

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2025

Ing. Miroslav Matuš



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Miroslav Matuš

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Simulácia dynamických javov pri produktívnych výrobných
technológiách**

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 2025

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

Predkladateľ:

Ing. Miroslav Matuš

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.et Ing.Mgr. Petrů Jana, Ph.D. - FS VŠB - Technická Univerzita Ostrava, Strojnícka fakulta, 17. listopadu 15/2172, CZ - 708 33

3. doc. Ing. Marek Vrabel', PhD. - Strojnícka fakulta TU v Košiciach Park Komenského 12a, 042 00 Košice

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 30.6.2025

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa
25.08.2025 o 09:00 hod. v miestnosti BA 205 na SJF, Univerzitná 8215/1, 010
26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenu 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. Ing. Jozef Svetlík, PhD.
Strojnícka fakulta TUKE
Katedra výrobnej techniky a robotiky,
Letná 9, 040 01 Košice,
Slovensko
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

Práce publikované v zahraničních časopisech a zbornících

Bechný, Vladimír - **Matuš, Miroslav** - Joch, Richard - Drbúl, Mário - Holubják, Jozef - Czán, Andrej - Šajgalík, Michal - Markovič, Jaromír. *Design of an injection mould utilizing experimental measurements and reverse engineering* [elektronický dokument]. DOI 10.21062/mft.2023.072 In: *Manufacturing Technology*. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, 2023, Roč. 23, č. 5, s. [1-9]

Bechný, Vladimír - **Matuš, Miroslav** - Joch, Richard - Drbúl, Mário - Czán, Andrej - Cedzo, Miroslav - Krišák, Dominik. *The influence of orientation by SLM additive manufacturing process on surface integrity* [elektronický dokument]. DOI 10.1007/978-3-031-65656-9_21 In: *From Smart City to Smart Factory for sustainable future: conceptual framework, scenarios, and multidiscipline perspectives*. Cham: Springer Nature, 2024, s. 206-215

Bechný, Vladimír - Czán, Andrej - Holubják, Jozef - **Matuš, Miroslav** - Kozovy, Peter - Timko, Pavol - Beránek, Libor. *Roughness surface analysis of samples produced by the additive manufacturing process*. DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.200 In: *TRANSCOM 2023: 15th International scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport*. Amsterdam: Elsevier, 2023, s. 702-708

Joch, Richard - Šajgalík, Michal - Drbúl, Mário - Holubják, Jozef - Czán, Andrej - Bechný, Vladimír - **Matuš, Miroslav**. *The application of additive composites technologies for clamping and manipulation devices in the production process* [elektronický dokument]. DOI 10.3390/ma16103624 In: *Materials*. Bazilej: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023, Roč. 16, č. 10, s. [1-15]

Bechný, Vladimír - **Matuš, Miroslav** - Joch, Richard - Drbúl, Mário - Holubják, Jozef - Czán, Andrej - Šajgalík, Michal - Markovič, Jaromír. *Creating an injection mold through experimental analysis and reverse engineering* In: *Smart manufacturing engineering: international scientific journal*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2023, Roč. 4, č. 1, s. 14-22

Matuš, Miroslav - Bechný, Vladimír - Joch, Richard - Drbúl, Mário - Holubják, Jozef - Czán, Andrej - Novák, Martin - Šajgalík, Michal. *Dimensional precision of SLS-printed parts relative to model orientation in 3D printing process* In: *Smart manufacturing engineering: international*

scientific journal. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2023, Roč. 4, č. 1, s. 38-46

Matuš, Miroslav - Bechný, Vladimír - Joch, Richard - Drbúl, Mário - Holubják, Jozef - Czán, Andrej - Markovič, Jaromír - Šajgalík, Michal. *Dimensional accuracy of SLS-printed parts based on model orientation in the 3D printing process* In: *Smart manufacturing engineering: international scientific journal*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2024, Roč. 5, č. 1, s. 13-21

Matuš, Miroslav - Bechný, Vladimír - Šajgalík, Michal - Markovič, Jaromír - Drbúl, Mário - Cedzo, Miroslav - Joch, Richard - Krišák, Dominik. *Implementation of advanced techniques for quality assessment of metal parts produced by SLM technology* [elektronický dokument]. DOI 10.1007/978-3-031-65656-9_8 In: *From Smart City to Smart Factory for sustainable future: conceptual framework, scenarios, and multidiscipline perspectives*. Cham: Springer Nature, 2024, s. 78-88

Matuš, Miroslav - Bechný, Vladimír - Joch, Richard - Drbúl, Mário - Czán, Andrej - Šajgalík, Michal. *Identification of machine tool defects using laser interferometer* [elektronický dokument]. DOI 10.21062/mft.2024.052 In: *Manufacturing Technology*. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, 2024, Roč. 24, č. 3, s. 420-428

Joch, Richard - Cedzo, Miroslav - Czán, Andrej - Šajgalík, Michal - Holubják, Jozef - Drbúl, Mário - Markovič, Jaromír - **Matuš, Miroslav**. *Impact of chip breaker geometry on the performance of actively rotary monolithic turning tools* [elektronický dokument]. DOI 10.3390/ma18051154 In: *Materials*. Bazilej: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2025, Roč. 18, č. 5, art. no. 1154, s. [1-21]

Matuš, Miroslav - Šajgalík, Michal - Holubják, Jozef - Joch, Richard - Slabejová, Silvia - Czán, Andrej - Bechný, Vladimír. *Modelling and simulation of a compact sample of composite materials*. DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.203 In: *TRANSCOM 2023: 15th International scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport*. Amsterdam: Elsevier, 2023, s. 724-731

Matuš, Miroslav - Drbúl, Mário - Markovič, Jaromír - Šajgalík, Michal - Czán, Andrej - Cedzo, Miroslav - Joch, Richard - Novák, Martin - Petrů, Jana. *Optimization of zero-point setting for enhanced measurement*

accuracy [elektronický dokument]. DOI 10.21062/mft.2025.014 In: *Manufacturing Technology*. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, 2025, Roč. 25, č. 1, s. 95-102

Joch, Richard - Drbúl, Mário - Šajgalík, Michal - Holubják, Jozef - Czán, Andrej - Bechný, Vladimír - **Matuš, Miroslav**. *Utilizing additive composite technologies in the creation of clamping and handling equipment for manufacturing processes* In: *Smart manufacturing engineering: international scientific journal*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2023, Roč. 4, č. 1, s. 23-37

Kozovy, Peter - **Matuš, Miroslav** - Bechný, Vladimír - Holubják, Jozef - Joch, Richard - Šajgalík, Michal. *Analysis of tool load concerning the cross-sectional size of removed material* [elektronický dokument]. DOI 10.3390/jmmp8030092 In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. Bazilej: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024, Roč. 8, č. 3, s. [1-19]

Matuš, Miroslav - Bechný, Vladimír - Joch, Richard - Drbúl, Mário - Holubják, Jozef - Czán, Andrej - Novák, Martin - Šajgalík, Michal. *Geometric accuracy of components manufactured by SLS technology regarding the orientation of the model during 3D printing* [elektronický dokument]. DOI 10.21062/mft.2023.027 In: *Manufacturing Technology*. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, 2023, Roč. 23, č. 2, s. 233-240

Bechný, Vladimír - **Matuš, Miroslav** - Joch, Richard - Drbúl, Mário - Holubják, Jozef - Czán, Andrej - Šajgalík, Michal - Markovič, Jaromír. *Developing an injection mold via experimental analysis and reverse engineering* In: *Smart manufacturing engineering: international scientific journal*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2024, Roč. 5, č. 1, s. 36-42

Bechný, Vladimír - **Matuš, Miroslav** - Joch, Richard - Drbúl, Mário - Czán, Andrej - Šajgalík, Michal - Nový, František. *Influence of the orientation of parts produced by additive manufacturing on mechanical properties* [elektronický dokument]. DOI 10.21062/mft.2024.021 In: *Manufacturing Technology*. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, 2024, Roč. 24, č. 1, s. [1-8]

Čaká sa na publikovanie

Miroslav Matuš - Miroslav Cedzo - Michal Šajgalík - Mário Drbúl - Jaromír Markovič - Peter Špuro - Richard Joch - Libor Beránek (2025): *Metrological Methods and Advanced Techniques for Evaluating the Position of Threaded Holes in Accordance with Product Geometric Specification*

Peter Spuro - Andrej Czan - **Miroslav Matuš** - Michal Sajgalik - Miroslav Cedzo - Jozef Mrazik - Mario Drbul - Jozef Holubjak (2025): *The Influence of Heat Treatment Regimes on Residual Stresses in Tool Steel After Grinding*

Miroslav Matuš - Jaromír Markovič - Mário Drbúl - Michal Šajgalík - Peter Špuro, - Jozef Mrázik (2025): *Design of non-contact measurement methods and evaluation of the impact of surface layers on the mechanical properties of functional implant components*

V recenznom konaní

Miroslav Matuš - Michal Sajgalik - Peter Spuro - Richard Joch - Andrej Czan - and Libor Beranek (2025): *Evaluation of Efficiency and Print Quality in Metal Additive Manufacturing Using BJ, ADAM, and SLM Technologies*

Obsah

	Úvod	9
1	Súčasný stav problematiky	10
2	Tézy dizertačnej práce	13
3	Experimentálna časť	14
3.1	Návrh modelu	14
3.2	Úprava geometrie	15
3.3	Materiálová charakteristika	16
3.4	Aplikácia materiálu na model	17
3.5	Definovanie súradnicového systému	18
3.6	Aplikácia siete	18
3.7	Definícia okrajových podmienok	19
3.8	Okrajové podmienky simulácie	21
4	Vzájomné porovnanie numerických simulácií s reálnymi experimentami	22
4.1	Simulácie ocele 19 313.4	26
4.2	Okrajové podmienky numerickej simulácie ocele 19 313.4 a experimentálnych meraní	26
5	Vzájomné porovnanie numerických simulácií s reálnymi experimentami ocele 19 313.4	28
5.1	Analýza Von – Misesových napätí	31
5.2	Metodika modelu sústruženia	34
6	Prínosy práca	36
6.1	Prínosy pre vedu a teóriu	36
6.2	Prínosy pre prax	33
7	Záver	37

Úvod

Súčasný priemysel kladie čoraz vyššie nároky na produktivitu, efektivitu a kvalitu výrobných procesov. Neustále sa objavujú nové materiály s pokročilými fyzikálno-mechanickými vlastnosťami, ktoré vyžadujú inovácie v oblasti rezných nástrojov a technológií obrábania. Správna voľba nástroja, rezných podmienok a výrobnéj stratégie je kľúčová pre dosiahnutie vysokej kvality povrchu, dlhšej životnosti nástroja a celkovej efektivity výroby. Trieskové obrábanie si napriek rastúcemu počtu alternatívnych technológií udržiava dominantné postavenie vďaka svojej presnosti, flexibilita a schopnosti zabezpečiť požadovanú kvalitu aj pri zložitých tvaroch. Produktivita obrábania je výsledkom komplexného súboru faktorov – od výberu nástroja a jeho upnutia, cez nastavenie rezných parametrov, až po správne zostavený NC kód v prostredí CAM systémov. Rastúci význam v tomto kontexte zohrávajú simulácie výrobných procesov, ktoré umožňujú optimalizovať technológiu ešte pred samotnou realizáciou výroby, čím prispievajú k eliminácii chýb a znižovaniu nákladov.

