

ZÁPADOČESKÁ FAKULTA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zjištění vlivu úhlu čela na velikost rezného odporu

Autor: Vojtěch Kojzar
Vedoucí práce: Ing. Jan Hnátík Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch KOJZAR**
Osobní číslo: **S20B0161P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **Zjištění vlivu úhlu čela na velikost řezného odporu**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Definice cílů
3. Rozbor současného stavu
4. Příprava experimentu
5. Realizace experimentu
6. Vyhodnocení naměřených dat
7. Hodnocení
8. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- CHLADIL, Josef. Přípravky a nástroje: část-obrábění. 3. vyd. Brno: VUT, 1992. ISBN 80-214-0408-6.
- BENEŠ, Vladimír; MRKVICA, Miloš. Teorie řezných nástrojů: určeno pro stud. fak. strojní. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00265-9.
- SCHMIDT, Eduard. Příručka řezných nástrojů. 2. vyd. Praha: SNTL, 1974.
- CHVÁLA, Břetislav; Votava, Josef. Přípravky: celost. vysokošk. učebnice pro strojní fakulty vys. škol techn. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988.
- VLACH, Bohumil. Technologie obrábění. Praha: ČVUT, 1986.
- PŘÍKRYL, Zdeněk, MUSÍLKOVÁ, Rosa. Teorie obrábění. 3. vyd. Praha: SNTL, 1982.
- MAREK, Josef. Experimentální ověření závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta strojní. Vedoucí práce: Ing. Jiří Vyšata, Ph.D.
- SPURNÝ, Martin. Průřez odebírané vrstvy materiálu a jeho vliv na měrný řezný odpor. Ostrava, 2016. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava, fakulta strojní. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.
- MÁDL, Jan. Teorie obrábění. Praha: ČVUT, 1989.
- ZEMAN, Petr. Měření užitečného výkonu při podélném soustružení. Liberec, 2018. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní. Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Jersák, CSc.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Tomáš Zatloukal**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

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 práci 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 na tomto místě poděkoval všem pracovníkům Regionálního technologického institutu, kteří mi byli nápomocní při každé mé činnosti, která byla v těchto prostorách prováděna. A to konkrétně: **Oldřichu Pavelkovi st.**, který připravil polotovar a přebrousil jej na přesné upnutí do nástrojářské brusky. **Tomáši Slabému**, který obsluhoval obráběcí centrum při tvorbě přípravku na broušení. **Ing. Tomáši Bakšovi a Pavlovi Adamcovi** za nabroušení břitových destiček na požadovaný úhly.

Dále bych nesmírně rád poděkoval **Ing. Josefu Skleničkovi, Ph.D.** za udělené rady v oblasti měření rezných sil a zajištění prostor, materiálu pro realizaci experimentu.

Veliká slova díky také patří **Ing. Michalu Povolnému a Ing. Tomáši Zatloukalovi**, kteří mi pomáhali provádět samotný experiment. Bez jejich pomoci realizaci experimentu nedokáží představit.

Dále bych chtěl nesmírně poděkovat panu **doc. Ing. Miroslavovi Gombárovi, Ph.D.** za pomoc v oblasti návrhu a vyhodnocení experimentu pomocí statistiky a metod, které statistika využívá.

Nesmírná slova díky a vděčnosti patří mému vedoucímu **Ing. Janu Hnátíkovi, Ph.D.**, který mi byl ve všem a vždy nápomocen. Bezvadná komunikace, vřelý přístup, trpělivost – to vše z něj dělá člověka na pravém místě. Nedokáží si představit, že bych měl jiného vedoucího bakalářské práce.

V poslední řadě, té nejdůležitější bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mi byli a vždy budou mou oporou v důležitých etapách mého života.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | | | |
|-------------------------|--|-------------------------|---------------------------------|
| AUTOR | Příjmení Kojzar | Jméno Vojtěch | |
| STUDIJNÍ PROGRAM | B0715A270013 Strojní inženýrství | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Hnátík Ph.D. | Jméno Jan | |
| PRACOVISŤE | ZČU – FST – KTO | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Zjištění vlivu úhlu čela na velikost řezného odporu | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KTO | ROK ODEVZD. | 2023 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| CELKEM | 69 | TEXTOVÁ ČÁST | 50 | GRAFICKÁ ČÁST | 19 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

| | |
|--|---|
| STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY | Hlavním cílem bakalářské práce bylo zjištění vlivu velikosti úhlu čela na velikost řezného odporu. Po vymezení jednotlivých pojmů se přešlo přímo k provedení experimentu, který musel být řádně připraven (přípravek na broušení, speciálně broušené břitové destičky, polotovary), aby byl experiment proveden správně. Byl proveden preexperiment, kde byly zjištěny nedostatky, které byly následně opraveny před samotným experimentem. Po změření experimentu byla data vyhodnocena pomocí metody DoE, která byla použita pro vyhodnocení celého experimentu. Závěrem byla komparována zjištěná rovnice a Kientzleho rovnice. |
| KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE | Posuv, řezná rychlost, hloubka řezu, hlavní složka řezné síly, řezná síla, měrný řezný odpor, závislost, dynamometr, měření, úhel čela, pozitivní a negativní úhel čela, životnost, přenos tepla, přípravek pro broušení, 5- osé frézování, břitová destička, broušení, preexperiment, DoE, opotřebení břitu, Experiment, vyhodnocení |

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

| | | | |
|--------------------------|--|-----------------|----------------------------|
| AUTHOR | Surname Kojzar | Name Vojtěch | |
| STUDY PROGRAMME | B0715A270013 Mechanical Engineering | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Hnátík Ph.D. | Name Jan | |
| INSTITUTION | ZČU – FST – KTO | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Determination of the effect of the rake angle on the magnitude of the cutting resistance | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | KTO | SUBMITTED IN | 2023 |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| TOTALLY | 69 | TEXT PART | 50 | GRAPHICAL PART | 19 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|---|--|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | The main objective of the bachelor thesis was to determine the effect of the size of the rake angle on the magnitude of the cutting resistance. After defining the individual concepts, the experiment had to be properly prepared (grinding jig, specially ground inserts, semi-finished product) in order to perform the experiment correctly. A pre-experiment was carried out, where shortcomings were found, which were subsequently corrected before the actual experiment. After the experiment was measured, the data was evaluated using the DoE method, which was used to evaluate the whole experiment. Finally, the observed equation and the Kientzle equation were compared. |
| KEY WORDS | Feed, cutting speed, depth of cut, main component of cutting force, cutting force, specific cutting resistance, dependence, dynamometer, measurement, rake angle, positive and negative rake angle, lifetime, heat transfer, grinding jig, 5-axis milling, cutting insert, grinding, pre-experiment, DoE, blade wear, experiment, evaluation |

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1. Úvod..... | 8 |
| 2. Definice cílů..... | 9 |
| 3. Rozbor současného stavu..... | 10 |
| 3.1 Bc. KNAPP, Jiří. (29. 10 2022). Experimentální měření řezných sil pro zjišťování řezného odporu. Načteno z https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html | 10 |
| 3.2 Bc. Spurný, Martin. (29. 10 2022). Průřez odebírané vrstvy materiálu a jeho vliv na měrný řezný odpor. Načteno z https://core.ac.uk/download/pdf/84394909.pdf | 14 |
| 3.3 GOMBÁR, M. (29. 10 2022). Plánování experimentov (DoE) ako nástroj efektívneho výskumu technologických procesov. Podklad k přednáškám | 16 |
| 3.4 Zeman, Petr. (29. 10 2022). Měření užitečného výkonu při podélném. Načteno z https://dSPACE.tul.cz/bitstream/handle/15240/152387/Bakalarska_prace_Petr_Zeman_end.pdf?sequence=1 | 17 |
| 3.5 Patrick De Vos, M. (31. 10 2022). Příručka pro technology – Jak jeto s řeznými silami? Načteno z https://www.mmspektrum.com/serialy/prirucka-pro-technology | 21 |
| 3.6 Úhel čela na břitů nástroje. (31. 10 2022). Načteno z ELUC: https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1189 | 21 |
| 3.7 Teplotní zkoumání vlivu na úhel čela (28.01.2023)..... | 22 |
| 3.8 Životnost nástroje v závislosti na úhlu čela (10.2.2023) | 23 |
| 3.9 Shrnutí současného stavu..... | 25 |
| 3.10 Statistické plánování experimentu | 25 |
| 3.11 Statické navrhování experimentu..... | 26 |
| 3.11.1 Kódování podle DoE normování..... | 27 |
| 3.11.2 Nástroje sloužící k vyhodnocení samotného experimentu..... | 28 |
| 4. Příprava experimentu | 29 |
| 4.1 Materiál obrobku | 29 |
| 4.2 Strojní vybavení pro realizaci experimentu..... | 30 |
| 4.2.1 Obráběcí stroj | 30 |
| 4.2.2 Obráběcí nástroj | 31 |
| 4.2.3 Soustružnický nůž | 38 |
| 4.3 Úprava destičky:..... | 38 |
| 4.3.1 Dynamometr KISTLER 9119AA2: | 41 |
| 5. Realizace experimentu | 42 |
| 5.1 Preexperiment..... | 42 |
| 5.1.1 Mikroskop KEYENCE VHX-6000..... | 43 |
| 5.1.2 Opatřebení břitových destiček | 44 |
| 5.1.3 Závěr z preexperimentu..... | 47 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.2 | Experiment..... | 48 |
| 6. | Vyhodnocení naměřených dat..... | 49 |
| 6.1 | Statistické vyhodnocení experimentu..... | 49 |
| 6.2 | Vyhodnocení výpočtu řezného odporu..... | 57 |
| 7. | Hodnocení dat..... | 62 |
| 8. | Závěr..... | 64 |
| 9. | Citovaná literatura..... | 65 |

Přehled použitých zkratk a symbolů

| Značka, veličina, symbol, zkratka | Jednotka | Popis |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| k_c | [MPa] | Řezný odpor |
| k_{c11} | [MPa] | Měrný řezný odpor |
| h | [mm] | Tloušťka odřezávané vrstvy |
| mc | [-] | Koeficient změny k_c |
| γ_o | [°] | Úhel čela v ortogonální rovině |
| a_p | [mm] | Hloubka řezu |
| f | [mm/ot] | Otáčkový posuv |
| F_c | [N] | Hlavní složka řezné síly |
| v_c | [m/min] | Řezná rychlost |
| v_p | [m/min] | Přísuvová rychlost |
| v_f | [m/min] | Posuvová rychlost |
| b | [mm] | Šířka obráběné vrstvy |
| K_r | [°] | Úhel nastavení hlavního ostří |
| D_c | [mm] | Průměr |
| π | [-] | Ludolfovo číslo |
| n | [ot/min] | Počet otáček |
| F | [N] | Řezná síla |
| F_p | [N] | Radiální složka řezné síly |
| F_f | [N] | Posuvová složka řezné síly |
| C_{Fc}, C_{Fp}, C_{Ff} | [-] | Empirické konstanty |
| X_{Fc}, X_{Fp}, X_{Ff} | [-] | Empirické exponenty |
| Y_{Fc}, Y_{Fp}, Y_{Ff} | [-] | Empirické exponenty |
| r_ϵ | [mm] | Poloměr špičky nástroje |
| A_D | [mm ²] | Aktivní průřez třísky |
| DoE | [-] | Design of Experiment |
| F_{ok} | [N] | Okamžitá řezná síla |
| ΔF | [N] | Rozdíl řezné rychlosti |
| M_k | [Nm] | Krouticí moment |
| P_{ef} | [W] | Efektivní výkon |
| $P_{už}$ | [W] | Užitečný výkon |
| ω | [rad·s ⁻¹] | Úhlová rychlost |

| Značka, veličina, symbol, zkratka | Jednotka | Popis |
|--|-----------------|--|
| SNOP | [-] | Stroj-Nástroj-Obrobek-Prostředí |
| Q | [J] | Teplo |
| Q _{DI} | [°C] | Teplota v oblasti primárních plastických deformací |
| Q _{DII} | [°C] | Teplota v oblasti sekundárních plastických deformací |
| Q _{DIII} | [°C] | Teplota v oblasti terciálních plastických deformací |
| Q _{TC} | [°C] | Teplota vzniklá třením třísky na čele nástroje |
| Q _{TH} | [°C] | Teplota vzniklá třením třísky na hřbetu nástroje |
| Q _T | [°C] | Teplota odvedená třískou |
| Q _O | [°C] | Teplota odvedená obrobkem |
| Q _N | [°C] | Teplota odvedená nástrojem |
| Q _P | [°C] | Teplota odvedená prostředím |
| R _m | [MPa] | Pevnost v tahu |
| ŘS | [-] | Řídicí systém |
| VBD | [-] | Vyměnitelná břitová destička |
| SW | [-] | Software |
| CAM | [-] | Computer aided manufacturing |
| ANOVA | [-] | Analysis of Variance – Analýza rozptylů |

Seznamy:

Obrázky:

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 - Tvorba plastických deformací v místě obrábění [16]..... | 13 |
| Obrázek 2 – Působení hlavních řezných sil [1]..... | 15 |
| Obrázek 3 – Rozdělení poměrů hlavních řezných sil v závislosti na poloměru špičky nástroje [31] | 15 |
| Obrázek 4 – Závislost operací na řezném odporu materiálu a odebírané vrstvě [10]..... | 16 |
| Obrázek 5 – Průběh řezné síly během řezného procesu [12] | 17 |
| Obrázek 6 – Způsoby stanovení řezných sil [13]..... | 18 |
| Obrázek 7 – Hydraulický dynamometr [13] | 20 |
| Obrázek 8 – Pneumatický dynamometr gazda [13] | 20 |
| Obrázek 9 – Hranice úhlů čela [8] | 21 |
| Obrázek 10 – Teplotní schéma při obrábění [17]..... | 22 |
| Obrázek 11 – Teplotní pole na čele soustružnického nože [17] | 22 |
| Obrázek 12 – Schéma experimentu DoE [32]..... | 26 |
| Obrázek 13 – Lineární DoE normování [21] | 27 |
| Obrázek 14 – Body rozvržené v centrálním kompozitním plánu [33]..... | 28 |
| Obrázek 15 – Rozměry dílu potřebného k experimentu | 29 |
| Obrázek 16 – Obráběcí stroj Emco E25 [27] | 30 |
| Obrázek 17 – Vyměnitelná břitová destička (VBD) [28] | 31 |
| Obrázek 18 – Broušený polotovár na přípravek..... | 32 |
| Obrázek 19 – Hrubý návrh držáku pro broušení | 32 |
| Obrázek 20 – Správné ustavení břitové destičky | 33 |
| Obrázek 21 – Tvar lůžka pro břitovou destičku | 33 |
| Obrázek 22 – Technologické odstranění nepotřebného materiálu | 34 |
| Obrázek 23 – Vyvrtané díry k zajištění technologičnosti výroby | 34 |
| Obrázek 24 – Vyosená díra držáku vůči břitové destičce pro uchycení šroubem..... | 35 |
| Obrázek 25 – DMG Mori DMU 40 eVo linear [36] | 35 |
| Obrázek 26 – kleštinový upínač Heinbuch Manok s kleštinou [34] | 36 |
| Obrázek 27 – Ustavení držáku v upínači Heinbuch Manok..... | 36 |
| Obrázek 28 – Indikování a srážení ostrých hran | 37 |
| Obrázek 29 – Vyrobený držák ve stroji DMG Mori | 37 |
| Obrázek 30 – Přípravek pro broušení..... | 38 |
| Obrázek 31 – ANCA MX7 [35]..... | 38 |
| Obrázek 32 – Upnutí držáku ve stroji ANCA MX7..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 33 – Proces broušení | 39 |
| Obrázek 34 – Měření s nasvícením na stroji Zollner G3 | 40 |
| Obrázek 35 – Uživatelské prostředí stroje Zollner G3 | 40 |
| Obrázek 36 – Nabroušené břitové destičky | 41 |
| Obrázek 37 – dynamometr KISTLER 9119AA2 [29] | 41 |
| Obrázek 38 – Pracoviště provedení preexperimentu/experimentu | 42 |
| Obrázek 39 – Mikroskop KEYENCE VHX-6000 [30] | 44 |
| Obrázek 40 – Destička s 0° úhlu čela – opotřebení..... | 44 |
| Obrázek 41 – 3D pohled na BD s úhlem čela 0° | 45 |
| Obrázek 42 – Destička s úhlem čela 7° – opotřebení..... | 45 |
| Obrázek 43 – 3D pohled na BD s úhlem čela 7° | 46 |
| Obrázek 44 – Destička s úhlem čela -7° – opotřebení | 46 |
| Obrázek 45 – 3D pohled na BD s úhlem čela 7° | 47 |
| Obrázek 46 – Napovlakované destičky metodou tripple coating..... | 48 |
| Obrázek 47 – Box plot opakovaných měření pokusu č.9 a pokusu č.10..... | 52 |
| Obrázek 48 – Úběr třísky z polotovaru [5] | 57 |

