosti Rz aj S10z (krok trochoidy  $s = 1$  mm, nesúbežné frézovanie). Namerané hodnoty parametra Rz pri skupine B s krokom trochoidy  $s$  klesali rovnako ako pri skupine A. Najnižšiu hodnotu drsnosti Rz (zo skupiny B) dosahuje experiment č. 12 ( $s$  krokom trochoidy  $s = 1$  mm a frézovaný nesúbežným spôsobom). Parametre drsnosti Rz pri experimentoch zo skupiny C vykazujú najvyššie hodnoty spomedzi všetkých troch skupín. Parameter Rz pri experimente číslo 13 dosahoval hodnoty 7,5  $\mu\text{m}$ , čo je zároveň najvyššia hodnota.





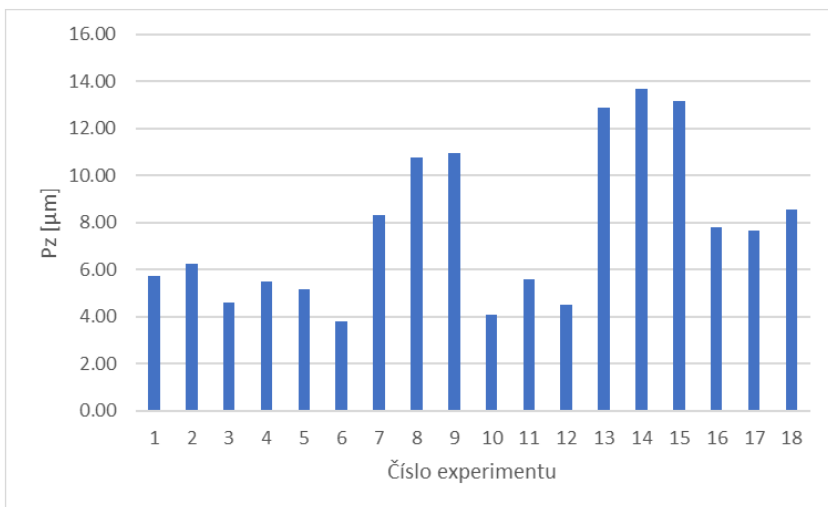
*Obr. 4.4 Parameter drsnosti Rz plochy dna drážky pre všetky experimenty*

Graf vlnitosti  $W_z$  (Obr. 4.5) plochy dna drážok vykazuje najväčšiu hodnotu pri experimente číslo 14, ktorý patrí do skupiny C, obrábaný súbežným frézovaním s krokom trochoidy  $s = 0,6$  mm. Pri experimentoch 7 až 9 môžeme sledovať nárast hodnoty parametra  $W_z$ , čo spôsobuje zvyšovanie hodnoty kroku trochoidy. Pri ďalších experimentoch je zaujímavé pozorovať, že pri rovnakých nastaveniach (experimenty 1 až 3, 13 až 15 a 16 až 18, kde sa mení len krok trochoidy  $s$ ) sú dosahované hodnoty vlnitosti menšie pri maximálnom zvolenom kroku 1 mm. Podobný charakter vykazovali aj drsnosti pri daných experimentoch.



*Obr. 4.5 Parameter vlnitosti Wz plochy dna drážky pre všetky experimenty*

Parameter Pz (Obr. 4.6) primárneho profilu vykazuje podobný charakter ako predchádzajúci graf vlnitosti meraných vzoriek. Avšak medzi jednotlivými experimentami nie sú tak výrazné rozdiely. Tiež môžeme vidieť rozdiel medzi súbežným a nesúbežným frézovaním a taktiež rozdielny charakter pri jednotlivých skupinách experimentov. Najnižšie hodnoty dosahuje skupina A experimentov, programovaných v softvéri Fusion. Ďalšie dve skupiny vykazujú podobný charakter, kde pri súbežnom frézovaní sú hodnoty vyššie ako pri nesúbežnom (to platí rovnako ako pri vlnitosti). Najvyššie hodnoty, a teda z tohto pohľadu najmenej kvalitný povrch, sú namerané pri experimentoch číslo 13 až 15. Tieto boli programované v softvéri CATIA, obrábané súbežným frézovaním. Experimenty obrábané nesúbežným spôsobom frézovania (14 až 16) vykazujú takmer o polovicu nižšie hodnoty.