Dizertačná práca sa zameriava na simuláciu a meranie dynamických javov, ktoré vznikajú počas procesu sústruženia. Hlavným cieľom je analyzovať a optimalizovať parametre obrábania s dôrazom na analýzu rezných síl, zlepšenie stability a predikovateľnosti procesu. V práci boli realizované numerické simulácie, ktoré boli verifikované experimentálnymi meraniami za identických okrajových podmienok. Tým sa zabezpečila objektivita porovnávania a konzistentnosť výsledkov. Simulácie umožnili detailne sledovať vývoj jednotlivých zložiek rezných síl pri zmene technologických parametrov, zatiaľ čo experimenty poskytli spätnú väzbu pre overenie modelu. Výsledky práce slúžia ako východisko pre návrh efektívnejších, stabilnejších a výkonnostne optimalizovaných obrábacích procesov v praxi.

1 Súčasný stav problematiky

V súčasnej dobe, keď sa technologický vývoj vo výrobe posúva neustále dopredu, simulácie sa stávajú neoddeliteľnou súčasťou riadenia procesov obrábania. Ich zásadnou výhodou je, že umožňujú optimalizovať výrobné parametre bez potreby vykonávať experimentálne merania, čím prispievajú k zníženiu nákladov a urýchľujú samotný proces výroby. Simulačné nástroje umožňujú analyzovať procesy obrábania v digitálnom prostredí, kde je možné detailne nastaviť kľúčové parametre, ako napríklad posuv, rýchlosť rezu alebo hĺbku rezu. Správne nastavené parametre tak vedú k maximálnej produktivite a zároveň minimalizujú náklady, čo celkovo zefektívňuje riadenie výrobných procesov. Aby tieto výhody mohli byť dosiahnuté, je dôležité využívať moderné simulačné softvéry, ktoré dokážu modelovať a simulovať rozličné technologické a fyzikálne procesy, vrátane procesov obrábania. Simulačné softvéry ako Deform 3D, ANSYS alebo AdvantEdge ponúkajú možnosť detailného modelovania procesov obrábania, čím zabezpečujú predikciu opotrebenia nástrojov, stabilitu výroby a minimalizujú energetické náklady.

Isik a kol. sa vo svojom výskume zaoberali vplyvom rôznych parametrov obrábania na sily rezania pri frézovaní ocele AISI 1040. V rámci výskumu boli realizované experimentálne merania na CNC stroji, kde použili povlakovaný nástroj zo spekaného karbidu TiAlN a merali rezné sily pomocou dynamometra Kistler 9333-A. Cieľom ich výskumu bolo analyzovať ako rýchlosť rezania a posuvu vplýva na rezné sily, trvanlivosť nástroja a kvalitu obrobeného povrchu. Pri jednotlivých experimentálnych meraniach boli rezné sily monitorované pri troch rezných rýchlostiach a to nasledovne: 100, 120 a 150 m.min⁻¹ a pri štyroch rôznych posuvoch: 0.1, 0.2, 0.3 a 0.4 mm. Dané parametre boli zvolené z dôvodu aby skúmali ich vplyv na rezné sily, ktoré priamo súvisia s opotrebením a deformáciou nástroja. Výsledky výskumu zistili, že pri zvyšovaní reznej rýchlosti aj posuvu sa zvýšili rezné sily. Pri najvyššej reznej rýchlosti 150 m.min⁻¹ a najväčšom posuve 0,4 mm boli dosiahnuté najvyššie rezné sily a to o sile 509 N. Samotný nárast síl vedie k vyššej deformácii nástroja, čo bolo zistené aj analýzami metódy konečných prvkov. (Isik, 2021)

Wasif a kol. vo svojom výskume skúmali vplyv rôznych rezných rýchlostí a posuvu pri suchom obrábaní. Ich cieľom bolo analyzovať mechanizmy, ktoré významne ovplyvňujú správanie materiálu počas suchého obrábania. Suché obrábanie umožňuje znížiť environmentálny dopad, zlepšiť životnosť nástrojov a v neposlednom rade

zefektívniť výrobný proces. V rámci výskumu boli použité simulácie prostredníctvom softvéru ANSYS Workbench, kde analyzovali interakciu medzi nástrojom zo spekaného karbidu a obrobkom z nízko uhlíkovej ocele. Simulácie boli realizované pri rôznych rezných podmienkach. Pri každej simulácii sa hodnotilo rozloženie napätí, teplota ale aj tvorba triesky. Výsledky ukázali, že Von – Misesove napätia boli lokalizované v oblasti pred hlavnou reznou hranou rezného nástroja a jeho hodnota sa zvyšovala so zvyšovaním reznej rýchlosti a posuvu. Taktiež sa správalo aj šmykové napätie, ktoré poukazuje na to, že oba dané parametre majú významný vplyv na celý proces obrábania. Pri analýze tvorby triesky sa zistilo, že hrúbka triesky závisí od zvoleného posuvu a reznej rýchlosti. Pri najnižšom posuve a reznej rýchlosti bola hrúbka triesky 0,147 mm zatiaľ čo pri najvyšších hodnotách posuvu a reznej rýchlosti bola dosiahnutá hrúbka triesky až 0,401 mm. Vyššie posuvy viedli k hrubším trieskam, čo má za následok efektívnosť odstraňovania materiálu a vplyv na opotrebenie nástroja. Na základe výsledkov sa zistilo, že vyššie posuvy a rezná rýchlosť priamo ovplyvňujú zvyšovanie napätí a teplôt, čo môže mať za následok negatívny vplyv na kvalitu povrchu obrobku a samotnú životnosť nástroja. (Wasif, 2017)

Kumar a kol. skúmali analýzu procesu tvorby triesky a deformáciu materiálu bez použitia chladiacich kvapalín, pričom sa použili dva druhy nástrojov. Prvý použitý nástroj bol z karbidu volfrámu a druhý nástroj bol z ocele AISI 4340. Použitým materiálom bola hliníková zliatina Al1100, ktorá je typická svojou vynikajúcou odolnosťou voči korózií a vysokou tvárnosťou. Samotné simulácie boli navrhnuté tak, aby modelovali tvorbu triesok, ktoré sú výsledkom interakcie medzi nástrojom a materiálom obrobku. V rámci simulácií boli definované rôzne okrajové podmienky hĺbky rezu a to 1 mm a 2 mm a rôzne rýchlosti 20 m.s⁻¹, 40 m.s⁻¹ a 70 m.s⁻¹. Použitie nasledovných rezných podmienok bolo z dôvodu, že sú bežne používané v priemysle. Taktiež jedným z kľúčových oblastí skúmania bola analýza plastickej deformácie a šmykového napätia v jednotlivých podmienkach. Výsledky simulácií preukázali, že s narastajúcou hĺbkou rezu a rýchlosťou posuvu dochádza k nárastu ekvivalentnej plastickej deformácie. (Kumar, 2014)

Kubala a kol. realizovali výskum v oblasti aplikovateľnosti monolitných keramických fréz. Samotný výskum spočíval vo vytvorení vývojového modelu pre simulovanie rezných síl a v samotnej simulácii zložiek reznej sily, ktoré pôsobili v rovine XY, kde bol najväčší predpoklad vyššieho zaťaženia nástroja. V osiach XY bol definovaný

smer posuvu a rotácia nástroja. V osi Z bola definovaná hĺbka rezu, ktorá je vo väčšine prípadov konštantná. Pre návrh modelu bolo nevyhnutné matematicky opísať pohyb (zaťaženie) rezného nástroja počas vnikania do obrábaného materiálu. Hodnoty zaťaženia nástroja sa dynamicky menili a narastali v priebehu vstupu nástroja do materiálu, pričom na veľkosť zaťaženia vplýval aj samotný tvar obrábaného dielu. V rámci experimentálnych meraní boli matematicky popísané tri rôzne spôsoby pohybu nástroja a tvarovania obrobku. Navrhnutý model nezohľadňoval všetky premenné faktory, ktoré ovplyvňujú konečné hodnoty získané z modelovania. Simulácia sa zameriavala na rezné zložky pôsobiace v X-ovej a Y-ovej osi, kde dochádzalo k väčšiemu zaťaženiu nástroja. Pri frézovaní v Z-ovej osi bolo zaťaženie menšie. Zložka reznej sily F_z bola pasívna, preto sme sa sústredili len na zložky síl F_x a F_y , u ktorých sa očakávalo vyššie zaťaženie. Dva zo simulačných modelov (model STN ISO 513 a model kc odvodený z medze pevnosti) nepreukázali dostatočnú schopnosť aplikácie v reálnych výrobných podmienkach. Naopak, posledný model simulácie rezných síl, ktorý vychádzal z výpočtu merného rezného odporu na základe nameraných hodnôt síl, dosiahol najvyššiu percentuálnu zhodu (80 %) s reálnymi nameranými dátami. Na základe získaných výsledkov možno tento model použiť na predpoveď reznej sily (F_x , F_y) pred samotným obrábaním. (Kubala, 2020)

2 Tézy dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je analyzovať, simulovať a experimentálne overiť dynamické javy prebiehajúce pri produktívnych technológiách obrábania, s dôrazom na reálne využitie v priemyselnej praxi. Práca sa zameriava na identifikáciu vplyvu technologických parametrov na vznik rezných síl, zvyškových napätí a ďalších mechanických javov. Súčasťou cieľa je aj návrh optimalizačných postupov prostredníctvom numerických simulácií a ich overenie pomocou experimentov. Výsledkom je vytvorenie metodiky pre efektívnejšie a stabilnejšie obrábanie, ktoré spĺňa požiadavky modernej výrobnjej praxe.