Grafy:

| | |
|---|----|
| Graf 1 – Závislost hlavní složky řezné síly na změně hloubky řezu při $f = 0,01$ [mm/ot] [5]. | 11 |
| Graf 2 – Závislost hlavní složky řezné síly na změně hloubky řezu při $f = 0,2$ [mm/ot] [5] ... | 11 |
| Graf 3 – Závislost hlavní složky řezné síly na změně posuvu při $v_c = 400$ [m/min] [5] | 12 |
| Graf 4 – Závislost hlavní složky řezné síly na změně posuvu při $v_c = 50$ [m/min] [5] | 12 |
| Graf 5 – Závislost řezného odporu na změně posuvu a řezné rychlosti [5] | 13 |
| Graf 6 – Závislost řezného odporu na změně řezné rychlosti a posuvu [5] | 14 |
| Graf 7 – Závislost teploty na posuvu nástroje [18] | 23 |
| Graf 8 – Závislost teploty na úhlu velikosti čela [18] | 23 |
| Graf 9 – Předpoklad životnosti na úhel čela [19] | 23 |
| Graf 10 – Zjištění životnosti nástroje na řezné rychlosti [20] | 24 |
| Graf 11 – Závislost hlavní řezné síly na úhel čela [20] | 24 |
| Graf 12 – Grafická deskriptivní statistika pro F_c | 50 |
| Graf 13 – Grafická deskriptivní statistika s eliminací hrubých chyb | 51 |
| Graf 14 – Grafická analýza reziduí řezné síly | 54 |
| Graf 15 – Rezidua pro jednotlivé pokusy plánu experimentu F_c | 55 |
| Graf 16 – Porovnání naměřených a zjištěných hodnot F_c [N] | 55 |
| Graf 17 – Závislost F_c na posuvu | 56 |
| Graf 18 – Závislost F_c na úhlu čela | 56 |

| | |
|---|----|
| Graf 19 – Grafická analýza reziduí řezného odporu | 59 |
| Graf 20 – Rezidua pro jednotlivé pokusy plánu experimentu <i>kc</i> | 60 |
| Graf 21 – Porovnání naměřených a zjištěných hodnot <i>kc</i> [MPa] | 60 |
| Graf 22 – Závislost řezného odporu na úhlu čela..... | 61 |
| Graf 23 – Závislost řezného odporu na posuvu..... | 61 |

Tabulky:

| | |
|---|-----------|
| Tabulka 1 – Parametry obráběcího stroje Emco E 25 [27] | 30 |
| Tabulka 2 – Velikosti jednotlivých kót [28] | 31 |
| Tabulka 3 – Plán experimentu..... | 43 |
| Tabulka 4 – Deskriptivní statistika základního souboru | 50 |
| Tabulka 5 – Deskriptivní statistika základního souboru bez hrubých chyb..... | 51 |
| Tabulka 6 – Analýza nulových bodů plánu experimentu | 52 |
| Tabulka 7 – Shrnutí vlastnosti modelu pro F_c | 52 |
| Tabulka 8 – ANOVA pro F_c | 53 |
| Tabulka 9 – Chyba nedostatečného přizpůsobení modelu | 53 |
| Tabulka 10 – Tabulka odhadů parametrů modelu pro F_c | 53 |
| Tabulka 11 – Vypočtené, zjištěné a stanovené hodnoty dle plánu experimentu..... | 57 |
| Tabulka 12 – Shrnutí vhodnosti modelu pro <i>kc</i> | 58 |
| Tabulka 13 – ANOVA pro <i>kc</i> | 58 |
| Tabulka 14 – Tabulka odhadů parametrů modelu <i>kc</i> | 58 |

1. Úvod

Obrábění, jakožto proces k dosažení odebrání materiálu formou třísky, je již znám velice dlouhou dobu. Byl pozorován již od doby kamenné, kde byla zpozorována technologie podobná dnešnímu vrtání, kdy pomocí dřívka (kde do dolní části byl vsazen tvrdý špičatý kámen) a kůže namotané na tětívu docházelo k rotačnímu pohybu, který při tlaku na desku způsoboval odběr materiálu. I když to byla primitivní technologie, přinášela žádoucí výsledky. V Egyptě dokázali soustružit díly z alabastru, poté i dokonce malé bronzové předměty ve formě nádob. Obrovský rozmach obráběcích strojů a strojů jako takových si připisuje průmyslová revoluce v 18. století, kdy se dostala do popředí pára, která zajišťovala dodávku energie obráběcím strojům. Ve 20. století byla pára nahrazena energií elektrickou, kterou využíváme dodnes.

Ve strojírenství známe mnoho faktorů, které dokážou značně ovlivnit proces samotného obrábění. Faktor je zejména definován jako činitel, který má určitý vliv na chod činnosti. S faktory přímo souvisejí odezvy neboli důsledky faktorů. Je známo, že se technolog snaží vyrobit součást co nejlevněji. Nesmíme avšak opomenout životnost nástroje – především na jeho řezné podmínky, materiál, z kterého je díl a nástroj vyroben, na samotnou řeznou geometrii nástroje a ostatní faktory, které proces obrábění ovlivňují. Tyto všechny faktory upozorňují na důležitost správné volby návrhu nástroje. Z ekonomického hlediska je na nástroj pohlíženo tak, aby dokázal vydržet co nejvíce úběru materiálu při minimální opotřebení nástroje. Řezná síla, která vzniká stykem nástroje a samotného materiálu, určuje, že materiál klade určitý řezný odpor. Tento odpor se bude lišit ve spoustu úsecích ovlivňující samotné obrábění, ale především bude mít vliv na citelnou změnu velikosti úhlu čela nástroje.

Jeden z nejdůležitějších faktorů je úhel čela, pod kterým odchází tříska z materiálu po nástroji do prostředí. Zde se setkáváme s rozložením řezných sil, které je nutno do výpočtu zahrnout. Výpočet sil poukazuje namáhání v jednotlivých místech řezu a jejich působení, proto je nutno sestavit matematický model, který tuto charakteristiku lépe zachycuje. Tento matematický model chceme dále rozvíjet a stanovit faktory, které ovlivňují úhel čela nástroje => proto je nutné sestavit rovnici, kde budou všechny faktory zachycené. Pomocí statistické metody je dosažena kompletace této rovnice. Tuto problematiku chceme tímto racionalizovat.

2. Definice cílů

Cílem této bakalářské práce je zjištění vlivu úhlu čela na velikost řezného odporu, resp. na velikost řezné síly. Práce bude řešena na katedře technologie obrábění, jejichž prostory, stroje a vybavení bude k této práci potřeba. Na základě vzorků, experimentů, bude zjištěn matematický model, který by uvažoval faktory ovlivňující obrábění (otáčkový posuv, úhel čela nástroje). V práci bude využita statistická metoda, která stanoví, jaké veličiny jsou potřeba k zjištění závislosti. Tyto veličiny budou změřeny a následně vyhodnoceny právě touto metodou. Po dokončení experimentální fáze dojde k vyhodnocení a sestavení rovnice popisující vliv úhlu čela. Tato nově vytvořená rovnice může reprezentovat případný rozdíl mezi touto nově vytvořenou rovnicí a rovnicí známou pod pojmem Kienzleův zákon (vztah 1). [1]

$$Fc = kc_{11} \cdot ap \cdot f^{1-mc} \quad (1)$$

kde:

- kc_{11} = měrný řezný odpor [N/mm²]
- ap = hloubka řezu [mm]
- f = otáčkový posuv [mm/min]
- mc = Kienzleův koeficient

Za obecných podmínek se uplatňuje pro výpočet řezného odporu (vztah 2), který je směrodatnější než obecný (vztah 10): [5]

$$kc = kc_{11} \cdot h^{-mc} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) \quad (2)$$

Kde:

- kc_{11} – měrný řezný odpor [N/mm²]
- h – tloušťka odřezávané vrstvy [mm]
- mc – koeficient, který vyjadřuje působení velikosti změny měrného řezného odporu v závislosti na tloušťce obráběné třísky [-]
- γ_o – úhel čela v ortogonální rovině [°]

Koeficient mc je tabulková hodnota, která v závislosti na druhu materiálu stanovuje hodnotu tohoto členu. U většiny materiálů hodnota dosahuje 0,25.

Ze (vztah 2) vyplývá, že při zvětšení úhlu čela γ o 1° způsobí zmenšení řezného odporu kc o 1 %. A právě ověření tohoto vlivu je motivem této práce.

3. Rozbor současného stavu

Pro zjištění aktuálního stavu problematiky byla provedena literární rešerše. Vyhledávání proběhlo díky klíčovým slovům a faktorům, které jsou definované v anotační listě. V následujících odstavcích bude stručně uveden záměr jednotlivých prací.

3.1 Bc. KNAPP, Jiří. (29. 10.2022). Experimentální měření řezných sil pro zjišťování řezného odporu. Načteno z <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>

V diplomové práci se objevuje ucelený základ na problematiku dynamického zatížení obráběcí soustavy při soustružení, a to především na jeho faktory. Pomocí experimentu jsou vyhodnocena data, která se podrobí statistickému modelu.

Důležité je si ovšem definovat faktory a jejich vztahy, na které je odkázáno v následujících odstavcích:

Posuv f – Je to vzdálenost, o kterou se při soustružení posune řezný nástroj vzhledem k obrobku za jednu jeho otáčku. Většinou se udává v mm na jednu otáčku – mm/ot. Nůž se dokáže posouvat podle druhu práce rovnoběžně, kolmo či oběma způsoby po obrobku. [2]

Řezná rychlost v_c – Značí se v_c . Definuje rychlost hlavního a vedlejšího pohybu, při nichž nůž odebrává materiál z obrobku ve formě třísek. Řezná rychlost lineárně závisí na vzdálenosti od středu obrobku, tj. největší řezná rychlost je na povrchu součásti. Rychlost vedlejšího pohybu je obvykle tak malá, že u samotného numerického výpočtu se zanedbává. Vzorec je dán (vztah 3). [2] [3]

$$V_c = \frac{D_c \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad (3)$$

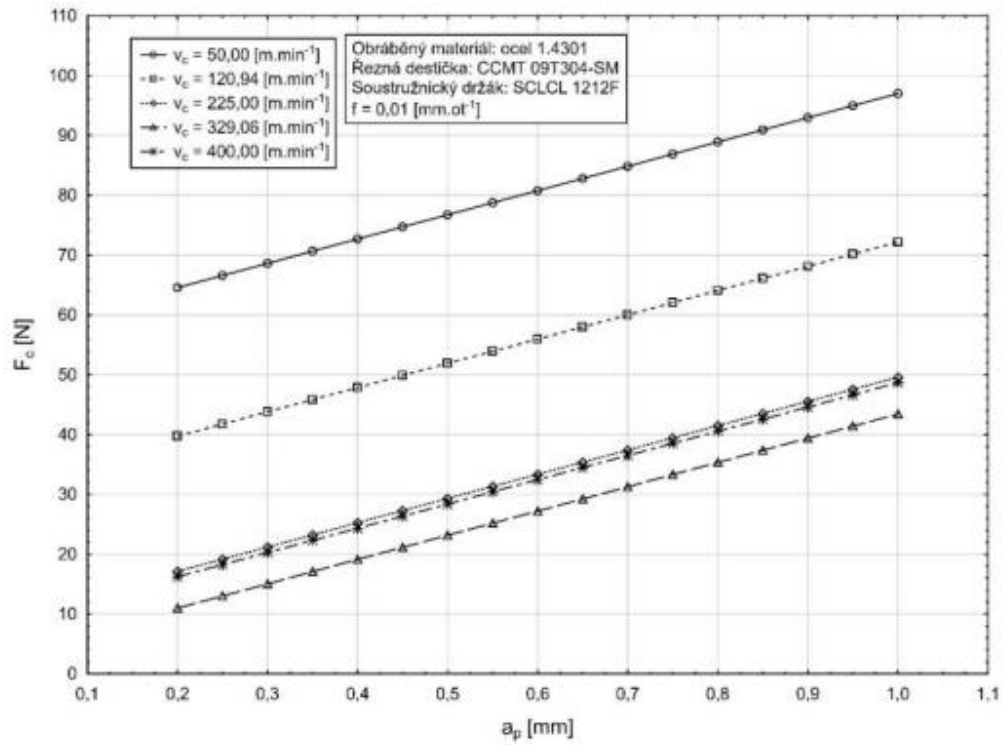
Hloubka řezu ap – Jedná se tloušťku odřezávané vrstvy z obrobku, kterou dokáže nůž odebrat při jediném lineárním nevratném pohybu. Udává se v mm a je dána polovičním rozdílem průměrů obráběné a obrobené plochy. Tříska je dána šířkou a výškou odřezávané vrstvy, které blíže popisují (vztah 4,5). [3]

$$b = \frac{ap}{\sin Kr} \quad (4)$$

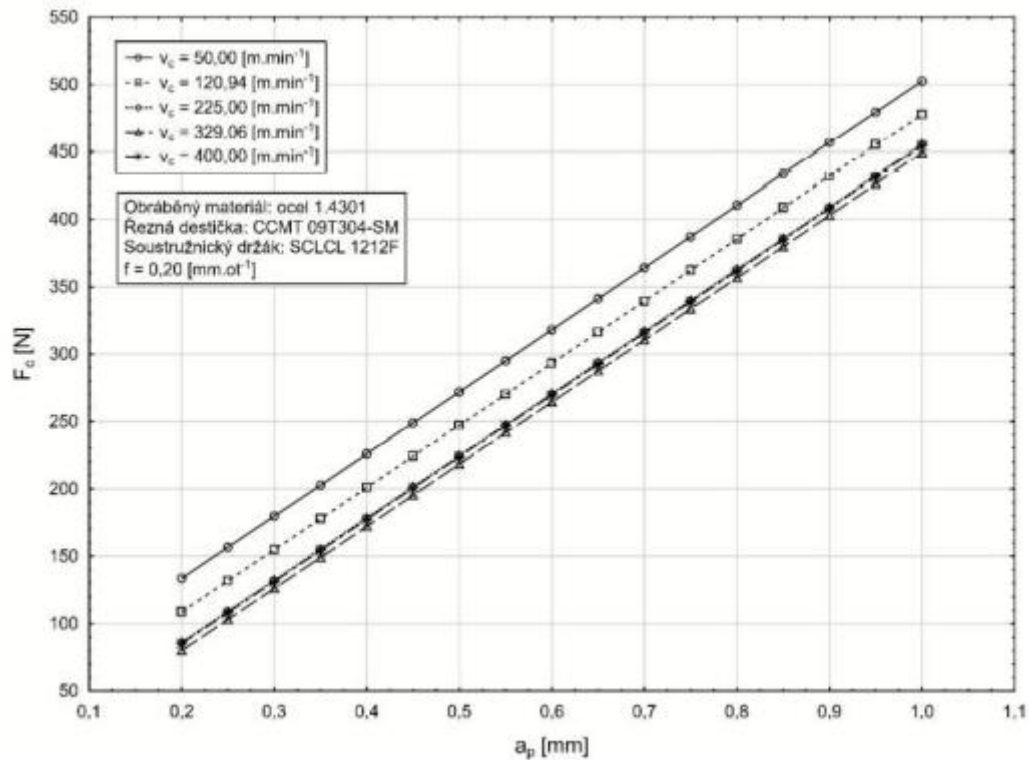
$$h = f \cdot \sin Kr \quad (5)$$

Hlavní složka řezné síly F_c – Řezná síla F_c působí ve směru hlavního pohybu obráběcího nástroje a je ze všech složek největší. Na celkovém řezném příkonu se většinou podílí až z 99 %. [4] Vzorec je dán (vztah 1).

Data, která byla experimentálně získána potvrzují samotnou teorii, že při zvyšování hloubky řezu a posuvu dochází ke zvětšení hlavní složky řezné síly – dochází k lineárnímu průběhu závislosti (Graf 1). Pokud je zahrnut posuv f , zejména jeho vyšší hodnoty je průběh více příkrý a vliv řezné rychlosti a její důležitosti se snižuje (Graf 2). [5]

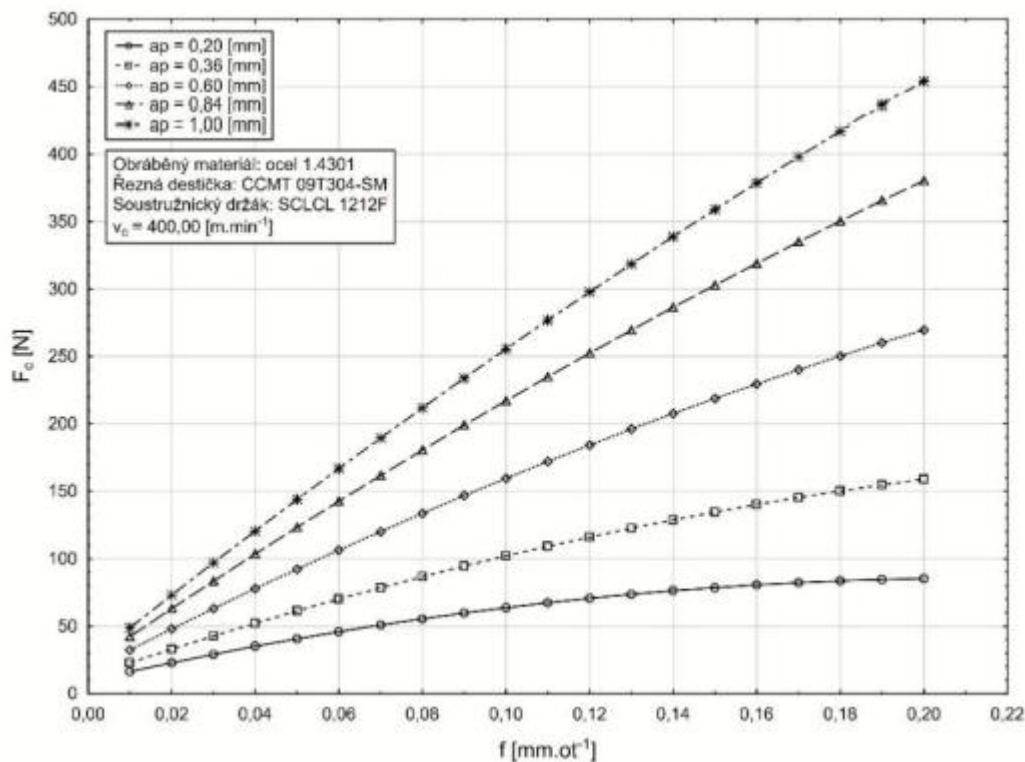


Graf 1 – Závislost hlavní složky řezné síly na změně hloubky řezu při $f = 0,01$ [mm/ot] [5]

