

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Katedra technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv parametrů obrábění na síly při obrábění kulovou frézou strategií vlečením

Autor: **Vojtěch Petrych**
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Vyšata, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří se na mé práci podíleli. V první řadě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Vyšatovi, Ph.D. za vedení práce, veškeré odborné rady a připomínky poskytnuté v průběhu tvorby práce, za zajištění prostředků potřebných k provedení experimentu a pomoc poskytnutou v průběhu experimentu. Dále bych rád poděkoval Jiřímu Tenkovi za pomoc s realizací experimentu, a Ing. Miroslavovi Gombárovi Ph.D. za statistické vyhodnocení získaných výsledků. Děkuji taky ostatním lidem na katedře za jejich cenné rady a připomínky. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své přítelkyni, rodině a kamarádům za velkou trpělivost a podporu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

| | | | | |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|--|
| AUTOR | Příjmení Petrych | Jméno Vojtěch | | |
| STUDIJNÍ OBOR | B2301 – Strojní inženýrství | | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Vyšata, Ph.D. | Jméno Jiří | | |
| PRACOVISŤE | ZČU - FST - KTO | | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte | |
| NÁZEV PRÁCE | Vliv parametrů obrábění na síly při obrábění kulovou frézou strategií vlečením | | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KTO | ROK ODEVZD. | 2020 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| CELKEM | 40 | TEXTOVÁ ČÁST | 28 | GRAFICKÁ ČÁST | 12 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p style="text-align: center;">ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p> | <p>Tato bakalářská práce zkoumá závislost mezi parametry obrábění a reznými silami s ohledem na vibrace. Prostřednictvím experimentu je ověřována hypotéza o uklidnění rezného procesu vlivem příčného vyklonění. Testování těchto závislostí probíhá obráběním pokusných drah s různým nastavením rezných podmínek, při kterém jsou zaznamenávány průběhy rezných sil, jež jsou hodnotícím kritériem celého experimentu.</p> |
| <p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p> | <p>Stabilita, rezný proces, rezné síly, podélné vyklonění, příčné vyklonění, vlečení, experiment, kulová fréza, DoE, Design of Experiment</p> |

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

| | | | |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| AUTHOR | Surname Petrych | Name Vojtěch | |
| FIELD OF STUDY | B2301 – Mechanical Engineering – University focus | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Vyšata, Ph.D. | Name Jiří | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KTO | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Influence of machining parameters on forces during ball-nose cutter milling using the tool-dragging strategy | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | Machining Technology | SUBMITTED IN | 2020 |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| TOTALLY | 40 | TEXT PART | 28 | GRAPHICAL PART | 12 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | This bachelor's thesis explores the dependence between the machining parameters and cutting forces out of consideration for vibrations. The hypothesis about calming the cutting process as a result of a transverse leaning is verified through the experiment. The substance of the experiment is machining of experimental tracks using different settings of cutting conditions. During the machining the progress of cutting forces is recorded, which is the evaluating criterion of the whole experiment. |
| KEY WORDS | Stability, cutting process, cutting forces, tool towing, experiment, ball end mill, DoE, Design of Experiment |

OBSAH

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ..... | 2 |
| 1 ÚVOD | 3 |
| 2 BLIŽŠÍ SPECIFIKACE PROBLÉMU A TEORETICKÁ VÝCHODISKA | 4 |
| 2.1 POLOHA KULOVÉ FRÉZY | 4 |
| 2.1.1 Podélné vyklonění kulové frézy a souvislosti s ním spojené..... | 4 |
| 2.1.2 Podélné a příčné vyklonění kulové frézy..... | 5 |
| 2.2 HYPOTÉZA | 6 |
| 2.3 METODIKA ŘEŠENÍ PROBLÉMU | 7 |
| 2.4 TEORETICKÁ VÝCHODISKA..... | 8 |
| 3 VYHLEDÁVÁNÍ PODSTATNÝCH INFORMACÍ K PROBLEMATICE..... | 9 |
| 3.1 PRVNÍ EXPERIMENT – HLEDÁNÍ OPTIMÁLNÍHO NASTAVENÍ ÚHLU PŘÍČNÉHO VYKLONĚNÍ KULOVÉ FRÉZY | 9 |
| 3.1.1 Vyhodnocování prvního experimentu | 10 |
| 3.1.2 Zhodnocení prvního experimentu..... | 12 |
| 3.2 DRUHÝ EXPERIMENT – OVĚŘOVÁNÍ VLIVU PŘÍČNÉHO VYKLONĚNÍ NA STABILITU ŘEZNÉHO PROCESU..... | 12 |
| 3.2.1 Vyhodnocování druhého experimentu..... | 14 |
| 3.2.2 Zhodnocení druhého experimentu | 18 |
| 3.3 SHRUTÍ DŮLEŽITÝCH INFORMACÍ PRO NÁVRH DALŠÍHO EXPERIMENTU | 18 |
| 4 NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTU | 19 |
| 4.1 NÁVRH EXPERIMENTU | 19 |
| 4.1.1 DoE – Design of experiment | 19 |
| 4.1.1.1 DoE – centrálně kompozitní plán..... | 21 |
| 4.1.1.2 DoE – Vliv času – znáhodnění experimentu | 22 |
| 4.1.2 Materiál a polotovar..... | 23 |
| 4.1.3 Stroj a nástroj..... | 24 |
| 4.1.4 Dynamometr | 25 |
| 4.2 REALIZACE EXPERIMENTU | 25 |
| 4.3 VYHODNOCOVÁNÍ EXPERIMENTU | 27 |
| 4.3.1.1 Odečítání rezných sil..... | 27 |
| 4.3.2 Vyhodnocování..... | 28 |
| 4.3.2.1 Vliv parametrů obrábění na amplitudu průběhu kroutícího momentu M_k | 29 |
| 4.3.2.2 Vliv parametrů obrábění na amplitudu průběhu ohybového momentu M_o | 33 |
| 4.3.2.3 Vliv parametrů obrábění na střední hodnotu kroutícího momentu..... | 33 |
| 4.3.2.4 Vliv parametrů obrábění na střední hodnotu ohybového momentu | 34 |
| 4.4 DVOJÍ POVRCH..... | 35 |
| 5 ZÁVĚR | 35 |
| 6 REFERENCE..... | 37 |
| SEZNAM PŘÍLOH NA DVD..... | 38 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 39 |
| SEZNAM GRAFŮ..... | 39 |
| SEZNAM TABULEK | 40 |

Přehled použitých zkratk a symbolů

| Zkratka | Popis |
|------------------------|------------------------------------------------|
| Soustava S – N – O – P | Soustava stroj – nástroj – obrobek – přípravek |
| VBD | Výměnná břitová destička |
| NC | Numerical control |
| DVD | Digital Versatile Disc |
| ZČU | Západočeská univerzita |
| DoE | Design of experiment |
| ČSN | Česká technická norma |

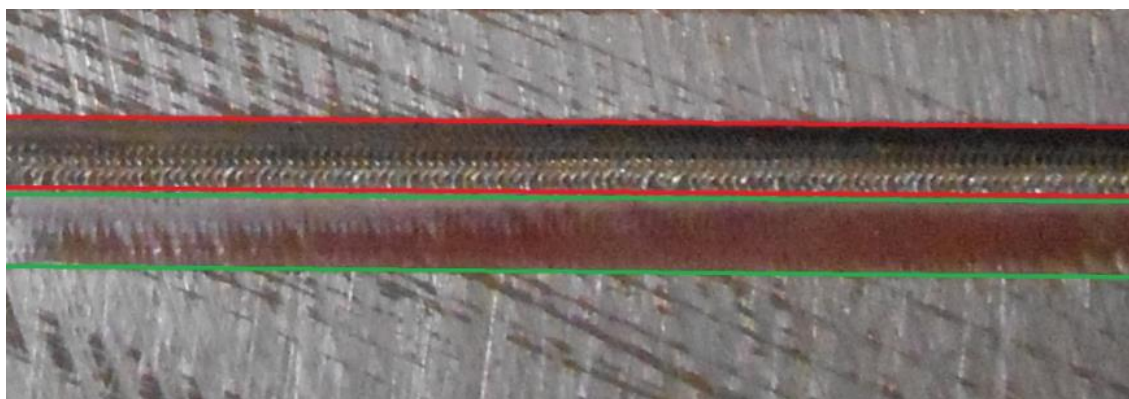
| Symboly a značky | Jednotky | Popis |
|------------------|----------|-----------------------------------------|
| r | mm | Poloměr kulové frézy |
| D | mm | Průměr kulové frézy |
| β_f | ° | Úhel podélného vyklonění |
| β_n | ° | Úhel příčného vyklonění |
| n | ot/min | Otáčky vřetena |
| a_p | mm | Hloubka řezu |
| v_f | - | Směr posuvu |
| d_{eff} | mm | Efektivní průměr |
| v_{ceff} | m/min | Efektivní řezná rychlost |
| f_z | mm/zub | Posuv na zub |
| v_c | m/min | Řezná rychlost |
| F_{abs} | N | Absolutní složka řezných sil |
| F_x, F_y, F_z | N | Jednotlivé složky řezných sil |
| A_{abs} | N | Amplituda řezných sil |
| A_x, A_y, A_z | N | Jednotlivé složky amplitudy řezných sil |
| F_{rad} | N | Radiální složka řezné síly |
| F_{tan} | N | Tangenciální složka řezné síly |
| k | - | Počet faktorů |
| p | - | Počet pokusů |
| M_k | Nm | Krouticí moment |
| M_o | Nm | Ohybový moment |

1 Úvod

V dnešní společnosti se zvyšuje četnost požadavků na vyšší rychlost výroby a nižší finanční náklady při zachování kvality. Tlak na tuto skutečnost lze pozorovat v mnoha odvětvích průmyslu. Aby firmy i menší podnikatelé přežili v konkurenčním prostředí, musí tento fakt brát na vědomí. Proto je optimalizace a racionalizace ve všeobecném smyslu významný prostředek ke snižování cen a zkracování doby výroby. Jeden z problémů, jehož se racionalizace může týkat, nastává při obrábění kulovou frézou.

Kulová fréza se používá pro obrábění tvarově složitých ploch v místech, kam se ostatní nástroje nedostanou. Avšak nevýhodou tohoto nástroje je nižší tuhost způsobená velkou štíhlostí. A právě nižší tuhost vede ke ztrátě stability řezného procesu, která má podstatný vliv na produktivitu obrábění. Pro opětovné dosažení stability řezného procesu je vyžadováno významné snížení řezných parametrů. Tato realita vedla k úvahám, jak by se daná situace dala zlepšit a v rámci těchto úvah vyvstala určitá hypotéza. Hypotéza předpokládá, že vhodnou strategií vedení nástroje po obrobku lze do jisté míry ovlivnit stabilitu řezného procesu. Konkrétně změnou nastavení příčného vyklonění kulové frézy vůči obrobku. Ověřování této hypotézy dosud probíhalo na ZČU ve dvou experimentech a bylo prokázáno, že kladné příčné vyklonění přispívá ke stabilitě řezného procesu.

Experimenty tohoto druhu jsou obecně nákladné a časově náročné zároveň. Možným řešením je výzkumy faktorově omezovat jako v případě předchozích experimentů, ve kterých šlo o potvrzení nebo vyvrácení hypotézy. Například hloubka řezu, otáčky a posuv na zub byly blokovány na konstantní hodnotě nebo nabývaly dvou případně tří úrovní. Druhým způsobem, který je zároveň úkolem této práce, jak snížit zmíněná negativa, je omezit sofistikovaně množství pokusných drah tak, aby byla zachována významnost a důvěryhodnost výsledků. Toho lze dosáhnout využitím vhodné strategie plánování experimentů, ve které je možné zapojení většího počtu faktorů ve více úrovních. Avšak k naplánování takového experimentu je nutná spolupráce s odborníkem, jenž má s plánováním zkušenosti.



Obrázek 1 – Detail na dvojí povrch [1]

V posledním z předcházejících experimentů byl jako vedlejší produkt náhodně objeven Bc. Petrou Frkovou nový jev. Tímto jevem je dvojí povrch vznikající na určité části stopy po frézování, který je zobrazen na obrázku č. 1, kde červeně ohraničená plocha vyznačuje primární povrch. Zeleně ohraničená část označuje sekundární povrch, který vznikal při výjezdu nástroje z řezu [1]. Cílem této práce však není zabývat se primárně vysvětlením tohoto jevu. Pouze poskytnout k tomuto jevu informační materiál, jelikož tento experiment je vlastně součástí širšího výzkumu a bude vyhodnocován mimo rámec této práce.

2 Bližší specifikace problému a teoretická východiska

Na počátku je potřeba uvést jednu podstatnou věc, která v době zadávání práce byla přehlédnuta. Z úvodu je patrné, že zkoumaným problémem je nestabilita řezného procesu v podobě vibrační kulové frézy během obrábění spolu s poskytnutím informačního materiálu ohledně dvojího povrchu. Ovšem z toho důvodu by se mohlo zdát, že tato práce se zabývá něčím jiným, než je specifikováno v názvu. Pravdou je, že cílem práce je zkoumání vibrační pomocí řezných sil, které je také možné měřit formou akustických emisí, vibrometrem nebo například pomocí kvality obrobeného povrchu. Proto by se tato bakalářská práce měla jmenovat „Vliv parametrů obrábění na síly při obrábění kulovou frézou strategií vlečení s ohledem na vibrace“. Bohužel název již nejde pozměnit, přesto se práce skutečně věnuje vztahu řezných sil a řezných parametrů, jen to jaksí překračuje.

Doposud byly řezné síly zkoumány jakožto staticky působící. Ovšem ve skutečnosti na stabilitu řezného procesu má největší účinek dynamická složka řezných sil. Z toho důvodu je v tomto experimentu zkoumán vztah řezných parametrů (hloubka řezu, posuv na zub, otáčky a úhel příčného vyklonění) a řezných sil s ohledem na amplitudu prostřednictvím průběhu ohybového a kroutícího momentu, které jsou zkoumanými odezvami.

Z hlediska správné terminologie amplituda představuje maximální výchylku zkoumané veličiny od střední hodnoty. Ovšem v případě této práce bude za amplitudu považovaná hodnota představující rozdíl mezi maximální a minimální úrovní, kterou daná veličina (moment) nabývá.

2.1 Poloha kulové frézy

Nastavení polohy kulové frézy vůči obrobku lze popsat více způsoby. Vzhledem k tomu, aby byla zachována jednotota mezi pracemi zabývajících se tímto tématem, bude zde použit totožný systém značení, tedy v podobě podélného a příčného vyklonění. Bohužel tento typ značení je z hlediska terminologie pro tento konkrétní experiment nepřesný. Avšak přesto existují důvody k použití tohoto systému značení, které jsou uvedeny níže.

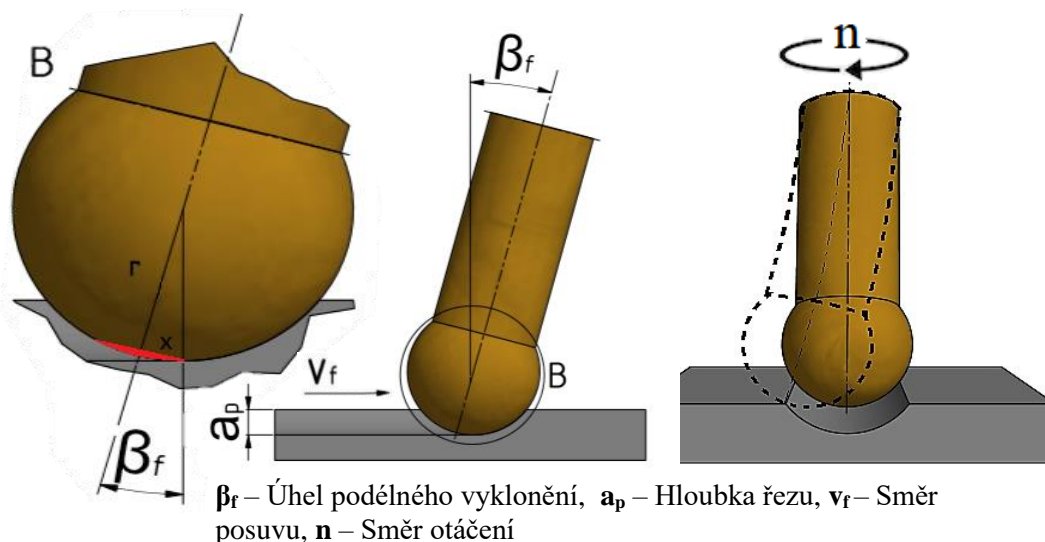
2.1.1 Podélné vyklonění kulové frézy a souvislosti s ním spojené

Jak již bylo zmíněno v úvodu, kulová fréza se používá k dokončování tvarově složitých ploch. Na vrcholu nástroje v místě, kde osa nástroje protíná povrch koule, se nachází *kritický bod*. V tomto bodě, kde je řezná rychlost nulová a v jeho blízkém okolí, ve kterém zmíněná rychlost nedosahuje požadované hodnoty pro správnou funkčnost břitů, není materiál náležitě odřezáván, nýbrž je tvářen. Oblast, která zahrnuje uvedený *kritický bod* a jeho blízké okolí, budeme nadále v tomto textu označovat jako *kritická oblast*. Toto tváření ve formě pýchování materiálu a smýkání nástroje po povrchu obrobku spolu s nepřesnou geometrií břitů v této oblasti poznamenává kvalitu povrchu. Rovněž uvedená *kritická oblast* výrazně snižuje trvanlivost části břitů oproti části, jež se nachází mimo tuto oblast. Podélným vykloněním ve směru posuvu lze *kritickou oblast* odstranit z řezu. Pro představu v případě kulové frézy o průměru 8 mm lze za blízké okolí považovat oblast, jež je vzdálená od kritického bodu na poloměr asi tak 1 mm. Tato odhadovaná vzdálenost je podpořena skutečností, že se nástroj v praxi standardně vyklání o 15°. Rovnice (1) ukazuje závislost mezi úhlem podélného vyklonění β_f , poloměrem nástroje r a neznámou vzdáleností od *kritického bodu* x . Dosazením do této rovnice vyjde hodnota, jež je téměř totožná odhadované vzdálenosti, která vymezuje velikost *kritické oblasti*. Na obrázku č. 2 lze vidět podélné vyklonění, kde nástroj je vlečen po obrobku. Spodní šedá část představuje obrobek a světle hnědou je vyobrazena kulová fréza. Rovněž na obrázku v detailu B lze vidět červeně vyznačenou část, která vymezuje *kritickou oblast*. Je možno si povšimnout, že celá tato oblast se během obrábění s podélným vykloněním nachází

mimo řez, a tím jsou omezena výše zmíněná negativa obrábění kulovou frézou.

$$x = \sin(\beta_f) * r \quad (1)$$

$$x = \sin(15) * 4 = 1,035\text{mm}$$



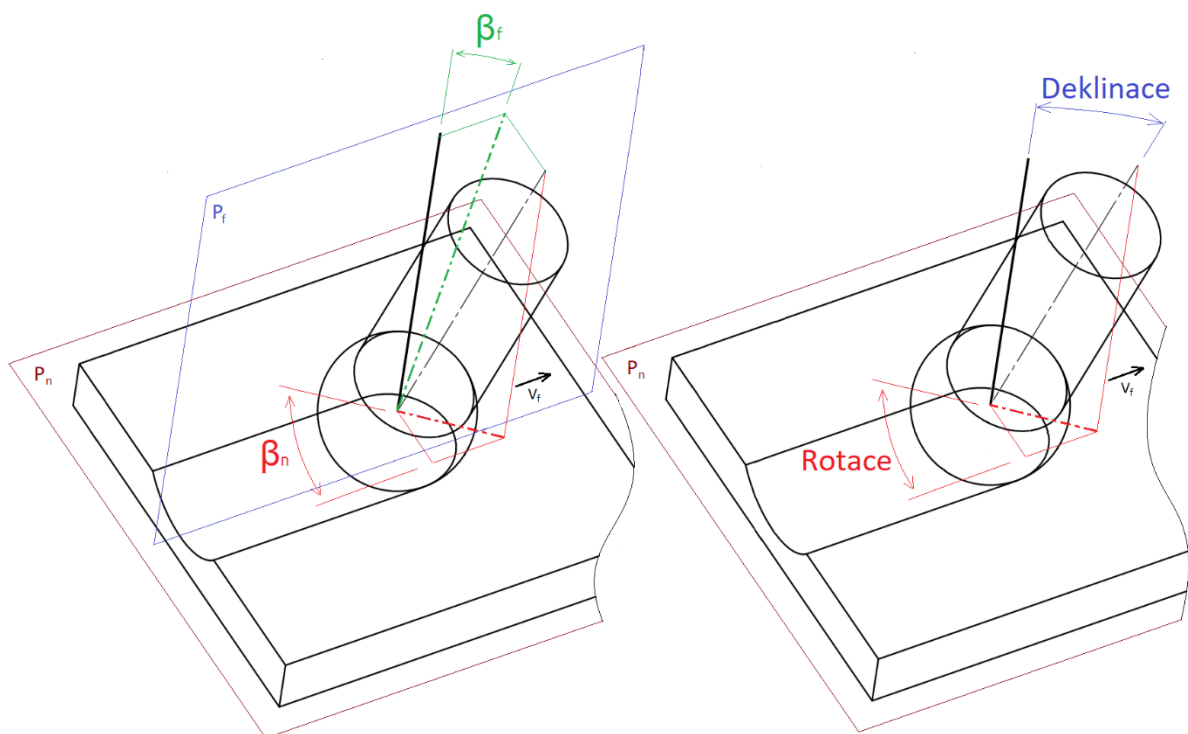
Obrázek 2 – Podélné vyklonění kulové frézy a jeho vychýlení při frézování

Se změnou podélného vyklonění rovněž dochází ke změně silového působení na nástroj. Při podélném vyklonění na břit působí síly, které jej vychylují na tu stranu, jež odpovídá rezistenci materiálu a způsobují částečnou destabilizaci řezného procesu v podobě chvění nástroje. Vpravo na obrázku číslo 2 je možno vidět, jak se kulová fréza vychyluje v případě pravotočivého otáčení. Ovšem toto znázornění je přehnané a slouží pouze k ukázce, jak se kulová fréza chová při obrábění s podélným vykloněním.