*Obr. 4.6 Parameter primárneho profilu Pz dna drážky pre všetky experimenty*

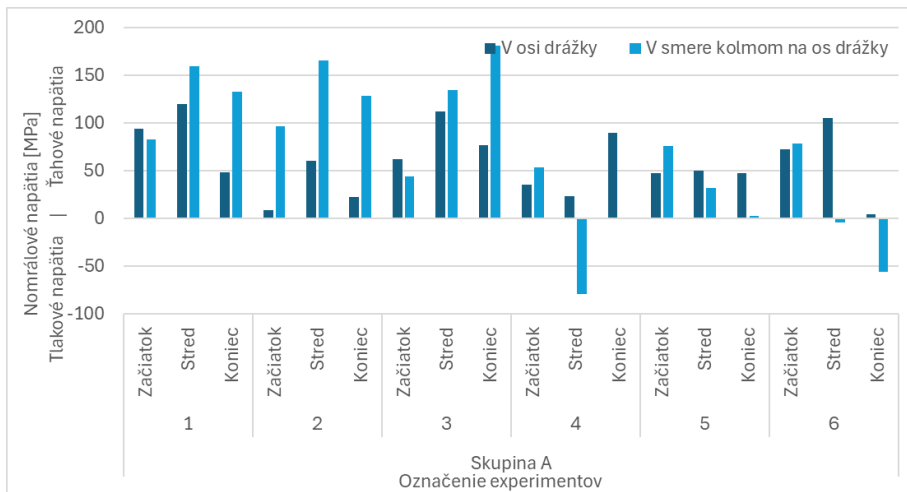
V dizertačnej práci sú, okrem povrchov dna drážok, vyhodnotené taktiež bočné steny drážok. Nakoľko sme po obrábaní pozorovali značne rozdielne boky drážok, zahrnuli sme do výsledkov experimentov aj porovnanie drsnosti bokov drážok. Ako bolo spomenuté v teoretickej časti, trochoidné frézovanie sa používa pri obrábaní foriem – kedy môže byť výhodné zvoliť parametre, pri ktorých bude aj časť obrobená valcovou časťou frézy dosahovať nízke hodnoty drsnosti, resp. vlnitosti.

### **4.3 Vyhodnotenie zvyškových napätí dna drážok**

Ďalším zo skúmaných parametrov v dizertačnej práci boli zvyškové napätia. Zvyškové napätia boli vyhodnocované po obrábaní nedeštruktívnou metódou pomocou zariadenia Proto iXRD. Hodnotenie zvyškových napätí v materiáli po obrábaní je kľúčové pre zabezpečenie kvality povrchu a jeho životnosti v prevádzke. Vo všeobecnosti môžeme tvrdiť, že tlakové napätia sú výhodnejšie pre zlepšenie únavovej pevnosti a odolnosti proti vzniku trhlín. Naopak, ťahové napätia môžu byť problematické a od určitej hodnoty

spôsobovať vznik trhlín. Napätia s hodnotou blízkou nule naznačujú, že materiál je stabilný a vhodný pre prípady, kedy je to vhodné pre jeho použitie.

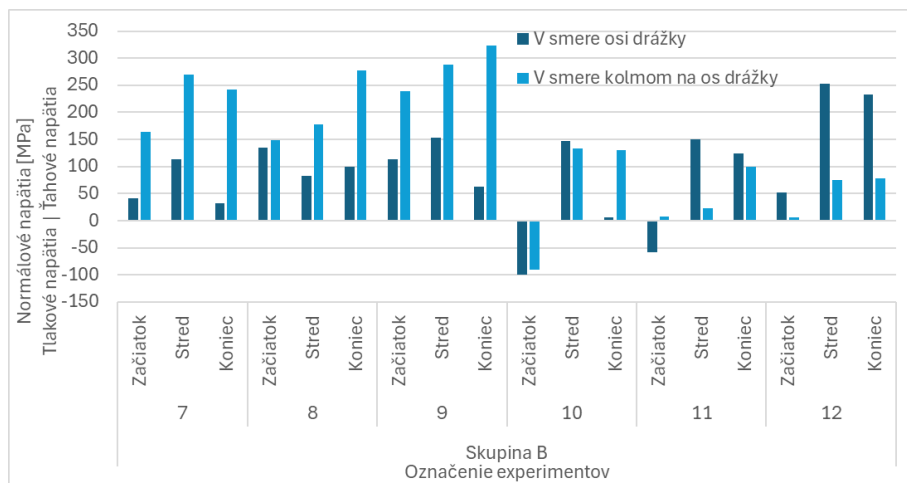
Zvyškové napätia boli merané v dvoch smeroch, a to v smere osi a kolmo na os frézovanej drážky. V každom smere boli vykonané tri merania, na začiatku, v strede a na konci drážky.