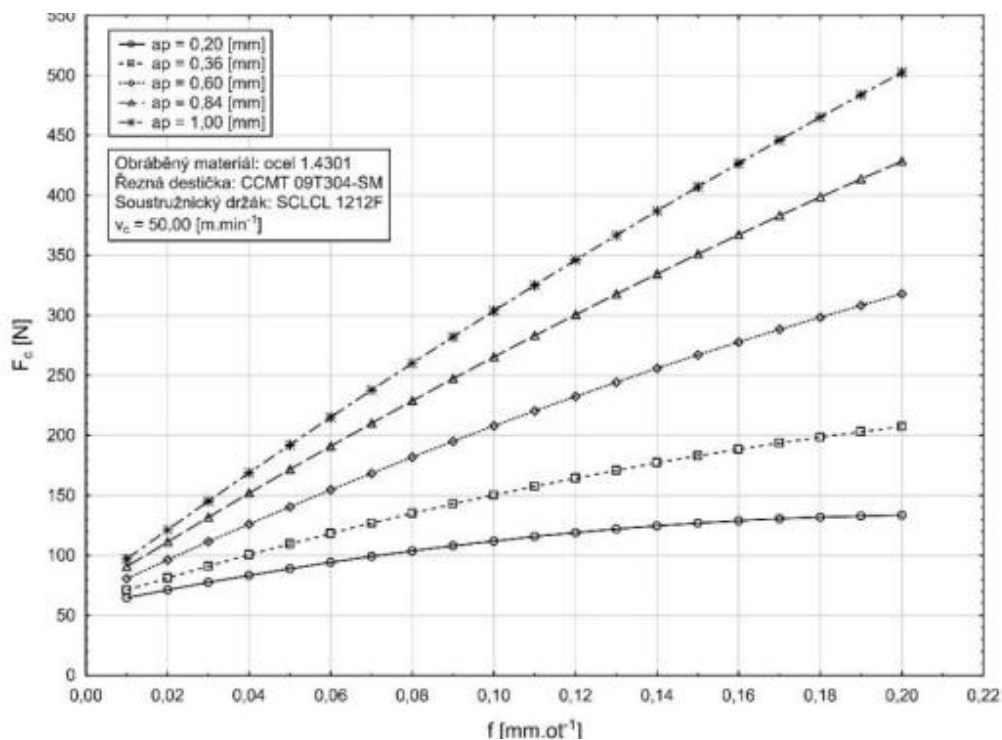


Graf 2 – Závislost hlavní složky řezné síly na změně hloubky řezu při $f = 0,2$ [mm/ot] [5]

Tvrzení, že vliv řezné rychlosti je zanedbatelný je chybné. Řezná rychlost není zanedbatelná a velký zřetel je dán na malé hodnoty posuvu či hloubky řezu, které znázorňují následné grafy (Graf 3 a Graf 4). Při komparaci obou grafů bylo stanoveno, že změna řezné rychlosti z 50 na 400 m/min způsobila pokles hlavní složky řezné síly F_c zhruba o hodnotu 50 N.[5]



Graf 3 – Závislost hlavní složky řezné síly na změně posuvu při $v_c = 400$ [m/min] [5]



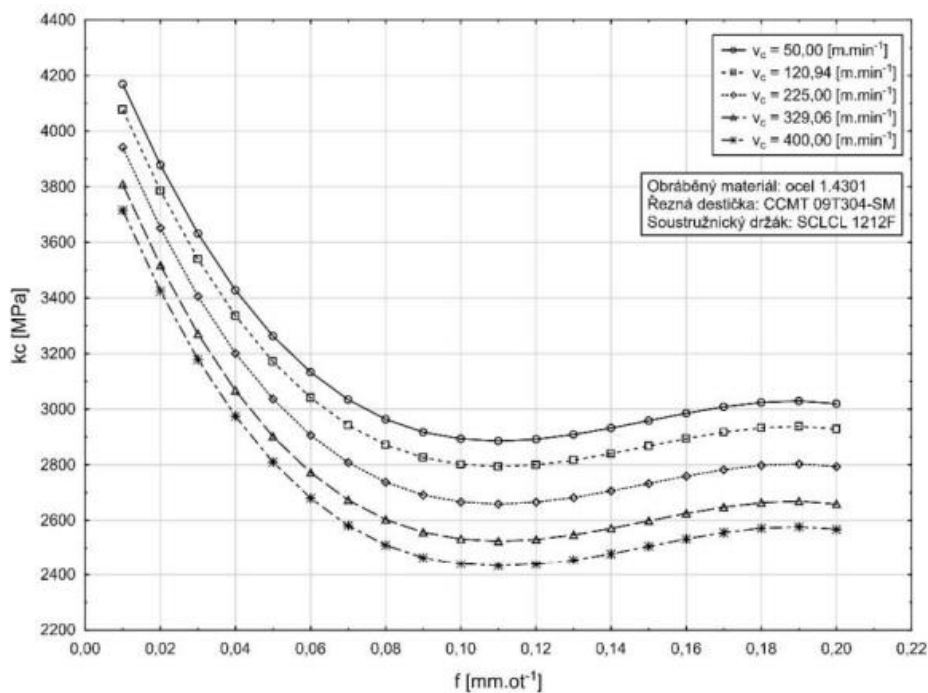
Graf 4 – Závislost hlavní složky řezné síly na změně posuvu při $v_c = 50$ [m/min] [5]

Řezný odpor k_c

Zjištění pana Knappa, který tvrdí, že faktor, který má na řezný odpor největší vliv, je šířka odřezávané vrstvy. Inkrementace hodnoty posuvu značně ovlivní snížení hodnoty řezného odporu k_c z důvodu snížení deformační práce, která redukuje stupeň zpevnění materiálu pasivních prací na tvorbu samotné třísky, které je přímo závislé na obráběném materiálu. Neopomenutelný vliv na samotný řezný odpor představuje také řezná rychlost. Tato rychlost má stejnou tendenci chování jako u řezné síly, kdy při překročení určité hranice této řezné rychlosti dochází s jejím nabýváním přírůstkem následně ke snížení řezného odporu materiálu. To je způsobeno ovlivňováním velikosti oblasti OMNO (Obrázek 1), intenzity primární deformace a ovlivnění teploty deformovaného materiálu (tvorba nárůstku) a interakci na velikost součinitele frikce. [5][12]

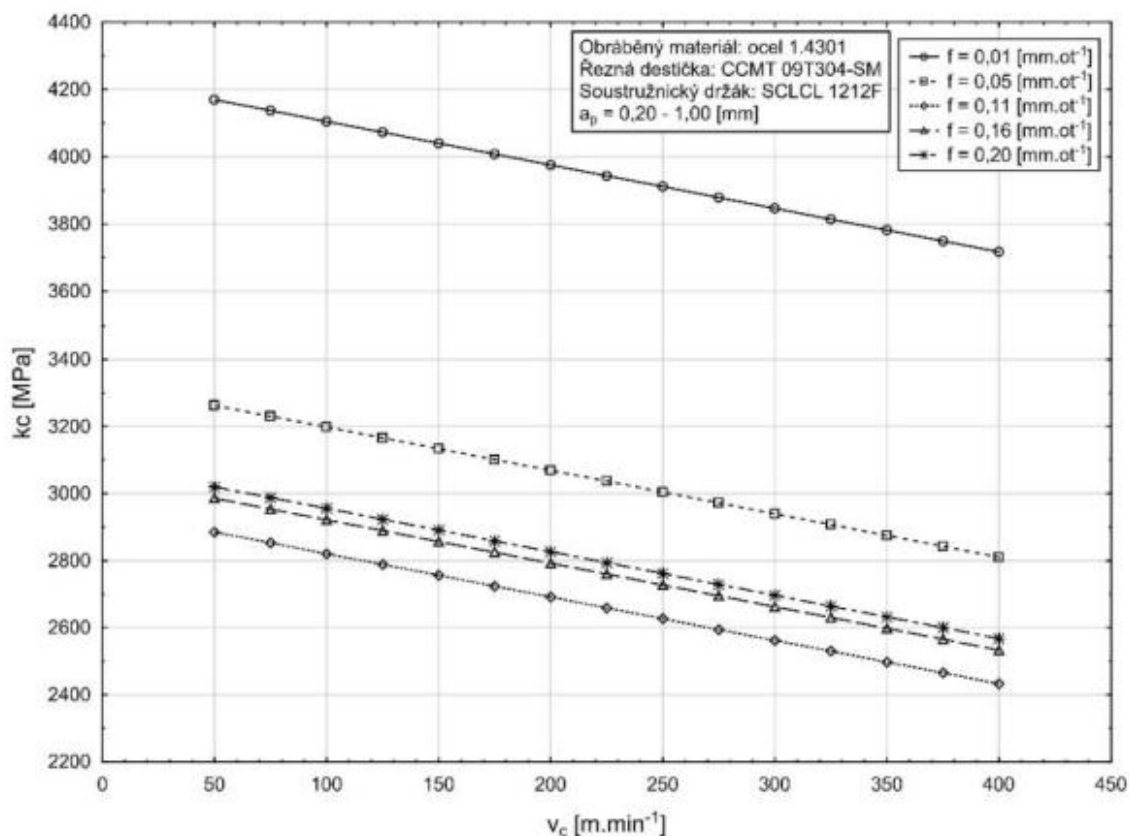


Obrázek 1 - Tvorba plastických deformací v místě obrábění [16]



Graf 5 – Závislost řezného odporu na změně posuvu a řezné rychlosti [5]

Při nahlédnutí do grafů (Graf 5 a Graf 6) je zcela zřejmé, že vliv řezné rychlosti na řezný odpor materiálu se rapidně zmenšuje při vyšších hodnotách posuvu f .



Graf 6 – Závislost řezného odporu na změně řezné rychlosti a posuvu [5]

3.2 Bc. Spurný, Martin. (29. 10. 2022). Průřez odebírané vrstvy materiálu a jeho vliv na měrný řezný odpor. Načteno z <https://core.ac.uk/download/pdf/84394909.pdf>

Cílem práce bylo naměření řezných složek sil při obrábění, kdy byly posuzovány dva odlišně se chovající materiály (niklové slitiny a uhlíkové oceli). Pomocí břitových destiček a zvolení takových řezných podmínek, aby průřez třísky obou materiálů dosahoval stejných hodnot se provedl experiment.

Nedílnou součástí této práce byl měrný řezný odpor. V předešlé kapitole byla uvedena jeho stručná charakteristika. Měrný řezný odpor je vyjádřen hlavní složkou řezné síly F_c , která tvoří až 99% celkové řezné síly F (vztah 6).

Dalšími zmíněnými veličinami ve (vztah 6) je síla pasivní (radiální) síla F_p , která ovlivňuje přesnost obrobenej plochy a mimo to zmírňuje náchylnost celého nástroje na vznik chvění, které se v obráběcím procesu vyskytuje. Zastupuje až 25% celkové řezné síly. Posuvová (axiální) síla F_f se nachází ve směru, kde má stroj největší tuhost. Tvoří obvykle 40-50 % řezné síly (Obrázek 2). [6] [7]

$$F = \sqrt{(F_c)^2 + (F_f)^2 + (F_p)^2} \quad (6)$$

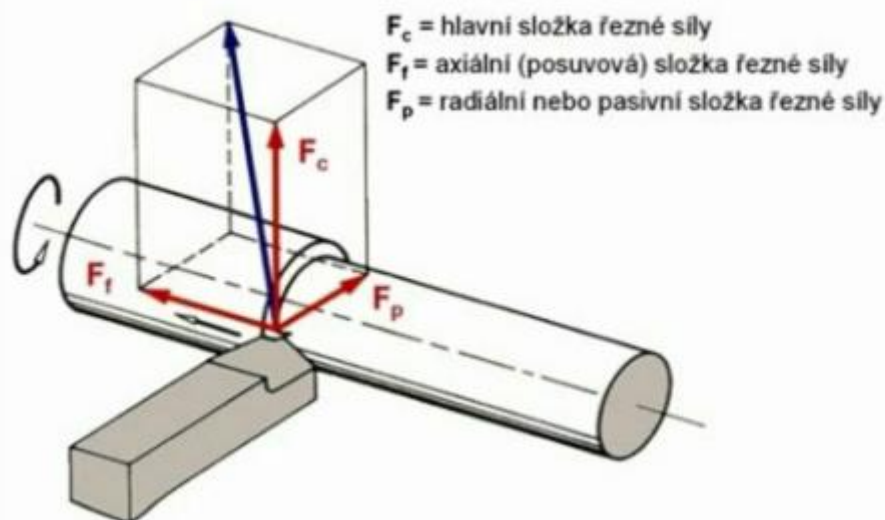
Kde jsou hlavní složky definované v následujících (vztah 7, 8, 9): [8]

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{X_{Fc}} \cdot f^{Y_{Fc}} \quad (7)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{X_{Fp}} \cdot f^{Y_{fp}} \quad (8)$$

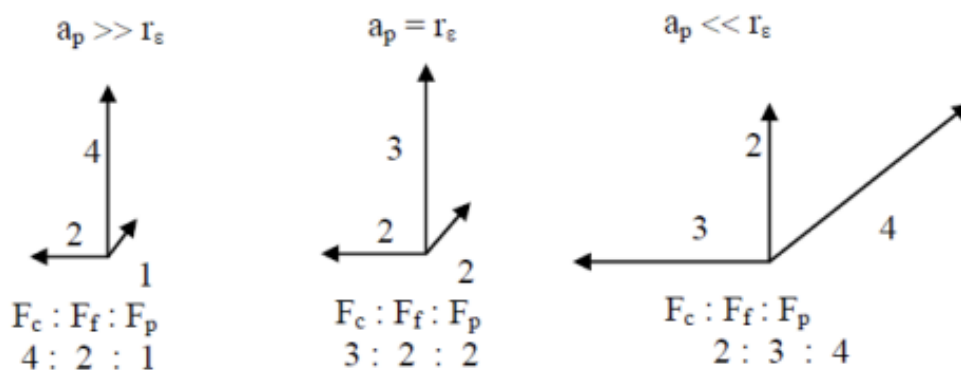
$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{X_{Ff}} \cdot f^{Y_{ff}} \quad (9)$$

Kde C_{Fc} , C_{Fp} , C_{Ff} jsou empirické konstanty a X_{Fc} , X_{Fp} , X_{Ff} , Y_{fc} , Y_{fp} , Y_{ff} jsou empirické exponenty, které jsou dohledatelné v tabulkách dle druhu materiálu a jeho samotného způsobu zatížení.



Obrázek 2 – Působení hlavních řezných sil [1]

Na samotné složky sil nemá účinek pouze úhel nastavení hlavního ostří K_r , ale i úhel čela, s jehož snižující hodnotou naopak složky řezných sil stoupají. Poměr řezných sil, tedy jejich rozložení, významně záleží na hloubce řezu a poloměru špičky nástroje r_ϵ . Jejich vzájemné porovnání určí poměr řezných sil. V teorii se uvádí, že hloubka řezu prakticky neovlivňuje velikost řezného odporu, nýbrž tato hypotéza není pravdivá. V oblasti zaoblení břitu nástroje řezný odpor ztelně narůstá. Díky tomuto zjištění lze říci, že výsledný poměr sil, tedy jejich rozložení, (Obrázek 2) záleží především na tom, v jakém rozsahu je nástroj vnořen do obrobku. (Obrázek 3). [6][31]



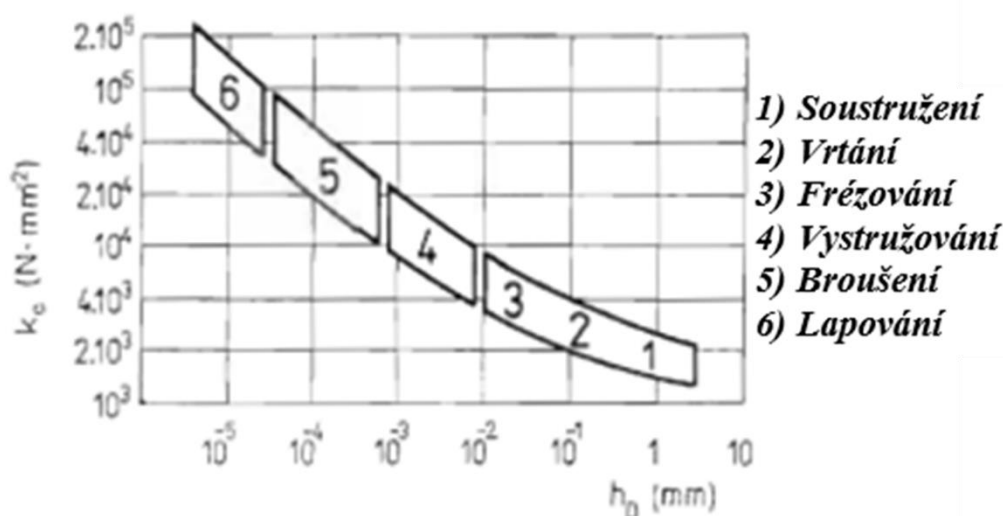
Obrázek 3 – Rozdělení poměrů hlavních řezných sil v závislosti na poloměru špičky nástroje [31]

Řezný odpor je definován (vztah 10): [9]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (10)$$

Způsob, jak se mění měrný řezný odpor je ukázáno na (Graf 5), tedy s rostoucími hodnotami posuvu se zmenšuje řezný odpor. Řezný odpor je definován jako síla, která působí proti řezné síle a neúměrně se váže na plochu řezu. Řezný odpor je tedy definován jako poměr hlavní řezné složky F_c a plochy jmenovitého průřezu třísky A_D . [9]

U různorodých technologií obrábění (Obrázek 4) jsou použité jiné určující faktory, které definují, jak má výsledná plocha vypadat. Operace se rozdělují podle toho, že čím je technologie přesnější a dochází k odebrání menší vrstvy materiálu prostřednictvím třísky, tím je řezný odpor materiálu vyšší. [10]



Obrázek 4 – Závislost operací na řezném odporu materiálu a odebírané vrstvě [10]

Experimentálně získaná data byla zjištěna díky dynamometru a počítačového softwaru, který tyto hodnoty dokázal zapsat. Kontrola opotřebení byla provedena digitální kamerou, která je součástí binokulárního stereomikroskopu. Právě díky digitální kameře bylo umožněno nahrání snímku použité destičky do počítače. Počítač je vybaven speciálním programem, který dokáže tento snímek analyzovat a vyhodnotit samotné hodnoty opotřebení. Z experimentu lze říci, že niklové slitiny mají daleko vyšší měrný řezný odpor než oceli => je to dáno především fyzikálními a chemickými vlastnostmi jednotlivých materiálů.