2.1.2 Podélné a příčné vyklonění kulové frézy

Výsledný směr, jakým je kulová fréza natočena vůči obrobku, lze chápat jako součet dvou složek. První složkou je úhel podélného vyklonění β_f (úhel vlečení), který byl popsán v předcházející kapitole a druhou je úhel příčného vyklonění β_n . Na obrázku číslo 3 vlevo je vyobrazena kombinace těchto úhlů. Příčné vyklonění reprezentuje odklon průmětu osy nástroje v rovině P_n od vektoru posuvové rychlosti, kde rovina P_n je rovnoběžná s povrchem obrobku a zároveň i s vektorem zmíněné posuvové rychlosti. Průmět osy nástroje v rovině P_f , která je kolmá na rovinu P_n a rovnoběžná s vektorem posuvové rychlosti představuje úhel podélného vyklonění β_f , který je zakótovaný k normále povrchu obrobku procházející středem koule.

Tento typ značení polohy kulové frézy byl používán předchozími experimenty, protože se v minulosti očekávalo maximálního uklidnění řezného procesu při malém příčném vyklonění. Ovšem poslední z předcházejících experimentů prokázal, že ani při nejvyšší hranici příčného vyklonění $\beta_n = 45^\circ$ řezné síly nedosáhly žádného extrému a měli stále tendenci klesat s rostoucím příčným vykloněním. Z toho důvodu je vhodné zvětšit horní hranici příčného vyklonění a s tím souvisí zmíněná terminologická nepřesnost tohoto značení pro tento konkrétní experiment. Protože v případě nastavení příčného vyklonění na $\beta_n = 90^\circ$ je z hlediska terminologie podélné vyklonění nulové, bylo by vhodnější použít přesnější definici v podobě termínů deklinace a rotace, kde by deklinace reprezentovala odklon od normály k povrchu obrobku a rotace natočení okolo této normály, jak lze vidět na obrázku číslo 3 vpravo.



Obrázek 3 – Podélné a příčné vyklonění kulové frézy, deklinace a rotace

S politováním je nezbytné konstatovat, že předchozí práce převzaly dosti nekorektně terminologii značení v podobě rotace a deklinace a vydávaly je za podélné a příčné vyklonění. Protože je nutné dodržet jistou návaznost mezi jednotlivými pracemi, bude zde použito opět značení v podobě příčného a podélného vyklonění. I když ve skutečnosti bude podélné vyklonění představovat deklinaci a příčné vyklonění rotaci.

Tento způsob kótování polohy kulové frézy pomocí úhlů β_n a β_f , respektive pomocí deklinace a rotace je rovněž zohledněn vůči stroji a NC programu. Úhel β_n zajišťuje osa C, tedy otočný stůl a úhel β_f je nastaven pomocí osy A (naklápění otočného stolu).

2.2 Hypotéza

Hypotéza vznikla již před několika lety a na jejím základě byly na ZČU provedeny dva experimenty. Je to vlastně tvrzení, že pokud by se kulová fréza při strategii vlečení vyklonila navíc do příčného směru tak by se mohlo dosáhnout uklidnění řezného procesu. Toto tvrzení bylo předcházejícími experimenty potvrzeno. Zároveň hypotéza může jít dále za toto tvrzení a může se snažit vysvětlit pomocí nějakého mechanismu, proč tomu tak je. Je možné že za uklidněním stojí síly od obrábění, které při vyklonění kulové frézy do příčného směru mají do značné míry podobný směr jako posuv na otáčku a tím je dosaženo uklidnění řezného procesu. Současně může docházet k uklidnění také vlivem posuvu, proti kterému působí síly od materiálu na hřbetní stranu nástroje. Tyto síly jsou při $\beta_n = 0^\circ$ zanedbatelné, ale se vzrůstající hodnotou příčného vyklonění až k $\beta_n = 90^\circ$ jsou tyto síly stále větší a způsobují, že se hřbetní strana kulové frézy opírá o čerstvě obrobenu plochu. Nicméně, důvodů, proč dochází k uklidnění při frézování s příčným vyklonění kulové frézy může být více. Zároveň zmíněná vysvětlení nemusí být správná. Je možné, že pouze došlo k interakci několika faktorů, jež způsobují uklidnění řezného procesu. I když předpokládaného efektu v předcházejících experimentech bylo dosaženo.

2.3 Metodika řešení problému

Podstatou této práce je přinést nové informace zabývající se vibracemi, které při obrábění kulovou frézou vznikají, a to konkrétně prostřednictvím řezných sil v závislosti na řezných parametrech. Úkolem při zkoumání tohoto problému je zohlednit co nejvíce faktorů v poměrně větší škále. Zároveň je nutné se pokusit dosáhnout co nejmenšího počtu jednotlivých pokusů s ohledem na kapacitu stroje, na kterém se má experiment konat a k tomu je potřeba podřídit metodiku řešení problému, která zde také uvádí jednotlivé skutečnosti, jež by se měli po celou dobu brát v úvahu.

Plánování experimentu

Aby bylo dosaženo minimálního počtu pokusů a zároveň v experimentu byly zahrnuty všechny požadované faktory v co největší šířce, a s co největší vypovídající schopností, je nutné experiment řádně naplánovat. Avšak naplánovat takový experiment vyžaduje mnohaleté zkušenosti, a tak je potřeba se kvůli tomu spojit s odborníkem na plánování a ve spolupráci s ním experiment naplánovat tak, aby se dal statisticky vyhodnotit. Návrhy takových experimentů vznikají podle *Design of Experiment (DoE)*, v nichž jsou vybírány sofistikovaným způsobem jednotlivé pokusy, které systematicky kombinují úrovně faktorů bez toho, aniž by testovali všechny jejich kombinace.

Zároveň je při plánování experimentu nutné jednotlivé pokusy znáhodnit, aby se zamezilo *vlivu času*, který by mohlo negativně, ale i pozitivně zkreslovat výsledky experimentu a tím celý výzkum znehodnotit.

Dále je nutné si ujasnit jaké veškeré prostředky k experimentu budou zapotřebí včetně veškerého materiálu, jak na straně obrobku, tak na straně nástroje a přístrojů. Jako první se musí navrhnout polotovar, který musí splňovat určité podmínky a zásady, ať už jde o velikost, materiál nebo způsob upnutí. Velikost polotovaru by neměla přesahovat rozměry stolu v obráběcím stroji. Protože již na začátku je známo, že se polotovar po provedení experimentu bude rozřezávat na jednotlivé obrobené pokusy musí být zároveň dostatečně velký, aby vzdálenost mezi nimi nebyla příliš malá. Důležité je také zohlednit velikost vůči způsobu upnutí, které je možné provést pomocí upínek, šroubů nebo také pomocí magnetické upínače.

Vzhledem k tomu, že zkoumaným problémem je nestabilita řezného procesu v podobě vibrací kulové frézy je vhodné při volbě materiálu zvolit takový, u kterého by při obrábění v praxi bylo nutné značné omezení řezných parametrů z důvodu vysoké houževnatosti. A právě vysoká houževnatost způsobí, že pro oddělení třísky je nutné vynaložit více energie, a to se projeví větší nestabilitou, která je v této práci zkoumána.

Plánování experimentu – uspořádání dat

Protože v plánovaném experimentu jsou čtyři proměnné faktory, které budou sledovány ve více úrovních, je nutné kvůli rozsahu celého experimentu vymyslet jednotný systém značení pro veškerý materiál a data, aby během vyhodnocování nedošlo k jejich záměně. Jelikož počet pokusů například pro plno faktorový experiment se čtyřmi úrovněmi by obsahoval 4^5 pokusů bez opakování, které je při provádění výzkumu z hlediska odhadování nepřesnosti měření důležité. Proto je vhodné všechny použité břitové destičky, polotovar, i naměřená data označit takovým způsobem, který bude jasný a zřetelný, aby po provedení experimentu bylo jasné, která destička, a který záznam patří k jakému obrobenému pokusu.

Před zahájením i v průběhu realizace experimentu je také nezbytné nějakým rozumným způsobem zaznamenávat veškerá důležitá fakta, která nastanou, protože v případě experimentu musí být splněna podmínka opakovatelnosti, aby v budoucnu šlo experiment v případě nutnosti přesně zopakovat.

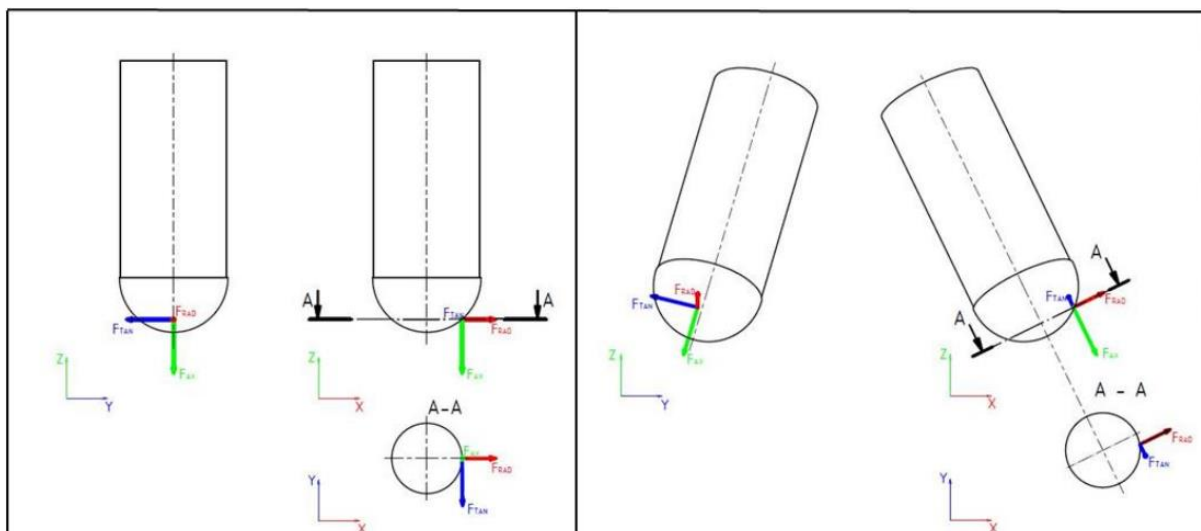
Příprava, realizace a vyhodnocení experimentu

V neposlední řadě je příprava a realizace samotného experimentu. Nejprve je nutné se domluvit s příslušným pracovníkem na konkrétní čas s ohledem na časovou kapacitu stroje a provést experiment. Po provedení experimentu je nutné v součinnosti s příslušným odborníkem na plánování experimentů celý experiment statisticky vyhodnotit a zhodnotit. Dalším užitečným bodem je veškerá data pečlivě uschovat a mít k dispozici.

2.4 Teoretická východiska

Než se začne s celým experimentem, je nutno si ujasnit jisté skutečnosti, které je zapotřebí vzít v úvahu. Některé skutečnosti se týkají samotného obrábění, kupříkladu jevy při obrábění: kritický bod, silová působení (rozklad řezných sil) a méně podstatná distribuce tepla. Dále souvislost s tuhostí systému S–N–O–P. Charakter obrobku (tvar a materiálové vlastnosti), chlazení, geometrie nástroje, řezné podmínky.

Největší vliv a vypovídající hodnotu o stabilitě řezu mají řezné síly, které jsou přímo závislé na všech zmíněných skutečnostech. Bc. Petra Frková uvedla za nejpodstatnější rozdíl mezi vykloněnou a nevykloněnou kulovou frézou směr působení řezných sil. Zatímco v případě nevykloněného nástroje jsou směry působení sil totožné se souřadnicovým systémem stroje, u vykloněného tomu tak není [1]. Rozklad sil do tangenciálního, radiálního a axiálního směru v určitém bodě lze vidět na obrázku číslo 4.



Obrázek 4 – Rozklad řezných sil nevykloněné kulové frézy (vlevo) a vykloněné kulové frézy (vpravo) [1]

Pan Bc. Jan Dvořáček, jenž analyzoval chování nástroje při pětiosém frézování ve své práci napsal, že s vykloněním nástroje přichází rovněž změna efektivního průměru frézování d_{eff} a změna efektivní řezné rychlosti v_{ceff} . Již nevykloněný nástroj je v tomto ohledu proměnlivý vlivem kruhového tvaru řezné části břitů a závisí na hloubce řezu a_p spolu s průměrem řezné části nástroje D [2]. Výpočet efektivního průměru d_{eff} pro nevykloněný nástroj je dán vztahem (2), který přímo navazuje na efektivní řeznou rychlost v_{ceff} uvedenou pod ním.

$$d_{eff} = 2 * \sqrt{a_p * (D - a_p)} \quad (2) [2]$$

$$v_{ceff} = \frac{\pi * d_{eff} * n}{1000} = \frac{2 * \pi * n * \sqrt{a_p * (D - a_p)}}{1000} \quad (3) [2]$$

V případě vykloněného nástroje se tyto výpočty liší, jak lze pozorovat níže. S rostoucím úhlem podélného vyklonění β_f rostou i hodnoty efektivního průměru d_{eff} a v závislosti na něm i efektivní řezné rychlosti v_{ceff} .

$$d_{eff} = D * \sin \left[\arccos \left(\frac{D - 2 * a_p}{D} \right) \pm \beta_f \right] \quad (4) [2]$$

$$v_{ceff} = \frac{\pi * d_{eff} * n}{1000} = \frac{\pi * n * \left\{ D * \sin \left[\arccos \left(\frac{D - 2 * a_p}{D} \right) \pm \beta_f \right] \right\}}{1000} \quad (5) [2]$$

3 Vyhledávání podstatných informací k problematice

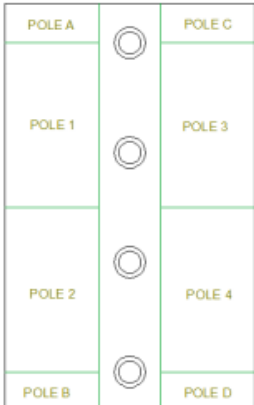
V úvodu již byla zmínka o tom že, tento experiment je součástí širšího výzkumu. Konkrétně navazuje na dva předešlé, které se zabývaly stejnou problematikou. První experiment, který se zabýval hypotézou, jež byla popsána v kapitole 2.2, provedl pan Bc. Ondřej Jukl. V experimentu se pokoušel nalézt optimální nastavení úhlu příčného vyklonění kulové frézy a byl prvním člověkem potažmo studentem ve zkoumání této problematiky na Západočeské univerzitě v Plzni. Druhý experiment byl proveden Bc. Petrou Frkovou a ověřoval výsledky prvního experimentu s doporučeními, jež uvedl ve své práci pan Jukl pro další zkoumání. Více o nich se lze dočíst níže.

3.1 První experiment – hledání optimálního nastavení úhlu příčného vyklonění kulové frézy

První experiment se konal roku 2011 a pokoušel se nalézt optimální nastavení úhlu příčného vyklonění. Řezné podmínky spolu s rozdělením polotovaru z tohoto experimentu je možno vidět na obrázku číslo 5. Polotovar byl rozdělen do čtyř vedlejších polí označených A až D a do čtyř hlavních polí označených číslovkou 1 až 4. Vedlejší pole sloužily k obrobění zkušebních pokusů pro kalibraci měřících přístrojů a vhodného nastavení vysunutí nástroje. Pro samotné měřené pokusy, které byly vyhodnocovány sloužily pole 1 až 4. V těchto polích otáčky, posuv na zub a úhel podélného vyklonění nabývaly konstantních hodnot. Jediným proměnným faktorem byla hloubka řezu, v závislosti na ní se změnil efektivní průměr obrábění i efektivní řezná rychlost. Hloubka řezu dosahovala pouze dvou úrovní. Tyto faktory měly stejnou hodnotu v poli 1 a 2 a jinou v poli 3 a 4. Úhel příčného vyklonění nabýval intervalu $\beta_n \in < -80^\circ; +80^\circ >$ s krokem 10° .