*Obr. 4.7 Graf normálových zvyškových napätí, pre skupinu experimentov A meraných v oboch smeroch (v smere osi obrábanej drážky a v smere kolmom na os drážky)*

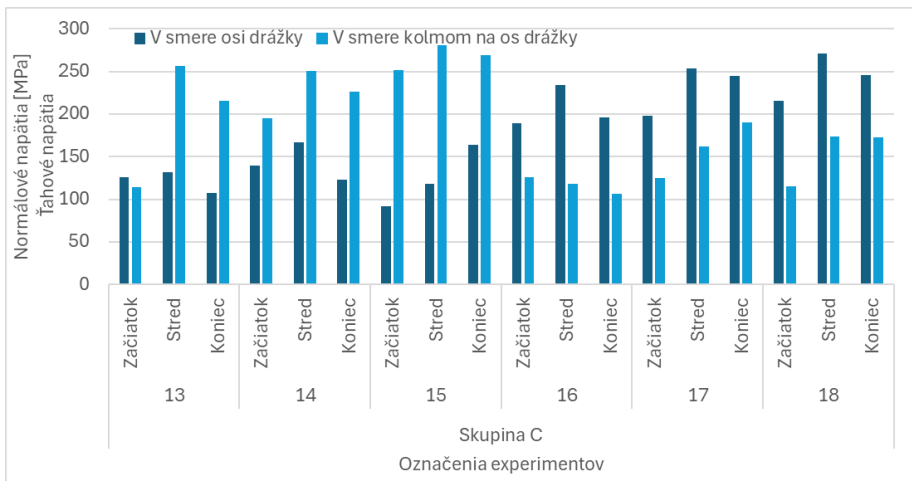
Prvá skupina experimentov (Obr. 4.7) vykazuje prevažne ťahové normálové napätia v oboch meraných smeroch. Pri štyroch zo šiestich experimentov môžeme vidieť vyššie hodnoty napätí namerané v strednej časti drážky. Tiež môžeme sledovať pokles napätí meraných v smere kolmom na os drážky pri experimentoch štyri až šesť, ktoré boli frézované nesúbežným spôsobom. Najväčšiu hodnotu vykazuje experiment číslo tri 181 MPa. Ak berieme do úvahy spodnú hranicu pevnosti materiálu (900 MPa) dostávame sa na hodnotu približne 20% pevnosti materiálu.

Skupina experimentov B (Obr. 4.8) dosahuje prevažne ťahové normálové napätia, v smere kolmom na os drážky (najmä pri experimentoch sedem až deväť) až do 300 MPa. Tieto hodnoty nie sú pre zvolený materiál kritické, avšak môžu spôsobiť vznik trhlín, čím by došlo k znehodnoteniu súčiastky. Tieto napätia, pokiaľ vzniknú pri hrubovacej operácii, je možné odstrániť pri dokončovaní. V tom prípade je dôležité zvoliť prídavok pre obrábanie tak, aby bola vrstva ovplyvnená ťahovými napätiami odstránená.



*Obr. 4.8 Graf normálových zvyškových napätí, pre skupinu experimentov B meraných v oboch smeroch (v smere osi obrábanej drážky a v smere kolmom na os drážky)*

Pre skupinu C sú charakteristické ťahové normálové napätia (Obr. 4.9). Pri súbežnom frézovaní (exp. č. 13 až 15) prevládajú napätia v smere kolmom na os frézovanej drážky. Naopak, pri nesúbežnom frézovaní (exp. č. 16 až 18) jasne prevládajú napätia v smere osi drážky.