3.3 GOMBÁR, M. (29. 10. 2022). Plánování experimentov (DoE) ako nástroj efektívneho výskumu technologických procesov. Podklad k přednáškám.

Tato práce se zabývá především využitím statistiky k získání rovnice, která obsahuje již identifikované faktory, a přitom kvalifikuje efekty faktorů a jejich interakci. DoE (Design of Experiment) se využívá pro testování složitých úloh, u kterých je konečný výsledek dán kombinací mnoha faktorů. Metoda je tedy založena na testování kombinací různých hodnot (úrovní) faktorů a pomocí ní se zúží počet testovaných kombinací na ty podstatné. Metoda DoE

tak výrazně redukuje nutný počet testů. Nejvíce se využívá v oblasti výzkumu a vývoje v průběhu testování a validace nových výrobků či systémů. [11]

Více o této metodě bude sděleno dále v následujících kapitolách, kde přímo bude statistika podrobně vysvětlena a kde bude definováno, jakým způsobem tato metoda přispívá současnému stavu věci.

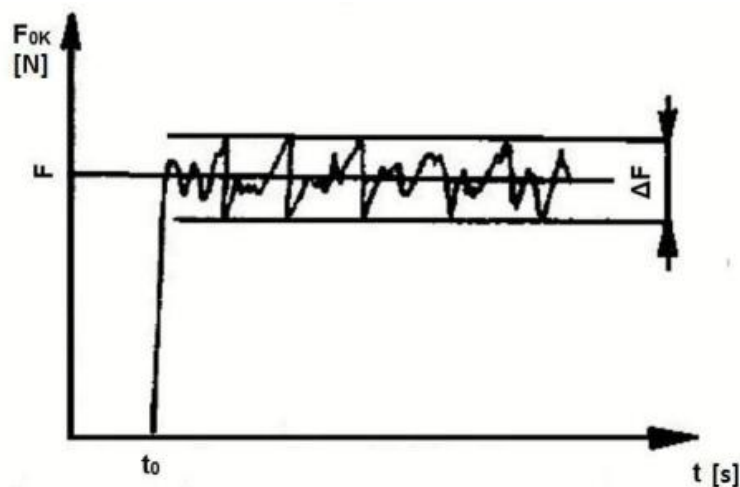
3.4 Zeman, Petr. (29. 10. 2022). Měření užitečného výkonu při podélném. Načteno z https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/152387/Bakalar_ska_prace_Petr_Zeman_end.pdf?sequence=1

Hlavním úkolem této bakalářské práce bylo vzájemně porovnat měření užitečného výkonu pomocí různých zařízení. V dnešní době víme, že náklady na energie jsou více než citelné, proto je nutné tyto náklady minimalizovat.

Předně zde byla řešena problematika řezné síly, která byla projednávána v předešlých kapitolách. Pozornost se však musí věnovat i tomu, že řezná síla je dynamická. Během samotného procesu obrábění se mění v závislosti na čase okamžitá velikost síly F_{ok} a to i za neměnných řezných podmínek. Hlavní faktor zde představuje drsnost obráběné plochy, rozložení mechanických vlastností v materiálu (uspořádání zrn...), metody tvorby třísky či jiných vlivů, které ovlivní tuto okamžitou řeznou sílu. Průběh okamžité řezné síly je ilustrován na (Obrázek 5). [12] [13]

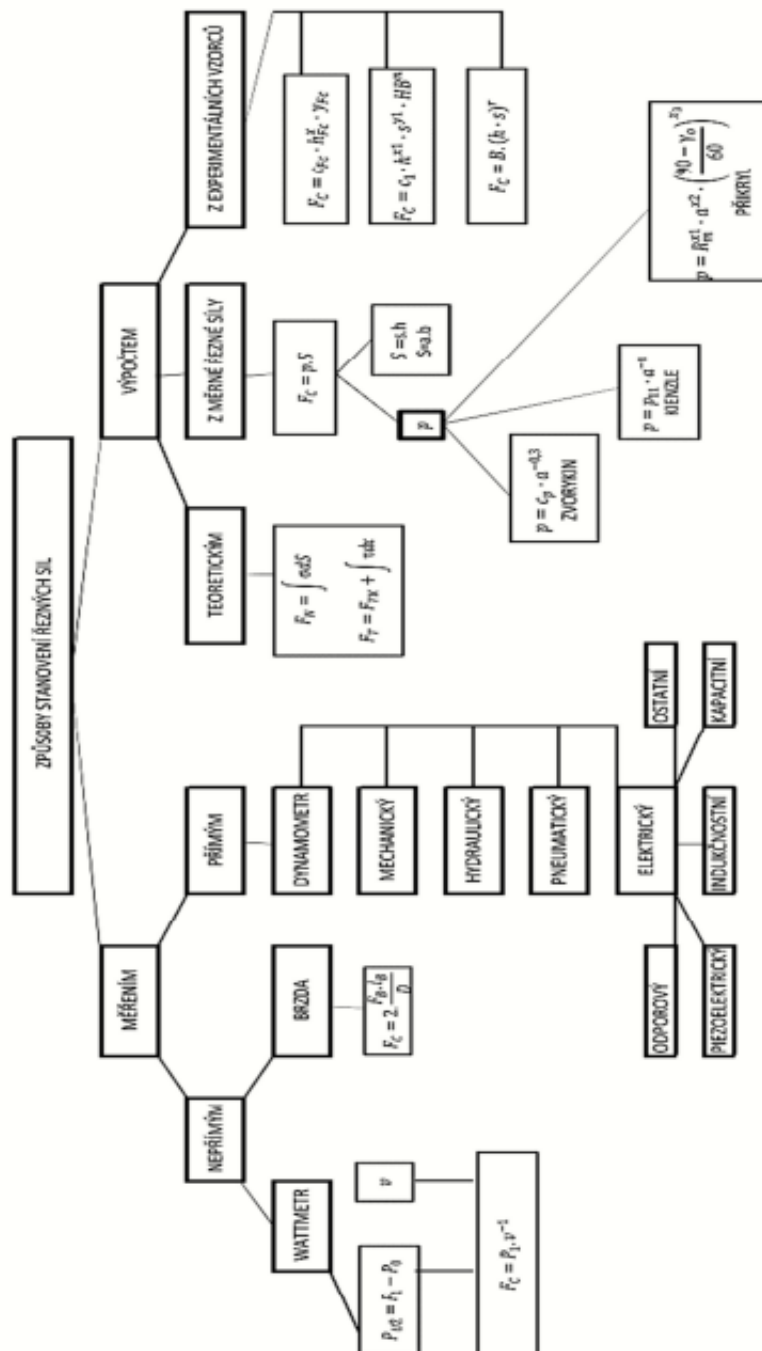
Moment, kdy při zjetí nože do záběru v časovém okamžiku, který označíme t_0 , tak právě tehdy započnou nerovnoměrné změny velikosti řezné síly okolo své střední hodnoty. Rozsah, tedy hranice výkyvů okamžité řezné síly F_{ok} , je označen ΔF . Tato hodnota činí jen několik procent celkové řezné síly F při standardním obrábění homogenních materiálů. Zcela výjimečně, kdy tento předpoklad není splněn, tak rozsah hodnot se může pohybovat až v rozmezí $\pm 20\%$ a to i při obrábění za neměnných řezných podmínek. Toto je především způsobeno tím, jak je napsáno výše – nehomogenitou povrchu, mechanikou tvorby třísky atd. Extrémní hodnoty rozptylu F_{ok} mohou být ovlivněny také např: nerovnoměrnou hloubkou třísky, kde dochází k podstatné změně působení síly materiálu na samotný řezný nástroj. [12] [13] [14]

K měření se především využíval Dynamometr a 3-fázový analyzátor, které vykazovali výsledky s minimální odchylkou. [14]



Obrázek 5 – Průběh řezné síly během řezného procesu [12]

To, jakým způsobem lze stanovit jednotlivé řezné síly je vyobrazeno na (Obrázek 6). Toto rozdělení je založeno na principu, jaké vstupní údaje se účastní děje, tedy těch, pomocí nichž dokážeme určit velikost výsledné řezné síly. Znalost velikosti řezných sil nám pomáhá určit, definovat např: velikost kroutícího momentů M_k , efektivního výkonu P_{ef} či jiných fyzikálních jednotek. Tyto zjištěné hodnoty lze použít k dalším výpočtům, které slouží ke stanovení rozměrů stroje či jeho jednotlivých součástí. Velikost řezných sil lze dosáhnout dvěma způsoby a to: měřením nebo výpočtem. [13]



Obrázek 6 – Způsoby stanovení řezných sil [13]

Pokud chceme stanovit složky řezné síly s daleko vyšší přesností a zahrnout do toho i dynamiku řezného procesu, tak je nutno volit měření řezných sil, nikoliv výpočet. [12]

Měření řezné síly je možno uskutečnit dvěma způsoby: [12]

1. Nepřímým měřením sil, kde je zjištěn příkon nebo kroutící moment a následně z toho výpočtem je zjištěna řezná síla
2. Přímým měřením sil pomocí dynamometru.

Nepřímým měřením sil:

Efektivní (užitečný) příkon stroje, který využívá stroj při obrábění na vnikání řezného nástroje do obrobku a tím zajistí oddělování třísky od obrobeného povrchu je dán (vztah 11): [12]

$$P_{ef} = F \cdot v_c \cdot \cos \omega \quad (11)$$

Veličiny F a ω nelze tak jednoduše určit, tak je velice vhodné použít (vztah 12), kde tato problematika není již přítomna [12]:

$$P_{už} = F_c \cdot v_c + F_p \cdot v_p + F_f \cdot v_f \quad (12)$$

(Vztah 12) poukazuje na to, že rychlosti v_p, v_f jsou oproti rychlosti v_c daleko menší a tím pádem se ve výsledku promítnou minimálně. Metoda se proto zjednoduší tím, že se tyto dva členy se zanedbají. Po tomto uvážení se hlavní složku řezné síly dá vypočítat pomocí (vztah 13): [12]

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} \quad (13)$$

Přímým měřením sil pomocí dynamometru:

Dynamometry se používají především pro přímé měření sil, které umožňují měřit vícesložkové řezné síly (x, y, z) a dokonce zvládají zaznamenat i kroutící moment. Zásadní součástí dynamometru je právě pružný element, který po deformaci zaviněné řeznou silou zaznamenává tuto sílu díky snímači, který ji díky tomuto signálu dokáže zpracovat přímo v měřicí aparatuře a následně poukáže na obrazovce naměřenou hodnotu. [13]

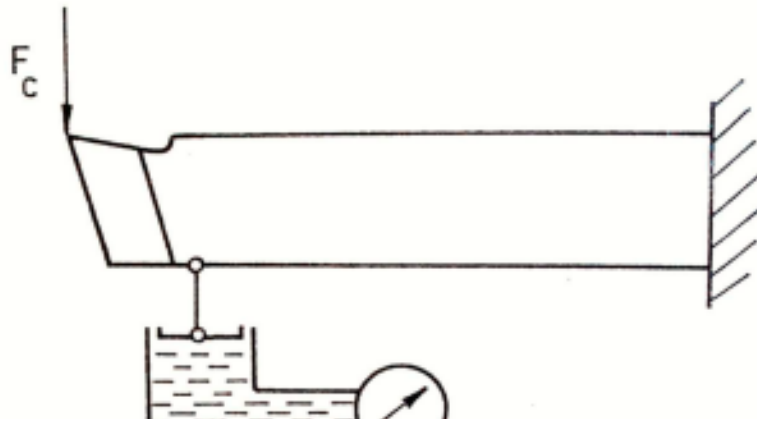
Rozdělení dynamometrů: [14]

- Mechanické
- Hydraulické
- Pneumatické
- Elektrické

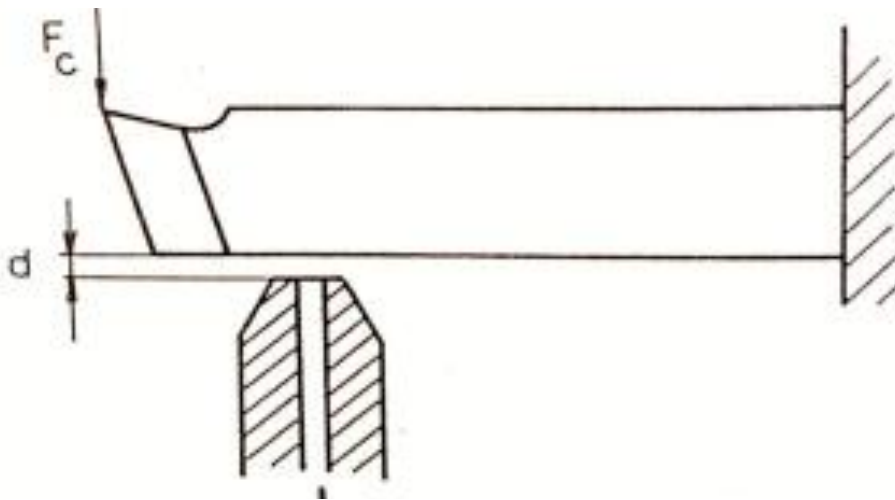
Mechanickým dynamometrem je měřena deformace pružného elementu mechanicky, např. číselníkovým úchylkoměrem. Velikost řezné síly F_c můžeme určit z průhybu, který se změnil díky měřicímu zařízení- tj. číselníkovým úchylkoměrem či jiným zařízením.[14]

Hydraulickým dynamometrem nazýváme zařízení, které v závislosti na změně tlaku v uzavřeném systému identifikuje velikost řezné síly. Právě výchylka manometru je přímo úměrná velikosti síly F_c . (Obrázek 7).[14]

Pneumatickým dynamometrem je měřen průhyb deformačního členu dynamometru na základě množství vzduchu protékajícího tryskou. Zmenší-li se průhybem nože mezera d , zmenší se úměrně i průtok vzduchu (Obrázek 8). [14]



Obrázek 7 – Hydraulický dynamometr [13]



Obrázek 8 – Pneumatický dynamometr gazda [13]

Mezi nejvíce používané dynamometry pro měření řezných sil patří elektrické dynamometry. Síla se dle fyzikálních zákonů mění na elektrickou hodnotu, jejíž měření je snadné a poměrně dobře se zpracovává. Zpracování probíhá skrze výpočetní techniku. Druhy snímačů jsou: [13]

- Odporové
- Piezoelektrické
- Indukční
- Kapacitní
- Ostatní (magnetoelektrické, magnetostrikční apod. ...)

Velikou výhodou elektrických dynamometrů není jen schopnost dynamického měření, ale je to také vysoká citlivost snímačů, přesnost měření a snadný odečet síly. V praxi se používají pro konstrukci dynamometrů nejčastěji tenzometrické a piezoelektrické snímače. [14]

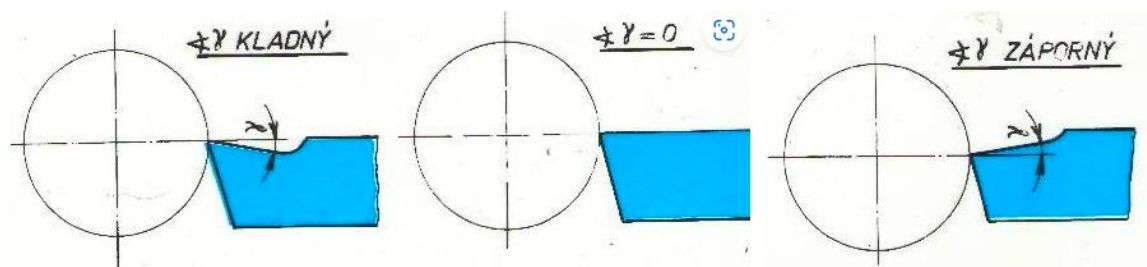
3.5 Patrick De Vos, M. (31. 10. 2022). Příručka pro technology – Jak jeto s řeznými silami? Načteno z <https://www.mmspektrum.com/serialy/prirucka-pro-technology>

Tento článek popisuje efektivitu při obrábění, vznik řezných sil v materiálu, samotný materiál obrobku a faktory působící na něj. Nedílnou součástí je i tzv. Kienzleův princip, který popisuje vztah řezné síly na dílčích faktorech soustružení (hloubka řezu, posuv). V Kienzlově principu hraje velkou úlohu úhel čela nástroje, tzv. ostrost, která působí na řeznou sílu. V důsledku to má takový účinek, že s každým přirůstajícím úhlem čela γ se o 1-1,5 % sníží velikost řezné síly, která má veliký dopad na spotřebu energie, deformaci řezných nástrojů, obrobků a vznik vibrační systému SNOP (Stroj-Nástroj-Obrobek-Přípravek). [1]

Jak již uvádí vztah (1), tzv. Kienzleův zákon, že při konfrontaci s omezením stroje se nesmí zaobírat řeznou rychlostí, nýbrž však hloubkami řezu a samotnými posuvy, jediné ty se dají velmi dobře korigovat.