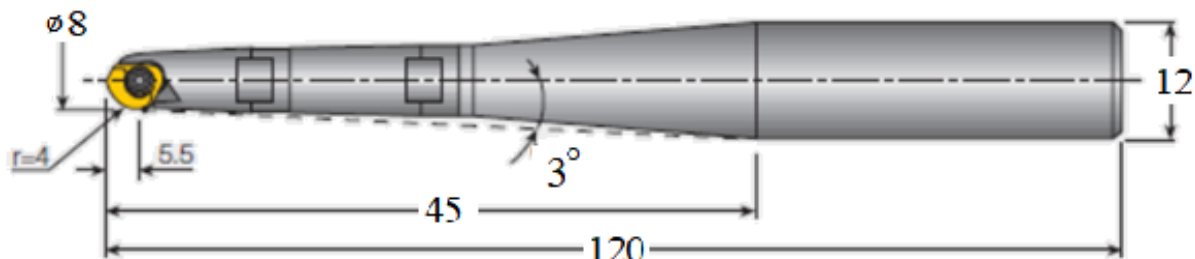
Zkoumána byla drsnost povrchu a řezné síly. Autor ve své práci uvedl, že drsnost povrchu byla vyhodnocována drsnoměrem značky MAHR MarSurf M300 s rozsahem snímače drsnosti $350 \mu\text{m}$ a řezné síly byly měřeny pomocí třísložkového dynamometru Kistler Type 9255A [3], který byl upnut na otočný stůl obráběcího centra a následně přímo na dynamometr byl upnut polotovar pomocí šroubů. Síly od obrábění se tak zaznamenávaly do směrů os obrobku. „Hlavním účelem měření tohoto parametru nebyl reálný rozbor silového zatížení frézy, ale vliv úhlu β_n na průběh celkového zatížení frézy“ [3].

| | Pole 1 | Pole 2 | Pole 3 | Pole 4 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| n [ot/min] | 4000 | | | |
| f _z [mm/zub] | 0,25 | | | |
| β _r [°] | 15 | | | |
| a _p [mm] | 0,2 | | 0,3 | |
| d _{eff.} [mm] | 4,38 | | 4,85 | |
| v _{eff.} [m/min] | 55,04 | | 60,95 | |

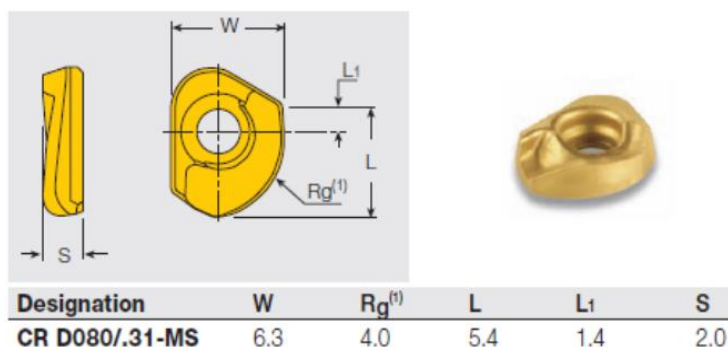


Obrázek 5 – Řezné podmínky a rozvržení polotovaru [2]

Experiment byl proveden na pětiosém frézovacím centru s označením Hermle U 1130, pro který byl zvolen materiál ČSN 14 220. Obrábělo se kulovou frézou s vyložením 92 mm. VBD destička byla upnuta v držáku s označením CM D08–B–C12, který lze vidět na obrázku č. 6, na němž jsou zakótované jednotlivé rozměry kulové frézy. Parametry použité VBD destičky lze vidět na obrázku č. 7.



Obrázek 6 – Schéma kulové frézy použité v prvním experimentu [3]



Obrázek 7 – VBD CR D080/.31-MS [3]

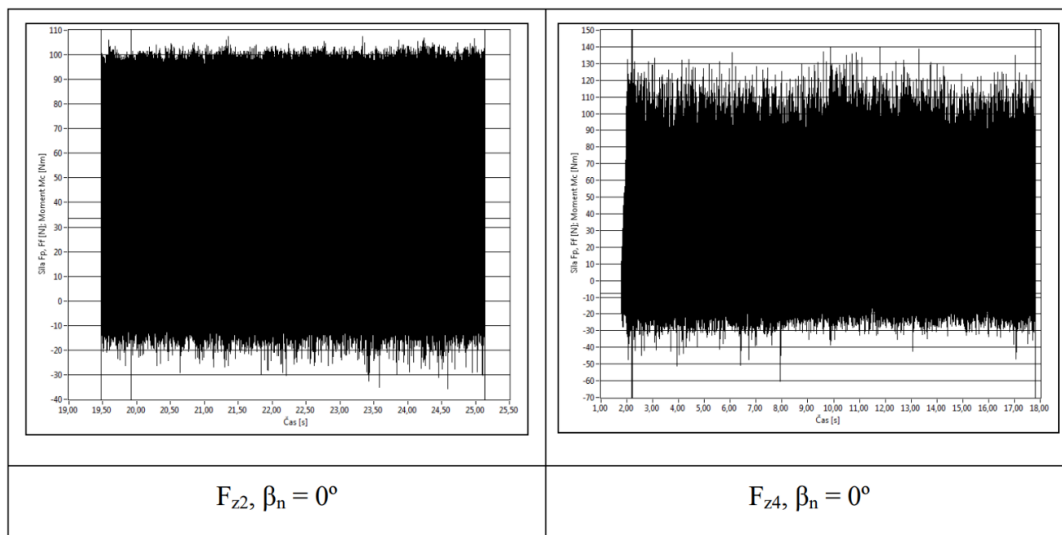
3.1.1 Vyhodnocování prvního experimentu

V experimentu byl použit dynamometr, který zaznamenával síly do souřadného systému obrobku, proto se nejprve tyto síly vektorově sečetly tak, jak je vidět na rovnici (6), aby poté mohla být výsledná absolutní síla porovnána s jednotlivými úhly příčného vyklonění.

$$F_{abs} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (6)$$

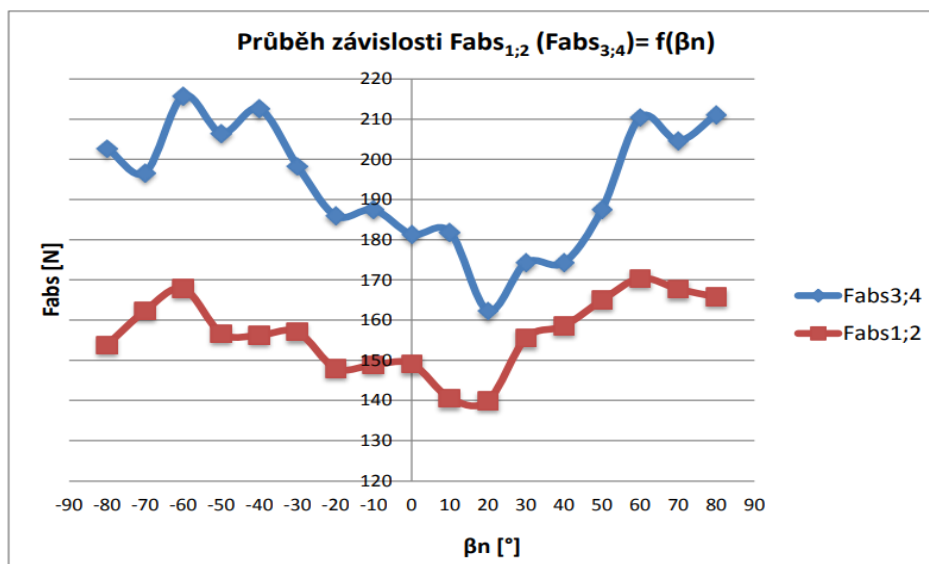
Ukázku záznamu sil lze vidět na obrázku číslo 8. Osa x reprezentuje čas a osa y velikost řezné síly. Nalevo je zobrazen záznam z druhého pole a napravo ze čtvrtého. Hlavní odlišností, co se vstupních parametrů týče, je rozdílná hloubka řezu. Na záznamu vpravo dosahuje větší úrovně než vlevo. Pan Bc. Ondřej Jukl poukázal na skutečnost, že v případě „průběhu F_{z2} při β_n = 0°, je vidět stabilní průběh řezné síly, naopak je tomu u průběhu F_{z4} při β_n = 0°, kde dochází k výrazným skokům jak ve velikosti řezné síly, tak jejím rozkmitu“ [3]. Z toho lze poukázat na

fakt, jak velký vliv na velikost řezných sil, respektive na stabilitu řezného procesu má hloubka řezu.



Obrázek 8 – Ukázka záznamu sil v prvním experimentu [3]

Za prvé v práci byl zkoumán vztah příčného vyklonění β_n na absolutní hodnotě zatížení F_{abs} , který lze vidět v grafu číslo 1. Modrá křivka zobrazuje hodnoty absolutního zatížení kulové frézy v poli 3 a 4, tedy v místě, kde hloubka řezu dosahovala větší hloubky oproti červené křivce popisující průběh sil v poli 1 a 2. Již na první pohled lze z grafu vyčíst, že k nejmenšímu absolutnímu zatížení kulové frézy dochází v oblasti kladného příčného vyklonění od 10° do 20° .

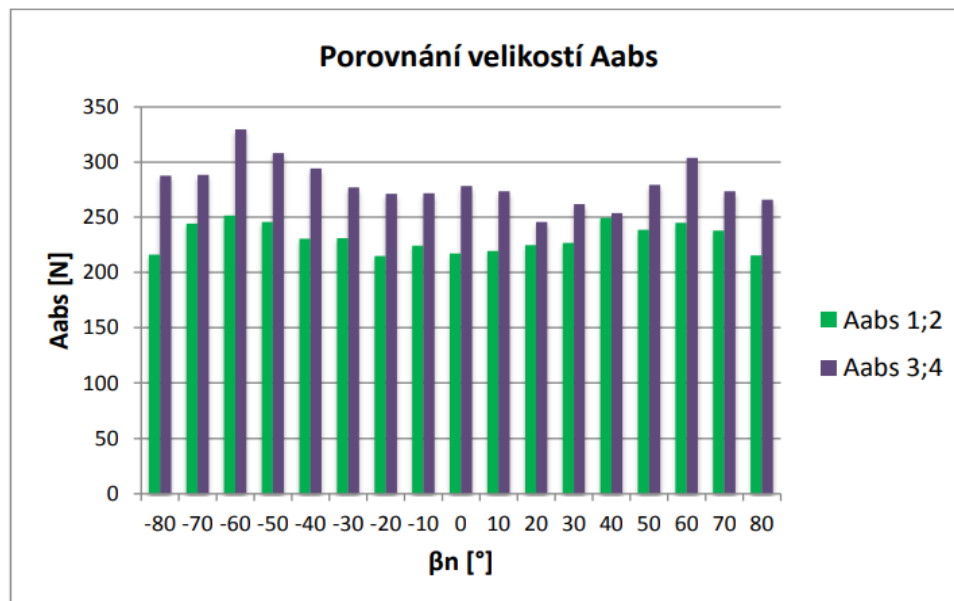


Graf 1 – Závislost úhlu příčného vyklonění β_n na absolutním zatížení F_{abs} [2]

Za druhé se srovnával v absolutní hodnotě rozkmit řezných sil A_{abs} v závislosti na příčném vyklonění β_n , obdobně jako v předešlém případě. Do vzorce (7) byly dosazovány hodnoty rozkmitu odečtené z průběhu sil z jednotlivých směrů a následně byl vytvořen graf číslo 2. Autor napsal, že tento graf potvrzuje zmíněnou hypotézu o zklidnění řezného procesu [3]. V případě pole 3 a 4 na intervalu $\beta_n \in <-20^\circ; +40^\circ>$ tomu tak opravdu je. Avšak nejpříznivější rozsah pro pole 1 a 2 je v rozsahu $\beta_n \in <-20^\circ; +20^\circ>$, což ve výsledku potvrzuje hypotézu, jak

konstatoval autor, ale jen nepatrně.

$$A_{abs} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (7)$$



Graf 2 – Amplituda řezných sil A_{abs} v závislosti na příčném vyklonění β_n [3]

Za třetí byla v práci zkoumána závislost kvality povrchu na příčném vyklonění β_n . Pan Bc. Ondřej Jukl podotkl, že charakteristiky drsností změřené drsnoměrem nebyly tak rozdílné, aby z nich mohl jednoznačně vyvodit závěr a napsal „že určitého zlepšení drsnosti povrchu se dosáhne příčným vykloněním v intervalu hodnot $\beta_n = -20^\circ$ až $+40^\circ$ “ [3]. Z toho důvodu ještě kvalitu povrchu hodnotil opticky pomocí detailních fotografií obrobených stop, na nichž se ukázal nejlepší povrch při $\beta_n = +40^\circ$.

3.1.2 Zhodnocení prvního experimentu

K této práci se již vyjadřovala Bc. Petra Frková a poukázala na fakt, že tento experiment do jisté míry potvrdil hypotézu, že kladné příčné vyklonění kulové frézy podporuje stabilitu řezného procesu. Průkaznost ovšem nebyla příliš statisticky významná. Jako možné důvody označila použitý typ dynamometru, styl vyhodnocování závislosti mezi příčným vykloněním a řeznými silami spolu s malým počtem obrobených pokusů [1]. Nelze nesouhlasit s jejím názorem na typ použitého dynamometru, jelikož zaznamenával síly do souřadného systému obrobku, a ne do souřadného systému nástroje. Zároveň vyhodnocování závislosti příčného vyklonění na řezných silách pomocí absolutní hodnoty řezné síly nebylo úplně správně, protože absolutní hodnota řezné síly rovněž zahrnuje sílu působící ve směru osy nástroje nemající na stabilitu řezného procesu výrazný vliv. Nicméně nebylo zcela správné označit jako možný důvod malé průkaznosti malý počet obrobených pokusů. Je pravdou, že čím více je pokusů, tím z nich jde vyvodit přesvědčivější výsledky, avšak vhodně nadimenzovaný experiment dokáže přinést téměř stejně hodnotné informace i z malého počtu pokusů.

3.2 Druhý experiment – ověřování vlivu příčného vyklonění na stabilitu řezného procesu

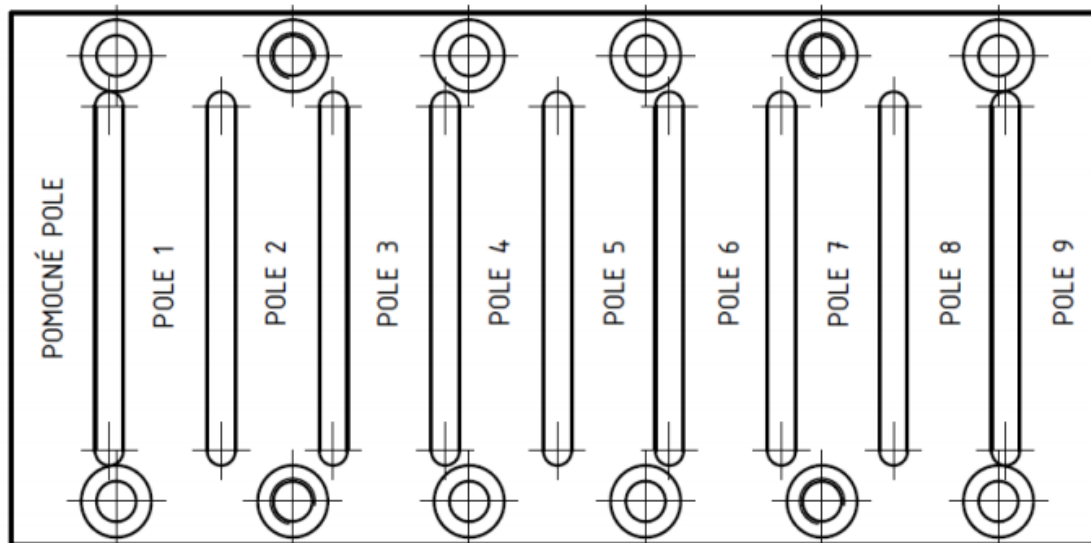
Druhý experiment zabývající se obdobnou problematikou byl proveden v roce 2017 v rámci diplomové práce Bc. Petry Frkové. V tomto experimentu byla hloubka řezu blokována na konstantní hodnotě. Otáčky a posuv na zub dosahovaly tří úrovní. Protože z prvního

experimentu se ukázalo, že největší pozitivní vliv na stabilitu řezného procesu je okolo hodnoty $\beta_n = 10^\circ$ a $\beta_n = 20^\circ$, byl tedy interval úhlu příčného vyklonění snížen na $\beta_n \in < -45^\circ; +45^\circ >$ a krok se zmenšil na 5° . Veškeré parametry obrábění jsou uvedeny v tabulce číslo 1, která přímo souvisí s obrázkem číslo 9, na kterém je vidět rozvržení polotovaru. Polotovar byl rozdělen na 9 hlavních polí a jedno pomocné. Pomocné pole sloužilo opět ke kalibraci měřicích přístrojů a nastavení vyložení kulové frézy jako v předešlém experimentu. Mezi jednotlivými poli byla vyfrézovaná drážka, která sloužila k najetí a vyjetí nástroje z řezu. V každém hlavním poli bylo odjeto 18 pokusů, kde každý z nich měl rozličné nastavení úhlu příčného vyklonění. Pro přesnost byl celý experiment zopakován na druhé straně polotovaru a celkově se tak obrobilo 342 pokusů. Pořadí pokusů bylo znáhodněno, aby se zamezilo vlivu času, o němž je zmínka v kapitole 4.1.1.2 na stránce 22.

V druhém experimentu byly měřeny řezné síly, drsnost povrchu a prováděla se zvuková analýza. Nejpodstatnější rozdíl mezi prvním a druhým experimentem z hlediska přístrojů je v typu použitého dynamometru. Bc. Petra Frková uvedla, že v tomto případě byl použitý dynamometr od firmy Promicron s názvem Spike, který zaznamenával řezné síly do souřadnicového systému nástroje. Drsnost byla vyhodnocována stejným přístrojem jako v případě prvního experimentu a druhým podstatným rozdílem bylo použití zvukové analýzy, navržené Bc. Janem Lerchem [1].

| Parametr | Pole 1 | Pole 2 | Pole 3 | Pole 4 | Pole 5 | Pole 6 | Pole 7 | Pole 8 | Pole 9 |
|--------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| f_z [mm/zub] | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,2 | 0,25 | 0,3 |
| n [ot/min] | 3000 | 3000 | 3000 | 3500 | 3500 | 3500 | 4000 | 4000 | 4000 |
| v_{ceff} [m/min] pro $\beta_n = 0^\circ$ | 41,3 | 41,3 | 41,3 | 48,2 | 48,2 | 48,2 | 55,0 | 55,0 | 55,0 |
| β_r [°] | 15 | | | | | | | | |
| a_p [mm] | 0,2 | | | | | | | | |
| D_{eff} [mm] pro $\beta_n = 0^\circ$ | 4,38 | | | | | | | | |

Tabulka 1 – Parametry obrábění v druhém experimentu [1]



Obrázek 9 – Rozvržení polotovaru v druhém experimentu [1]

Oproti prvnímu experimentu bylo v druhém použité odlišné pětiosé obráběcí centrum. Konkrétně DMG MORI s označením DMU 65 monoBLOCK®. Aby šlo výsledky z experimentu porovnávat, byl pro experiment zvolen stejný materiál polotovaru i typ VBD

destičky (viz obrázek číslo 7) jako v předcházejícím experimentu. Autorka v práci uvedla, že kulová fréza použitá v prvním experimentu již bohužel nebyla k dispozici, a tak byla zakoupena nová určená pro stejný typ břitové destičky. Avšak den před konáním experimentu bylo zjištěno, že pro experiment je nová kulová fréza příliš krátká, a tak byla prodloužena vlepením do ocelového pouzdra [1]. Prodlouženou kulovou frézou lze vidět na obrázku číslo 10. Během experimentu bylo pro obrábění pokusných drah použito vyložení nástroje o velikosti 129 mm.