1. Teoretická analýza súčasného stavu vybraných technológií s dôrazom na aplikáciu do praxe
2. Návrh numerického modelu
3. Analýza výsledkov rezných síl
4. Analýza výrobných technológií na základe hodnotenia integrity povrchu
5. Prínosy pre vedu, teóriu a prax

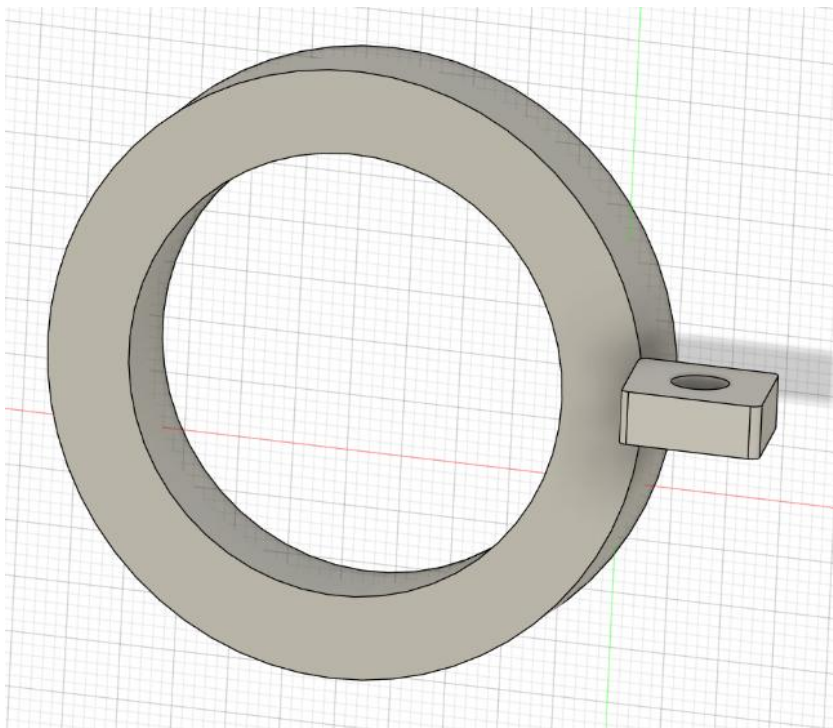
Experimentálna časť spolu s experimentálnymi meraniami bola realizovaná v laboratóriách Katedry obrábania a výrobnjej techniky. Výsledky numerických simulácií a experimentálnych meraní boli spracované a vyhodnotené s dôrazom na analýzu jednotlivých zložiek rezných síl a napätí.

3 Experimentálna časť

V experimentálnej časti práce boli realizované numerické simulácie procesu sústruženia pri definovaných okrajových podmienkach. Výpočty prebiehali v prostredí Ansys Workbench s využitím modulov Explicit Dynamics a LS-Dyna, ktoré umožnili zachytiť dynamické a nelineárne javy typické pre trieskové obrábanie. Ako referenčný materiál bola použitá oceľ 12 050.0, na ktorej bol vytvorený a overený výpočtový model. Následne bol analyzovaný aj druhý materiál – kalená nástrojová oceľ 19 313.4, pričom sa analyzovala pri rôznych parametroch posuvu, hĺbky rezu a pri konštantnej reznej rýchlosti. Model bol využitý ako návrhový a optimalizačný nástroj pre testovanie vplyvu technologických nastavení na priebeh rezných síl a deformácií. Simulácie zohľadňovali materiálové vlastnosti, trenie, kontaktné napätia a ďalšie faktory. Pre overenie výpočtov boli realizované experimentálne merania pomocou dynamometra na Katedre obrábania a výrobnjej techniky, čím sa zabezpečila validácia výsledkov pre oba materiály. Obrábanie prebiehalo na univerzálnom sústruhu typu SUI 40 od výrobcu TOS Trenčín, ktorý umožnil nastavenie požadovaných rezných parametrov v súlade s podmienkami numerickej simulácie. Okrem merania reznej sily boli na vybraných vzorkách vykonané aj merania zvyškových napätí pomocou difrakčného systému Proto iXRD, čím sa získali dodatočné informácie o stave materiálu po obrábaní. Namerané hodnoty zvyškových napätí boli následne porovnané s výsledkami numerických simulácií, čím sa overila presnosť výpočtového modelu aj z pohľadu dlhodobého mechanického správania materiálu.

3.1 Návrh modelu

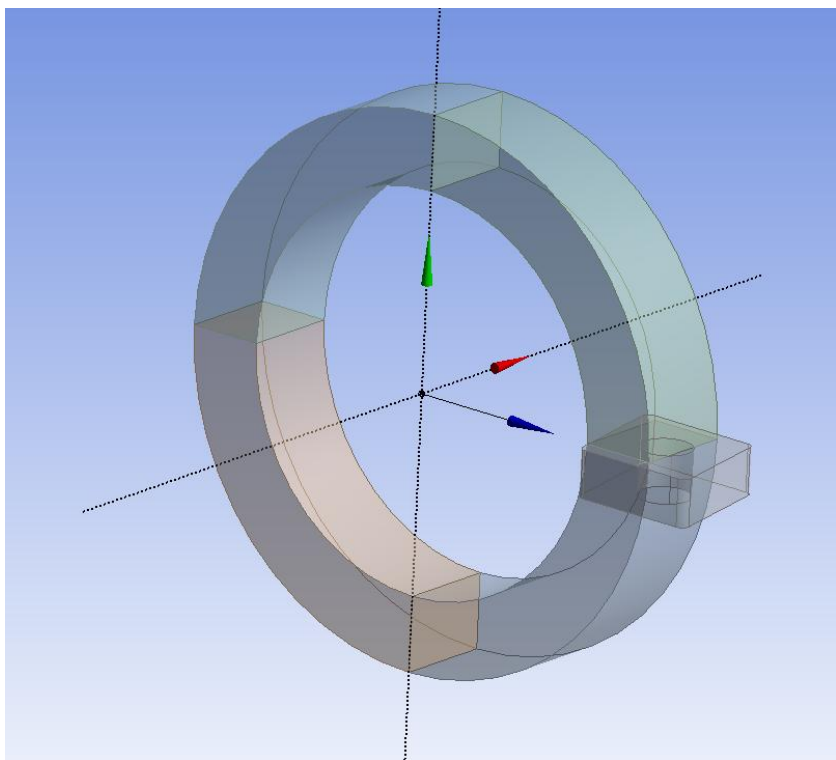
Prvotným krokom pre realizáciu simulácií bol návrh modelu, ktorý bol navrhnutý v program FUSION 360. Hlavným dôvodom výberu tohto programu bolo intuitívnejšie prostredie a odľahčenie procesu pri návrhu okrajových podmienok v programe Ansys. V rámci návrhu bol definovaný priemer obrobku $\varnothing 55$ mm. (Obr.3.1). Po dokončení návrhu bol model exportovaný do programu Ansys Workbench, kde prebehli ďalšie nastavenia modelu.



Obr. 3.1 Model sústruženia

3.2 Úprava geometrie

Po importovaní geometrie do Ansysu bol model zámerne rozdelený na štyri rovnomerné segmenty s cieľom zabezpečiť optimálne a predovšetkým rovnomerné osieťovanie. Samotné rozdelenie modelu prebehlo vytvorením dvoch rovín a to v osiach X a Y (Obr.3.2.). Následne boli tieto roviny rozdelené pomocou príkazu „Slice“. Toto rozdelenie umožnilo jednoduchšie sieťovanie modelu, presnejšiu simuláciu a zároveň prispelo k zlepšeniu stability výpočtu.



Obr. 3.2 Rozdelenie modelu na segmenty

3.3 Materiálová charakteristika

Zvolený materiálom bola uhlíková oceľ triedy 12, jednalo sa konkrétne o typ 12 050. Daná oceľ je charakteristická svojou vysokou pevnosťou, čím je vhodná na tepelné spracovanie. Jej uplatnenie je najmä na výrobu hriadeľov, čapov prípadne ozubených kolies. V rámci simulácií je tento materiál vhodný na analýzu z dôvodu, zistenia ako jednotlivé okrajové podmienky ovplyvňujú správanie sa daného materiálu. V nasledujúcej tabuľke (Tab.1) sú uvedené mechanické vlastnosti materiálu.

Tabuľka 1 Mechanické vlastnosti ocele 12 050.0

Medza pevnosti (Rm)	Medza Klzu (Re)	Tvrdosť7 (HB)	Poissonovo číslo (ν)	Modul pružnosti (E)	Hustota (ρ)
540 MPa	350 MPa	225	0,27-0,30	211 GPa	7850 kg/m3

3.4 Aplikácia materiálu na model

Na základe materiálovej charakteristiky v podkapitole bol vybraný vhodný materiál, ktorý najlepšie reprezentuje správanie nástroja a obrobku počas simulácie. Pri samotnej aplikácii vybraného materiálu bolo potrebné definovať okrem základných mechanických dát aj pokročilé nelineárne modely správania (Obr.3.3). V prípade obrobku bol použitý materiálový model „MAT_PLASTIC_KINEMATIC“, ktorý umožňuje analýzu plastickej deformácie s kombináciou izotropného a kinematického spevnenia. Na model boli použité materiálové vlastnosti z tabuľky č.1, a zároveň mu bol pridaný parameter FS „Failure Strain“. Tento parameter ovplyvňuje ako sa materiál spevňuje pri kontakte, kde pôsobí trenie. Čím vyššia hodnota FS je, tým sa materiál správa pevnejšie v oblasti kontaktu a naopak, čím nižšia hodnota FS, tým sa materiál správa krehkejšie.

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' window for defining material properties. The title bar indicates the current material is '*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_(TITLE) (003) (1)'. The form includes a 'NewID' field, buttons for 'MatDB', 'RefBy', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', 'Done', and 'Setting'. There are checkboxes for 'Use *Parameter' and 'Comment'. The main input area contains a table of material properties:

	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	BETA
1	1	7.850e-09	2.100e+05	0.3000000	350.00000	1500.0000	1.0000000
2	SRC	SRP	FS	VP			
	0.0	0.0	0.5000000	0.0			

Below the table are buttons for 'Plot', 'Raise', 'New', and 'Padd'. A 'COMMENT:' section contains a text area with the text: '\$ ID ro E pr sigy Etan beta unused!'. At the bottom, a status bar shows 'Total Card: 1', 'Smallest ID: 2', 'Largest ID: 2', and 'Total deleted card: 0'.

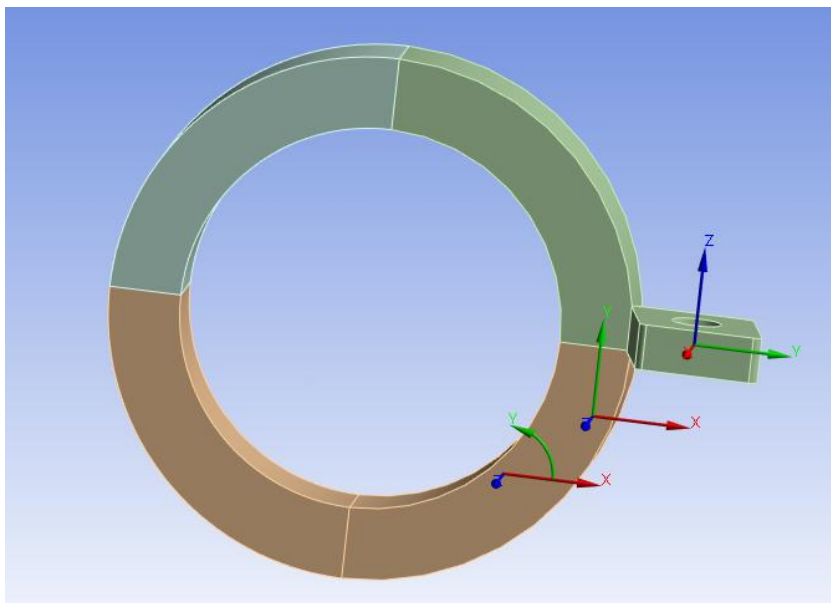
Obr. 3.3 Definovanie materiálu v prostredí LS DYNA

Čo sa týka nástroja, v simulácii bol definovaný ako ideálne tuhé teleso. Na tento účel bol použitý materiálový model „MAT_RIGID“, ktorý umožňuje simuláciu telesa bez zohľadnenia jeho deformácie. Ako rezný nástroj bola v simulácii použitá rezná platnička CNGA120408S01520FWH z materiálového radu 7135, ktorá zodpovedá bežne používanému typu pre sústruženie tvrdých materiálov. Táto voľba umožnila

realistickejšie priblíženie reálnym podmienkam obrábania pri zachovaní výpočtovej efektivity.