3.6 Úhel čela na břitu nástroje. (31. 10. 2022). Načteno z ELUC: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1189>

Na tuhost a pevnost břitu nástroje má značný vliv úhel hřbetu společně s úhlem čela. Právě o úhlu čela lze říct, že čím je tento úhel větší, tím snadněji vniká řezný klín do materiálu a řezný odpor se zmenšuje (Obrázek 9). Nevýhoda spočívá v tom, že se břit zeslabuje, může se vyломit, zhoršuje se kvalita obrobené plochy, protože materiál je břitem vytrháván. Tento typ nože je ideální pro snadno obrobitelné materiály. Při záporném úhlu čela se dostáváme do zcela odlišného vnímání – dokáží obrábět tvrdé materiály (slnuté karbidy, keramické materiály), který mají malou pevnost v ohybu. [8]



Obrázek 9 – Hranice úhlů čela [8]

Kladný úhel čela (pozitivní):

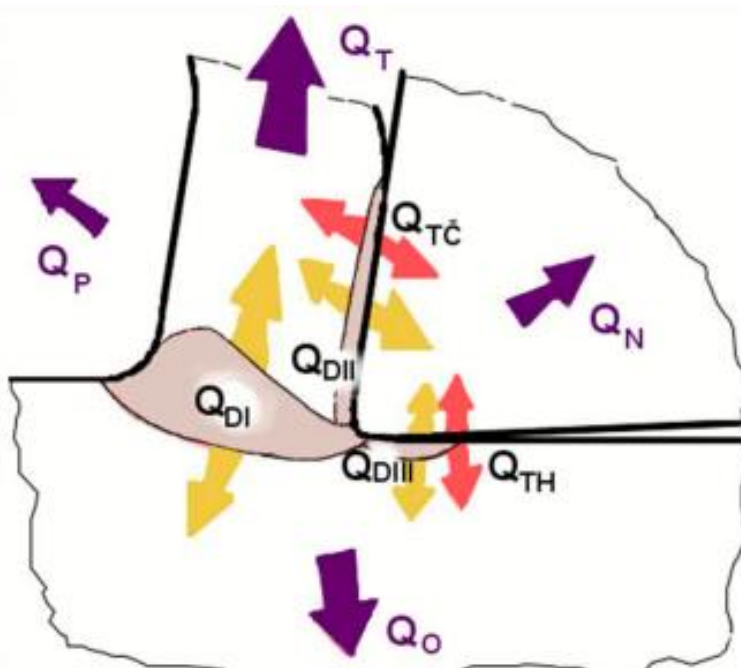
Kladný úhel čela má ostrou řeznou hranu a také menší deformaci třísky během obrábění. Řezná síla a tím i potřeba výkonu při obrábění s kladným úkosem je podstatně menší. Pomáhá také dosáhnout lepší obrobitelnosti. Kvůli ubývajícím se hodnotám úhlu břitu se nástroj stává křehčím a životnost nástroje se snižuje. Jakékoli rázové zatížení během obrábění může způsobit destrukci nástroje. Typická je pro něj kontinuální tvorba třísky. [15]

Záporný úhel čela (negativní):

Na rozdíl od kladného sklonu nabízí záporný sklon velký úhel břitu nástroje, díky kterému je nástroj odolnější při nárazovém zatížení. Odolává také lépe plastické deformaci při vysoké teplotě a díky velkému úhlu břitu, který dokáže absorbovat a zároveň odvádět více tepla z řezu. Nástroj s negativním úhlem čela má delší životnost nástroje. V důsledku velkého úhlu břitu se však smyková deformace třísky zvětšuje a je tedy potřeba vyšší řezná síla. Obvyklé jsou pro tento úhel nespojitě třísky. [15]

3.7 Teplotní zkoumání vlivu na úhel čela (28.01.2023)

Nejdůležitějším parametrem ovlivňující proces řezání a jeho vlivy je teplota. Závisí na ni jak správná volba jak nástroje, tak definice parametrů, při kterých je tento proces možno vykonat. Hraje velkou roli v trvanlivosti nástroje. Ze všech výše zmíněných argumentů lze říci, že teplota nepřímou, ale zásadně ovlivní ekonomickou a výrobní stránku výrobku. Faktem je, že teplo vzniká přeměnou mechanické práce. Při obrábění se 95 až 98 % mechanické práce přemění na teplo. Celkové množství tepla Q určuje rozsah prostupu teploty v materiálu, nástroji v tříске nebo v okolí (Obrázek 10). [16]



Obrázek 10 – Teplotní schéma při obrábění [17]

Vyznačené oblasti: [16]

Q_{DI} = teplota vzniklá v oblasti primárních plastických deformací

Q_{DII} = teplota vzniklá v oblasti sekundárních plastických deformací

Q_{DIII} = teplota vzniklá v oblasti terciálních plastických deformací

Q_{TC} = teplota vzniklá třením třísky na čele nástroje

Q_{TH} = teplota vzniklá třením třísky na hřbetu nástroje

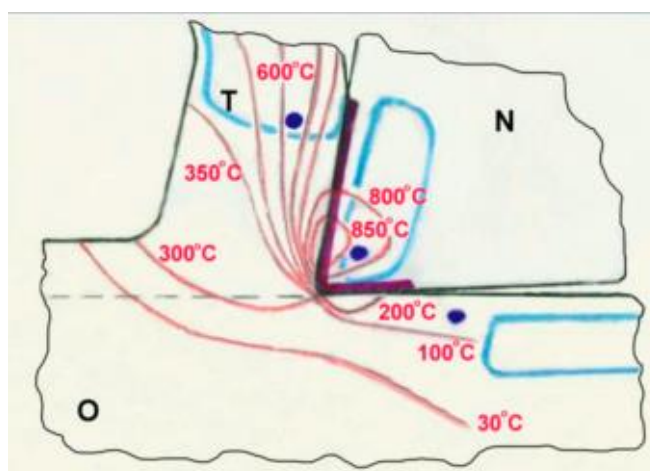
Q_T = teplota odvedená třískou

Q_O = teplota odvedená obrobkem

Q_N = teplota odvedená nástrojem

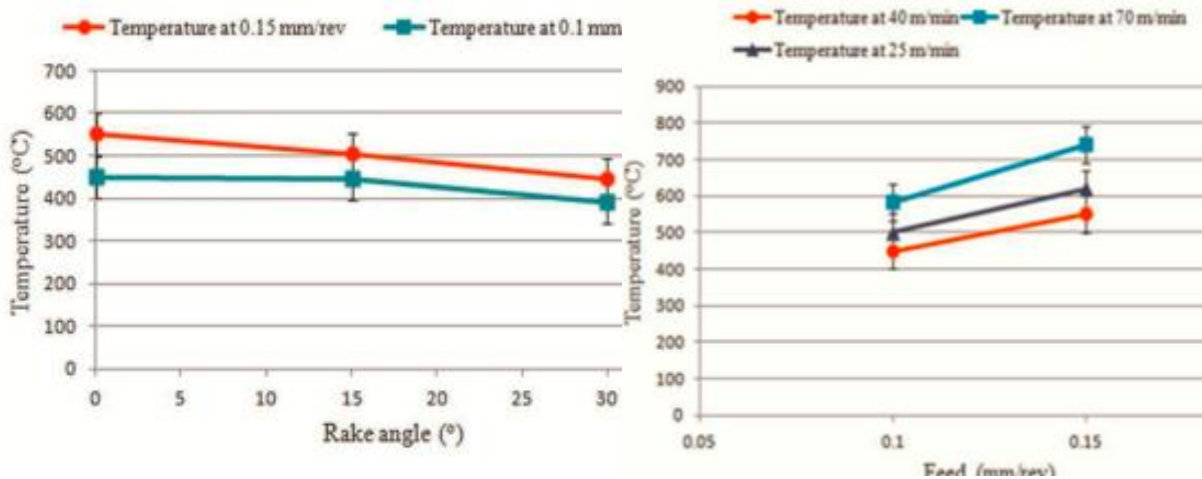
Q_P = teplota odvedená prostředím

Teplota závisí zejména na řezných podmínkách, na vzdálenosti od zdroje tepla a na tepelné vodivosti materiálu – může dosahovat hodnot v rozsahu 300-1200°C. Teplotní pole charakterizuje rozložení teplot v nástroji, obrobku a tříске. Je tvořeno izotermami, tj. křivkami, které spojují místa o stejné teplotě (Obrázek 11). [17]



Obrázek 11 – Teplotní pole na čele soustružnického nože [17]

Pokud úhel čela stoupá v kladném směru, kontakt nástroje a třísky se snižuje. To způsobuje, že se snižuje teplota v oblasti čela nástroje – zmenšení plochy pro tření mezi samotnou třískou a vnikajícím řezným klínem. Rozsah snížení teploty není příliš zřejmý s úhlem čela od 0 do +30 (Graf 8). [18]

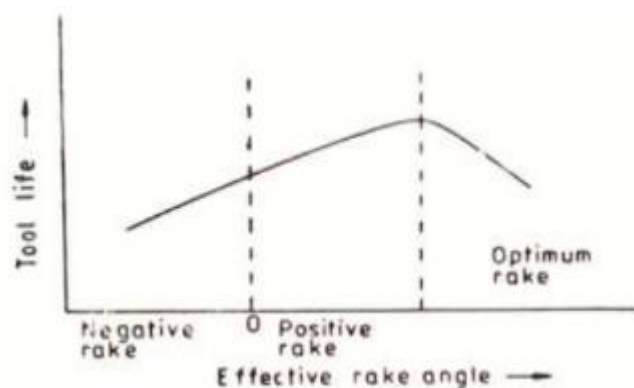


Graf 8 – Závislost teploty na úhlu velikosti čela [18] Graf 7 – Závislost teploty na posuvu nástroje [18]

Veliký a znatelný skok na diferenci teploty bude mít řezná rychlost (Graf 7). Pokud tedy vytvoříme z těchto dvou grafů diskutovatelný závěr, že při nízkých hodnotách posuvu nástroje, řezné rychlosti a dostatečně velkém úhlu čela, po kterém se tříška odvádí, lze dosáhnout nejvhodnější teplotní prostředí pro samotné obrábění. Vše ovšem záleží na způsobu a technologičnosti výroby a na samotné ceně racionalizované výroby. Úhel čela jistě ovlivňuje samotný prostup tepla v systému tříška-čelo, avšak jsou zde důležitější faktory, na kterých záleží více a jejich difference je značně vidět (posuv, řezná rychlost).

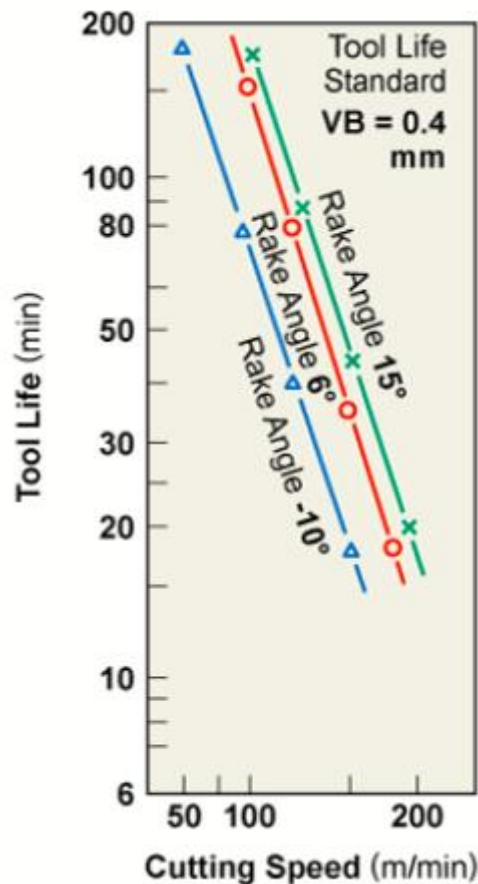
3.8 Životnost nástroje v závislosti na úhlu čela (10.2.2023)

Při obrábění mají úhly nástrojů velký vliv na výkonnost obrábění a životnost nástroje. Zvětšuje-li se úhel čela v kladném směru, je kontakt mezi třískou a záběrovou plochou nástroje menší. To následně snižuje tvorbu tepla a řezných sil, což zvyšuje životnost nástroje. Na druhou stranu je však v případě velkého úhlu čela nástroje břit řezného nástroje oslaben. Záporný úhel čela poskytuje silnější řeznou hranu, a tím i pevnější břit. Zároveň se však maximalizují řezné síly a vzniklé teplo. Pro efektivní životnost nástroje je tedy nutné vyvážit hodnotu mezi těmito dvěma veličinami. Optimální hodnota úhlu čela je -50 až +100 (Graf 9). Dalším úhlem, který ovlivňuje životnost nástroje, je úhel hřbetu. Úhel hřbetu slouží k tomu, aby se minimalizovalo tření mezi obráběným povrchem a nástrojem. Pokud se úhel hřbetu zmenší, může se snížit teplota a opotřebení vznikající na povrchu hřbetu => tím se zvyšuje životnost nástroje. Velmi velký úhel hřbetu však nástroj oslabuje a snižuje jeho životnost.

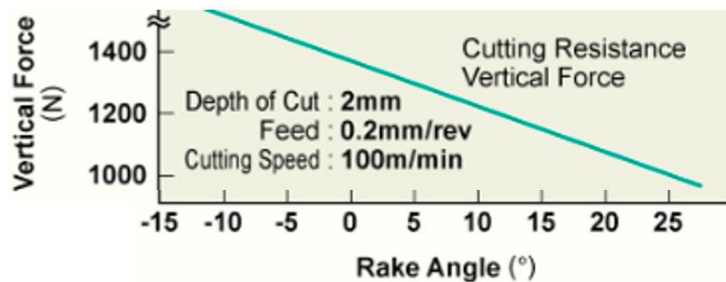


Graf 9 – Předpoklad životnosti na úhel čela [19]

Optimální hodnota úhlu hřbetu se pohybuje od 50 do +80°. [19]



Graf 10 – Zjištění životnosti nástroje na řezné rychlosti [20]



Graf 11 – Závislost hlavní řezné síly na úhel čela [20]

Po provedení samotných experimentů bylo prokázáno, že při zvyšujícím se úhlu čela roste jeho životnost v závislosti na řezné rychlosti (Graf 10) a snižuje se velikost hlavní řezné síly F_c . (Graf 11). Z logického hlediska bylo vše popsáno již výše, že při záporných úhlech čela se sice řezná hrana stává pevnější, ale řezné síly právě díky tomu narůstají a vytváří větší množství tepla, což vede k menší životnosti nástroje (Graf 11).

3.9 Shrnutí současného stavu

Společným znakem všech výše uvedených prací je definovat faktory, které ovlivňují samotný proces obrábění. Hlavním cílem všech prací byla především racionalizace procesu a zjištění všech možných důsledků. Od samotného měření tloušťky odřezávané vrstvy přes působení řezných sil a výkonů, až po konečnou statistickou metodu, která vytvoří na základě naměřených dat rovnici, která zahrnuje všechny identifikované faktory.

3.10 Statistické plánování experimentu

S ohledem na cíl bakalářské práce bude potřeba naplánovat a provést experiment a následně ho také vyhodnotit. Správný návrh, provedení, analýza stavů a vyhodnocení naměřených dat by mělo patřit k základnímu vzdělání studentů technických škol a jejich absolventů. Zanedbání jakéhokoliv kroku může vést ke znehodnocení experimentu, který by měl nevypovídající a zkreslený výsledek. Použití matematické statistiky, a to konkrétně metody, kterou lze zkratkou označit jako DoE neboli Design of Experiment, nám celý experiment pomůže vyhodnotit. Tato metoda nejen práci definuje, ale je charakterizována jako určitý návod, jak správně a efektivně navrhnout experiment tak, aby nedocházelo zbytečně ke ztrátě času a financí. V podstatě lze říci, že v plánovaném experimentu jde o vytvoření takových podmínek, aby rozsah experimentu byl co nejmenší, ale objem i forma naměřených údajů byl co nejkvalitnější. Metoda DoE pracuje s daty, které ovlivňují nahodilosti, které často ani nejsou vnímány. Mezi základní principy metody DoE patří: [21] [22]

- **Replikace** – Opakování měření při stejné nebo kombinaci úrovní faktorů. Díky tomuto lze zvýšit spolehlivost závěru – použití testu adekvátnosti modelu, a dokonce lze i odhadnout nepřesnost měření, které se může vyskytnout.
- **Rozdělení do bloků** – Nutnost zavedení variability do experimentu, které je schopno nalézt další zdroje, které mají poměrně stejné podmínky – musí se odlišit.
- **Znáhodnění** – Experimenty jsou prováděny v náhodném pořadí tak, aby nevznikala systematická chyba vyhodnocení.

V experimentech se používají dva či tříúrovňové experimenty, které mohou být úplné (faktorové) či zkrácené, a to z důvodu minimalizace pokusů provedených v experimentu.