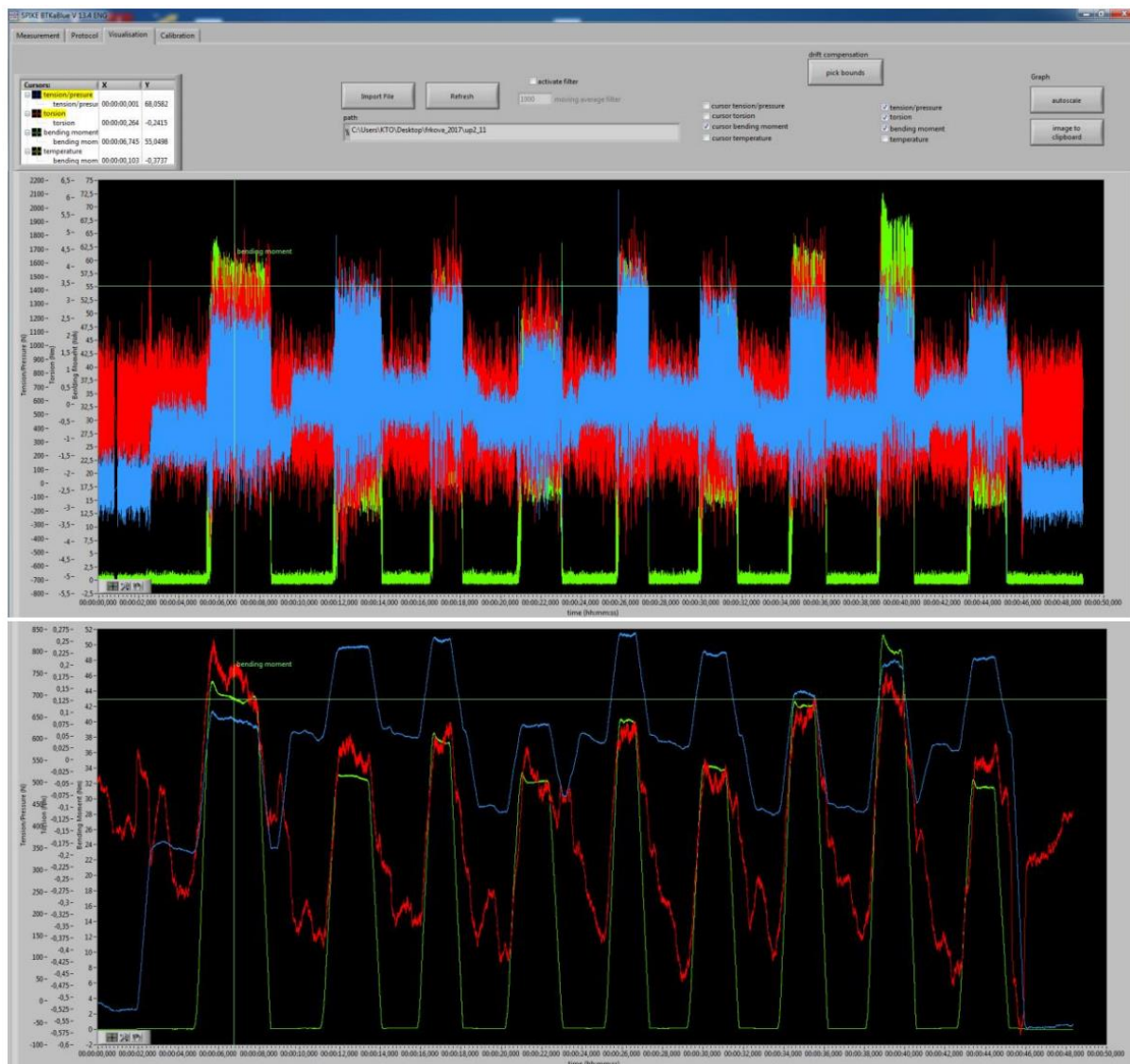


Obrázek 10 – Prodloužená kulová fréza z druhého experimentu [1]

3.2.1 Vyhodnocování druhého experimentu

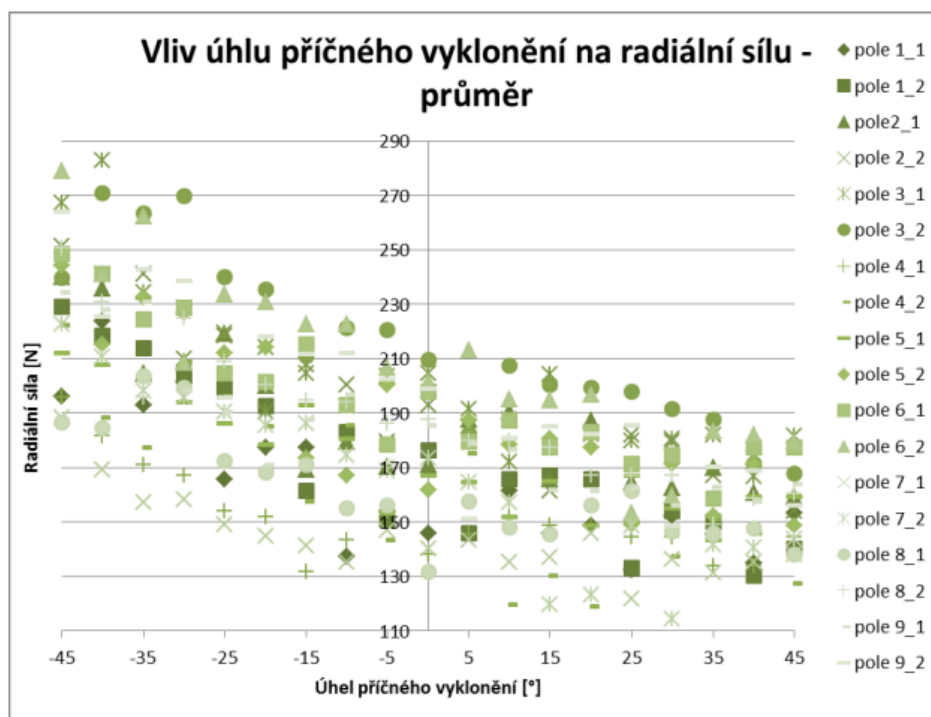
Za prvé se stejně jako v přechodí práci zkoumala závislost řezných sil (tangenciální, radiální a axiální síla) na úhlu příčného vyklonění β_n . Na rozdíl od předchozího experimentu se zde každá složka řezné síly vyhodnocovala zvlášť. Záznamy silového působení byly získány pomocí rotačního dynamometru SPIKE z programu SPIKE BTKaBlue V 13.4 [1]. Záznam obsahující devět obrobených pokusů lze vidět na obrázku číslo 11. Obrázek obsahuje totožný záznam, jen v případě dolní poloviny je zapnut filtr *kráčejší průměr*¹ s hodnotou 1000. Z takto odfiltrovaného záznamu byly odečteny potřebné hodnoty. Jen v případě ohybového momentu byla odečtena navíc hodnota maxima bez použití tohoto filtru. Červená barva představuje průběh kroučícího momentu. Zelená barva označuje průběh ohybového momentu a modrá barva vyobrazuje průběh axiální síly. Tangenciální síla byla přepočítána z kroučícího momentu. Radiální sílu z ohybového momentu a axiální sílu je možno vyčíst přímo ze záznamu.

¹ Pro příklad, pokud je do kráčejšího průměru dosazena hodnota deset tak filtr každých deset po sobě jdoucích hodnot zprůměruje a tím celý záznam vyčistí.



Obrázek 11 – Záznam obrobených pokusů v druhém experimentu [1]

Druhý experiment veškerá nasbíraná data hodnotil grafickou metodou spolu se statistickým posouzením řezných sil. Bc. Petra Frková uvedla, že složky řezné síly byly statisticky hodnoceny pouze v tangenciálním a radiálním směru, protože axiální síla nemá na stabilitu řezného procesu výrazný vliv [1]. Ukázkou grafu popisující závislost mezi radiální silou a úhlem příčného vyklonění lze vidět níže v grafu číslo 3. V grafu jsou zobrazeny hodnoty radiální síly ze všech obrobených pokusů a lze si povšimnout klesající tendence se vzrůstajícím úhlem příčného vyklonění β_n . Podobný průběh měla radiální i tangenciální síla, které zde nejsou uvedeny, aby nedošlo k zahlcení nadbytečnými informacemi.



Graf 3 – Průběh radiální síly v druhém experimentu [1]

Statisticky byly hodnoceny řezné síly v tangenciálním a radiální směru. V případě radiálního směru byly použity odečtené hodnoty bez použití *krácejícího průměru*. Tedy hodnoty sil, jenž znázorňují maximální zatížení v radiálním směru s označením $F_{rad\ max}$. Autorka pro hodnocení použila analýzu lineární regrese a analýzu rozptylu (ANOVA). Regresní analýzou byla naměřená data pro každou řeznou sílu zvlášť proložena přímkou a poté byla kontrolována důvěryhodnost, jak moc proložená přímka odpovídá skutečnému průběhu. Byla uvažována *hladina významnosti*² 95%. Takto zvolenou *hladinu významnosti* splňovaly veškeré průběhy radiální síly a téměř většina průběhů tangenciální síly [1].

Regresní analýza v druhém experimentu prokázala, že s rostoucím úhlem příčného vyklonění β_n dochází ke zmenšení silového působení jak v radiálním, tak i v tangenciálním směru, přestože v případě tangenciálního silového působení je „statistická přesvědčivost tohoto tvrzení sice významná, ale o něco nižší, než u tvrzení o radiální složce sil“ [1]. Toto snížení důvěryhodnosti je způsobené mnohem větším rozptylem úhlů, pod kterými proložené přímky průběhů tangenciálních sil klesají.

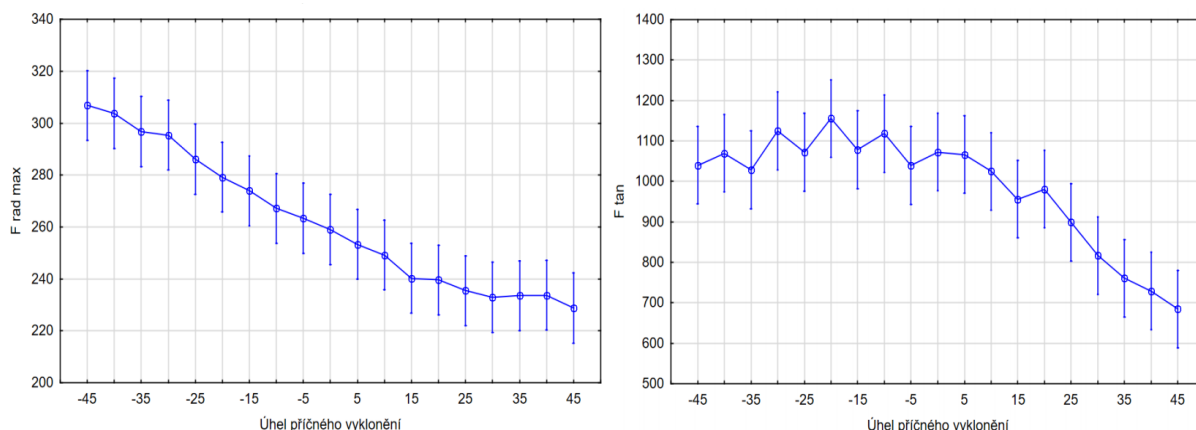
Podstatou ANOVA analýzy je rozklad celkového rozptylu naměřených dat do dvou skupin, na objasněné a neobjasněné složky. Objasněná složka reprezentuje známé zdroje variability a neobjasněná složka zohledňuje náhodné zdroje (např. chyby měření). Poté se ověřuje významnost jednotlivých zdrojů variability.

Autorka pomocí ANOVA analýzy zjišťovala vztah mezi jednotlivými zkoumanými faktory (úhel výklonu, typ vyklonění a vliv pole) na složky řezných sil v tangenciálním a radiální směru. V každém grafickém řešení níže je možné vidět střední hodnotu naměřených sil se stejnými řeznými podmínkami, kde velikost svislých čar reprezentuje hodnotu rozptylů [1].

Závislost silového působení na úhlu příčného vyklonění β_n lze vidět v grafu číslo 4, kde pro

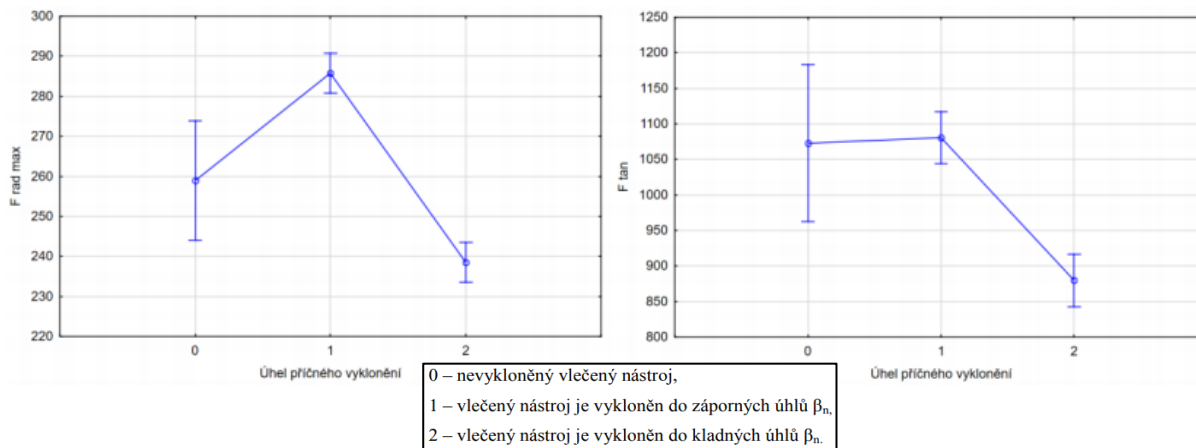
² „Při testu statistické hypotézy určená hladina významnosti říká, s jakou pravděpodobností je učiněn správný závěr. Pokud je tedy hladina významnosti 95 %, pak pouze v 5 % případech je dopuštěno chybného závěru“ [7]

zatížení F_{rad} (vlevo) je jasně viditelné, že s nárůstem úhlu příčného vyklonění β_n dochází ke snížení silového působení na nástroj. Taktéž tomu je i v případě tangenciálního zatížení F_{tan} , i když jistému mírnému snížení zatížení dochází i v záporných hodnotách úhlu příčného vyklonění β_n .



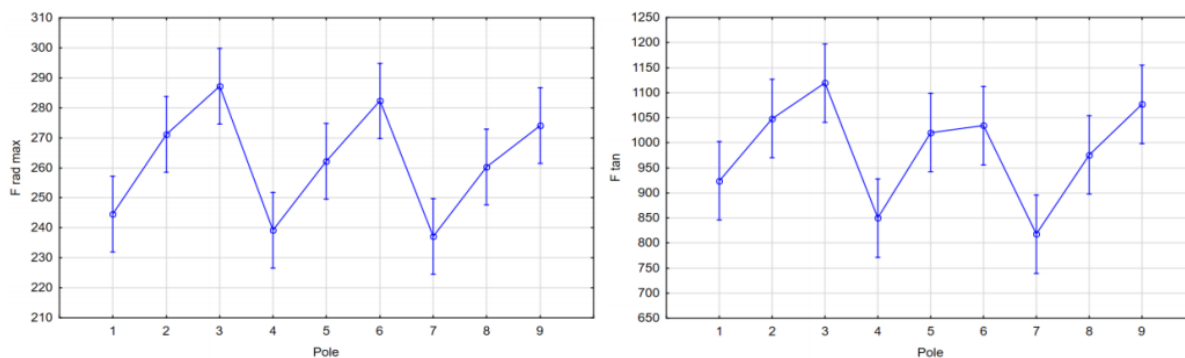
Graf 4 – Závislost F_{rad} (vlevo) a F_{tan} (vpravo) na úhlu příčného vyklonění β_n [1]

Graf číslo 5 zobrazuje závislost mezi zatížením kulové frézy a typem vyklonění. „Radiální složka řezných sil má největší velikosti při negativních úhlech výklonu. U tangenciální složky není téměř žádný rozdíl mezi obráběním s nevykloněnou vlečenou frézou a s vlečenou frézou vykloněnou do negativních úhlů příčného vyklonění. Při kladných úhlech výklonu vlečeného nástroje jsou obě složky řezných sil výrazně nižší“ [1]. Zároveň si lze povšimnout, že rozptyl řezných sil u nevykloněného nástroje je více jak dvounásobný než u vykloněného.



Graf 5 – Závislost F_{rad} (vlevo) a F_{tan} (vpravo) na typu vyklonění [1]

Poslední statisticky zkoumaný vztah v druhém experimentu byla závislost velikosti silového působení na nástroj v jednotlivých polích zobrazená v grafu číslo 6. Průběh obou sil napříč všemi poli je téměř totožný, jen v případě šestého pole tangenciální síly F_{tan} je jistá odlišnost, která nebyla blíže zkoumaná. Autorka poukázala na fakt, že průběh tangenciální síly v poli šest neodpovídal průběhu v jiných polích a nebylo možné statisticky toto pole vyhodnotit s požadovanou *hladinou významnosti*. Přesto z grafu bylo získáno mnoho informací. Zvyšující se posuv na zub má za následek výrazný vzrůst řezných sil, a naopak zvyšující se otáčky řezné síly mírně snižují. [1]



Graf 6 – Závislost F_{rad} (vlevo) a F_{tan} (vpravo) na druhu pole [1]

Za druhé byla v práci zkoumána závislost kvality povrchu na úhlu příčného vyklonění β_n . Bc. Petra Frková uvedla, že drsnost dosahovala nejlepšího výsledku při příčném vyklonění $\beta_n = 30^\circ$ a $\beta_n = 35^\circ$ [1]. Během experimentu také došlo k objevení nového jevu, který byl již zmiňovaný v úvodu, a tím je sekundární povrch, který vznikl při výjezdu nástroje z řezu. Tento sekundární povrch dosahoval výrazně lepší kvality. Autorka poznamenala, že začínal přibližně při $\beta_n = -15^\circ$, a když příčné vyklonění dosáhlo $\beta_n = 45^\circ$, tedy své maximální úrovně v tomto experimentu, tak sekundární povrch zastupoval 55 % šířky obrobene stopy [1]. Podrobnější informace o povrchu zde nebudou uvedeny, protože zkoumání kvality povrchu není cílem této práce.

Za třetí byla v druhém experimentu prováděna zvuková analýza navržená Bc. Janem Lerchem. Tato analýza se však ukázala nepříliš vhodná pro tento konkrétní případ použití, a proto informace z ní byly spíše informativního charakteru. Nicméně i tak zvuková analýza potvrdila zmíněnou hypotézu, ale autorka také dodala, že důvěryhodnost těchto výsledků není příliš vysoká [1].

3.2.2 Zhodnocení druhého experimentu

Druhý experiment ověřoval vliv příčného vyklonění kulové frézy na stabilitu řezného procesu a přímo tak navazoval na první experiment. Autorka v závěru napsala, že hypotéza o příčném vyklonění byla správná a jednoznačně potvrzená. Nejpříznivější podmínky z hlediska stability se ukázaly při maximálním příčném vyklonění $\beta_n = +45^\circ$, i když dle prvního experimentu se očekávalo, že tak nastane při $\beta_n = 15^\circ$ [1]. Lze se dohadovat, proč se první a druhý experiment v tomto ohledu liší. Může to být způsobeno malou statistickou významností spolu s malou spolehlivostí prvního experimentu. Proto vypovídající hodnota o uklidnění řezného procesu při úhlu příčného vyklonění $\beta_n = 15^\circ$ může být zavádějící skutečnost, na kterou se nejde spoléhat. Avšak za možnou příčinou této odlišnosti Bc. Petra Frková označila použitou kulovou frézu, která byla prodloužena vlepením do ocelového pouzdra, a právě ono lepidlo mohlo působit jako tlumič mikrovibrací. V důsledku toho se nástroj mohl chovat jinak, než se předpokládalo [1].

3.3 Shrnutí důležitých informací pro návrh dalšího experimentu

Dosavadní experimenty potvrdily pozitivní vliv kladného příčného vyklonění na stabilitu obrábění, ale jen v jistém omezeném rozsahu. Žádoucí tedy je provést komplexnější experiment, ve kterém budou zahrnuty veškeré nejpodstatnější faktory, které mají vliv na stabilitu řezného procesu ve vícero úrovních a ve větším rozsahu. Mezi tyto faktory patří: otáčky, hloubka řezu, posuv na zub a úhel příčného vyklonění.

Zejména v případě úhlu příčného vyklonění musí být interval posunut více do kladných hodnot, poněvadž nejpříznivějších výsledků z hlediska silového působení na nástroj bylo dosaženo při maximální úrovni $\beta_n = 45^\circ$. Zároveň může být interval vyňat ze záporných hodnot příčného vyklonění, protože předchozí experimenty jasně prokázaly klesající tendenci řezných sil se

vzrůstajícím úhlem příčného vyklonění.