3.5 Definovanie súradnicových systémov

Ďalším krokom bolo definovanie globálneho súradnicového systému, ktorý slúži ako hlavný systém na orientáciu modelu v priestore. Okrem globálneho súradnicového systému bolo potrebné definovať aj lokálne súradnicové systémy (Obr.3.4). Prvý lokálny súradnicový systém bol aplikovaný na obrobok, pričom jeho hlavnou úlohou bolo zabezpečiť rotáciu obrobku. Druhý lokálny súradnicový systémom bol aplikovaný na nástroj aby zabezpečil lineárny posuv v smere rezu. Takto definované súradnicové systémy zabezpečujú presnú aplikáciu okrajových podmienok a lepšie kontrolu nad výpočtovými parametrami.

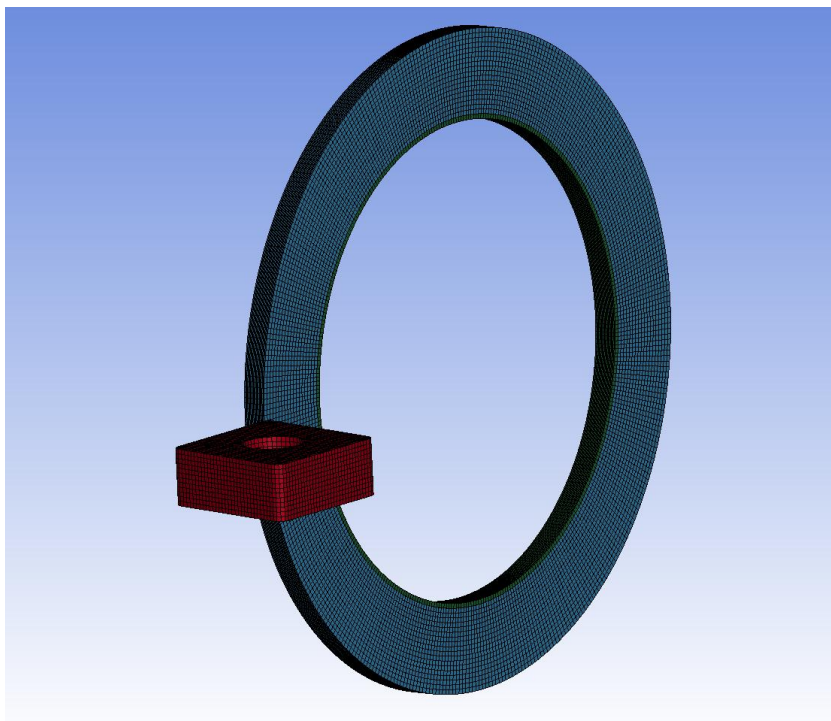


Obr. 3.4 Globálny súradnicový systém spolu s lokálnymi

3.6 Aplikácia siete

Po definovaní súradnicových systémov a rozdelení modelu bolo možné pristúpiť k osieťovaniu, ktoré zabezpečuje efektívne rozdelenie modelu na menšie výpočtové prvky, čím sa zvyšuje stabilita výpočtu a presnosť numerickej analýzy. Na model bola

aplikovaná štruktúrovaná sieť, tvorená z hexaedrických prvkov. Voľba týchto prvkov bola najmä z dôvodu lepšej presnosti a konverencie oproti ostatným prvkom. Na nami zvolenom modeli bola použitá veľkosť elementov 0,05 mm, čo zabezpečuje detailné osieťovanie modelu (Obr.3.5). V rámci nášho modelu bolo celkovo použitých 219 032 uzlov a 199 516 elementov, čo poskytuje dostatočnú hustotu siete pre našu simuláciu.

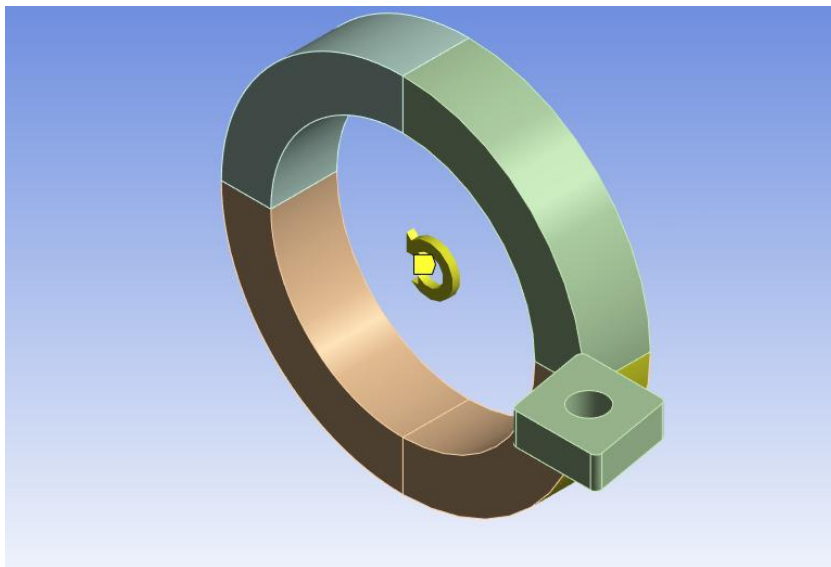


Obr. 3.5 Aplikovaná sieť na model

3.7 Definícia okrajových podmienok

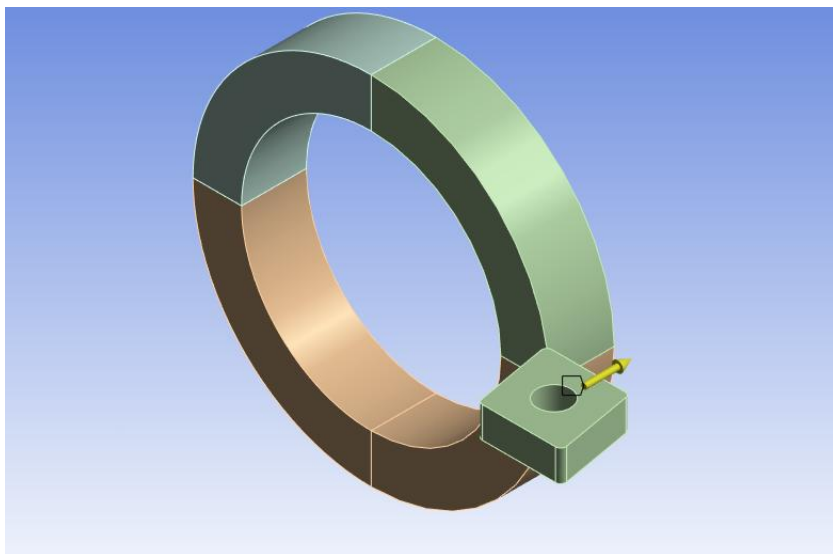
Ako posledné boli definované okrajové podmienky na obrobok aj nástroj. Na obrobok bola stanovená okrajová podmienka rotácie pomocou funkcie „Remote Displacement“. Táto podmienka bola aplikovaná na vnútorný kruh geometrie. V rámci tejto podmienky boli odobraté všetky stupne voľnosti s výnimkou osi Z (Obr.3.6). Takto definovaná okrajová podmienka umožňuje presnú analýzu rezných síl, deformácií a

kontaktnej interakcie medzi nástrojom a materiálom, pričom zároveň zabezpečuje stabilitu výpočtu a presnosť.



Obr. 3.6 Rotácia obrobku

Druhá okrajová podmienka bola implementovaná na nástroj, aby zabezpečila posuv nástroja (Obr.3.7). Taktiež ako pri prvej okrajovej podmienke tak aj pri tejto bola použitá funkcia „Remote Displacement“, ktorá zabezpečila kontrolované riadenie pohybu nástroja. V rámci definície okrajovej podmienky boli tiež odobraté všetky stupne voľnosti okrem lineárneho posuvu v danom smere. Ako kontaktná plocha bol zvolený povrch nástroja, čím bol zabezpečený jeho kontrolovaný pohyb a správna interakcia s obrobkom.



Obr. 3.7 Posuv obročku

3.8 Okrajové podmienky simulácie a experimentov ocele 12 050.0

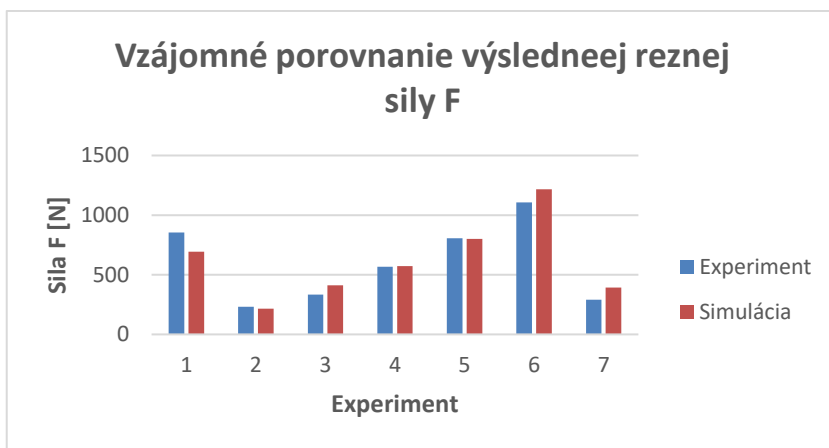
V tejto časti boli stanovené okrajové podmienky simulácie sústruženia referenčnej ocele 12 050.0, ktoré zároveň zodpovedajú podmienkam realizovaných experimentálnych meraní. V rámci výskumu bolo definovaných sedem rôznych kombinácií technologických parametrov – reznej rýchlosti, hĺbky rezu a posuvu (Tab.2).