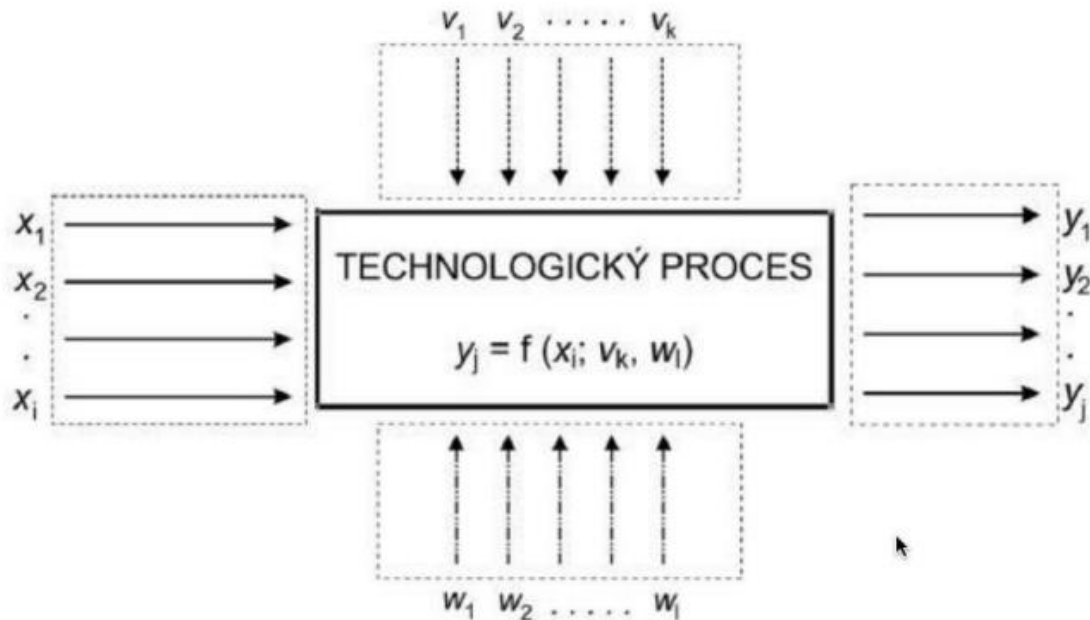
Pokud člověk předpokládá, že vystačí s tzv. „Selským rozumem“, či s „Expertním posouzením“ (které láká i zkušené experimentátory při malém počtu faktorů), pak je velice pravděpodobné či dokonce jisté, že dojde k několika nepříjemným skutečnostem: [21]

- Pokud se špatně vyberou body a nesprávně se zvolí statistické nevýznamnosti faktorů, pak to vede k sestavení špatnému matematického modelu, který není relevantní
- Návrh obsahuje přebytečné informace (za dobrým účelem, avšak nejsou implementovány důležité, potřebné informace)
- Metoda „pokus-omyl“ jen ve velice ojedinělých případech přináší užitečnou informaci
- Metoda změny jednoho faktoru směřuje k příliš velkému počtu pokusů, které nejsou potřebné => cílem je stanovit tolik pokusů, aby byl výsledek vypovídající, a přitom netrval zbytečně dlouho dobu, která by mohla být zapříčiněna nestřídáním faktorů.

Plánovaný experiment (DoE) je takový návod, jak současně měnit faktory takových úrovníh najednou pro získání maximálního počtu potřebných informací, které by byli vhodné pro stavbu modelu, který popisuje zkoumaný proces jako celek. [5] [22]

Velké množství faktorů, které působí na soustružnický proces se definují rozdílně a odlišují se od sebe takovými vlastnostmi, které jsou vidět na (Obrázek 12). Na výstupu jsou pozorovány faktory, které se mohou řadit mezi kontrolované, náhodné či konstantní.

Kontrolované faktory lze rozlišit od ostatních v tom, že je dokážeme ovlivnit a aktivně měnit – např. řezné podmínky, posuv. Díky tomuto procesu získáme určitý výsledek, který je označován jako závislá proměnná. Cíl metody DoE spočívá v určení takové kombinace faktorů, vlivů a počtu „užitečných“ pokusů tak, aby odezva byla co nejpřesnější a nedocházelo ke zbytečným, nechtěným odchylkám. [5] [23] [24]



Obrázek 12 – Schéma experimentu DoE [32]

Kde si musíme definovat výše zmíněné symboly: [5]

- X_1, X_2, X_3 jsou kontrolované faktory
- V_1, V_2, V_3 jsou konstantní faktory (nekontrolované)
- W_1, W_2, W_3 jsou náhodné faktory (způsobují šum)
- Y_1, Y_2, Y_3 jsou závislé proměnné (odezvy systému)

3.11 Statické navrhování experimentu

Data, která nesou určitou vypovídající, správnou informaci o procesu jsou základním prvkem pro matematickou statistiku. Jak sbírat a zpracovávat tyto data, se právě věnuje DoE, které má dvě části, které se skládají z vlastního plánu provedení experimentu a statistického vyhodnocení tohoto plánu. Existují dva principy, z kterých vlastní plán vychází. Je to *replikace* (opakovatelnost) a *randomizace* (nahodilost). Replikace je opakování měření při stejné nebo kombinaci úrovní faktorů. Díky tomuto lze zvýšit spolehlivost závěru – použití testu adekvátnosti modelu, a dokonce lze i odhadnout nepřesnost měření, které se může vyskytnout. Docílíme tím přesnějšího odhadů důsledků faktorů, které v procesu pozorujeme. Druhým principem je randomizace. Je to základní kámen, protože přímo na ni jsou stavěny metody, díky kterým se vyhodnocují data. Randomizace zaručuje, že provedení všech jednotlivých měření bude náhodné, jelikož se data nebudou řadit dle předem určitých seznamů. [23] [24]

Analýzou výsledků se dojde k závěrům, ze kterých vystupují vlivy jednotlivých faktorů a interakcí mezi nimi. Cílem je nalézt statisticky významné faktory, které mají vliv na sledovaný proces. Pro ověření, zda-li se jedná o významné faktory, tak se používá řada nástrojů, které tuto

problematiku pomáhají odhalit (t-test, F-test, analýzy rozptylu atd.). Vyhodnocení je u konce právě tehdy, pokud se poodhalí vlivy zkoumaných faktorů na veličiny či nikoliv. [23] [24]

Experiment se provádí vždy popořadě, v předem stanovených krocích, které nesmíme prohodit. Experiment tedy lze rozdělit na tyto kroky: [5] [23]

- analýza procesu
- návrh experimentu
- provedení zkoušek ve stanoveném pořadí
- analýza výsledků
- závěr

Nejprve se uskuteční analýza procesu, kde je stanovena odezva a faktory, které pro experiment jsou důležité. Potom následuje vlastní návrh experimentu. Je potřeba řešit otázku kompromisu mezi naměřenými výsledky a časovou náročností, a to hlavně z důvodu ekonomické náročnosti, která hraje zásadní roli v technologických procesech. Následuje měření, které se uskuteční v předem daném pořadí. Pomocí softwaru se zpracují hodnoty do připravených formulářů, které budou složité k celkovému vyhodnocení. Na řadu se dostává vyhodnocení experimentu, které poukáže výsledek vlivu jednotlivých faktorů a interakcí těchto faktorů. Závěrem se stanoví, které faktory či interakce jsou důležité na odezvu procesu nebo ty, které můžeme zanedbat, jelikož mají nevypovídající hodnotu. [5] [23]

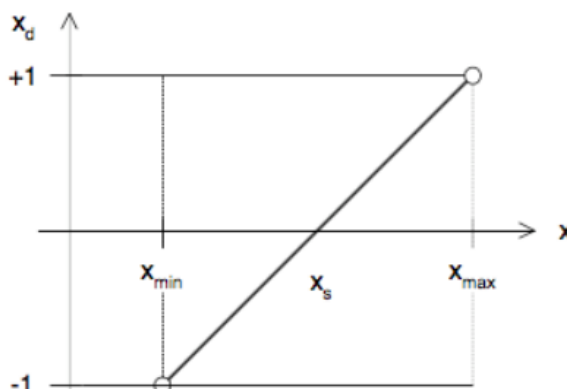
3.11.1 Kódování podle DoE normování

Lineární transformace hodnot $\langle x_{min}, x_{max} \rangle$ do intervalu $\langle -1; 1 \rangle$ vychází ze (vztah 14), který tuto transformaci popisuje. [21]

$$x_d(i) = \frac{x(i) - \frac{x_{max} - x_{min}}{2}}{\frac{x_{max} - x_{min}}{2}} \quad (14)$$

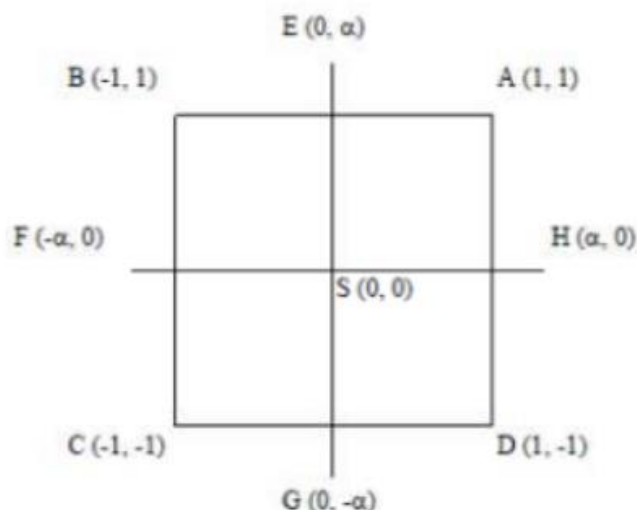
Kde si musíme definovat výše zmíněné symboly: [21]

- $x(i)$ - původní základní proměnné, $i = 1 \dots k$,
k-počet základních faktorů
- $x_d(i)$ -normované proměnné podle metody DoE
- x_{max} -maximální hodnota původní proměnné $x(i)$
- x_{min} -minimální hodnota původní proměnné $x(i)$



Obrázek 13 – Lineární DoE normování [21]

Poté dojde k přepsání samotného plánu experimentu do tzv. „kódovacího měřítka“, kde dojde k samotné transformaci vstupní hodnoty faktoru do dvou úrovní (Obrázek 13). Interval $<-1;1>$ definuje omezení dolní i spodní hranice, tedy úrovně. Rozvržení bodů v tomto kódovacím měřítku centrálního kompozitního plánu popisuje právě (Obrázek 14). V tomto obrázku se setkáme s dvěma typy bodů, které označují centrální kompozitní plán. Jsou to body krychlové a hvězdicové. Body A, B, C a D jsou krychlovými body a body E, F, G a H jsou hvězdicové. Centrální bod je označen písmenem S, který i v mnoha jiných technických odvětvích značí střed jisté věci či problematiky. Součtem těchto bodů se docílí zisku celkového počtu bodů centrálního kompozitního plánu. [24] [25]



Obrázek 14 – Body rozvržené v centrálním kompozitním plánu [33]

3.11.2 Nástroje sloužící k vyhodnocení samotného experimentu

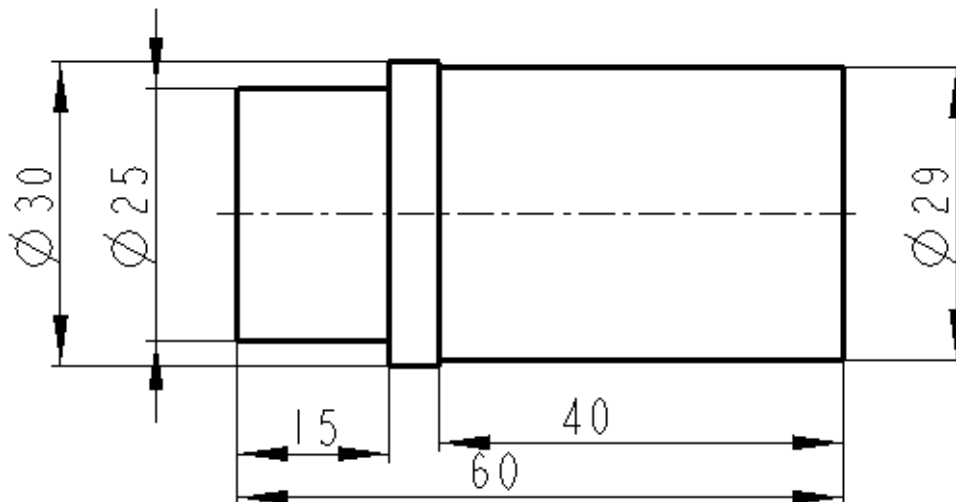
Metody statistického posuzování slouží k vyhodnocení experimentů a stanovují směrodatné výsledky. Jedná se o nástroje, díky kterým dochází k odhalení faktorů, které mají důležitý vliv na zkoumaný proces. Nástroj, který má důležité postavení ve fázi řešení, je testování hypotéz. Má podmínku, že musí být bezpodmínečně splněny normality dat sledovaných veličin. Dalšími nástroji pro statistické vyhodnocení může být např. Fischerův test, Studentův t-test, Durbin-Watsonův test či Shapiro-Wilkův test normality. Každý z těchto nástrojů bude blíže představen a ve stručnosti bude řečeno, v čem daný nástroj napomáhá při řešení jednotlivých faktorů a jejich vzájemných interakcí. Fisherův t-test se používá při srovnání dvou přesností, kdy data nebyla měřena na jednom zařízení. Studentův t-test je nejstarším statistickým testem a slouží ke stanovení případné schody mezi vybranou veličinou a známou zadanou hodnotou. Udává míru pravděpodobnosti, zda-li se hodnoty shodují či nikoliv. Durbin-Watsonův test se používá pro stanovení autokorelace, tedy porušení Gauss-Markova požadavku na odhad regresních parametrů pomocí metody nejmenších čtverců. Shapiro-Wilkův test normality sleduje data pohybující se kolem střední hodnoty, jež mohou ovlivnit náhodné chyby. V posledních dvou zmiňujících metodách se dostáváme do opravdu vysoké matematické statistiky. Pro mnoho z těchto testů jsou vytvořeny softwary, které nám napomáhají s řešením. [5] [24] [25]

4. Příprava experimentu

Cílem měření bylo zjištění velikosti úhlu čela na měrném řezném odporu materiálu, tedy v jaký závislosti se tyto dvě veličiny nacházejí. Ve výsledku je cílem porovnat námi naměřené výsledky se (vztah 1), který popisuje tuto problematiku a najít případné difference v tomto vzorci. Z důvodu, že úhel čela byl po dobu experimentu měněn, tak bylo nutno upravit destičky pomocí brusného zařízení (ANCA MX7). Z důvodu technologie broušení bylo nutné i vytvořit jiné uložení destičky. Stanovení podmínek a vyhodnocení experimentu vykonávalo DoE, které jakožto statistická metoda definuje správný návrh a samotný průběh experimentu. Pro každou číselnou hodnotu úhlu čela bylo vyhotoveno 6 měření, díky kterým se docílí větší variability a přesnosti naměřených výsledků.

4.1 Materiál obrobku

Jako materiál obrobku byla zvolena ocel ČSN 15 142.6 / 42CrMo54 / 1.7725, která má pevnost v tahu R_m od 740 do 890 MPa. DoE nám stanovilo, jaký nejmenší počet jednotlivých úběrů musí být provedeno, abychom docílili relevantních výsledků. Byl tedy zvolen polotovár, na kterém bude experiment uskutečněn (Obrázek 15). Osazení $\varnothing 25$ v délce 15 mm bylo vyhotoveno a upnuto pomocí kleštiny, kterou stroj Emco E25 disponuje.