Aby bylo možné experimenty mezi sebou porovnávat a získávat tak hodnotné informace o zkoumané problematice, je vhodné použít totožný materiál polotovaru pro obrobění pokusných drah a rovněž shodnou kulovou frézu osazenou stejným typem VBD destičky. Zároveň by bylo žádoucí použít tentýž stroj jako v přecházejícím experimentu z důvodu odlišných vlastností jednotlivých obráběcích center (tuhostní charakteristika stroje, vůle ve vedení a v ložiskách, vlastní frekvence vibrací).

Během předcházejících experimentů byla jedna břitová destička použita k obrobění několika pokusů. Tím však do experimentu vstoupil další faktor, jež může mít dopad na výsledky. Aby se zamezilo právě zmíněnému *vlivu otupení nástroje*, je vhodné po každém odjetém pokusu vyměnit břitovou destičku.

Silové působení na nástroj v předcházejícím experimentu bylo vyhodnocováno pomocí průměrné hodnoty velikosti průběhu řezných sil, odečtených za pomoci filtru s názvem *krácející průměr*, o kterém již byla zmínka v kapitole 3.2.1. V případě tangenciálního směru působení byl experiment navíc vyhodnocován pomocí $F_{\tan \max}$ znázorňující maximální hodnotu, kterou síla pro daný obroběný pokus nabývala. Nicméně dnes je známo, že použitím *krácejícího průměru* sice dochází k usnadnění odečítání potřebných hodnot z průběhů řezných sil, ale zároveň tyto průběhy mění. Čím větší je dosazená hodnota do filtru, tím dochází ke většímu zkreslení celkového průběhu řezných sil. Proto je žádoucí při vyhodnocování následujícího experimentu použít co nejmenší hodnotu zmíněného filtru. Zároveň nevyhodnocovat průběhy řezných sil pomocí průměrné hodnoty, ale zkoumat je s ohledem na amplitudu průběhu, konkrétně pomocí maximální a minimální hodnoty, jež řezná síla v jednotlivých směrech nabývá.

4 Návrh a realizace experimentu

4.1 Návrh experimentu

Na základě výše zmíněných informací je v plánu uskutečnit více-faktorový i více-úrovňový experiment, který má konkrétně čtyři faktory (otáčky, hloubka řezu, posuv na zub a úhel příčného vyklonění) a každý faktor má pět úrovní. V ideálním případě by bylo vhodné provést plnofaktorový experiment, který zkoumá všechny kombinace. Ovšem plnofaktorový plán by pro čtyři faktory a pět úrovní obsahoval 625 pokusů bez opakování. S opakováním by počet pokusů vzrostl na 1250. Takový experiment by byl značně náročný, zejména s ohledem na finanční nákladnost a na časovou kapacitu obráběcího stroje. Aby se tedy zamezilo velkým finančním nákladům, časové náročnosti a co nejefektivněji byl využit strojní čas, je nutné experiment vhodně nadimenzovat.

4.1.1 DoE – Design of experiment

Vhodně nadimenzovaný experiment dokáže z poměrně malého počtu měření poskytnout mnoho informací o zkoumané problematice. Navrhnout takový plán však vyžaduje velké znalosti v dané oblasti. Proto plán tohoto experimentu vznikl za spolupráce s odborníkem na plánování panem Ing. Miroslavem Gombárem, PhD.

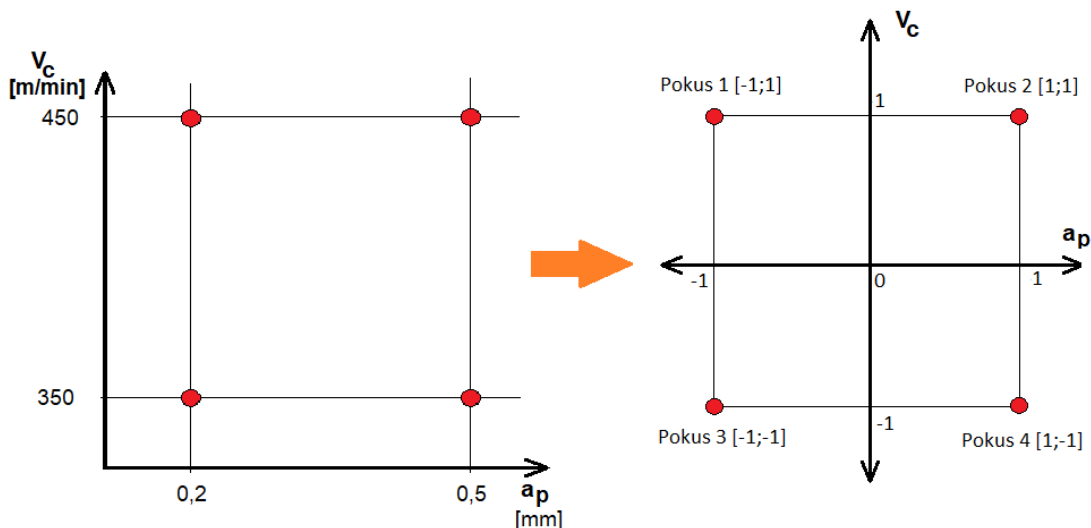
Úkolem experimentu je zjištění, zda určité vstupní faktory ovlivňují sledovanou výstupní veličinu a případně jak. Toto zkoumání probíhá formou vytvoření matematické závislosti (modelu) výstupních veličin (odezev) na faktorech pomocí, které se na určené hladině statistické významnosti kontroluje správnost vytvořeného modelu. Zároveň nalezenou funkci závislosti odezev na faktorech lze případně zkoumat analytickými metodami, při nichž lze

eventuálně najít i extrém. Princip vzniku takového plánu si lze vysvětlit na jednoduchém příkladu níže.

Př) Firma věnující se obrábění hledá vhodné nastavení řezné rychlosti a hloubky řezu za účelem zlepšení kvality dokončovaného povrchu. Jedním faktorem je řezná rychlost s rozsahem $v_c \in \langle 350 \text{ m/min}, 450 \text{ m/min} \rangle$. Druhým faktorem je hloubka řezu, která je na intervalu $a_p \in \langle 0,2 \text{ mm}, 0,5 \text{ mm} \rangle$ a sledovanou výstupní veličinou je drsnost obrobeneho povrchu.

Pro ukázkové řešení tohoto příkladu se použije *úplný faktorový návrh*. Jedná se tedy o dvou-faktorový experiment, ve kterém jsou uvažovány dvě krajní úrovně faktorů. Počet pokusů pro takový experiment je roven 2^k , kde k je počet faktorů a číslovka 2 představuje počet úrovní. Jestliže by počet faktorů a úrovní byl vyšší než v uvedeném příkladu, lze provést experiment, ve kterém nebudou sledovány všechny kombinace všech úrovní faktorů, tzv. zkrácený nebo neúplný experiment.

Hodnoty úrovní jednotlivých faktorů se dle DoE plánování převádí *lineární transformací* na *DoE normované hodnoty* tak, jak je to znázorněno na obrázku 12. Takové hodnoty nabývají od -1 do $+1$. Důvodem této transformace je nepřesnost statistického posouzení modelu v některých případech plánů, která může vznikat z důvodu neortogonalita plánu. Zároveň si lze na obrázku povšimnout červeně zbarvených bodů, které znázorňují jednotlivé pokusy. Vlevo jsou zobrazeny pokusy, které mají původní hodnoty faktorů a vpravo jsou transformované na *DoE normované hodnoty*. Poloha těchto bodů představuje nastavení vstupních parametrů (řezná rychlost, hloubka řezu) v každém pokusu. Například pro pokus 1 se změří drsnost obrobeneho povrchu, který se obrobí řeznou rychlostí $v_c = 450 \text{ m/min}$ při hloubce řezu $a_p = 0,2 \text{ mm}$. Takto se provedou všechny pokusy a následně se z naměřených drsností vyvodí jistá predikce. Ovšem při realizaci experimentu nejsou jednotlivé pokusy provedeny v pořadí, v jakém je to zakresleno na tomto obrázku, ale jejich pořadí je znáhodněno.



Obrázek 12 – Grafické znázornění pokusů a jejich transformace

To, jak je plán experimentu znázorněn na obrázku, lze zapsat i v tabulkové formě tak, jak je to znázorněno v tabulce číslo 2, kterou lze považovat za výsledný plán ukázkového experimentu.

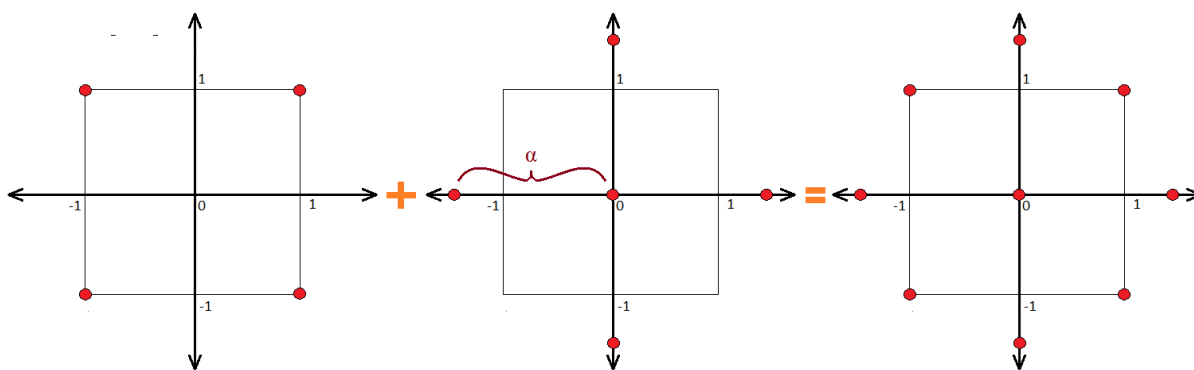
| Pokus | Faktor | | Odezva |
|-------|--------------|----------------|---------|
| | Hloubka řezu | Řezná rychlost | Drsnost |
| 1 | -1 | 1 | |
| 2 | 1 | 1 | |
| 3 | -1 | -1 | |

| | | | |
|---|---|----|--|
| 4 | 1 | -1 | |
|---|---|----|--|

Tabulka 2 – Plán experimentu

4.1.1.1 DoE – centrálně kompozitní plán

Návrh experimentu této bakalářské práce byl vytvořen podle centrálně kompozitního plánu. Podstatným rozdílem mezi plánem v ukázkovém příkladu v předchozí kapitole a typem použitého pro tento experiment je systematické vynechávání pokusů a jejich uspořádání. Zatímco v plno-faktorovém plánu jsou sledovány všechny kombinace úrovní faktorů, které jsou rovnoměrně rozloženy po celém intervalu daného faktoru, u centrálně kompozitního plánu tomu tak není. Pro příklad tento druh plánu je pro dva faktory tvořen plno-faktorovým návrhem zobrazeného na obrázku 13 vlevo, ke kterému se připojí centrální bod a axiální (hvězdicové) body. Centrální bod se nachází ve středu plánu, tedy na souřadnicích [0;0]. Hvězdicové body jsou umístěny na osách reprezentující faktory ve vzdálenosti α od centrálního bodu, která je proměnlivá dle počtu faktorů, úrovní a typu experimentu. Výsledné grafické znázornění centrálně kompozitního plánu pro dva faktory lze vidět vpravo.



Obrázek 13 – Centrálně kompozitní plán

Aby se v experimentu zohlednily všechny kombinace, bylo by nutné pro čtyř-faktorový plán s pěti úrovněmi provést 625 pokusů, bez opakování, jak je již uvedeno v kapitole 4.1. Ovšem takové množství pokusů je s ohledem na časovou náročnost a hodinovou sazbu stroje téměř nepřístupné. Proto byl pro tento experiment použit výše popsáný centrálně kompozitní plán, jenž pro čtyři faktory představuje 26 pokusů, které jsou zapsány v následující tabulce číslo 3.

| Pokus | Faktory | | | |
|-------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|
| | Hloubka řezu – a_p | Otáčky za minutu – n | Posuv na zub – f_z | Příčné vyklonění – β |
| | 0,2÷0,4 [mm] | 1000÷4000 | 0,15÷0,3 [mm] | 0÷90 [°] |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| 3 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 4 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 5 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 6 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| 8 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 10 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 11 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 12 | 1 | -1 | 1 | 1 |
| 13 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 14 | 1 | 1 | -1 | 1 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 1 |



$2^k = 2^4 = 16$
k...počet faktorů

| | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|
| 17 | -1,48 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 1,48 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | -1,48 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 1,48 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | -1,48 | 0 |
| 22 | 0 | 0 | 1,48 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | -1,48 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 1,48 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$2^k = 2^4 = 8$

Tabulka 3 – Centrálně kompozitní plán

Celkový počet pokusů je tedy tvořen podle vzorce číslo (8) uvedeného níže, kde 2^k představuje plno-faktorový dvou-úrovňový návrh, který reprezentuje počet bodů v rozích k -rozměrného rovnoběžníku. Protože je v tomto plno-faktorovém plánu malý počet pokusů, poskytl by pouze lineární model o zkoumaném zatížení. Tento problém lze vyřešit přidáním jedné úrovně, která změní model z lineárního na kvadratický. Bohužel přidáním třetí úrovně plno-faktorový plán dosáhne 3^k pokusů, které pro $k = 4$ znamená značný nárůst celkového počtu pokusů. Hvězdicové body, pro které je $\alpha = 1,48$, představují v rovnici člen 2^k . Jedná se o počet pokusů na ose každého faktoru při nulových dle *DoE normovaných hodnot* nebo středních skutečných hodnot ostatních faktorů. Tyto pokusy se spolu s opakovanými pokusy v centrálním bodě starají o případné nelineární prohnutí funkce modelu, které podchycuje chyby měření, proto mohou experimenty obecně obsahovat i větší počet opakování v centrálním bodě. Celkově je tedy v centrálně kompozitním plánu pět úrovní, které umožní proložit naměřenými hodnotami funkci až čtvrtého řádu. Nicméně kdyby se všechny pokusy prováděly bez opakování, funkce čtvrtého řádu by měla malou vypovídající schopnost, protože ta lze pěti body proložit téměř vždy.

$$p = 2^k + 2 * k + 4 \quad (8)$$

Rozsah každého faktoru lze vidět v horní části tabulky. Z takto vytvořeného plánu pokusů se za pomoci tabulkového procesoru s názvem „Excel“ vygenerovaly reálné hodnoty úrovní faktorů, ve které vzdálenost $\alpha = 1,48$ představovala krajní hodnotu intervalu. Takže například pro pokus číslo 18 platí, že hloubka řezu je rovna 0,4 mm.

Jak již bylo zmíněno několikrát v této práci, je nutné toto pořadí během realizace experimentu znáhodnit kvůli zamezení *vlivu času*, které je popsáno v následující kapitole 4.1.1.2. Zároveň je vhodné, jak již bylo uvedeno, opakovat pokusy experimentu, kde se celý experiment znovu zopakuje v odlišně znáhodněném pořadí za účelem přesnější predikce výsledků na základě naměřených dat.

4.1.1.2 DoE – Vliv času – znáhodnění experimentu

K tomuto tématu se již v předešlém experimentu vyjádřil Bc. Ondřej Jukl a napsal: „Do výsledků experimentu mohou vnášet svůj dopad další faktory, jako třeba otupení nástroje, které mají jistý trend či tendenci vývoje vlivem času stoupající nebo klesající. Může mít také charakter funkce, která není prostá“ [3]. V případě neprosté funkce, která má v čase vysokou frekvenci a podobný průběh jako například funkce sinusová, nenastává závažné zkreslení výsledků, protože funkce obsahuje velké množství extrémů. Zatímco v případě funkce, která má pouze jeden extrém, může měření znepřesnit takovým způsobem, že výsledek, jež se očekával, v určitém bodě nastane v jiném místě anebo nenastane vůbec.

Dále pan Jukl pokračoval „Mimoto mohou výsledek experimentu ovlivňovat i jevy skryté. To

všechno může způsobit zkreslený, resp. falešný obraz skutečnosti. Falešný obraz je tížen tendencí, která nemá s vlastním zkoumaným vlivem nic společného. Souhrnně se takové vlivy označují jako "vliv času". Je ovšem možné, tuto tendenci převést na nahodilostní šum tím, že se experiment uspořádá tak, aby nenastala korelace mezi zkoumanými faktory a vlivem času". [3]. K tomu dopomáhá znáhodnění experimentu. Konkrétně se jedná o znáhodnění pořadí, v jakém jsou v případě tohoto experimentu obráběny jednotlivé pokusy. Znáhodnění může být místní nebo časové. Místní znáhodnění znamená, že rozvržení jednotlivých pokusů na polotovaru je zcela náhodné, ačkoliv jsou jednotlivé pokusy obráběny za sebou. K tomu lze použít tabulkový procesor s názvem Excel se zabudovanou funkcí „náhodné číslo“. Při časovém znáhodnění jsou jednotlivé dráhy systematicky rozmístěné, ale pořadí, v jakém jsou obráběny je zcela nahodilé.

Vlivem tohoto znáhodnění dojde ke zkreslení výsledků, které se projeví jako zmíněný nahodilostní šum. Lze si pod tím představit křivku, která zobrazuje určitou závislost. Znáhodněním experimentu dojde ke zvětšení tloušťky této křivky tak, že do určitého místa najednou může zapadat více bodů. To však nezpůsobí zneřádnění výsledku, ale projeví se jako nepřesnost měření, se kterou lze dále pracovat.

4.1.2 Materiál a polotovar

Aby mohly být výsledky jednotlivých experimentů porovnávány, je žádoucí použít stejný druh materiálu, jak je již zmíněno v kapitole 3.3, konkrétně materiál s označením ČSN 14 220. Dle prodejce se jedná o ušlechtilou konstrukční mangan – chromovou ocel. Ocel je dobře tvářitelná jak za tepla, tak po vyžhání i za studena. Zároveň je dobře obrobitelná, svařitelná a používá se k cementování a kalení. Proto je v praxi hojně užívaná pro hřídele, ozubená kola, čepy apod. Chemické složení zmíněné oceli je uvedeno v tabulce číslo 4 [4].

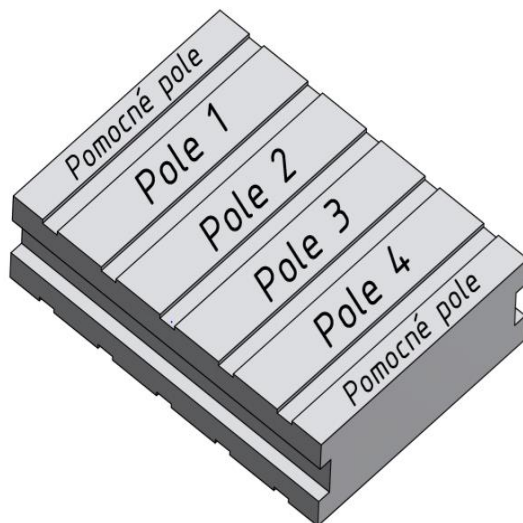
| Uhlík (C) | Mangan (Mn) | Křemík (Si) | Chrom (Cr) | Fosfor (P) | Síra (S) |
|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-----------|
| 0,14 – 0,19 | 1,1 – 1,4 | 0,17 – 0,37 | 0,8 – 1,1 | Max. 0,035 | Max 0,035 |

Tabulka 4 – Ocel ČSN 14 220 – chemické složení [%] [4]

Polotovar pro experiment musí být navržen tak, aby obsáhnul veškeré navrhnuté pokusy, a protože v budoucnu bude polotovar rozřezán na jednotlivé obrobené dráhy kvůli zkoumání povrchu pod mikroskopem, musí být i dostatečně velký, aby mohl každý z nich být označen a nebyly tak mezi sebou obrobené dráhy zaměněny. Zároveň nesmí být moc velký s ohledem na manipulaci a finanční nákladnost.