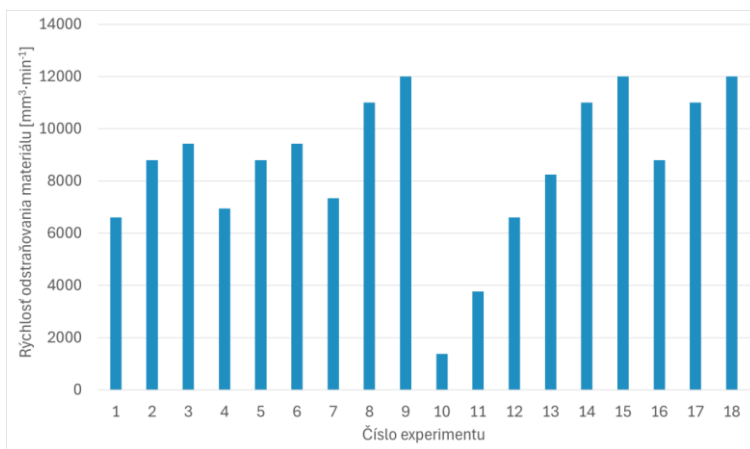


Obr. 4.9 Graf normálových zvyškových napätí, pre skupinu experimentov C meraných v oboch smeroch (v smere osi obrábanej drážky a v smere kolmom na os drážky)

#### 4.4 Vyhodnotenie produktivity

Pre hodnotenie produktivity bol stanovený parameter – rýchlosť odstraňovania materiálu. Táto charakteristika bola inšpirovaná experimentom, kde autori porovnávali rozdielne trochoidné dráhy. Týmto faktorom sa metódy charakterizujú len z jedného hľadiska a nezvažujú sa ovplyvňujúce faktory (tepelné a mechanické vplyvy, vibrácie, spotreba energie atď.), ktoré majú vplyv na bezpečnosť procesu, životnosť nástroja a celkový vývoj nákladov na obrábanie. (Szalóki, 2012)

Po obrábaní boli na základe kamerových záznamov doplnené časové údaje k jednotlivým experimentom. Obrábané drážky mali rovnaké rozmery (20x10x55 mm) a výpočtom sme dostali hodnoty, podľa ktorých môžeme vyhodnotiť najefektívnejší experiment z pohľadu času obrábania (Obr. 4.10).



*Obr. 4.10 Porovnanie rýchlosti odstraňovania materiálu pri jednotlivých experimentoch*

Analýza rýchlosti odstraňovania materiálu (MRR) je pre náš výskum najvhodnejším ukazovateľom. V niektorých štúdiách sa uvádza ako jednotka  $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ , avšak najčastejšie je používaná jednotka  $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Preto sme zvolili túto jednotku a hodnoty porovnávali v daných jednotkách pre všetky experimenty. Ako najmenej produktívny vyšiel jednoznačne experiment č. 10, pri ktorom bola dráha generovaná softvérom SolidCAM s protibežným frézovaním a krokom trochoidy  $s = 0,1$  mm. Pri týchto parametroch je objem odobratého materiálu  $1375 \text{ mm}^3$  za jednu minútu. Najproduktívnejšie vyšli tri experimenty (č. 9, 15 a 18), kde bol objem odobratého materiálu za jednu minútu až  $12\,000 \text{ mm}^3$ .

## **5 Prínosy práce**

### **5.1 Prínosy pre vedu a teóriu**

Výskum v oblasti vysokoproduktívnych technológií sa už dlhé roky venuje zaťaženiu a ďalším parametrom. Pre trochoidnú dráhu je však dôležité začať od jej vzniku – programovania NC dráhy do stroja. Výskum preukázal vplyv metódy generovania dráhy nielen na sily pôsobiace pri obrábaní, ale aj na kvalitu povrchu a čas obrábania.

Prekladaný výskum tvorí pevný základ pre budúci výskum v danej oblasti, nakoľko bol vybraný softvér, ktorý umožňuje najväčšie množstvo zmien. Možnosti tohto CAM softvéru je možné ďalej otestovať a zistiť ich vplyv nielen na zaťaženie, ale aj produktivitu samotného procesu výroby.