Obrázek 15 – Rozměry dílu potřebného k experimentu

Bylo nutno předběžně stanovit, kolik materiálu by bylo vhodné na tento experiment připravit. Dle (Obrázek 15) se z tyče $\varnothing 30$ (resp. $\varnothing 29$) muselo vytvořit tolik podélných řezů v délce $l=40$ mm, aby se obsáhl celý plán experimentu. Tedy každé měření úhlů čela probíhalo 6 podélnými řezy (tedy až na $\varnothing 17$). Takto proběhlo celé měření všech 5 variabilních úhlů čela. Tím bylo dosaženo celkem 30 řezů, které se vyhodnocovali. Ovšem díky DoE byl vytvořen plán experimentu, který obsahuje kombinaci úhlů čela a posuvů. DoE stanovila, že musí být vyhotoveno 10 měření při různých řezných podmínkách. Bylo tedy nakonec potřeba 60 řezů (plán experimentu bude uveden v další kapitole). Ke stanovení potřebné délky tyče byl použit MS Excel, kde byly zadány požadované hodnoty, parametry a pomocí jednoduchého (vztah 15) bylo stanoveno množství potřebného materiálu:

$$\left(\left(\frac{POKUSY}{POČET\ TŘÍSEK} \right) \cdot DÉLKA\ POLOTOVU \right) + \left(\left(\frac{POKUSY}{POČET\ TŘÍSEK} \right) \cdot PROŘEZ \right) \quad (15)$$

4.2 Strojní vybavení pro realizaci experimentu

4.2.1 Obráběcí stroj

Experiment byl proveden na stroji Emco E25, který vlastní katedra obrábění (Obrázek 16). Jedná se o horizontální NC soustruh. Tento soustruh není vhodný díky svým rozměrům a parametrům pro velké obrobky, ale pro menší obrobky je vhodný (viz tabulka níže). Obsahuje hlavní vřeteno a protivřeteno. Stroj obsahuje revolverový zásobník nástrojů, který má 12 nástrojových pozic. Nejčastější řídicí systém je Sinumerik 840D, ale je i možnost použití i ŘS Fanuc. Další parametry jsou uvedeny v (Tabulka 1). [26]

Tabulka 1 – Parametry obráběcího stroje Emco E 25 [27]

| | |
|---------------------------|-------------------|
| Maximální průměr obrábění | 100 mm |
| Vzdálenost mezi vřeteny | 400 mm |
| Průchod vřetena | 25,5 mm |
| Otáčky hlavního vřetene | 6300 ot/min |
| Oběžný průměr nad ložem | 250 mm |
| Výkon pohonu | 5,5 kW |
| Maximální točivý moment | 35 Nm |
| Rozměry (DxŠxV) | 1700x1270x1820 mm |

Katedra technologie obrábění vlastní dynamometr, který dokáže zaznamenat síly vznikající v procesu obrábění a ke stroji ho lze jednoduše připojit. Na tomto stroji v minulosti proběhly podobné experimenty, proto lze konstatovat, že bude svými parametry vhodný i pro toto experimentální měření.[26]



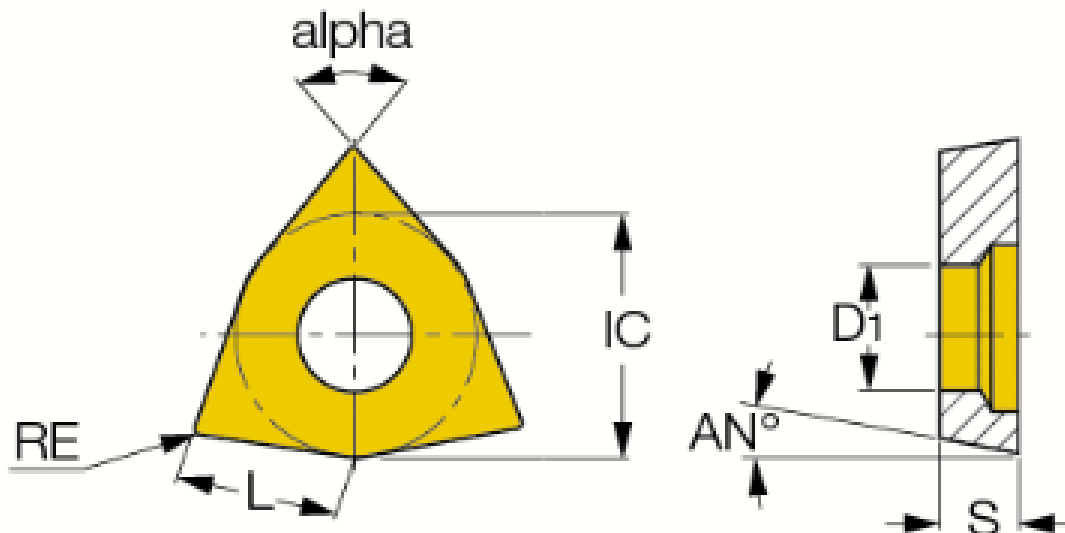
Obrázek 16 – Obráběcí stroj Emco E25 [27]

4.2.2 Obráběcí nástroj

Řezná destička:

K experimentu byla použita břitová destička WPEB060404N08 IC908, jejíž geometrický tvar je vidět na (Obrázek 17). Tato destička má úhel čela 0° . Úhel čela břitové destičky má vliv na velikost měrného řezného odporu nástroje, ale i na odchod odebrané třísky z místa řezu. Břitové destičky s nulovým úhlem čela se obvykle pro běžné obrábění nepoužívají, tudíž je v destičkách s nulovým úhlem čela velmi omezený výběr.

Cílem experimentu bylo vytvořit variabilitu v nastavení úhlu čela. Jednou z možností, jak mírně měnit nastavení úhlu čela, je přenastavení destičky v ose Y. Tato možnost je vhodná pouze pro malé rozsahy hodnot úhlu čela – při dosažení větších úhlů čela by došlo i k interakci hřbetu destičky, což pro následné vyhodnocení experimentu není žádoucí. Druhou možnou variantou bylo nabroušení břitové destičky na požadované úhly. Bylo nutno vytvořit přípravek pro broušení, který by zajistil ustavení VBD (vyměnitelná břitová destička). Nové nastavení VBD zajistilo snazší dosažení požadovaných úhlů čela. Byla zakoupena destička typu W (trigon) s úhlem sklonu hřbetu 8° a zaoblením RE 0,4.



Obrázek 17 – Vyměnitelná břitová destička (VBD) [28]

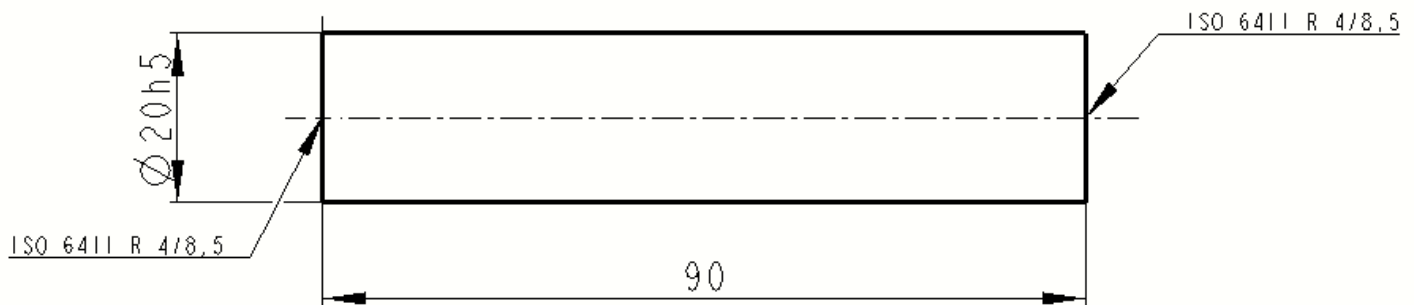
Velikosti jednotlivých kót (Obrázek 17) jsou uvedeny v (Tabulka 2).

Tabulka 2 – Velikosti jednotlivých kót [28]

| Hodnoty jednotlivých kót VBD [mm] | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|------|-----|
| L | RE | S | IC | D1 | AN |
| 6.00 | 0.40 | 4.00 | 9.52 | 3.70 | 8.0 |

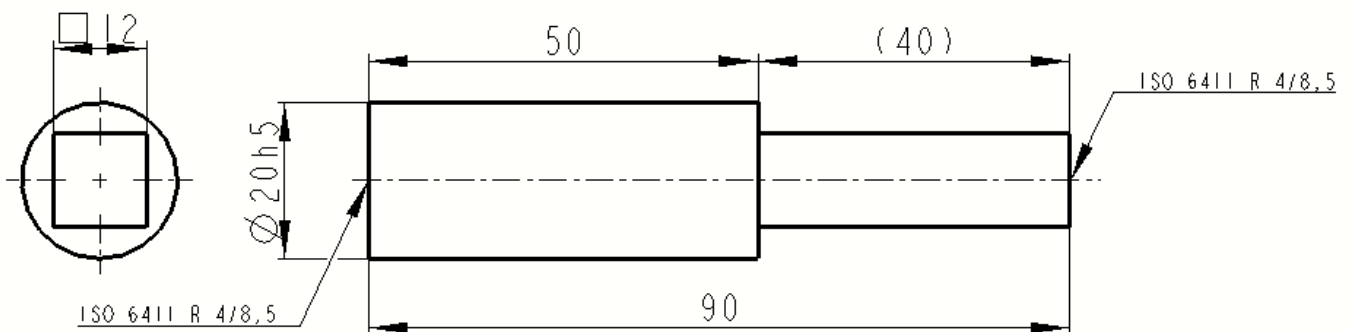
Přípravek pro broušení:

Základní myšlenkou celého experimentu bylo, jakým způsobem lze dosáhnout větších rozsahů úhlů čela. Bylo tedy ustanoveno, že by se VBD měli brousit. Tím ale vznikla otázka, jak VBD brousit. Bylo tedy nutno vytvořit přípravek pro broušení. Bylo stanoveno, že přípravek, který bude dlouhý $l = 90$ mm, bude vyhovující. Na pásové pile byl uříznut polotovar z materiálu 15 260 který je vidět na (Obrázek 18).



Obrázek 18 – Broušený polotovar na přípravek

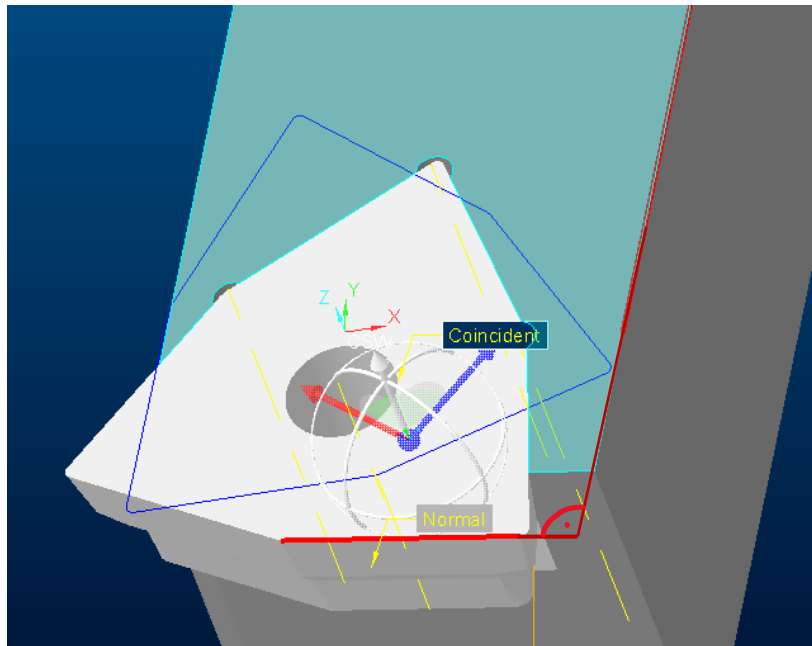
Kvůli tomu, že přípravek na broušení břitových destiček musel být přesně ustanoven do brousícího stroje ANCA MX7, tak bylo nutno mít velice přesně vyrobenou upínací část, která musela být přebroušena. Výroba probíhala na univerzálním hrotovém soustruhu a k dosažení tak vysoké přesnosti ($\varnothing 20h5$) musely být vytvořeny středící důlky. Tolerovaný průměr musel být ještě přebroušen na požadovanou přesnost. Středící důlky nijak nekomplikovaly další průběh experimentu, proto je nebylo nutné nechat odstranit.



Obrázek 19 – Hrubý návrh držáku pro broušení

Čtvercový průřez na (Obrázek 19) byl udělán pro to, že VBD se lépe na tuto plochu upíná a design přípravku pro broušení vypadá lépe než s kruhovým průřezem.

Z důvodu, že se muselo čelo břitové destičky brousit, aby se dosáhlo požadovaných úhlů potřebných pro experiment, tak bylo nutno držák upravit. Držák (swapl_1212-06) byl stažen ze stránek společnosti Iscar a bylo nutno jej upravit v SW (software) Creo (dříve Pro/Engineer). Břitová destička musela být nastavena tak, aby hlavní ostří nástroje bylo kolmé na osu (červené označení v Obrázek 20) a to především proto, aby při broušení docházelo k snazší korekci broušených úhlů čela a jejich následnému změření. Původní uložení břitové destičky je na tomtéž obrázku (modré označení). Díky těmto parametrům by původní lůžko nebylo vhodné pro snadné ustavení nově nepolohované břitové destičky. Muselo být vytvořeno nové lůžko, které zajistí potřebnou polohu.



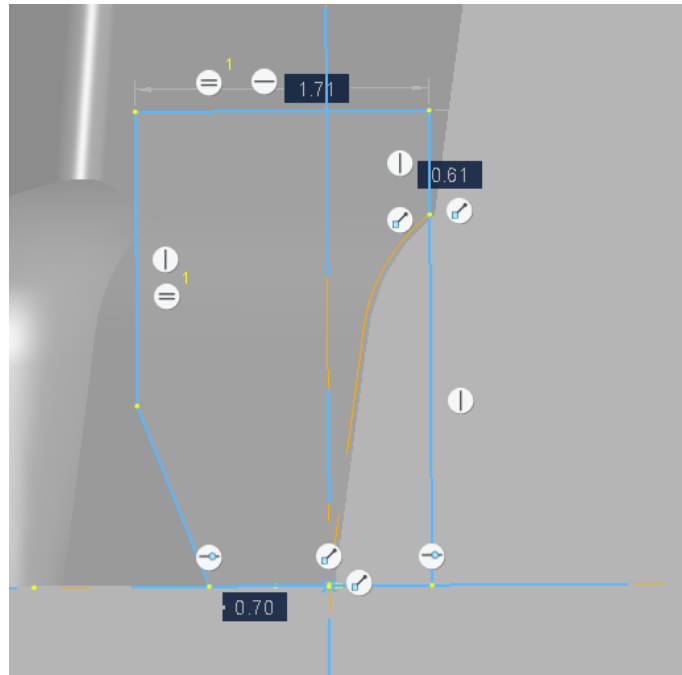
Obrázek 20 – Správné ustavení břitové destičky

Při stanovení těchto podmínek výše se musel nejdříve původní držák musel editovat – tzn. staré lůžko se muselo být „zaplněno“ objemem hmoty a následně pomocí funkcí, které nabývá SW Creo byl „vtisknut“ tvar již natočené destičky, která vytvořila celý nový tvar lůžka (Obrázek 21). Břitová destička má složitý tvar, proto byl tento tvar dále upraven tak, aby dosedací plochy, které jsou pod úhlem 8° (zobrazeny v Obrázek 17 pod pojmem AN°), držely přesně definovaný tvar destičky a její polohu. Plochy, které nejsou dosedací, byly považovány za nefunkční, a proto z tohoto důvodu došlo k jejich úpravě – odlehčení.



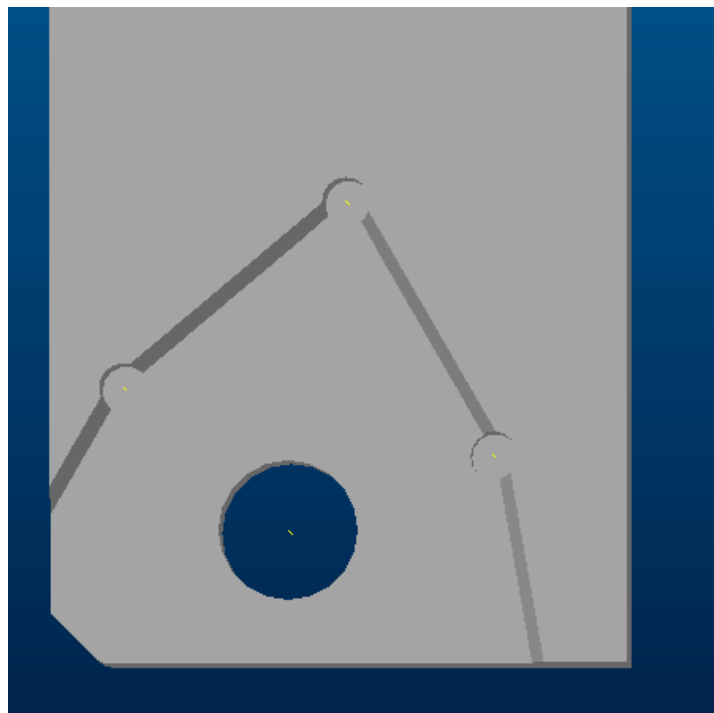
Obrázek 21 – Tvar lůžka pro břitovou destičku

Úprava spočívala tom, aby se nefunkční plochy daly obrobit co nejsnadněji. Úprava je vidět na (viz Obrázek 22). Tento nepotřebný materiál se odstranil pomocí funkce v SW Creo (fce. Sweep).



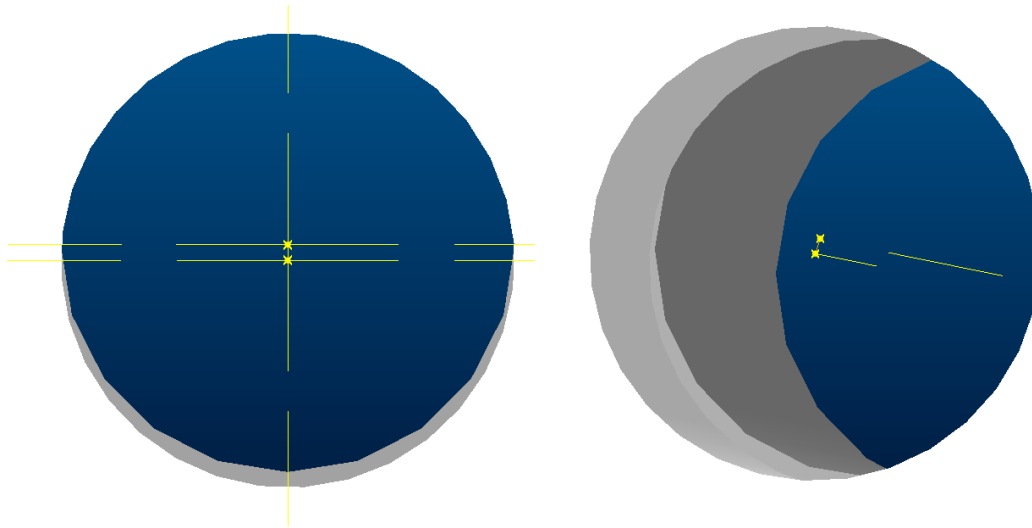
Obrázek 22 – Technologické odstranění nepotřebného materiálu

Následně musely být vyřešeny „ostré hrany“, které by bylo obtížné či téměř nemožné obrobit. Proto bylo nutné v koutech lůžka vymodelovat díry, které slouží jako odlehčení a zajistí vyrobiteľnost. Byly proto vymodelovány 3 díry o $\varnothing 1$ mm, které byly ustaveny v nárýsu tak, aby jejich poloha zajistila bezpečné odebrání materiálu (Obrázek 23).