Tabuľka 2 Okrajové podmienky simulácie pri obrábaní ocele 12 050.0

Experiment	Rezná rýchlosť [m.min-1]	Hĺbka rezu [mm]	Posuv [mm]
1.	100	1	0,051
2.	150	0,5	0,051
3.	150	1	0,026
4.	150	1	0,051
5.	150	1	0,102
6.	150	1,5	0,051
7.	200	1	0,051

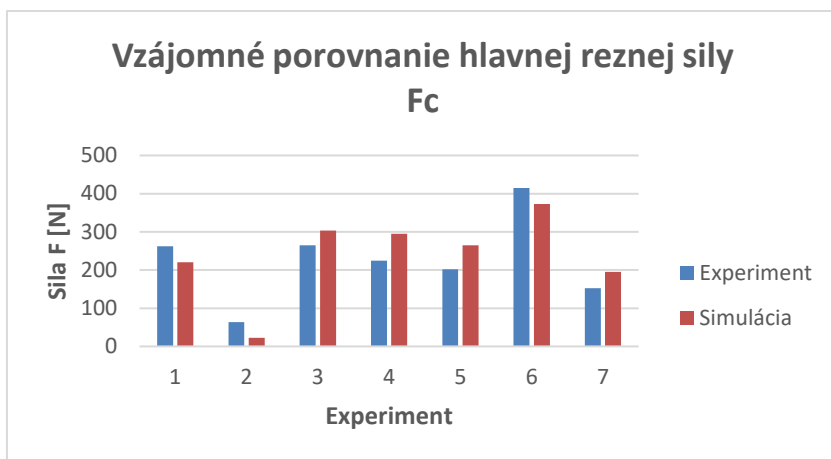
4 Vzájomné porovnanie numerických simulácií s reálnymi experimentami

Po samotných analýzach numerických simulácií a experimentálnych meraní bolo potrebné tieto výsledky verifikovať. Cieľom verifikácie bolo zhodnotiť presnosť a dôveryhodnosť numerického modelu s experimentom. V rámci analýzy boli riešené aj možné faktory, ktoré ovplyvňovali výsledky. Medzi faktory ovplyvňujúce numerické výpočty patrí napríklad sieť numerického modelu, kontakt medzi nástrojom a obrobkom a podobne. Čo sa týka reálnych experimentov tam mohli byť výsledky ovplyvnené najmä vibráciami. V rámci verifikácie boli vyhodnocované maximálne hodnoty jednotlivých zložiek rezných síl pre rovnaké okrajové podmienky. Porovnanie simulovaných a experimentálne získaných hodnôt výslednej reznej sily (Obr.4.1) preukázalo viacero zhodných aj odlišných trendov v závislosti od zvolených okrajových podmienok. V experimentoch č.1,2 a 5 boli simulované hodnoty nižšie než experimentálne, pričom rozdiel v experimente č.1 dosahoval približne 180 N. Tento jav možno pripísať modelom pri strednej hĺbke rezu a strednej reznej rýchlosti. V prípade experimentu č.5 boli hodnoty takmer totožné, čo poukazuje na dobrú predikčnú schopnosť modelu práve pri kombinácii vyššieho posuvu a strednej hĺbky rezu. Naopak, pri experimentoch č.3, 6 a 7 simulácie mierne nadhodnotili výslednú reznú silu. V experimente č.6 bol rozdiel najväčší. Simulovaná hodnota prekročila experimentálnu o viac než 100 N. V experimentoch č.3 a 7 bol rozdiel menší. Experiment č.4 predstavoval najvyššiu mieru zhody medzi simulovaným a meraným výsledkom. Rozdiel medzi oboma hodnotami bol minimálny, čo potvrdzuje, že model dokáže pri určitých kombináciách parametrov veľmi presne vystihnúť priebeh silového zaťaženia.



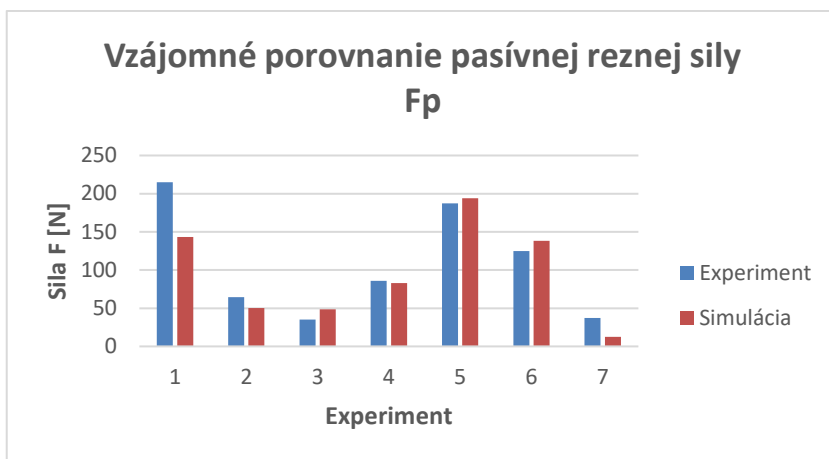
Obr. 4.1 Grafické porovnanie výslednej reznej sily F

Porovnanie hlavnej zložky reznej sily F_c medzi experimentálnymi meraniami a výsledkami numerickej simulácie (Obr.4.2) ukazuje viacero charakteristických trendov, ako aj systematické odchýlky medzi jednotlivými konfiguráciami. V experimentoch č.1, 2 a 6 boli simulované hodnoty nižšie než experimentálne, pričom najvýraznejší rozdiel sa prejavil pri experimente č. 2. Pri tomto nastavení model značne podhodnotil skutočnú hodnotu sily, čo môže súvisieť nižšou hĺbkou rezu. V experimentoch č.1 a č. 6 boli rozdiely menšie, ale stále výrazne v prospech experimentu. V prípade experimentu č.6 išlo o hodnotu vyššiu približne o 40 N. Naopak, pri experimentoch č.3,4,5 a 7 došlo k nadhodnoteniu simulovanej sily F_c . V týchto prípadoch simulácia predpokladala vyšší odpor materiálu, než bol pozorovaný v reálnych podmienkach. Najvýraznejšie sa tento rozdiel prejavil pri experimente č.4, kde simulované hodnoty presiahli experimentálne o viac než 70 N. Mierne nadhodnotenie sa objavilo aj pri experimentoch č. 3 a 7, kde sa simulované a reálne hodnoty priblížili, avšak s odchýlkou o 20 %. Vo väčšine prípadov však model zachytil základný trend závislosti zložky reznej sily F_c od technologických parametrov, najmä vplyv hĺbky rezu. Rozdiely v hodnotách poukazujú na potrebu dodatočného nastavenia modelu pre hlavnú reznú silu, ktorá je citlivá na presnosť opisu materiálového správania a kontaktných interakcií..



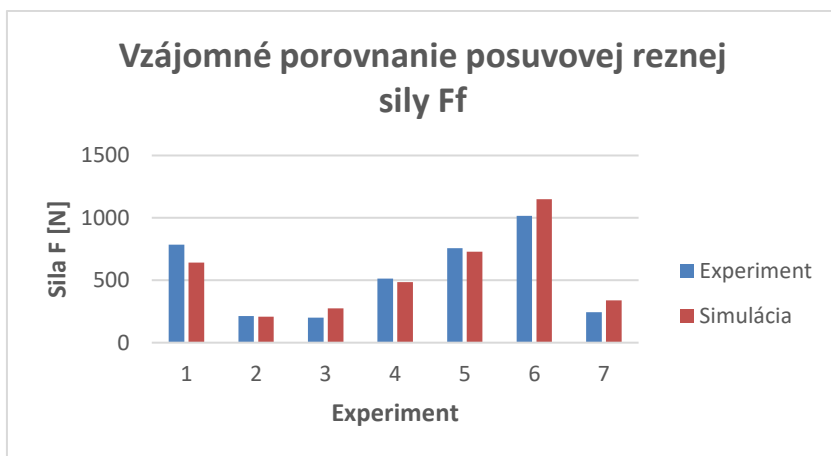
Obr. 4.2 Grafické porovnanie hlavnej zložky reznej sily F_c

Ďalšou porovnanou zložkou reznej sily bola pasívnej zložka reznej sily F_p . Výsledky poukazujú výraznejšiu variabilitu v zhode medzi oboma súbormi v porovnaní s ostatnými zložkami reznej sily (Obr.4.3). Pasívna sila, ako zložka pôsobiaca kolmo na rovinu rezu, je citlivá na drobné zmeny v geometrii triesky, bočnom kontakte a tuhosti sústavy, čo sa v simuláciách často modeluje len zjednodušene. V experimentoch č.1, 2, a 7 boli experimentálne hodnoty výrazne vyššie než simulované. Najvýraznejší rozdiel bol zaznamenaný pri experimente č.1, kde simulovaný výstup podhodnotil reálnu silu približne o 70 N. Tento jav možno vysvetliť tým, že model v tomto prípade nedostatočne zachytil radiálne zaťaženie vznikajúce pri hĺbke rezu a strednej reznej rýchlosti. Podobný vývoj bol pozorovaný aj v experimentoch č.7, kde mohla byť simulácia ovplyvnená nízkou kontaktnou tuhosťou medzi nástrojom a obrobkom alebo absenciou mikroskopických vibrácií, ktoré sa v experimentoch môžu prenášať ako zvýšené bočné zaťaženie. Naopak, pri experimentoch č.4 a 5 bola zhoda medzi simuláciou a meraním veľmi dobrá, pričom v prípade experimentu č.5 bola simulovaná hodnota dokonca o niečo vyššia. Tieto výsledky naznačujú, že pri určitých kombináciách parametrov (najmä vyšší posuv a stredná hĺbka rezu) model dokáže spoľahlivo predikovať veľkosť radiálnej zložky reznej sily, a teda aj kontakt medzi nástrojom.



Obr. 4.3 Grafické porovnanie pasívnej zložky reznej sily F_p

Poslednou hodnotenou zložkou reznej sily bola posuvová rezná sila F_f . Výsledky (Obr.4.4) získané z numerickej simulácie s reálnymi experimentálnymi dátami ukazujú vo väčšine prípadov dobrú trendovú zhodu, pričom odchýlky medzi hodnotami sú v jednotlivých experimentoch rôznej miery. V experimentoch č.1, 2, a 5 boli experimentálne hodnoty mierne vyššie ako simulované. Rozdiely však nepresiahli 15 %, čo možno považovať za prijateľné v kontexte numerických výpočtov so zjednodušeným fyzikálnym opisom procesu. V prípade experimentu č.1 bol rozdiel najvýraznejší, čo pravdepodobne súvisí so zvýšenou citlivosťou sily F_f na trenie v smere posuvu a kontaktný tlak pod reznou hranou. Simulácia zrejme tieto efekty zachytila len čiastočne, čo viedlo k podhodnoteniu výsledku. Pri experimentoch č.3, 6 a 7 boli naopak simulované hodnoty vyššie než experimentálne. To naznačuje, že model v týchto prípadoch predpokladal vyšší odpor v smere posuvu, čo môže byť spôsobené nastavením materiálového modelu bez dostatočného zohľadnenia javov pri malých prírastkoch deformácie. Navyše, pri nižších hĺbkach rezu napríklad v experimente č. 2 môže byť relatívna chyba ovplyvnená aj nejednotnou tuhosťou počas experimentu. Najvyššiu mieru zhody vykazoval experiment č.5, kde boli simulované a experimentálne hodnoty prakticky identické. Tento výsledok potvrdzuje, že numerický model je najspoľahlivejší pri vyšších posuvoch, teda v oblastiach, kde je deformácia materiálu dominantne plastická a efekt trenia a kontaktného tlaku má ustálený charakter.