### **5.2 Prínosy pre prax**

Vysokoproduktívne metódy obrábania pri frézovaní zahŕňajú moderné techniky a technológie, ktoré zvyšujú efektivitu výroby a kvalitu spracovania. Tieto metódy sa často vyznačujú vyššou rýchlosťou, optimalizáciou nástrojov a použitím sofistikovaných stratégií rezania.

Okrem ekonomického významu vysokoproduktívnych metódy je prínosom aj efektívnejšie využívanie zdrojov a znižovanie odpadu v strojárkej výrobe. Príspevok k vývoju ekologických výrobných postupov, resp. technológií, ktoré znižujú dopad na životné prostredie je v súčasnosti veľmi oceňovaný. Trochoidné frézovanie ako hrubovacia technológia dosahuje vysokú produktivitu aj bez použitia procesnej kvapaliny. Zvýšením produktivity (v našom prípade rýchlosti úberu materiálu) sa znižuje spotreba elektrickej energie stroja, čo prispieva nielen k ekonomickej, ale aj ekologickej stránke výroby.

Štatistická analýza vykonaná v práci môže tvoriť základ pre budúce simulácie, vytvorené v rámci projektu KEGA, ktorého súčasťou bola aj táto dizertačná práca. Regresné rovnice, vytvorené na predikciu parametrov drsnosti, môžu byť ďalej použité a verifikované v ďalších výskumoch.



## 6 Záver

Práca potvrdila hypotézy z predchádzajúcich experimentov kde bolo skúmané zaťaženie, resp. rezné sily pôsobiace pri trochoidnom frézovaní. Autori z výskumov spomínaných v piatej kapitole sa zväčša zameriavali na skúmanie samotnej nelineárnej dráhy. Náš výskum bol viac zameraný na jej generovanie, umožňujúce v jednotlivých CAM softvéroch rozdielne nastavenia. Zatiaľ, čo pre experimenty zo skupiny A bolo možné definovať maximálnu dovolenú šírku rezu, pre experimenty zo skupiny B bolo možné nastaviť uhol záberu  $\beta$ . Pre skupinu experimentov C sme boli schopní nastaviť konštantný krok trochoidy, čo umožňovalo dosiahnuť porovnateľné výsledky v rámci skupiny experimentov. Nakoľko pri skupine B sa generovanie dráhy riadilo nastavením uhla záberu, došlo k zásadnej zmene šírky rezu ( $a_{\text{emax}}$ ). Táto skutočnosť mala vplyv na všetky skúmané parametre. Je preto dôležité, pri analýze výsledkov jednotlivých experimentov, prihliadať na komplexné hodnotenie. Výskum mal za úlohu skúmať aplikáciu jednotlivých CAM softvérov, a teda sme nevstupovali do generovania NC programu, len sme zvolili čo najporovnateľnejšie vstupné podmienky. Potvrdila sa hypotéza, že so zväčšujúcim sa krokom trochoidy s dochádza k nárastu zložiek reznej sily. Taktiež boli preukázané vplyvy skúmaných parametrov na vlnitosť a primárny profil.

Analýza vplyvu skúmaných parametrov (CAM, smer rotácie a krok trochoidy) ukázala, že vplyv viac ako 50% na celkovú reznú silu, dosahuje výber samotného CAM softvéru. Táto skutočnosť potvrdzuje význam pokračovať a prehľbovať počiatočnú teóriu, že je dôležité pred obrábaním zvoliť najvhodnejší CAM softvér pre konkrétnu aplikáciu. Aplikácia jednotlivých softvérov neodráža ich celkovú funkčnosť, boli vybrané na základe dostupného postprocesora a licencie, resp. možnosti programovať samotnú trochoidnú dráhu. Taktiež každý softvér umožňoval odlišné nastavenia, či už pre dráhu, samotné nájazdy, či rôzne špecifické možnosti (ako zdvih z-ovej osi pri druhej časti kruhovej dráhy, kde nástroj nie je v zábere). Pre čo najdôslednejšie porovnanie boli vybrané

ekvivalentné parametre – tam kde to bolo možné – resp. vypnuté funkcie, ktoré neposkytovali alternatívne programy.