Upínání polotovaru v obráběcím centru může být provedeno několika způsoby, například šrouby nebo upínkami. V případě upnutí polotovaru pomocí šroubů musí být polotovar rozměrově větší, aby obsáhnul všechny pokusy nežli v případě upínání pomocí upínek, protože hlavy šroubů zabírají více prostoru okolo polotovaru. Z toho důvodu je možná kolize nástroje a upínacích součástí během obrábění, jestliže by upínky vyčnívali do značné míry nad povrch polotovaru. Samozřejmě z hlediska tuhosti je upnutí pomocí šroubů výhodnější, avšak vzhledem k tomu, že se obrábí do malé hloubky a šířka obrobené stopy měří jen několik milimetrů, je výhoda upínání šrouby zanedbatelná. Další nevýhodou upínání pomocí šroubů je nutnost dodržet roztečnou vzdálenost mezi T-drážkami na stole v obráběcím centru. Z těchto důvodů bylo zvoleno upínání polotovaru pomocí upínek přes drážky vyfrézované na boku polotovaru, kterých si lze povšimnout na obrázku 14. Tento druh upínání zmenšil celkovou velikost i hmotnost oproti předcházejícímu experimentu, kde byl polotovar upnut šrouby. Rozvržení polotovaru je uskutečněno podobným způsobem jako v předcházejícím experimentu. Polotovar

obsahuje čtyři hlavní pole určená pro měřené pokusy a dvě pomocné vyhrazené ke kalibraci měřících přístrojů a nastavení vyložení kulové frézy na hranici stability řezného procesu. Jednotlivá pole jsou od sebe oddělena vyfrézovanou drážkou, která slouží k výjezdu a nájezdu nástroje do řezu. V každém poli bude obrobena 7 pokusů a celý experiment bude zopakován z druhé strany znovu jen v odlišném znáhodněném pořadí. Výrobní výkres polotovaru je k dispozici v příloze na DVD.



Obrázek 14 – Polotovar a jeho rozvržení v plánovaném experimentu

4.1.3 Stroj a nástroj

Opět, jako v případě materiálu a nástroje, je žádoucí použít i tentýž stroj. Jedná se o pětiosé frézovací centrum vyrobené firmou DMG MORI s označením DMU 65 monoBLOCK®, zobrazené na obrázku číslo 15 níže spolu se základními technickými parametry. Obrobek umístěný na otočném stole může rotovat o 360° a rozsah naklápěcího stolu je 120°.



| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Rozjezdy X/Y/Z | 735/650/560 [mm] |
| Velikost stolu | Ø 650 [mm] |
| Maximální zatížení | 1000 [kg] |
| Výkon | 21 [kw] |
| Točivý moment | 111 [Nm] |
| Otáčky vřetena | 15000 [$\frac{ot}{min}$] |

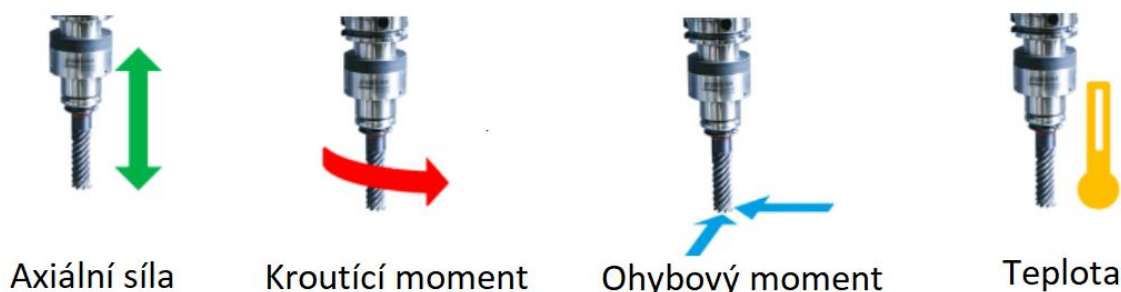
Obrázek 15 – DMU 65 monoBLOCK® a jeho základní technické parametry [5]

Ze stejných důvodů jako v případě volby materiálu a stroje je zvolena i totožná kulová fréza s též VBD destičkou jako v druhém experimentu. Charakteristické informace dané frézy již

byly uvedeny v kapitole 3.2 na straně 14, proto zde nebudou znovu opakovány.

4.1.4 Dynamometr

Řezné síly se zaznamenávají pomocí rotačního dynamometru s názvem SPIKE, vyrobeným firmou Promicron. Během obrábění dynamometr zaznamenává čtyři veličiny, které se přenáší bezdrátově do přijímacího média a poté do počítače. Jedná se axiální sílu, kroutící moment, ohybový moment a teplotu, které je možno vidět naznačené na obrázku číslo 16. Technické parametry dynamometru převzaté z diplomové práce z druhého experimentu jsou uvedeny v tabulce č. 5.



Obrázek 16 – Dynamometr [6]

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Kompatibilita s automatickou výměnou nástroje | Ano |
| Počet bezdrátových kanálů | 4 |
| Frekvence přenosu dat | 2,45 GHz |
| Vzorkovací frekvence na kanál | Až 2 KHz |
| Rozlišení naměřených hodnot | 15 bit |
| Maximální povolené otáčky | 18 000 ot/min |
| Rozsah přenosu signálu | 2 až 3 m |
| Životnost baterie | Až 12 h |
| Doba nabíjení baterie | 4 h |
| Kvalita dynamického vyvážení | 2,5 G |
| Kompatibilita s chladicím systémem | Vnitřní/ vnější |
| Výstup dat | .txt |
| Rozsah měření F_{ax} / M_k / M_o | 60 kN / 400 Nm / 400Nm |

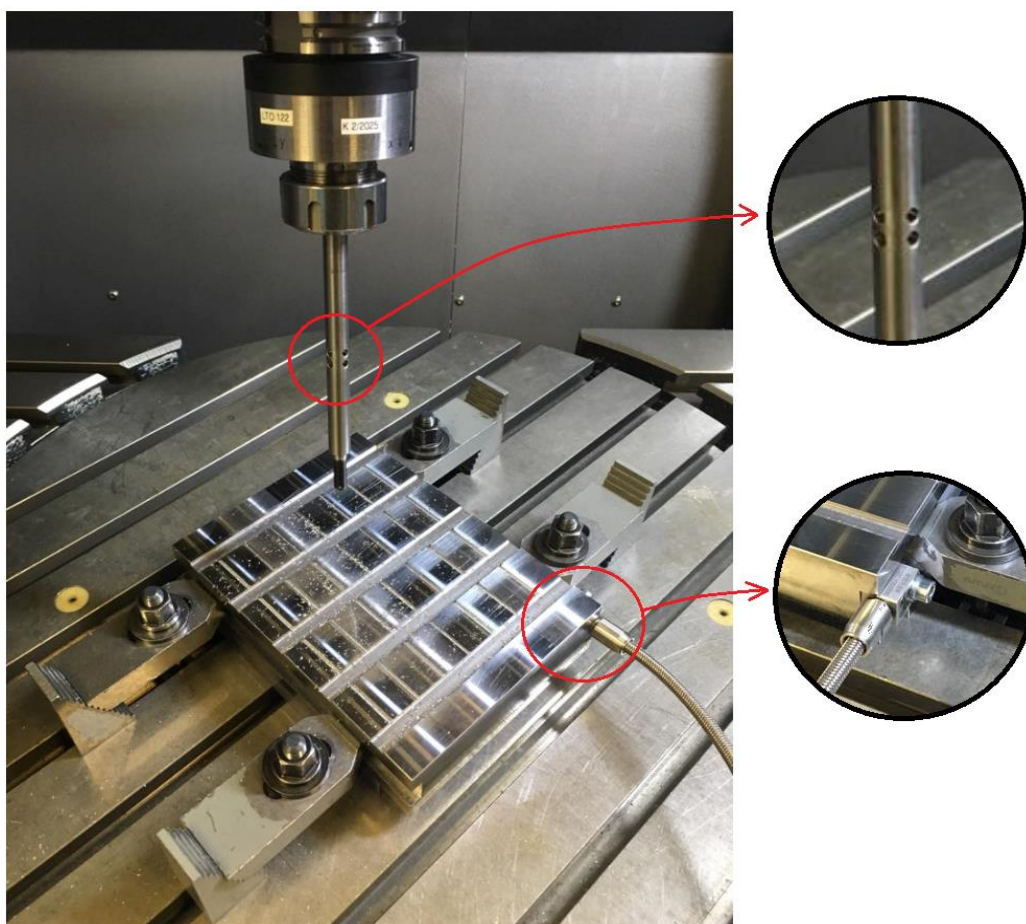
Tabulka 5 – Technické parametry dynamometru [1]

4.2 Realizace experimentu

Realizace experimentu proběhla na pětiosém obráběcí centrum, ve vědecko-technologickém parku v Plzni 26.11.2019. NC program byl na místě upraven z programu vytvořeného v předcházejícím experimentu ve spolupráci s vedoucím této bakalářské práce panem Ing. Jiřím Vyšatou, PhD. Program je totiž vytvořen parametricky tak, aby byl pro experimenty tohoto druhu co nejvíce univerzální. Před změnu parametrů pro tento experiment bylo nejdříve potřeba znovu po delší době ověřit chování programu.

V průběhu úprav programu byl polotovar upnut do stroje a dynamometr s kulovou frézou do vřetena. Následně po odladění programu a změření polohy polotovaru nástrojovou sondou byl program odzkoušen v malé vzdálenosti nad polotovarem. Po úspěšném odjetí programu bylo nutné nastavit délku vyložení nástroje. Předchozí experiment, který používal totožný nástroj, obráběl jednotlivé pokusy při vyložení 129 mm. Avšak, protože se v tomto experimentu interval

příčného vyklonění pohybuje pouze v kladných hodnotách ($\beta_n \in < 0^\circ; +90^\circ >$), které má samo o sobě pozitivní vliv na stabilitu, bylo zapotřebí snížit tuhost nástroje v podobě delšího vyložení tak, aby se kulová fréza dostala na hranici stability řezného procesu. K tomuto testování délky vyložení sloužila pomocná pole. Test vyložení probíhal na středních hodnotách všech faktorů, tedy v místě, kde příčné vyklonění dosahovalo úrovně $\beta_n = 45^\circ$. Ale jak předchozí experiment prokázal, tak právě při této úrovni příčného vyklonění byly řezné síly nejmenší. Z toho důvodu ani v případě zvětšení vyložení nástroje na maximální hodnotu 152 mm nebylo dosaženo hranice stability řezného procesu. Aby bylo dosaženo zmíněné hranice, bylo nutné do stopky nástroje vyvrtat díry, které zmenšují jeho tuhost. Díry byly vyvrtány celkově čtyři ve dvou řadách a byly na sebe pootočené o 90° , lze si jich povšimnout v detailu obrázku číslo 17. Zmíněný obrázek je vyfocen již po obrobení veškerých drah. Při zpětném hodnocení by mohly být díry vyvrtány v menší vzdálenosti od dynamometru. Sice se dosáhlo kýženého efektu, ale kdyby se díry nalézaly výše vzhledem k pohledu na obrázek. Mohlo by se použít menší vyložení nástroje při zachování hranice stability řezného procesu.



Obrázek 17 – Experiment

Před zahájením obrábění jednotlivých pokusů, které jsou v tomto experimentu vyhodnocovány, bylo nejprve nutné připojit jednotlivé přístroje pro měření řezných sil a zvukových emisí. Tyto přístroje byly v moci pana Ing. Jana Kutlwašera, Ph.D. Nástrojový dynamometr, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1.4, přenáší data bezdrátově přes přijímací modem do počítače, kde je tento signál zpracováván programem s názvem SPIKE BTKaBlue V 13.2. V případě měření zvukových emisí jsou data přenášena z čidla připojeného na polotovaru prostřednictvím kabelu. Zmíněné čidlo bylo nejprve připevněno k polotovaru pomocí magnetického držáku, který je příslušenstvím tohoto čidla a je pro tyto účely určen. Ale jak se ukázalo, tento typ připevnění nebyl vhodný, protože během polohování os stroje nebylo čidlo v dostatečném kontaktu

s povrchem polotovaru, a tak se v polotovaru musely v místě, kde je vyfrézovaná upínací drážka vyvrtat díra se závitem a čidlo bylo upevněno pomocí imbusového šroubu o velikosti M4. Toho si lze povšimnout v druhém detailu na obrázku zobrazeného výše.

Jednotlivé dráhy byly obráběny nasucho kvůli zmíněnému čidlu připevněnému na polotovaru. Dalším důvodem, proč se nepoužívalo chlazení byl fakt, že chlazení by řezný proces mohlo uklidňovat a zároveň by mohlo působit na řezné síly náhodně. Někdy by docházelo k většímu uklidnění a jindy k menšímu, tím by se do experimentu zanesl další nežádoucí faktor, k jehož zkoumání by bylo nutné zvětšit rozsah celého experimentu. V závislosti na to by se výsledky odezev posouvaly na různé strany, což by při větším počtu pokusů působilo zvětšení rozptylu, ale při menším počtu pokusů by to mohlo výrazně snížit statistickou významnost vytvořeného modelu. V každém případě by procesní kapalina v prostoru obráběcího stroje působila nepříznivou optickou clonou, která by mohla problematizovat přenos infračerveného signálu dynamometru a také znepříjemňovat obsluhu či znemožňovat pořizování fotodokumentace. Mimoto může kapalina ohrožovat experimentální přístroje umístěné v pracovním prostoru stroje.

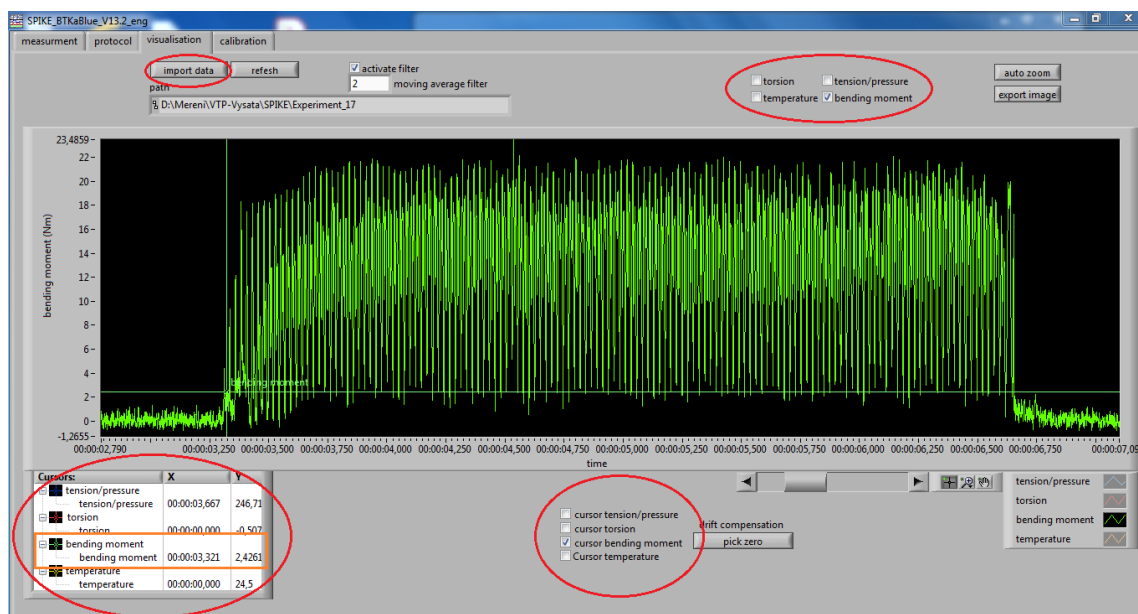
4.3 Vyhodnocování experimentu

Řezné síly v této práci jsou vyhodnocovány prostřednictvím ohybového a kroutícího momentu, kde tangenciální řezná síla je zahrnuta v kroutícím momentu a radiální síla v ohybovém. Dynamometrem byly zaznamenány průběhy ohybového i kroutícího momentu společně s axiální silou. Axiální síla dále nebude zkoumána, a to kvůli zanedbatelnému vlivu na stabilitu řezného procesu. Jelikož jsou v této práci zkoumány řezné síly s ohledem na vibrace, jsou řezné síly hodnoceny podle rozkmitu, tzn. že pro každou zkoumanou řeznou sílu je odečtena maximální i minimální hodnota, které síla nabývá. Nicméně, protože rozložení hmoty kulové frézy okolo osy není zcela rovnoměrné, tak již při chodu na prázdno, tj. mimo řez, dynamometr zaznamenává jisté výkyvy sil. Proto bylo žádoucí i tento rozkmit z průběhu sil odečíst a dále s ním pracovat. Dalším důvodem odečítání amplitudy sil při chodu na prázdno je fakt, že použitý dynamometr se musí ručně vynulovat před začátkem obrábění každého jednotlivého pokusu. Z tohoto důvodu nejsou hodnoty sil naměřené mimo řez rovnoměrně rozloženy kolem nulové osy, ale jsou jaksi excentricky posunuty.

4.3.1.1 Odečítání řezných sil

Hodnoty průběhu řezných sil byly získány prostřednictvím programu s názvem SPIKE BTkaBlue V 13.2, který byl k tomuto účelu využit i v předcházejícím experimentu. Zároveň je vhodné konstatovat, že tento program se již používal při nahrávání jednotlivých průběhů řezných sil během realizace experimentu, které byly uloženy zvlášť po jedné do počítače a během odečítání řezných sil jsou postupně nahrávány zpět do programu. Vyhodnocovány jsou řezné síly s ohledem na amplitudu průběhu, protože právě ona má na stabilitu řezného procesu nejvýraznější vliv. Proto se z průběhů řezných momentů odečítala maximální a minimální hodnota. Na obrázku 18 lze vidět systémové prostředí programu SPIKE, ve kterém je zobrazen záznam průběhu ohybového momentu. K nahrání příslušného záznamu slouží červeně ohraničené tlačítko v levém horním rohu s názvem „import data“. Po nahrání záznamu se v programu zobrazí veškeré průběhy naměřených veličin z dynamometru, konkrétně průběhy axiální síly, ohybového a kroutícího momentu a teploty. Následně se v pravém horní rohu zvolí příslušný průběh měřené veličiny, ze kterého se budou odečítat potřebné hodnoty. Tím dojde k zobrazení pouze jednoho záznamu, jak lze vidět na obrázku 18. Poté se dole uprostřed zaškrtně typ kurzoru určený pro daný průběh a hodnota vybrané veličiny se zobrazí v levém dolním rohu. Na obrázku je tato část vyznačena oranžově. Posunutím kurzoru na příslušné místo záznamu dojde k zobrazení požadované hodnoty, která se následně ručně zaznamenala

do příslušné tabulky na druhém počítači.



Obrázek 18 – Spike BTKaBlue V 13.2 – Odečítání hodnot řezných sil

Jak lze vidět na obrázku 18, tak průběh ohybového momentu v řezu není rovnoměrný. Z toho důvodu nelze jednoznačně říci, kde je minimum nebo maximum. Navíc v záznamu, kde není použit filtr s názvem *krácející průměr*, který byl popsán v kapitole 3.2.1, se místy nachází tzv. *peaky*, jež přesahují ostatní body záznamy o nezanedbatelnou vzdálenost a tím jej zkreslují. Tyto *peaky* mohou, ale nemusí vznikat nerovnostmi povrchu obrobku, nehomogenitou materiálu nebo vlivem působení okolního prostředí. Proto pro odečítání byl použit filtr *krácející průměr* s nastavenou hodnotou 2. V závislosti na tom se záznam lehce vyhladil bez toho, aniž by se výrazně zkreslil. Přesto je nutné kurzor umístit do záznamu tak, aby malá část vrcholů záznamu kurzor přesahovala, jak je zobrazeno na obrázku číslo 18, kde se odečetla minimální hodnota ohybového momentu v řezu. Tímto způsobem byly odečteny všechny potřebné hodnoty ze všech záznamů a zapsány do tabulky řezných sil v souboru v Excelu pod názvem „Řezné síly“, která je součástí přílohy na DVD.