Obr. 4.4 Grafické porovnanie posuvovej zložky reznej sily F_f

4.1 Simulácie ocele 19 313. 4

Druhým simulovaným a analyzovaným materiálom bola kalená nástrojová oceľ triedy 19, konkrétne typu 19 313.4, ktorá patrí medzi bežne používané materiály v oblasti tvárniacich nástrojov a prípravkov. Tento materiál sa vyznačuje vysokou odolnosťou voči opotrebeniu, rozmerovou stálosťou a z hľadiska rezných vlastností poskytuje výrazne lepšiu výkonnosť v porovnaní s bežnými uhlíkovými či nízko legovanými oceľami. Výber tohto materiálu na realizáciu simulácií a reálnych experimentov bol na základe požiadaviek z aplikačnej praxe, kde sa kládol dôraz na stabilitu otáčok počas obrábania. Na základe toho bola definovaná séria simulácií a experimentov, pri ktorých sa ako nezávisle meniteľné vstupné parametre uvažovali iba posuv a hĺbka rezu. Cieľom bolo overiť, do akej miery je numerický model schopný predikovať správanie sa takto špecifikovaného materiálu a identifikovať citlivosť výstupných parametrov na zmeny v okrajových podmienkach. Zvolená metodika zodpovedala predchádzajúcim použitým postupom.

4.2 Okrajové podmienky numerickej simulácie ocele 19 313.4 a experimentálnych meraní

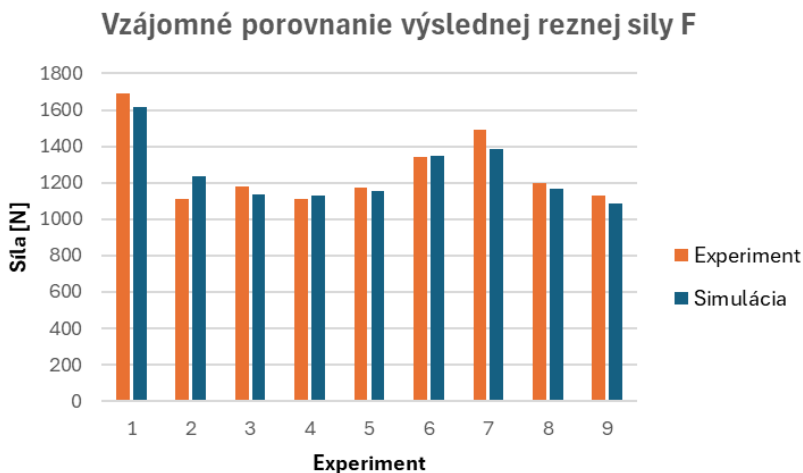
Rovnako ako pri oceli 12 050.0 boli navrhnuté okrajové podmienky, ktoré odpovedajú numerickej simulácii ale aj reálnym experimentálnym meraniam (Tab.3).

Tabuľka 3 Okrajové podmienky ocele 19 313.4

Experiment	Hĺbka rezu [mm]	Posuv [mm]	Otáčky [min ⁻¹]
1.	0.1	0.05	700
2.	0.1	0.1	700
3.	0.1	0.15	700
4.	0.4	0.05	700
5.	0.4	0.1	700
6.	0.4	0.15	700
7.	0.8	0.05	700
8.	0.8	0.1	700
9.	0.8	0.15	700

5 Vzájomné porovnanie numerických simulácií s reálnymi experimentami ocele 19 313.4

Na obrázku (Obr.5.1) je znázornené porovnanie výslednej reznej sily F medzi experimentálnymi meraniami a numerickými simuláciami pre jednotlivé konfigurácie rezných podmienok. Modré stĺpce zobrazujú hodnoty získané z reálnych experimentov, zatiaľ čo oranžové stĺpce predstavujú výsledky z numerických simulácií. Každá dvojica stĺpcov (1 až 9) predstavuje jednu konkrétnu okrajovú podmienku hĺbky rezu a_p a posuvu f . Z grafu je zrejmé, že vo väčšine prípadov simulácie nasledujú trend experimentálnych meraní, pričom rozdiely medzi oboma metódami sú najčastejšie v rozsahu desiatok newtonov. Pri experimentoch č.1,5 a 7 simulácie mierne podhodnocujú namerané hodnoty, čo môže súvisieť s numerickým zjednodušením reálneho kontaktu alebo správania materiálu. Naopak, pri experimentoch č.2 a 6 sa výsledky veľmi tesne približujú, čo poukazuje na vysokú zhodu medzi simulovaným a experimentálnym priebehom.

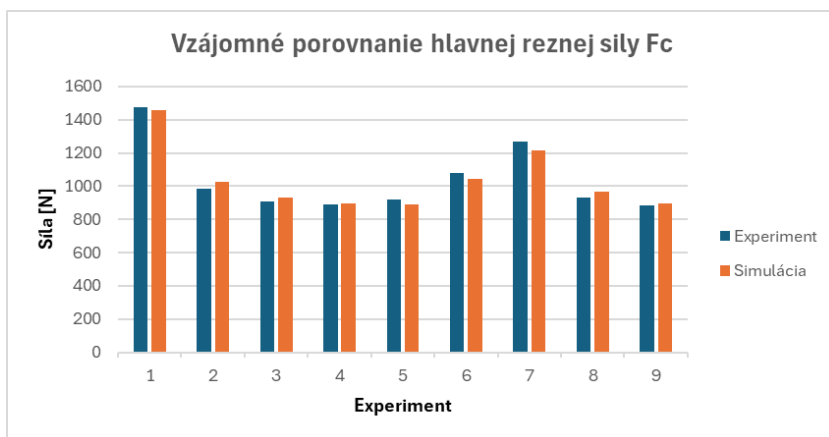


Obr. 5.1 Grafické porovnanie výslednej reznej sily F

Jednou z kľúčových sledovaných zložiek pri hodnotení počas obrábania bola hlavná zložka reznej sily F_c , ktorá pôsobí v smere rezu a predstavuje dominantnú silu zaťažujúcu nástroj. Z tohto dôvodu bola podrobená detailnej analýze z hľadiska vplyvu

technologických parametrov a zároveň porovnaná s výsledkami numerických simulácií, ktoré mali za cieľ overiť schopnosť výpočtového modelu a predikovať silové zaťaženie.

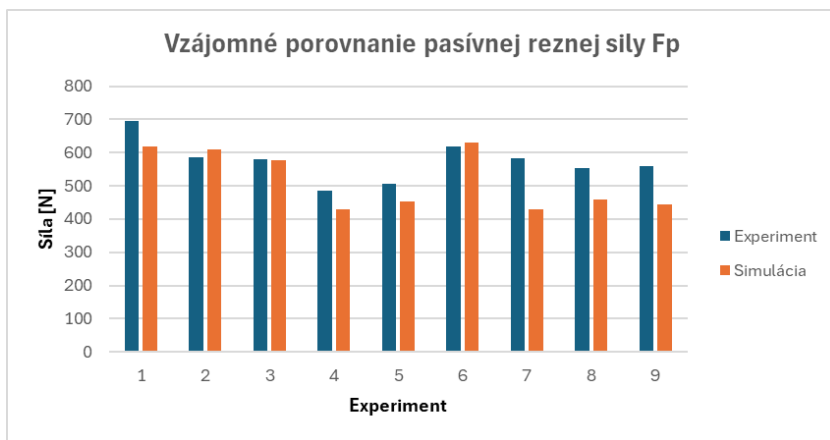
Na obrázku (Obr.5.2) sú znázornené maximálne hodnoty F_c analyzované pre jednotlivé okrajové podmienky. Najvyššia hodnota F_c bola zaznamenaná pri podmienke $a_p = 0,1$ mm a $f = 0,05$ mm (exp. č.1), čo naznačuje, že aj pri nízkej hĺbke rezu môže dôjsť ku koncentrácii záberu a výraznému zaťaženiu nástroja. Výrazne vyrovnané hodnoty boli pozorované pri experimentoch č.4 až 9, kde sa F_c pohybovala v podobnom rozsahu v oboch prípadoch. V niektorých prípadoch boli simulované hodnoty mierne nižšie než experimentálne, čo možno pripísať zjednodušeniu fyzikálneho modelu, najmä absencii opotrebenia nástroja a idealizovaným podmienkam. Dôležité však je, že rozdiely medzi oboma metódami neprekračovali hranicu interpretačnej spoľahlivosti a poskytujú konzistentný obraz o správaní zložky hlavnej reznej sily.



Obr. 5.2 Grafické porovnanie hlavnej reznej sily F_c

Na obrázku (Obr.5.3) sú zobrazené maximálne hodnoty F_p pre jednotlivé okrajové podmienky. Pri väčšine okrajových podmienok boli hodnoty pasívnej sily v simuláciách nižšie ako v experimentoch. Najvýraznejší rozdiel sa prejavil pri experimentoch č.7, 8 a 9, kde simulované hodnoty F_p boli výrazne pod experimentálnymi. Rozdiel vo výsledkoch môže byť spôsobený niekoľkými faktormi. Jeden z prvých faktorov môže byť idealizovanými kontaktnými podmienkami v simulácii, ale aj skutočnosťami, prípadne vibráciami alebo nerovnosťami povrchu, ktoré sa v simuláciách nezachytávajú. Naopak, pri experimentoch č.2,3 a 6 boli rozdiely minimálne, čo naznačuje, že model dokáže za

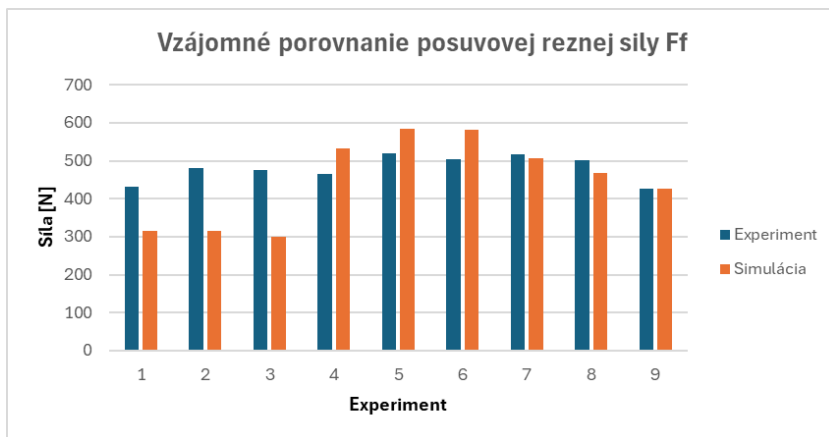
určitých podmienok pomerne presne zachytiť priebeh sily. Z fyzikálneho hľadiska možno pozorovať, že pri malých hodnotách a_p (napr. experiment č.1) vzniká koncentrovanejší kontakt nástroja, čo sa prejavuje vyšším zaťažením a teda aj vyššou výslednou hodnotou. Aj keď sú hodnoty simulácií v tejto zložke miestami nižšie, dôležité je, že rozdiely sú konzistentné a model poskytuje použiteľné výstupy pre predikciu trendov v zaťažení.