Voľba spôsobu frézovania (aj keď v mnohých štatistických prehľadoch vyšla ako najmenej významná, z pohľadu meniacich sa faktorov) je dôležitou súčasťou obrábania a zásadne mení rozloženie reznej sily počas obrábania. Jeho vplyv v niektorých prípadoch ovplyvňovala voľba CAM softvéru (napríklad pri skupine experimentov B – kde pri zmene na nesúbežné frézovanie došlo k spomínanej zmene šírky záberu). Tiež je pozorovateľný jav, kedy pri jednej metóde dochádza ku kvalitnejšiemu opracovaniu na jednej strane drážky – je teda potrebné brať do úvahy tento moment a pri hrubovaní ponechať väčší prídavok pre dokončovacie operácie, alebo zvolíť taký spôsob frézovania, ktorý aj pri vysokom objeme odoberaného materiálu vytvorí povrch dostatočnej kvality (viď. Tabuľky s nameranými drsnosťami).

Krok trochoidy, ktorý ovplyvňuje objem odobratého materiálu (produktivitu obrábacieho procesu) je priamoúmerný zaťaženiu nástroja. Je teda zrejmé, že so zvyšujúcou sa hodnotou rastú aj zložky reznej sily, čo potvrdil aj výskum. V štatistickej časti práce boli vypracované optimalizačné grafy, ktoré znázorňujú aké nastavenie tohto parametra umožňuje dosiahnuť požadovanú kvalitu opracovaného povrchu.

Rezné sily pôsobiace počas obrábania boli merané priamou metódou, štatisticky bol zistený ako najvplyvnejší faktor CAM softvér a najmenší vplyv (avšak štatisticky stále významný) bol spôsob obrábania (súbežné a nesúbežné frézovanie). Ako znázorňujú priložené priebehy zložiek reznej sily (Príloha A), obrábanie bolo stabilné a zložky nevykazovali žiadne nestabilné charakteristiky, ktoré by mohli mať dopad na životnosť nástroja. Experimenty zo skupiny C, kde obrábanie prebiehalo lineárnymi interpoláciami, vykazovali najväčšie rezné sily a taktiež experiment s najväčšou vypočítanou výslednou reznou silou bol experiment číslo 18 (skupina C, nesúbežné frézovanie, krok trochoidy  $s = 1$  mm).

Zvyškové napätia boli merané röntgenovou difraktometriou, v smere osi frézovanej drážky aj v smere kolmom na os drážky. Hodnoty normálových napätí nepresahovali hodnotu 350 MPa, môžeme teda povedať, že išlo o bezpečné napätia

Drsnosti boli merané nielen na ploche dna obrábaných drážok, ako v predchádzajúcich experimentoch, ale pre doplnenie boli porovnané taktiež obidve bočné steny drážok. Keďže ako najproduktívnejšie dosiahli hodnoty tri experimenty (9,15,18), drsnosť pri týchto bola prekvapivá. Zatiaľ čo experiment č.15 vykazoval jedny z najhorších drsností, pri experimente 9 sa najvyšší krok prejavil na zhoršenej vlnitosti. Zaujímavosťou je exp. č. 18, ktorý s najvyššou produktivitou dosahoval priemerné drsnosti spomedzi meraných experimentov – môžeme teda povedať, že z pohľadu produktivity ide o najlepšiu voľbu s prihliadaním na kvalitu opracovaného povrchu dna drážky (resp. čelnej plochy).

## Najdôležitejšie literárne zdroje riešenej problematiky

Aydin M. a Koklu U., „Analysis of cutting forces at different spindle speeds with straight and helical-flute tools for conventional-speed milling incorporating the effect of tool runout,“ *Mechanics based design of structures and machines*, zv. 52, (2), str. 867-893, 2022.

Davim J. P., *Integrity in Machining*, New York: Springer London Dordrecht Heidelberg, 2010, p. 215.

Drbúl M., Šajgalík M., Šemcer J., Czánová T., Petřkovská L. a Čepová L., *STROJÁRSKA METROLÓGIA A KVALITA POVRCHOV VYTVORENÝCH TECHNOLOGIAMI OBRÁBANIA, ŽILINA*, 2014.