Důležitým aspektem při odečítání hodnot je subjektivní vnímání jednotlivce. Kdyby vyhodnocování provádělo více lidí, vnesla by se do těchto hodnot chyba, která by mohla odečtené hodnoty a výsledky z nich vyvozené ztuhle znehodnotit. Proto je nutné, aby odečítání dat prováděla pouze jedna osoba, avšak i přesto data vyhodnocována chybu obsahují. Ale protože se jedná o chybu, kterou lze přirovnat k nepřesnosti měření, tak její zkreslení lze ve výsledku zanedbat.

4.3.2 Vyhodnocování

Statisticky byla hodnoceny data, na jejichž základě byly vytvořeny čtyři hlavní modely a čtyři doplňkové. Ve všech modelech je testován vliv parametrů obrábění. V případě hlavních modelů je zkoumán vliv na amplitudu průběhu ohybového a kroučícího momentu a ve vedlejších modelech na střední hodnotu obou momentů. Z naměřených údajů z každé strany polotovaru jsou vytvořeny vždy dva hlavní a dva doplňkové modely. Dva modely pro kroučící moment a zbylé dva pro ohybový moment. Z důvodu celkového rozsahu statistického posuzování vytvořených modelů a faktu, že princip hodnocení kvality modelu je téměř totožný u všech modelů, bude zde uveden pouze jeden detailněji popsáný model amplitudy kroučícího momentu vytvořeného na základě dat z 2. strany polotovaru a ze zbylých budou učiněny jen výňatky zásadních informací, které tvoří vlastní podstatné výsledky. Kompletní data o statistických

modelech, které zde nejsou uvedeny, jsou k dispozici v příloze této práce na DVD pod názvem „Statistické vyhodnocení“.

Pojem model představuje matematickou funkci počtu proměnných všech faktorů. Je možné ho popsat několika standardními funkcemi, pro které jsou zpracované metody regrese. Typicky se může jednat o lineární, polynomičnou či mocninou funkci nebo také exponenciální či logaritmickou. Z těchto funkcí se vybere taková, která nejlépe probíhá mezi naměřenými hodnotami a pokud možno tak, aby odpovídala dosavadním užívaným standardům v oboru. Zároveň by bylo vhodné, aby zvolená funkce popisovala chování ve shodě s nějakým teoretickým vysvětlením mechanismu jevu.

4.3.2.1 Vliv parametrů obrábění na amplitudu průběhu kroutícího momentu M_k

Tato kapitola popisuje vlastnosti vytvořeného modelu pro amplitudu kroutícího momentu z 2. strany polotovaru a zobrazuje vliv jednotlivých faktorů na výsledný kroutící moment. Tabulky a grafy zde uvedené jsou vytvořeny pomocí softwarů určených pro hodnocení přesnosti modelu a jeho vyhodnocování. Bohužel v případě tabulek není možné detailně vysvětlit veškeré údaje v nich uvedené, protože se jedná o složité téma, kterému podrobně rozumí převážně jen lidé, kteří se tímto tématem podrobně zabývají. Proto zde jsou popsány jen ty údaje, které jsou nejpodstatnější.

Amplituda kroutícího momentu pro jednotlivé pokusy byla vypočtena rozdílem maximální a minimální úrovně odečtených hodnot z průběhů kroutícího momentu. Z těchto hodnot byl následně vytvořen regresní model metodou nejmenších čtverců a ověřovala se jeho správnost a použitelnost. V tabulce číslo 6 jsou uvedena shrnutá data analýzy vhodnosti vytvořeného modelu. Koeficient determinace udává podíl variability hodnot zkoumaného kroutícího momentu neboli kvalitu regresního modelu, která zde po zaokrouhlení dosahuje 80,9 %. Avšak skutečnější hodnotu představuje adjustovaný koeficient determinace (72,9 %), který má větší vypovídající hodnotu o vhodnosti modelu. Průměrná chyba modelu je 0,53 Nm a průměrná hodnota kroutícího momentu z druhé strany polotovaru je 4,64 Nm.

| Název | Hodnota |
|--------------------------------------------------|----------|
| Koeficient determinace (RSquare) | 0,809357 |
| Adjustovaný koeficient determinace (RSquare Adj) | 0,729086 |
| Průměrná chyba modelu (Root Mean Square Error) | 0,529707 |
| Průměrná hodnota (Mean of Response) | 4,635714 |
| Počet pokusů (Observations or Sum Wgts) | 28 |

Tabulka 6 – Shrnutí vhodnosti modelu amplitudy kroutícího momentu z 2. strany polotovaru

Za pomocí ANOVA analýzy rozptylu, jejíž podstata již byla uvedena v kapitole 3.2.1, a testu chyby přizpůsobení modelu se testovala po statistické stránce správnost celého vytvořeného modelu. Tabulka číslo 7 představuje údaje ANOVA analýzy, v níž nejpodstatnější část je poslední sloupec, který uvádí hodnotu **Prob > F**. Pokud je toto číslo menší než 0,05, které představuje zvolenou hladinu významnosti, tak vytvořený model je nazýván modelem adekvátním. V tomto případě je hodnota **Prob > F** menší než 0,0001, proto lze konstatovat, že se jedná o adekvátní model.

ANOVA

| Zdroj variability (Source) | DF – počet stupňů volnosti | Součet čtverců (Sum of Squares) | Rozptyl (Mean Square) | F Poměr (F Ratio) | Prob > F |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|----------|
| Skupinový (Model) | 8 | 22,633088 | 2,82914 | 10,0828 | <,0001 |
| Reziduální (Error) | 19 | 5,331198 | 0,28059 | – | – |
| Celkový (C. Total) | 27 | 27,964286 | – | – | – |

Tabulka 7 – ANOVA analýza kroučícího momentu z 2. strany polotovaru

Test chyby přizpůsobení modelu porovnává rozptyl naměřených hodnot uvnitř skupiny, kde nulová statistická hypotéza říká, že rozptyl reziduí je menší nebo rovný rozptylu vnitřní skupiny. Proti tomu působí alternativní hypotéza, která tvrdí opak, a to, že rozptyl reziduí je větší, než rozptyl ve vnitřní skupině. K potvrzení jedné z uvedených statistických hypotéz opět poslouží poslední sloupec v tabulce číslo 8, který tentokrát musí být větší než číslo 0,05, protože čím vyšší toto číslo je, tím se rozptyl reziduí zmenšuje a zde tomu tak je. Proto je nulová statistická hypotéza správná a z toho důvodu model popisuje naměřené hodnoty správně.

Chyba přizpůsobení modelu

| Zdroj | DF | Součet čtverců | Rozptyl | F Poměr | Prob > F |
|--------------------------------|----|----------------|----------|---------|----------|
| Nedostatek shody (Lack Of Fit) | 16 | 2,8436981 | 0,177731 | 0,2143 | 0,9842 |
| Náhodná chyba (Pure Error) | 3 | 2,4875 | 0,829167 | | |
| Celkem (Total Error) | 19 | 5,3311981 | | | |

Tabulka 8 – Chyba přizpůsobení modelu kroučícího momentu z 2. strany polotovaru

Podle ANOVA analýzy a testu chyby přizpůsobení modelu bylo možné prohlásit, že model je použitelný na zvolené hladině významnosti. Na základě toho bylo možné vytvořit tabulku odhadů parametrů modelu uvedených v tabulce číslo 9, kde $x_1 = a_p$, $x_2 = n$, $x_3 = f_z$, $x_4 = \beta$. V tabulce je nejpodstatnější čtvrtý a pátý sloupec. Čtvrtý sloupec představuje, jak moc se jednotlivé parametry podílejí na výsledné výstupní veličině, v tomto případě na kroučícím momentu. Pátý sloupec opět souvisí se zvolenou hladinou významnosti, na které jsou uvažovány jen ty parametry a interakce mezi nimi, u nichž je hodnota v tomto sloupci menší než číslo 0,05.

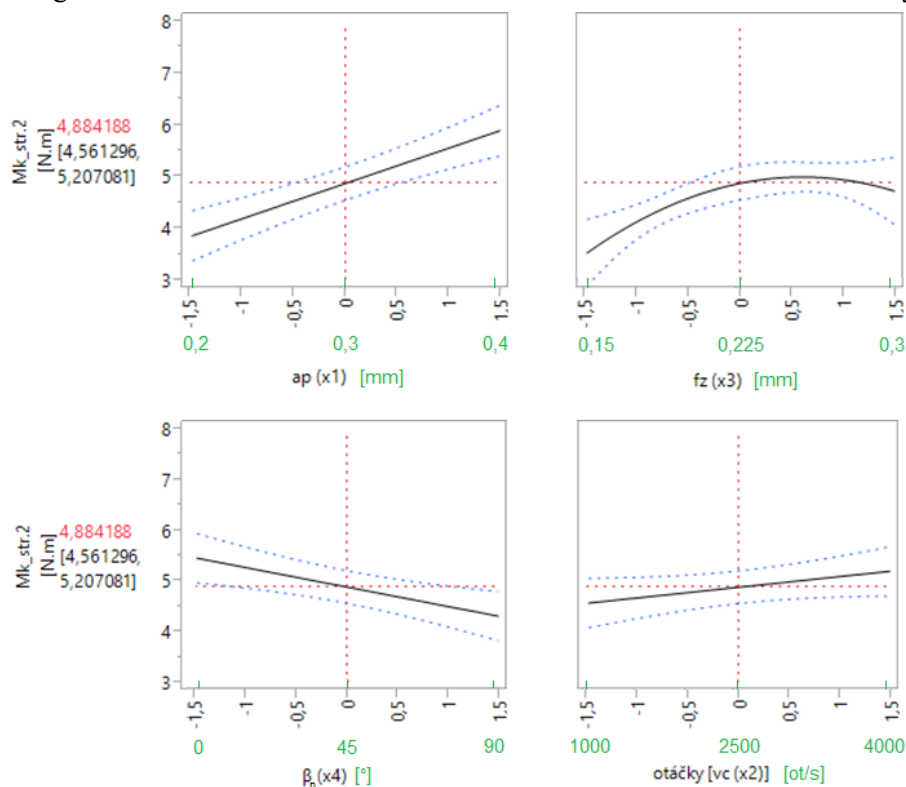
| Term | Odhad | Střední chyba průměru | t Poměr | Prob> t | Lower 95% | Upper 95% |
|-----------------------------------|----------|-----------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| Intercept (absolutní člen modelu) | 4,884188 | 0,154271 | 31,66 | <,0001 | 4,561296 | 5,207081 |
| x_1 | 0,684527 | 0,11729 | 5,84 | <,0001 | 0,439036 | 0,930019 |
| x_3 | 0,403721 | 0,11729 | 3,44 | 0,0027 | 0,158229 | 0,649212 |
| x_4 | -0,3863 | 0,11729 | -3,29 | 0,0038 | -0,6318 | -0,14081 |
| x_2 | 0,211653 | 0,11729 | 1,8 | 0,087 | -0,03384 | 0,457145 |
| $x_1 \cdot x_3$ | 0,28125 | 0,132427 | 2,12 | 0,047 | 0,004078 | 0,558422 |
| $x_3 \cdot x_3$ | -0,34111 | 0,161143 | -2,12 | 0,0477 | -0,67838 | -0,00383 |
| $x_3 \cdot x_4$ | -0,29375 | 0,132427 | -2,22 | 0,0389 | -0,57092 | -0,01658 |
| $x_1 \cdot x_3 \cdot x_4$ | -0,34375 | 0,132427 | -2,6 | 0,0177 | -0,62092 | -0,06658 |

Tabulka 9 – Odhadované parametry modelu kroučícího momentu

Pomocí odhadovaných parametrů modelu byla sestrojena statistická predikční závislost uvedená v rovnici číslo (9), která charakterizuje závislost modelem spočítaného kroučícího momentu na všech odhadovaných parametrech, včetně jejich interakcí na zvolené hladině významnosti.

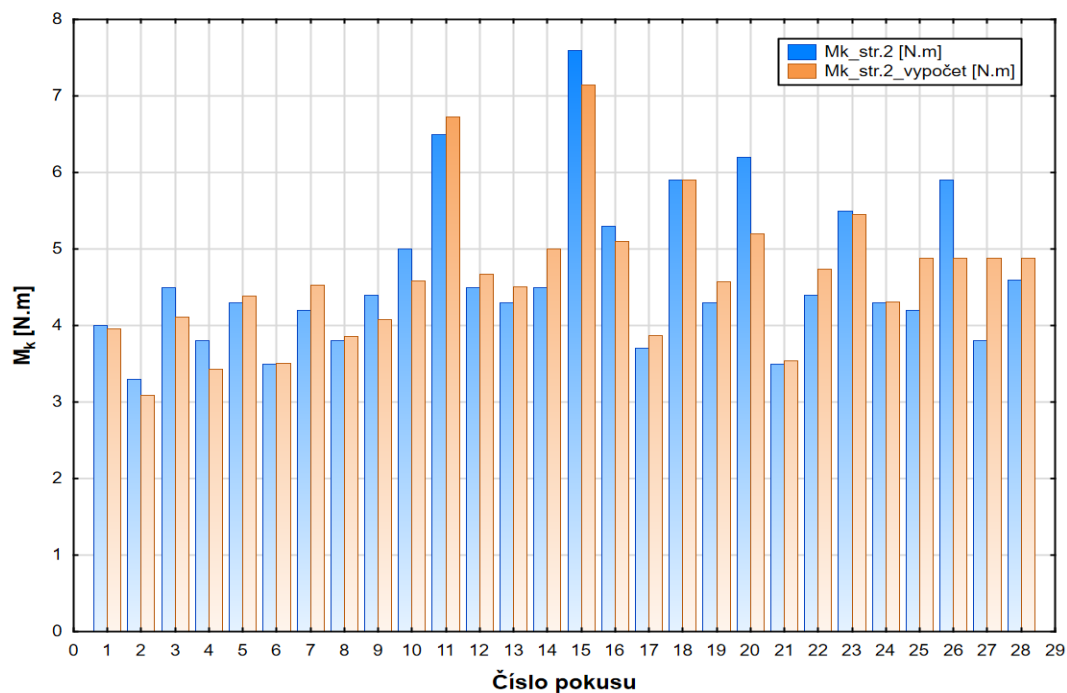
$$M_k = 0.9007 \cdot f_z - 40.0694 \cdot a_p - 0.1842 \cdot \beta + 2.0909 \cdot 10^{-4} \cdot n + 0.7134 \cdot \beta \cdot a_p + \quad (9) \\ + 0.0762 \cdot \beta \cdot f_z + 22.1549 \cdot a_p \cdot f_z - 1 \cdot f_z^2 - 0.3173 \cdot \beta \cdot a_p \cdot f_z + 6.6131$$

Na základě výše uvedené rovnice bylo možné vytvořit grafy zobrazující vliv jednotlivých faktorů. V případě tohoto modelu jsou vytvořeny všechny závislosti, ale nemusí tomu tak být vždy, protože existují případy, kdy určitý faktor na zkoumanou veličinu téměř nepůsobí nebo se nachází mimo zvolenou hladinu významnosti. Na obrázku číslo 19 je zobrazen účinek jednotlivých faktorů na amplitudu kroučícího momentu, které jsou seřazeny od nejlivnějšího. Osa y reprezentuje kroučící moment ve skutečné míře, osa x představuje jednotlivé faktory v *DoE normované hodnotě* a zároveň je zelenou barvou vyobrazena skutečná míra jednotlivých faktorů. Označení nacházející se vedle značek faktorů v podobě x₁, x₂, x₃, x₄ uvádí souvislost s tabulkou číslo 9. Z obrázku a z této tabulky je patrné, že největší vliv na kroučící moment má hloubka řezu a se zvětšující se úrovní hloubky řezu rovnoměrně stoupá i kroučící moment. V případě posuvu se projevil v tomto modelu zvláštní jev a to, že se stoupající úrovní posuvu začíná klesat kroučící moment. Proč tomu tak je nelze s určitostí říct, protože tato závislost se projevila pouze v tomto modelu, a ne v modelu pro kroučící moment z 1. strany polotovaru, kde byl průběh momentu v závislosti na posuvu lineární. Možným důvodem je fakt, že obráběné plochy polotovaru v jednom místě nebyly zcela rovnoběžné a byl tam znatelný schod v řádu několika setin milimetru. A právě proto tento schod mohl interagovat z dalšími faktory, které mohly způsobit zakřivení křivky kroučícího momentu. Toto teoretické tvrzení podporuje rozptyl hodnot, který je v pravé části grafu viditelně větší. Nejpodstatnějším grafem je graf reprezentující závislost příčného vyklonění, ze kterého je jasně viditelné, že se stoupajícím úhlem příčného vyklonění dochází ke snížení kroučícího momentu. Z toho důvodu lze konstatovat, že pro kroučící moment je hypotéza o uklidnění vlivem příčného vyklonění správná a nejnižšího silového působení se dosáhlo při maximální úrovni $\beta_n = 90^\circ$. Poslední graf reprezentuje závislost kroučícího momentu a otáček, které měli na zkoumanou veličinu nejmenší účinek. Bohužel pro model kroučícího momentu z 1. strany polotovaru vyšla závislost otáček a kroučícího momentu mimo zvolenou hladinu významnosti, a tak nelze tyto dva grafy spolu porovnat. Přesto je z obrázku patrné, že se stoupající hodnotou otáček mírně roste i kroučící moment.



Obrázek 19 – Vliv jednotlivých faktorů na kroutící moment

Hodnotu, kterou kroutící moment nabývá napříč všemi pokusy na 2. straně polotovaru, lze vidět v grafu číslo 7, kde je vyobrazena modrou barvou. Zároveň jsou v grafu oranžově zobrazeny hodnoty výpočtového kroutícího momentu vytvořeného na základě predikčního modelu. Dále byly vytvořeny grafy zobrazující rezidua a procentuální chyby modelu, které kvůli své rozsáhlosti jsou uvedeny pouze v příloze na DVD.