Obr. 5.3 Grafické porovnanie pasívnej reznej sily F_p

V závere boli hodnotené aj rozdiely v posuvovej zložke reznej sily F_f , ktorá síce nedosahuje najvyššie hodnoty spomedzi všetkých zložiek, no zohráva významnú úlohu pri energetickej náročnosti procesu a priamo súvisí s odporom materiálu voči pohybu nástroja. Obrázok (Obr.5.4) zobrazuje porovnanie experimentálnych a simulačných hodnôt. V prvých experimentoch č.1-č.3 sú simulované hodnoty F_f viditeľne nižšie ako hodnoty získané z meraní. Tento rozdiel môže byť spôsobený tým, že posuvová zložka reznej sily je citlivá na reálne trenie medzi trieskou a čelom nástroja. V skutočnom procese môžu tiež zohrávať úlohu faktory ako drobné nerovnosti triesky, oneskorené oddeľovanie materiálu alebo vplyv mazania, ktoré menia dynamiku trenia a prispievajú k mierne vyšším hodnotám F_f . Naopak, pri experimentoch č.4-6 simulácie mierne prevyšujú experimentálne hodnoty. Tento vývoj môže byť dôsledkom spôsobu, akým model zachytáva plastickú deformáciu v oblasti posuvu. Pri vyšších posuvoch dochádza k intenzívnejšiemu toku materiálu, ktorý je v simulácii často modelovaný s vyššou tuhosťou, čo vedie k nárastu predikovaných síl. V posledných experimentoch č.7,8 a 9 sa hodnoty F_f medzi simuláciami a experimentami výrazne približujú, čo poukazuje na to, že

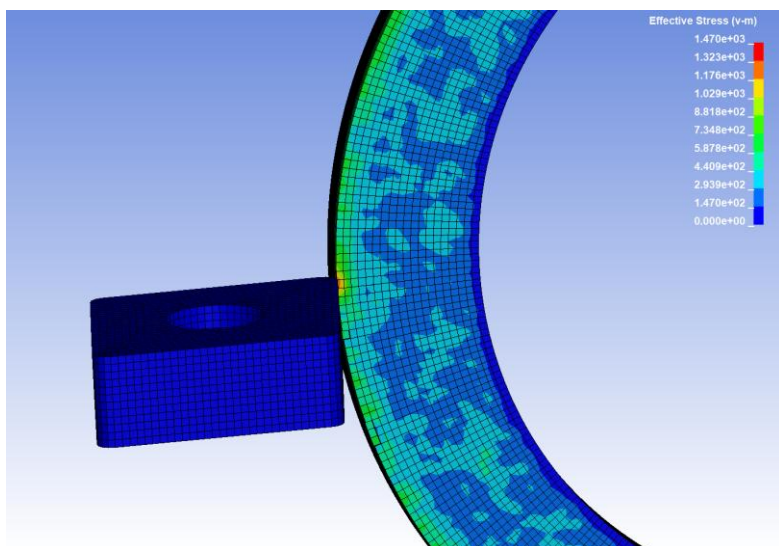
pri vhodnej kombinácii posuvu a hĺbky rezu je numerický model schopný realisticky predikovať posuvové zaťaženie. Napriek určitým odchýlkam hodnôt sú rozdiely konzistentné.



Obr. 5.4 Grafické porovnanie posuvovej zložky reznej sily F_f

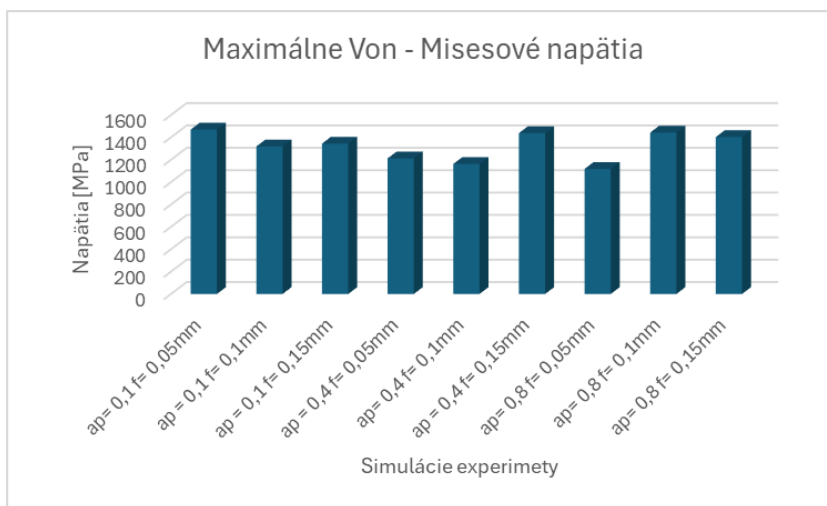
5.1 Analýza Von – Misesových napätí

V tejto kapitole sa analyzujú výsledky napätí získané zo simulácií. Cieľom bolo identifikovať kritické oblasti so zvýšeným mechanickým namáhaním, ktoré môžu mať vplyv na celkovú integritu súčiastky. Na obrázku (Obr.5.5) je znázornené rozloženie efektívneho Von Misesovho napätia pri kontakte medzi nástrojom a obrobkom.



Obr. 5.5 Grafické znázornenie Von – Misesových napätí pri simulácii

Na nasledujúcom obrázku (Obr.5.6) je znázornený graf, ktorý porovnáva hodnoty napätí pre jednotlivé experimenty. Z grafu možno pozorovať, že výsledky závisia od konkrétnych okrajových podmienok. Najvyššie napätia boli zaznamenané pri podmienke $a_p=0,1\text{mm}$ a $f=0,05\text{ mm}$. Naopak, so zvyšujúcou sa hĺbkou rezu a posuvom hodnoty napätí klesajú. Výsledky poukazujú na priebeh samotného procesu a vplyv zmien rezných podmienok, čo je kľúčové pre optimalizáciu parametrov a minimalizáciu napätí.



Obr.5.6 Grafické porovnanie Von – Misesových napätí pri rôznych okrajových podmienkach

V rámci verifikácie numerického modelu boli realizované porovnania medzi Von - Misesovými napätiami zo simulácie a zvyškovými napätiami nameranými pri reálnych experimentoch. Zvyškové napätia sa merali na katedre pomocou zariadenia Proto iXRD, ktoré umožňuje neinvazívne a presné určovanie napäťových stavov na povrchu materiálov prostredníctvom röntgenovej difrakcie. V tabuľke (Tab.4) sú uvedené namerané hodnoty normálových a šmykových napätí, ktoré boli následne prepočítané na ekvivalentné Von Misesove napätia.

Tabuľka 4 Namerané zložky zvyškových napätí

σ_x	τ_{xy}	σ_y	τ_{yz}	σ_z	τ_{zx}
-109,1	242,3076923	162,8	82,4	81,57	8,6
-272,7	40,38461538	-216,2	112,8	-146,67	5,9
-435,6	40,38461538	-819,1	145,6	-376,41	10,5
-156,4	242,3076923	-274,8	91,3	-129,36	4,3
-103	40,38461538	-170,7	103,1	-82,11	15
-49,7	242,3076923	-265,4	99,7	-94,53	6,2
-42,6	242,3076923	72,2	81,2	8,88	5,6
-251,8	40,38461538	-219,6	105,3	-141,42	13,7
-343,1	40,38461538	-734,4	200,8	-323,25	8,9

Namerané hodnoty boli následne na základe vzorca prepočítané

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \quad (5.1)$$

Po dosadení hodnôt do vzorca boli vypočítané Von – Misesové napätia pre reálne experimenty (Tab.5).

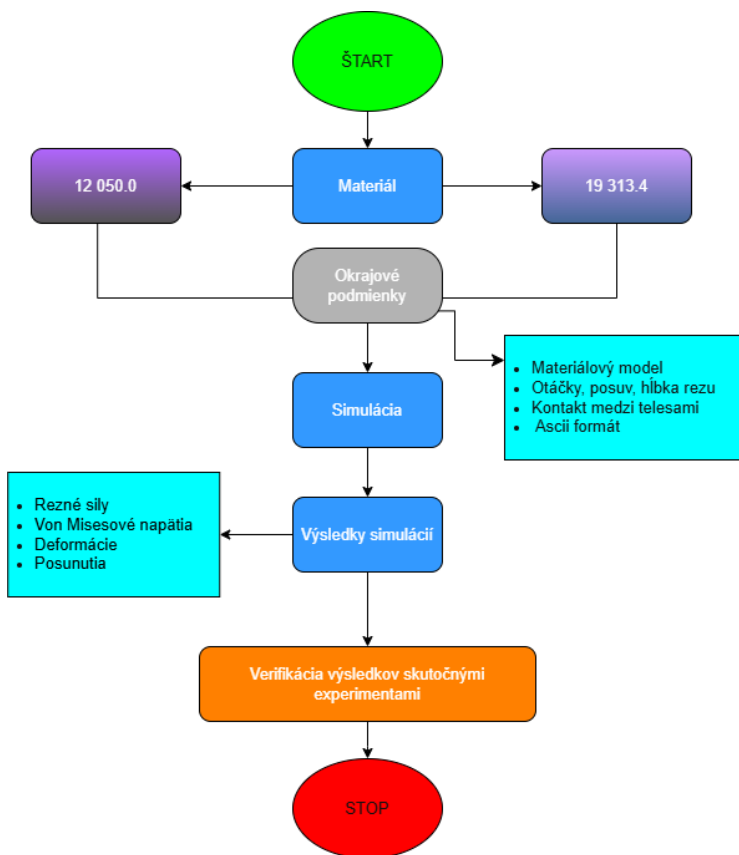
Tabuľka 5 Von Misesové napätia

Experiment	Simulované napätia	Namerané napätia
1.	1469,62 MPa	1515,436 MPa
2.	1318,63 MPa	704,3539 MPa
3.	1343,87 MPa	1476,1 MPa
4.	1211,66 MPa	1404,413 MPa
5.	1161,87 MPa	628,5019 MPa
6.	1437,99 MPa	1484,746 MPa
7.	1117,85 MPa	1361,395 MPa
8.	1442,63 MPa	659,9075 MPa
9.	1402,81 MPa	1608,205 MPa

V tabuľke (Tab.5) sú porovnané napätia k jednotlivým experimentom. Z analyzovaných hodnôt je možné vidieť, že vo väčšine experimentov sa napätia zhodujú v primeranom rozsahu. K väčšiemu rozdielu došlo pri experimente č.2,5 a č.8. Tieto rozdiely môžu byť spôsobené materiálovou nehomogenitou, ktorá sa môže prejaviť ako trhlinka v materiáli prípadne ako iný faktor.

5.2 Metodika modelu sústruženia

Na základe numerických simulácií a následných experimentálnych meraní, bola navrhnutá metodika riešenia, ktorá predstavuje pracovný postup analýz vybraných javov, ktoré vznikajú pri sústružení. Výsledná metodika (Obr.5.7), sa skladá z pracovných postupov začínajúc definovaním materiálu, nastavením okrajových podmienok, samotnej numerickej simulácia až po verifikáciu reálnymi experimentami. Samotná metodika je nastavená ako univerzálny postup, ktorý je možný aplikovať na rôzne materiály, prípadne rôzne okrajové podmienky.



Obr. 5.7 Metodika modelu sústruženia

6 Prínosy práce

Vytvorené numerické modely a overené metodiky môžu slúžiť ako základ pre ďalší vývoj na Katedre obrábania a výrobných techník, kde môžu výrazne napomôcť pri efektívnejšej realizácii experimentov, výučby a simulačných analýz v oblasti sústruženia. Získané poznatky môžu byť využité pri návrhu a optimalizácii technologických procesov a zároveň prispieť k rozvoju laboratórnych a výskumných kapacít pracoviska.