Goméz G., Fernández D. L., Del Olmo A., Martinez De Pissón G. a Jimeno A., „Comparison between milling roughing operations in full slotting manufacturing: trochoidal, plunge and conventional milling,“ *IOP Conference Series. Material Science and Engineering: Bristol*, zv. 1193, 2021.

Jacso A., Lado Z., Phanden R. K., Sikarwar B. S. a Singh R. K., „Bézier curve-based trochoidal tool path optimization using stochastic,“ *Materials Today: Proceedings*, 78, str. 633-639, 2023.

Karkalos N., Karmiris-Obratański P., Kurpiel S., Zagórski K. a Markopoulos A., „Investigation on the Surface Quality Obtained during Trochoidal Milling of Aluminum Alloy,“ *MDPI - machines*, zv. 9, (4), p. 75, 2021.

Kónya G., Kovács Z. F. a Kókai E., „Milling of Nickel-based Superalloy by Trochoidal Strategies,“ rev. 2022 *IEEE 22nd International Symposium on Computational Intelligence and Informatics and 8th IEEE International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Science and Robotics (CINTI-MACRo)*, Budapest, Hungary, 2023.

Mičietová A. a Čilliková M., *Technológia - obrábanie, Žilina: EDIS - vydavateľstvo Žilinskej univerzity*, 2009.

Niaki F. A., Pleta A. a Mears L., „Trochoidal milling: investigation of a new approach on uncut chip thickness modeling and cutting force simulation in an alternative path planning strategy,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, str. 641–656, 2018.

Pleta A., Niaki F. A. a Mears L., „Investigation of chip thickness and force modelling of trochoidal,“ rev. 45th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 45, LA, USA, 2017.

Pleta A., Niaki F. A. a Mears L., „A comparative study on the cutting force coefficient identification,“ rev. 46th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 46, Texas, USA, 2018.

Szalóki I., „Can trochoidal milling be ideal?,“ rev. Manufacturing 2012 The XXI. Conference of GTE on Manufacturing and related technologies, Budapest, 2012.

Šajgalík M., Kušnerová M., Harničárová M., Valíček J., Czán A., Czánová T., Drbúl M., Borzan M. a Kmec J., Analysis and Prediction of the Machining Force Depending on the Parameters of Trochoidal Milling of Hardened Steel, Appl. Sci. 10(5), 1788, 2020.

Wagih M., Maher I. a Hassan M., „Investigating the effects of trochoidal milling parameters on the waviness and surface roughness of P20 alloy steel slots: Analytical and Experimental,“ 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3612266/v1

Zhang X., Peng F., Qiu F., Yan R. a Li B., „Prediction of cutting force in trochoidal milling based on radial depth of cut,“ Advanced Materials Research, 852, str. 457-462, 2014.

## **ANOTÁCIA**

Vysokoproduktívne metódy obrábania ako téma práce, predstavujú kľúčový aspekt v modernom priemysle, kde je dôležité dosahovať kvalitné výsledky pri minimálnom čase a nákladoch. Dizertačná práca sa zameriava na analýzu a optimalizáciu technológie trochoidného frézovania ako vysokoproduktívnej metódy obrábania. Výskum sa zameriava na analýzu vplyvu jednotlivých softvérov na výsledné zaťaženie nástroja a kvalitu obrobeného povrchu. Výsledky tejto práce poskytnú cenné poznatky pre priemyselné aplikácie v oblasti vysokoproduktívnych metód obrábania a prispievajú k ďalšiemu rozvoju efektívnych a inovatívnych technológií v oblasti obrábania.

## **RESUMÉ**

High-productivity machining methods, as the subject of this thesis, represent a key aspect in modern industry, where it is important to achieve quality results with minimum time and cost. The thesis focuses on the analysis and optimization of trochoidal milling technology as a high-productivity machining method. The research focuses on the analysis of the influence of different control software on the resulting tool load and the quality of the machined surface. The results of this thesis will provide valuable insights for industrial applications in the field of high-productivity machining methods and contribute to the further development of efficient and innovative machining technologies.