Graf 7 – Kroutící moment napříč všemi pokusy

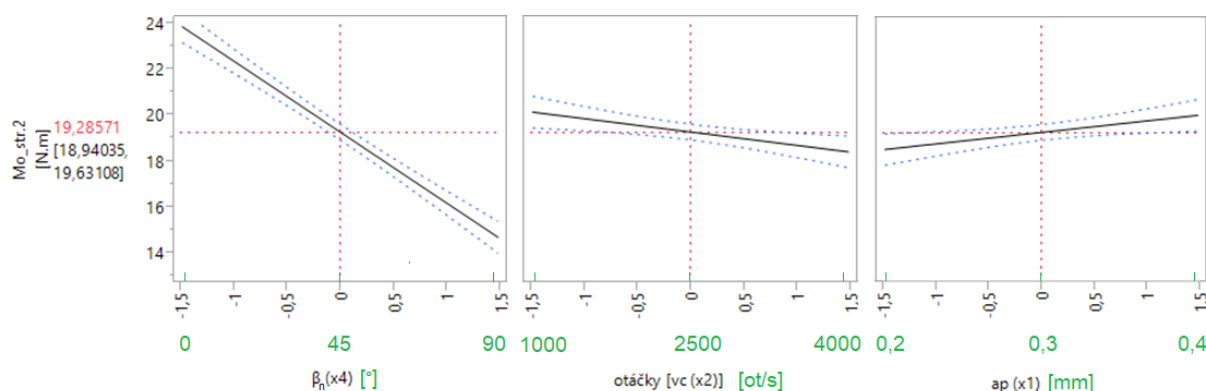
4.3.2.2 Vliv parametrů obrábění na amplitudu průběhu ohybového momentu M_o

Největší podíl na stabilitu řezného procesu z hlediska silového působení má průběh amplitudy ohybového momentu, který nástroj vychyluje na stranu a tím řezný proces destabilizuje v podobě rozvibrování nástroje. Vlastnosti regresního modelu amplitudy ohybového momentu vytvořeného na základě naměřených dat z 2. strany polotovaru lze vidět v tabulce číslo 10. Nejdůležitější je zde hodnota adjustovaného koeficientu determinace reprezentující kvalitu vytvořeného modelu, která zde dosahuje po zaokrouhlení 90,7 %. Z toho důvodu lze usuzovat, že se jedná o přesný model a výsledky ANOVA analýzy spolu s testem chyby přizpůsobení modelu uvedených v příloze toto tvrzení potvrzují. Průměrný ohybový moment zde dosahuje 19,29 Nm a průměrná chyba modelu je 0,89 Nm.

| Název | Hodnota |
|--------------------------------------------------|----------|
| Koeficient determinace (RSquare) | 0,916929 |
| Adjustovaný koeficient determinace (RSquare Adj) | 0,906545 |
| Průměrná chyba modelu (Root Mean Square Error) | 0,885454 |
| Průměrná hodnota (Mean of Response) | 19,28571 |
| Počet pokusů (Observations or Sum Wgts) | 28 |

Tabulka 10 – Shrnutí vhodnosti modelu amplitudy ohybového momentu z 2. strany polotovaru

Jak lze vidět na obrázku číslo 20 tak největší vliv na amplitudu ohybového momentu má úhel příčného vyklonění, který po celém intervalu vyklonění rovnoměrně klesá. Téměř stejného účinku dosáhlo příčné vyklonění i v případě druhého modelu vytvořeného na základě dat naměřených na 1. straně polotovaru. Rozdíl mezi nevykloněným a vykloněným nástrojem je po stránce ohybového momentu značný. Jedná se téměř o 40% pokles silového účinku, který jasně dokazuje spolu s průběhem krouticího momentu, že hypotéza o uklidnění vlivem příčného vyklonění je správná. Dále jsou na obrázku zobrazeny závislosti otáček nástroje a hloubky řezu, které mají na amplitudu ohybového momentu v poměru s příčným vykloněním malý účinek. Amplituda ohybového momentu se vzrůstajícími otáčkami pozvolně klesá a se vzrůstající hloubkou řezu mírně roste. Vliv posuvu na zub zde není uvažován z důvodu malého vlivu na amplitudu ohybového momentu



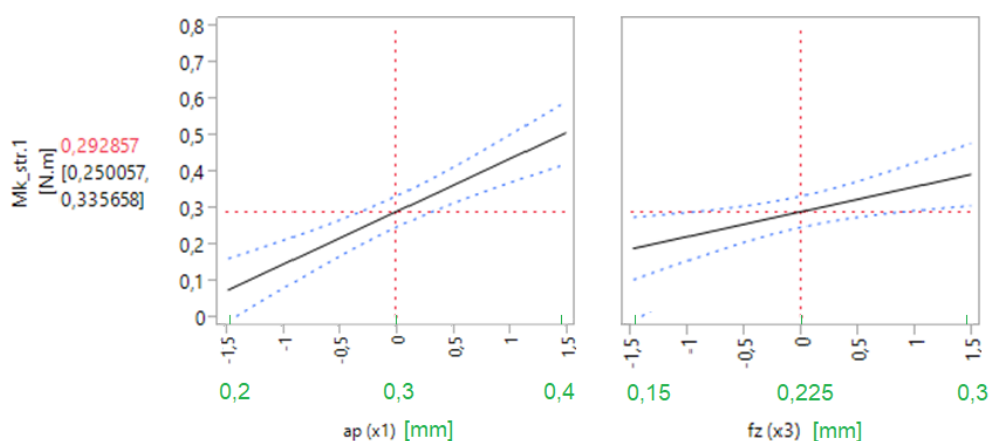
Obrázek 20 – Vliv jednotlivých faktorů na ohybový moment

4.3.2.3 Vliv parametrů obrábění na střední hodnotu krouticího momentu.

Během zkoumání jednotlivých průběhů bylo zaznamenáno, že se občas velikost amplitudy v chodu na prázdno a v řezu nijak zdatně nezmění a spíše se posune její střední hodnota. Proto byla navíc statisticky hodnocena i střední hodnota krouticího a ohybového momentu, která vznikla zprůměrováním horní a dolní úrovně amplitudy v řezu a od níž se odečetla průměrná

hodnota z minimální a maximální úrovně v chodu na prázdno.

Bohužel regresní model vlivu parametrů obrábění na střední hodnotu krouticího momentu nebyl s porovnáním s ostatními příliš přesný. Kvalita modelu vytvořeného podle dat z 2. strany polotovaru dosahovala pouze 15,3 %, a tak z něho nelze usuzovat nějaké závěry. Avšak model vytvořený na základě dat z 1. strany polotovaru dosahoval obstojných 63,6 %. Sice se jedná o druhý nejméně přesný model ze všech, ale přesto použitelný. Vliv hloubky řezu a posuvu na střední hodnotu krouticího momentu z modelu vytvořeného na základě dat z 1. strany polotovaru je uveden na obrázku číslo 21. Účinek úhlu příčného vyklonění a otáček zde není vyobrazen, protože na střední hodnotu krouticího momentu neměl výrazný vliv. Jinak je z obrázku patrné, že se stoupající hloubkou řezu a posuvem na zub dochází ke zvětšování střední hodnoty krouticího momentu.



Obrázek 21 – Vliv jednotlivých faktorů na střední hodnotu krouticího momentu.

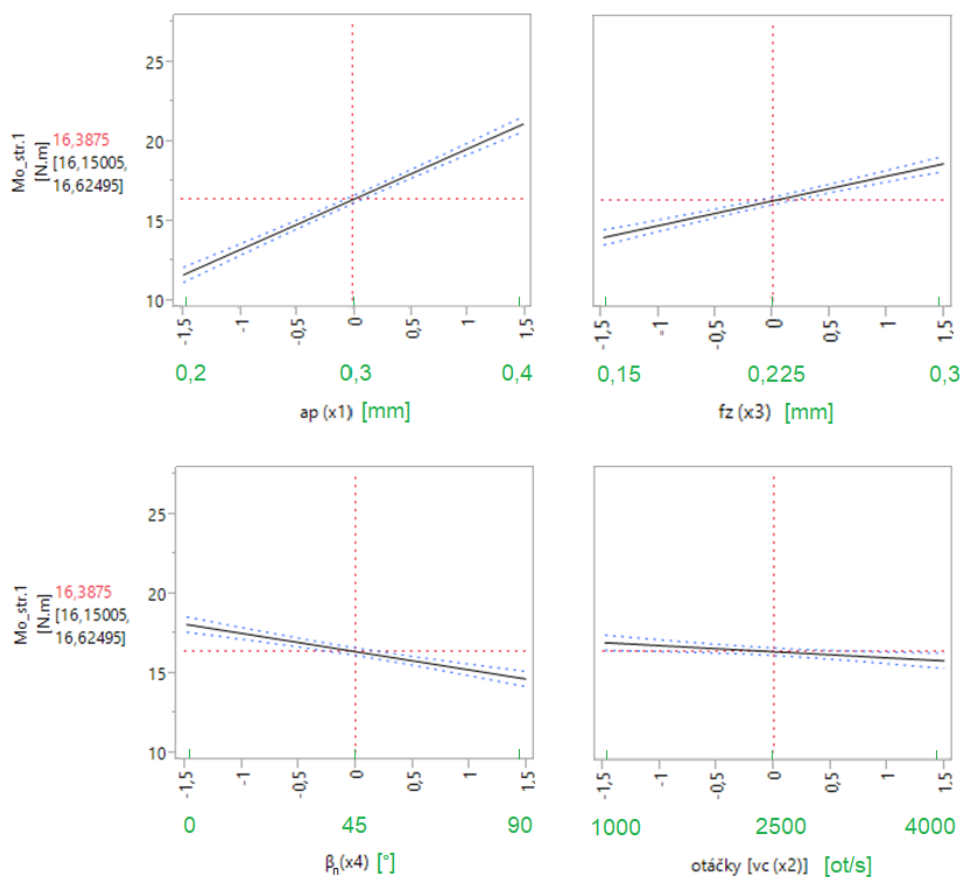
4.3.2.4 Vliv parametrů obrábění na střední hodnotu ohybového momentu

Nejpřesnější regresní model byl vytvořen na základě dat z 1. strany polotovaru, kde upravený koeficient determinace dosahoval neuvěřitelných 96,9 % (Tabulka 11). Jde tedy o velmi přesný model popisující střední hodnotu ohybového momentu, která zde průměrně dosahovala 16,39 Nm s průměrnou chybou 0,6 Nm.

| Název | Hodnota |
|--------------------------------------------------|----------|
| Koeficient determinace (RSquare) | 0,975692 |
| Adjustovaný koeficient determinace (RSquare Adj) | 0,968746 |
| Průměrná chyba modelu (Root Mean Square Error) | 0,604194 |
| Průměrná hodnota (Mean of Response) | 16,3875 |
| Počet pokusů (Observations or Sum Wgts) | 28 |

Tabulka 11 – Vhodnost modelu střední hodnoty ohybového momentu z 1. strany polotovaru

Podobně jako v případě střední hodnoty krouticího momentu mají největší vliv na střední hodnotu ohybového momentu hloubka řezu a posuv na zub, jak lze vidět na obrázku číslo 22. Nejzajímavější je zde opět graf popisující průběh vlivu příčného vyklonění. Na něm si lze povšimnout jeho pomalé klesající tendence, zatímco v případě vlivu příčného vyklonění na amplitudu ohybového momentu byl účinek značný. Z toho lze vyvodit závěr, že s rostoucím úhlem příčného vyklonění pozvolna klesá střední hodnota ohybového momentu a zároveň s klesající střední hodnotou ohybového momentu o dost výrazněji klesá i jeho amplituda.



Obrázek 22 – Vliv jednotlivých faktorů na střední hodnotu ohybového momentu

4.4 Dvojitý povrch

Posledním doplňujícím úkolem této práce bylo poskytnout nějaký informační materiál týkající se dvojího povrchu, který se objevil v předchozím experimentu. Možnou souvislostí mezi příčným vykloněním a dvojitým povrchem je skutečnost, že na začátku vnikání břitu do materiálu má nástroj tendenci se od něj odehnout a tím se během obrábění rozkmitává. Ovšem v momentě, kdy se břit začne pohybovat směrem vzhůru, dojde k jeho uklidnění, protože se hřbet břitu začne opírat o čerstvě obrobenu plochu a tím ji vyhlazuje. Toto tvrzení podporuje fakt, proč je šíře dvojího povrchu závislá na nastavení příčného vyklonění, a to je souvislost s amplitudou zatížení kulové frézy, která se zmenšuje spolu se zvětšujícím se příčným vykloněním a tím dochází k rychlejšímu uklidnění kulové frézy a k růstu kvalitnější části povrchu. Ovšem je možné, že toto tvrzení je nesprávné a zároveň by bylo vhodné prozkoumat, zdali tento dvojitý povrch je vázaný na lepenou frézu nebo během vyhodnocování prvního experimentu s celistvým nástrojem byl tento jev přehlédnut.

5 závěr

Prostřednictvím řezných sil byla ověřována hypotéza o uklidnění řezného procesu vlivem příčného vyklonění při obrábění kulovou frézou. Naměřená data z experimentu tuto hypotézu potvrdila spolu s informací, že vyklonění kulové frézy do příčného směru má největší vliv na amplitudu průběhu řezných sil. Zároveň příčné vyklonění snižuje i střední hodnotu řezné síly působící prostřednictvím ohybového momentu, ale ne v takové míře jako amplitudu.

Vliv řezných parametrů na zatížení kulové frézy byl vyhodnocován regresními modely vytvořených z naměřených odezev v podobě ohybového a kroutícího momentu. Se vzrůstající

hodnotou příčného vyklonění amplituda obou momentů rovnoměrně klesala až k maximální zkoumané hranici ($\beta_n = 90^\circ$) v tomto experimentu bez náznaku očekávaného zlomu. V případě střední hodnoty ohybového momentu tomu bylo podobně, ovšem na střední hodnotu kroučícího momentu nemělo příčné vyklonění vliv. Na základě těchto skutečností by bylo vhodné nadále pokračovat ve zkoumání vlivu příčného vyklonění na řezné síly za zmíněnou maximální hranici v tomto experimentu. Důležitou informací pro budoucí zkoumání úhlu $\beta_n > 90^\circ$ je skutečnost, že kulová fréza již nebude vlečena, ale tlačena, proto bude pravděpodobně nutné změnit úhel vlečení (tlačení), aby se *kritická oblast* opět nedostala do řezu a negativně tím neovlivňovala obrábění. Teoreticky je možné, že tlačení nástroje se ještě více sníží ohybový moment a zároveň dojde k nárůstu kroučícího momentu spolu s výraznějším nárůstem axiální síly, proto by mohlo být žádoucí ji v budoucím zkoumání nezanedbat. Zároveň by bylo vhodné pozměnit zaužívané značení předchozími experimenty v podobě příčného a podélného vyklonění za rotaci a deklinaci, protože v případě $\beta_n = 90^\circ$ je z hlediska správné terminologie příčné vyklonění nulové.

Po prozkoumání řezných sil v oblasti, kde je nástroj tlačěn, bylo by vhodné získané informace využít k provedení experimentu, ve kterém by se výhody příčného vyklonění otestovaly na reálném obrobku z praxe.

6 Použitá literatura

1. **Frková, Petra.** *Ověření vlivu příčného vyklonění při vlečení na stabilitu řezného procesu.* Plzeň : Západočeská univerzita, 2017.
2. **Dvořáček, Bc. Jan.** *Analýza silového zatížení řezného nástroje při pětiosém frézování.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2009.
3. **JUKL, Ondřej.** *Hledání optimálního úhlu příčného vyklonění kulové frézy při vlečení z hlediska stability řezného procesu.* Plzeň : Západočeská univerzita, 2011.
4. **JKZ.** [Online] JKZ Bučovice, a.s. [Citace: 03. 04 2020.] <https://www.jkz.cz/cs/produkty/konstrukcni-oceli/csn-14-220-17131-16mncr5/>.
5. **DMG MORI.** [Online] [Citace: 03. 04 2020.] <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/dmu-monoblock/dmu-65-monoblock#Intro>.
6. **PROMICRON.** [Online] [Citace: 03. 04 2020.] <https://www.promicron.de/spike/?lang=en>.
7. **STEM/MARK.** [Online] STEM/MARK, a.s. [Citace: 31. 03 2020.] <https://www.stemmark.cz/encyklopedie-hladina-vyznamnosti/>.
8. **Dvořáček, Bc. Jan.** *Analýza silového zatížení řezného nástroje při pětiosém frézování.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2009.

Seznam příloh na DVD

Příloha č. 1: Polotovary

Obsahuje zdrojové soubory z programu Inventor včetně výkresu polotovaru ve formátu pdf.

Příloha č. 2: Plán experimentu

Soubor vytvořený v tabulkovém procesoru Excel, který obsahuje na prvním listu plán experimentu dle *DoE* v *DoE normovaných hodnotách*, na druhém je vygenerované standardní pořadí jednotlivých pokusů a poslední dva listy obsahují znáhodněné pořadí pro 1. a 2. stranu polotovaru.

Příloha č. 3: Záznamy řezných sil

Jednotlivé záznamy průběhů řezných sil získané prostřednictvím programu SPIKE BTKaBlue V 13.2. Záznamy jsou rozděleny podle umístění na polotovaru a jsou seřazeny ve standardním pořadí.

Příloha č. 4: Řezné síly

Excelovský soubor obsahující v zeleně ohraničené části odečtené hodnoty z průběhů kroutícího a ohybového momentu ve standardním pořadí z 1. a 2. strany polotovaru. V červeně ohraničené části se nachází hodnoty amplitud pro jednotlivé momenty a v oranžové části je zobrazena střední hodnota momentů pro všechny pokusy.

Příloha č. 5: Statistické vyhodnocení

Textový dokument, který obsahuje statistické hodnocení všech vytvořených regresních modelů.

Seznam obrázků

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1 – Detail na dvojí povrch [1]..... | 3 |
| Obrázek 2 – Podélné vyklonění kulové frézy a jeho vychýlení při frézování | 5 |
| Obrázek 3 – Podélné a příčné vyklonění kulové frézy, deklinace a rotace..... | 6 |
| Obrázek 4 – Rozklad řezných sil nevykloněné kulové frézy (vlevo) a vykloněné kulové frézy (vpravo) [1] | 8 |
| Obrázek 5 – Řezné podmínky a rozvržení polotovaru [2] | 10 |
| Obrázek 6 – Schéma kulové frézy použité v prvním experimentu [3]..... | 10 |
| Obrázek 7 – VBD CR D080/.31–MS [3] | 10 |
| Obrázek 8 – Ukázka záznamu sil v prvním experimentu [3]..... | 11 |
| Obrázek 9 – Rozvržení polotovaru v druhém experimentu [1]..... | 13 |
| Obrázek 10 – Prodloužená kulová fréza z druhého experimentu [1] | 14 |
| Obrázek 11 – Záznam obrobených pokusů v druhém experimentu [1] | 15 |
| Obrázek 12 – Grafické znázornění pokusů a jejich transformace..... | 20 |
| Obrázek 13 – Centrálně kompozitní plán..... | 21 |
| Obrázek 14 – Polotovar a jeho rozvržení v plánovaném experimentu..... | 24 |
| Obrázek 15 – DMU 65 monoBLOCK® a jeho základní technické parametry [5]..... | 24 |
| Obrázek 16 – Dynamometr [6]..... | 25 |
| Obrázek 17 – Experiment..... | 26 |
| Obrázek 18 – Spike BTKaBlue V 13.2 – Odečítání hodnot řezných sil | 28 |
| Obrázek 19 – Vliv jednotlivých faktorů na krouticí moment | 32 |
| Obrázek 20 – Vliv jednotlivých faktorů na ohybový moment..... | 33 |
| Obrázek 21 – Vliv jednotlivých faktorů na střední hodnotu kroutícího momentu. | 34 |
| Obrázek 22 – Vliv jednotlivých faktorů na střední hodnotu ohybového momentu | 35 |

Seznam grafů

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Graf 1 – Závislost úhlu příčného vyklonění β_n na absolutním zatížení F_{abs} [2]..... | 11 |
| Graf 2 – Amplituda řezných sil A_{abs} v závislosti na příčném vyklonění β_n [3]..... | 12 |
| Graf 3 – Průběh radiální síly v druhém experimentu [1] | 16 |
| Graf 4 – Závislost F_{rad} (vlevo) a F_{tan} (vpravo) na úhlu příčného vyklonění β_n [1] | 17 |
| Graf 5 – Závislost F_{rad} (vlevo) a F_{tan} (vpravo) na typu vyklonění [1] | 17 |
| Graf 6 – Závislost F_{rad} (vlevo) a F_{tan} (vpravo) na druhu pole [1] | 18 |
| Graf 7 – Krouticí moment napříč všemi pokusy | 32 |

Seznam tabulek

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 – Parametry obrábění v druhém experimentu [1] | 13 |
| Tabulka 2 – Plán experimentu..... | 21 |
| Tabulka 3 – Centrálně kompozitní plán | 22 |
| Tabulka 4 – Ocel ČSN 14 220 – chemické složení [%] [4] | 23 |
| Tabulka 5 – Technické parametry dynamometru [1] | 25 |
| Tabulka 6 – Shrnutí vhodnosti modelu amplitudy kroutícího momentu z 2. strany polotovaru | 29 |
| Tabulka 7 – ANOVA analýza kroutícího momentu z 2. strany polotovaru..... | 30 |
| Tabulka 8 – Chyba přizpůsobení modelu kroutícího momentu z 2. strany polotovaru | 30 |
| Tabulka 9 – Odhadované parametry modelu kroutícího momentu..... | 30 |
| Tabulka 10 – Shrnutí vhodnosti modelu amplitudy ohybového momentu z 2. strany polotovaru | 33 |
| Tabulka 11 – Vhodnost modelu střední hodnoty ohybového momentu z 1. strany polotovaru | 34 |