6.1 Prínosy pre vedu a teóriu

Simulácie pri produktívnych výrobných technológiách prinášajú mnohé možnosti a prínosy pre vedu. Umožňujú analyzovať vplyv hlavných technologických parametrov, ako sú rezná rýchlosť, posuv či hĺbka rezu, čo vedie k zvýšeniu presnosti a znižovaniu opotrebenia nástrojov. Na základe týchto analýz je možné nastaviť optimálne rezné podmienky, čím sa dosahuje úspora nákladov, znižuje spotreba energie a predlžuje životnosť nástrojov. Výhodou numerických simulácií je tiež možnosť analyzovať rôzne geometrie nástrojov, ich materiálové zloženie či typy výmenných rezných platničiek. Tým je možné detailne sledovať priebeh rezných síl, deformácií a teplotných polí bez potreby nákladného experimentovania. Takéto simulácie výrazne napomáhajú optimalizácii konštrukcie nástrojov, s cieľom zvýšiť ich efektivitu a znížiť ich opotrebenie.

6.2 Prínosy pre prax

Dizertačná práca má výrazné a hmatateľné prínosy pre prax. Predovšetkým umožňuje optimalizáciu výrobných parametrov bez potreby časovo náročného experimentálneho testovania, čím sa výrazne skracuje čas vývoja a výroby. Simulácie umožňujú analyzovať fyzikálne javy prebiehajúce počas obrábania, ako sú rezné sily, napätia, deformácie a kontaktné interakcie, čo prispieva k optimalizácii technologických parametrov a zníženiu spotreby energie aj materiálových strát. Ďalším prínosom je zníženie opotrebenia nástrojov, čo šetrí náklady na časté výmeny a údržbu nástrojov. Simulácie pomáhajú predikovať potenciálne problémy s opotrebením, a tým predchádzať nežiaducim poruchám, ktoré by mohli negatívne ovplyvniť presnosť a kvalitu výrobkov. Tento prístup vedie k dlhšej životnosti nástrojov a spoľahlivejšiemu obrábaniu.

Simulácie v praxi tiež podporujú zavádzanie moderných technológií, ako je prediktívna údržba, ktorá sa stáva kľúčovou pre efektívnu a bezpečnú prevádzku. Monitorovanie rezných síl a teploty počas simulovaných procesov umožňuje lepšie plánovanie údržby a

eliminuje neočakávané výpadky. Tento prediktívny prístup prináša do výroby viac stability a zároveň podporuje autonómne riadenie procesov, čo zvyšuje celkovú konkurencieschopnosť výrobných prevádzok.

7 Záver

Cieľom dizertačnej práce bolo vytvoriť a overiť výpočtové modely, ktoré umožnia analyzovať silové zaťaženie počas obrábania, optimalizovať rezné podmienky a tým zvýšiť efektivitu a presnosť výrobného procesu.

V rámci experimentálnej časti boli realizované numerické simulácie rezných síl pri sústružení pomocou metódy konečných prvkov v softvéri Ansys LS-DYNA. Simulácie boli vykonané pre rôzne okrajové podmienky a pre konkrétne materiály. Ako prvým materiálom bola použitá oceľ 12 050.0, ktorá slúžila ako referenčný model a na základe nej bol vytvorený aj skríninový model. Následne bol do analýzy zaradený aj materiál oceľ 19 313.4, a to na základe požiadaviek z aplikačnej praxe, keďže ide o bežne využívaný materiál v priemyselnej výrobe. Tieto materiály bol použité pri reálnych experimentálnych meraniach, ktoré slúžili na overenie výpočtového modelu. Modely boli spracované od návrhu geometrie, definovania materiálových vlastností, aplikácie okrajových podmienok, vytvorenia výpočtovej siete až po nastavenie kontaktov medzi nástrojom a obrobkom. Súčasťou výskumu boli aj reálne experimentálne merania, ktoré prebiehali za identických podmienok ako simulácie. Tieto experimentálne dáta boli následne porovnávané so simulačnými výstupmi, čím sa potvrdila presnosť vytvoreného modelu a jeho schopnosť predikovať reálne správanie systému. Výsledkom bola aj návrhová metodika aplikácie FEM pre procesy sústruženia, ktorá môže slúžiť ako východisko pre ďalšie analýzy.

Dizertačná práca preukázala, že vhodne zostavený simulačný model dokáže nahradiť časovo aj finančne náročné experimenty a zároveň poskytuje podrobný pohľad na priebeh jednotlivých zložiek rezných síl a ich reakcie na zmeny technologických parametrov. V rámci ďalších výskumov je vhodné rozšíriť trieskové technológie, ako je napríklad frézovanie, prípadne vrtanie, kde by bolo možné podobným spôsobom aplikovať FEM simulácie. Taktiež sa otvára priestor rozšírenia metodiky o tepelnú analýzu generovaného tepla v oblasti rezu a jeho vplyvu na kvalitu povrchu a životnosť nástrojov. Dizertačná práca poskytuje pevný základ pre ďalšie výskumné a vývojové aktivity v oblasti modelovania dynamických javov pri trieskovom obrábaní a jej výsledky sú prínosom pre vedu, výskum aj prax v oblasti moderného strojárstva.

Najdôležitejšie literárne zdroje riešenej problematiky

D. L. Logan, A First Course in the Finite Element Method, Canada: Chris Carson, 2007.

M. K. G. Mehmet Erdi Korkmaz, „A State of the Art on Simulation and Modelling Methods in Machining: Future Prospects and Challenge,“ Archives of Computational Methods in Engineering, pp. 161-189, 2022.

O. Kubala, „Štúdium implementácie monolitných keramických frézovacích nástrojov,“ 2020.

A. E. A. V. Kumar, „FEM Analysis to Optimally Design End Mill Cutters for Milling of Ti-6Al-4 V,“ %1. vyd.97, pp. 1237-1246, 2014.

Y. I. Yahya Işık, „Experimental Analysis of Cutting Forces and,“ International Journal of Mechanical Engineering, %1. vyd.8, pp. 1-7, 18 November 2021.

S. J. Z. H. B. Wu, „3D FEM simulation of milling process for titaniumalloy Ti6Al4V,“ Int J Adv Manuf Technol, 2014.

M. S. A. S. B. D. A. R. A. M. M. A. A. K.T. SHEROV, „MATHEMATICAL MODELING OF THERMOFRICTIONAL,“ Journal of Theoretical and Applied Mechanics, %1. vyd.47, pp. 24-33, 2017.

K. T. R. S. N. M. A. R. M. K. M. E. K. M. B. Ali Wasif, „FEM simulácia suchého obrábania pomocou Ansys Workbench,“ 14th International Conference on Mechanical Engineering, pp. 68-1-68-6, 18-19 December 2023.

R. R. R. Gudala Sandeep Kumar, „International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET),“ rev. Simulation of Turning Process using Explicit Dynamics, 2019.

L. N. Małgorzata Błasiak, „The European Physical Journal Conferences,“ rev. Simulation research of the temperature distribution during face milling, 2019.

V. B. Y. E. A. S. A. S. B. M. S. V. S. V. F. Yu I Gordeev, „Journal of Physics Conference Series,“ rev. Simulation of high-speed machining processes by multi-edge mills, 2022.

E. Budak, „Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity,“ International Journal of Machine Tools and Manufacture, pp. 1478-1488, 2006.

I. Masood, M. Jahanzaib a A. Haider, „Tool wear and cost evaluation of face milling grade 5 titanium alloy for sustainable machining,” *Advances in Production Engineering & Management*, p. 239–250, 2016.

A. R. M. W. F. S. M. A. S. B. & E. O. E. Mário C. Santos Jr, „Machining of aluminum alloys: a review,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 3067–3080, 2016.

M. D. D. B. D. Mourtzis, „Simulation in Manufacturing: Review and Challenges,” rev. CIRP Sponsored DET 2014 Conference, 2014.

B. B. M. W. Ahmad RivaiOmar, „Modelling optimization involving different types of elements in finite element analysis,” *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2013.

K. V. N. Harshini Pothina, „Finite Element Method-Based Artificial Neural Network,” rev. ICT Analysis and Applications, 2022.

D. W. G.H. Paulino, „Finite Element Methods (in Solid and Structural Mechanics),” 2014.

M. K. G. Mehmet Erdi Korkmaz, „A State of the Art on Simulation and Modelling Methods in Machining: Future Prospects and Challenge,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, pp. 161-189, 2022.

ANOTÁCIA

Dizertačná práca sa zaoberá analýzou simulácií dynamických javov pri produktívnych výrobných technológiách, so zameraním na procesy sústruženia. Hlavným cieľom práce je identifikovať faktory ovplyvňujúce presnosť a stabilitu obrábacích procesov a na základe získaných poznatkov navrhnúť odporúčania pre efektívne využitie týchto technológií v priemyselnej praxi. Teoretická časť práce poskytuje komplexný prehľad o súčasných trendoch v oblasti produktívneho obrábania, pričom zdôrazňuje metódy optimalizácie procesov na zvýšenie produktivity a zníženie výrobných nákladov. Experimentálna časť sa zameriava na simulácie rezných síl pri sústružení, ktoré boli realizované pre vybrané materiály. V rámci simulácií boli vyhodnocované zložky rezných síl, ako aj výsledná rezná sila, pričom sa sledoval ich vývoj v závislosti od technologických parametrov. Získané simulačné dáta boli následne porovnané s reálnymi experimentálnymi meraniami, aby sa overila presnosť výpočtového modelu a jeho schopnosť predikovať reálne správanie systému. Na základe porovnania bola vytvorená aj metodika modelu. Simulácie umožnili detailne analyzovať mechanické odozvy materiálov počas obrábania, identifikovať kritické body procesu a posúdiť vplyv rezných podmienok na silové zaťaženie nástroja. Výsledky práce poskytujú cenné poznatky pre optimalizáciu rezného procesu a prispievajú k rozvoju presnejších a efektívnejších obrábacích technológií v priemyselnej praxi.

RESUMÉ

The dissertation deals with the analysis of simulations of dynamic phenomena in productive manufacturing technologies, with a focus on turning processes. The main objective of the thesis is to identify factors affecting the accuracy and stability of machining processes and, based on the findings, to propose recommendations for the effective use of these technologies in industrial practice. The theoretical part of the thesis provides a comprehensive overview of current trends in the field of productive machining, emphasizing methods of process optimization to increase productivity and reduce production costs. The experimental part focuses on simulations of cutting forces during turning, which were performed for selected materials. The simulations evaluated the components of cutting forces as well as the resulting cutting force, monitoring their development depending on technological parameters. The simulation data obtained was then compared with real experimental measurements to verify the accuracy of the

computational model and its ability to predict the real behavior of the system. Based on the comparison, a model methodology was also created. The simulations made it possible to analyze in detail the mechanical responses of materials during machining, identify critical points in the process, and assess the impact of cutting conditions on the force load on the tool. The results of the work provide valuable insights for optimizing the cutting process and contribute to the development of more accurate and efficient machining technologies in industrial practice.