Obrázek 23 – Vyvrtané díry k zajištění technologičnosti výroby

K uchycení břitové destičky byl využit systém uchycení typu S(P), tedy šroubem. K velice důležitému poznatku patří to, že závitová díra držáku musí být vyosená o 0,1mm do směru do lůžka břitové destičky (Obrázek 24). Tím se zajistí potřebný přítlak a destička se tzn. „vtahuje do držáku“. Zároveň z hlediska výroby bylo posouzeno za nejlepší řešení, když se závit udělá průchozí.



Obrázek 24 – Vyosená díra držáku vůči břitové destičce pro uchycení šroubem

Výroba držáku proběhla na stroji DMG Mori DMU 40 eVo linear (Obrázek 25), který je umístěn v laboratořích RTI (Regionální Technologický Institut). Pokud jsme vybaveni 3D modelem součásti, lze využít bezvýkresovou dokumentaci, kde se pomocí CAM (computer aided manufacturing) systému vytvoří program, který se následně nahrál do obráběcího stroje, kde byl držák vyroben.



Obrázek 25 – DMG Mori DMU 40 eVo linear [36]

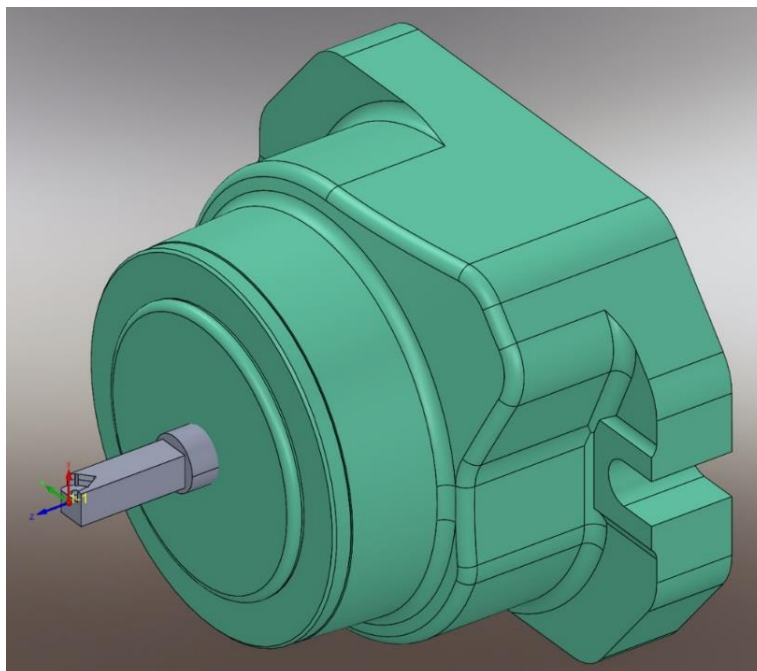
Při výrobě držáku byl použit kleštinový upínač Manok od společnosti Heinbuch, (Obrázek 26). Vyniká nejen svojí univerzálností, ale má řadu dalších aspektů proč je oblíbený. I přes svoji velikost dokáže vyvinout velkou upínací sílu, navíc kleština je vtahována do upínače, čímž je vtahován i obráběný díl. Upnutí je tak odolné vůči „povytažení“ dílu z upínače. Upínačem se dosahuje vysoké přesnosti a tuhosti výroby. Pro svůj tvar a velikost je ideální pro 5-osé obrábění.



Obrázek 26 – kleštinový upínač Heinbuch Manok s kleštinou [34]

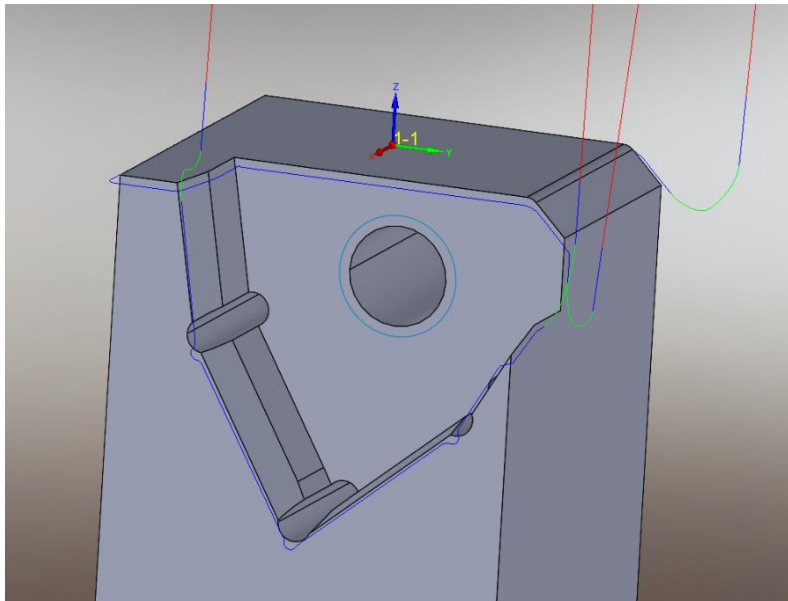
Nevýhody upínače: vysoká cena a komplikovaná výroba kleštin (často je nutné dutinu vyrábět pomocí technologie drátového řezání), upínání pouze přesných tvarů (požadavek na kruhovitost a rozměr polotovaru ± 1 mm).

Pro ustavení polotovaru do držáku (Obrázek 27) bylo nutné jeho upínací část přebrousit na $\text{Ø}20\text{h}5$, jak bylo již bylo popsáno dříve, kdy pro kleštinu by byla vhodná i výrazně menší přesnost upínací části.



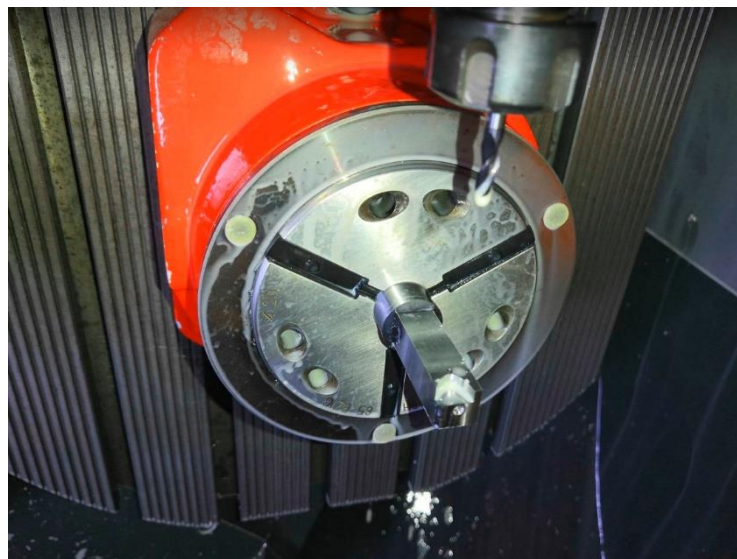
Obrázek 27 – Ustavení držáku v upínači Heinbuch Manok

Sražení hran proběhlo pomocí operace, která je schopna indikovat „ostré hrany“ a sráží je kulovou frézou $\varnothing 1$ (Obrázek 28).



Obrázek 28 – Indikování a srážení ostrých hran

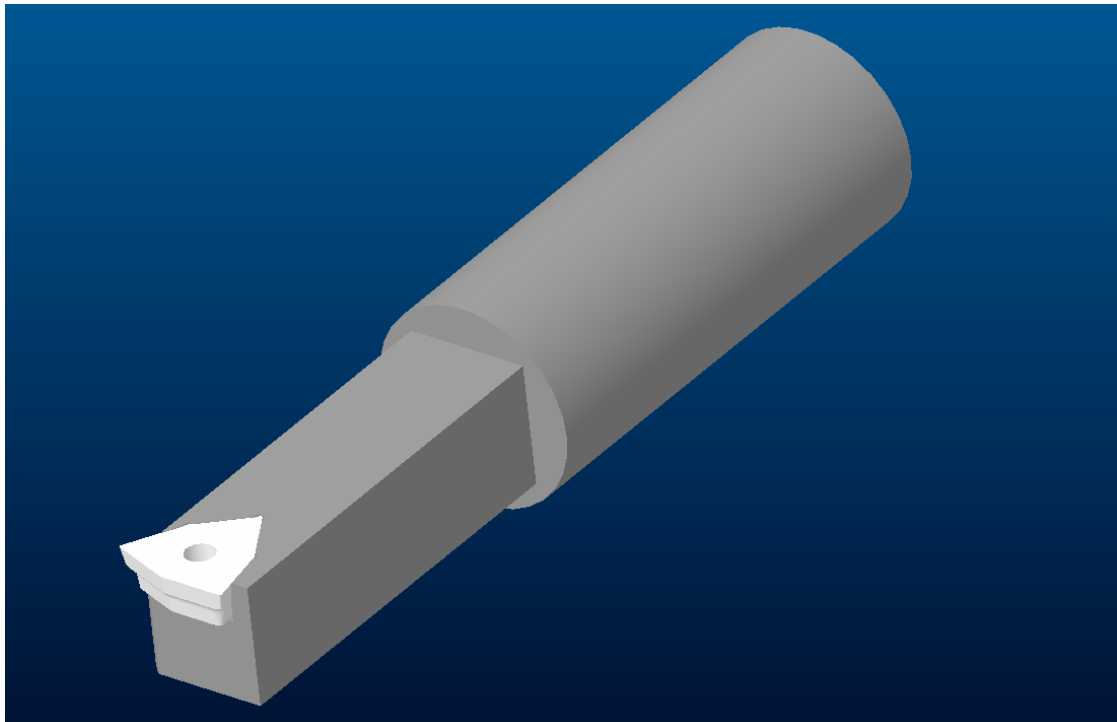
Byl vytvořen NC kód, který byl následně nahrán do ŘS stroje pomocí přenosného média (flash disk) Přípravek byl obroběn pomocí vhodných nástrojů, které jsou pro jeho vytvoření důležité. Před přenesením programu do stroje proběhla simulace v CAM systému. Ovšem záleží na přesné poloze upínače ve stroji. Namodelovaný a skutečný upínač si nemusí navzájem odpovídat polohou. Tento problém byl i při naší tvorby držáku.



Obrázek 29 – Vyrobený držák ve stroji DMG Mori

Při obrábění hrozilo nebezpečí kolize (stroj má integrovanou kontrolu kolizí.), způsobené nesprávným umístěním držáku. Heidenhain iTNC530 má bezpečnostní zóny 20 mm před možnou kolizí, kam již stroj nepustí. Nebezpečí kolize bylo zamezeno výměnou držáku nástroje za delší. Fréza byla prodloužená nástavcem tak, aby nedošlo k případné kolizi. Po vyřešení

tohoto problému byl proces obrábění držáku již bezproblémový a byl řádně dokončen (Obrázek 29). Na (Obrázek 30) je viděn dokončený přípravek pro broušení břitových destiček.



Obrázek 30 – Přípravek pro broušení

4.2.3 Soustružnický nůž

Nabroušené břitové destičky byly dány do univerzálního držáku, který má úhel 90° . Tento držák se používá výhradně pro měření řezných odporů materiálu.

4.3 Úprava destičky:

Pro experiment bylo zásadní mít variabilní velikosti úhlů čela, proto byla destička následně přebroušena na stroji ANCA MX7 (Obrázek 31). Upínací přípravek pro broušení destičky byl navržen na základě požadavků a připomínek pracovníků zodpovědných za broušení nástrojů, především s ohledem na jednoduché a spolehlivé upnutí a seřízení v nástrojařské brusce.



Obrázek 31 – ANCA MX7 [35]

Ustavení nože do stroje je zobrazeno na (Obrázek 32), kde je rovněž vidět pohled do pracovního prostoru stroje.



Obrázek 32 – Upnutí držáku ve stroji ANCA MX7

Při spuštění procesu je důležité zajistit dostatečný přívod minerálního oleje mezi diamantový kotouč a břitové destičky (Obrázek 33). Při nedodržení tohoto postupu by mohlo docházet k dosažení velkého tepelnému ovlivnění broušené oblasti, která by mohla znehodnotit materiál VBD.



Obrázek 33 – Proces broušení

Ke změření úhlů čela se využil stroj od společnosti Zoller, konkrétně zařízení Zoller G3, který slouží k měření geometrie nástrojů. K vyšší přesnosti odečtu je lepší, když na měřený subjekt je svíceno (je lépe viditelná geometrie) a tím se dosáhne relevantnějších výsledků a sníží se možná chybovost odečtu (Obrázek 34).



Obrázek 34 – Měření s nasvícením na stroji Zollner G3

Na následujícím obrázku je zachyceno rozhraní, kde jsou výsledky zobrazeny uživateli, pro následné využití ve výrobě nebo v průběhu experimentu (Obrázek 35).



Obrázek 35 – Uživatelské prostředí stroje Zollner G3

Na destičkách byly nabroušeny všechny tři řezné hrany. Dle návrhu experimentu bylo nutno vytvořit destičky s úhly $+10^\circ$, -10° , $\pm 7^\circ$ a 0° , tedy neupravené destičky (Obrázek 36).



Obrázek 36 – Nabroušené břitové destičky

4.3.1 Dynamometr KISTLER 9119AA2:

Jedná se o tříosý siloměr pro obrábění (Obrázek 37). Jeho přednost spočívá v tom, že disponuje malými rozměry, což umožňuje jeho použití v soustruhu EMCO E25. K tomu, abychom mohli měřitelné veličiny zaznamenat, je nutno spolu s tímto dynamometrem mít také nábojový zesilovač, který dokáže přenést informaci z prostředí SNOP do SW, konkrétně do SW Dynoware.

Je schopen zaznamenávat síly ve 3-osém kartézském souřadnicovém systému, tedy ve směrech x, y, z. Velikosti měření v jednotlivých osách jsou: F_x 2kN; F_y 3kN; F_z 2 kN.[29]



Obrázek 37 – dynamometr KISTLER 9119AA2 [29]

5. Realizace experimentu

5.1 Preexperiment

Preexperiment sloužil k ověření všech předpokladů v reálném procesu obrábění a měření. Tyto předpoklady byly definované již v předchozích kapitolách. Byl proveden v prostorách katedry, kam bylo nově EMCO E25 přestěhováno (Obrázek 38).



Obrázek 38 – Pracoviště provedení preexperimentu/experimentu

Preexperiment byl proveden na základě navrženého statistického modelu. Pro správné vyhodnocení statistického modelu je nutné zachovat všechny proměnné, které nejsou součástí zkoumaného vlivu, nastavit na konstantní hodnotu. Variabilní, tudíž veličiny, které nezůstaly konstantní, tedy otáčkový posuv f a úhel čela γ , jsou měněny dle plánu experimentu. Plán zahrnuje 10 měření a každé z nich je pro dodržení variability výsledků důležité zopakovat 6x. To znamená, že bylo nutno tedy provést celkem 60 řezů. Tento plán znázorňuje (Tabulka 3), kde jsou na základě statistiky navrhnuté takové hodnoty, aby se zajistily co nejpřesnější výsledky s minimální přípustnou chybovostí. Při provádění experimentu je důležité zajistit také náhodnost měření. To znamená, že nepostupujeme popořadě, nýbrž jsou jednotlivé experimenty prováděné v náhodném pořadí, tedy např. 1,3,8 atd. To zabrání ovlivnění dat systematickou chybou, jako je například postupně narůstající opotřebení VBD nebo postupná změna průměru obrobku po odebrání jednotlivých vrstev.

Tabulka 3 – Plán experimentu

| Číslo pokusu | f – otáčkový posuv [mm/ot] | γ – úhel čela [°] |
|--------------|----------------------------|--------------------------|
| 1 | 0,087 | -7 |
| 2 | 0,087 | 7 |
| 3 | 0,263 | -7 |
| 4 | 0,263 | 7 |
| 5 | 0,050 | 0 |
| 6 | 0,300 | 0 |
| 7 | 0,175 | -10 |
| 8 | 0,175 | 10 |
| 9 | 0,175 | 0 |
| 10 | 0,175 | 0 |

Na začátku experimentu bylo nutno stanovit hodnoty konstant, které se průběhem experimentu nebudou měnit. Byla to především řezná rychlost v_c , která byla stanovena na 200 m/min a hloubka řezu a_p , která byla stanovena na 1 mm. Tyto dva parametry zůstanou konstantní po celou dobu měření experimentu. Při nedodržení těchto konstant by vyhodnocení experimentu ztratilo smysl a bylo by irelevantní.

Při zahájení měření experimentu jsme začli úhlem čela, který odpovídal 0° . V tomto případě nebyl jediný problém. Břit břitové destičky se nezměnil a choval se tak, jak bychom predikovali. Avšak při dalších úhlech čela, které nebyly nulové, docházelo k velkým problémům. Zhruba po dvou podélných řezech v délce $l = 40$ mm došlo k velkému opotřebení řezné hrany a vlivem vysokých teplot došlo k natavení třísky, které vedlo k vytvoření VÝMOLU ČELA. Tyto výmoly jsme zkoumali na mikroskopu. Byly použity pouze hodnoty $+7^\circ$, -7° , které vedly k značným opotřebení dané břitové destičky. Hodnoty $+10^\circ$, -10° po konzultaci, která byla provedena v týmu, nemělo již cenu v preexperimentu pokračovat, jelikož byl predikovaný podobný výsledek. Proto byl preexperiment zastaven, byly stanoveny podmínky a nápravy řešení, čemu se vyhnout při další pokusu, abych předešli stejnému pochybení.

5.1.1 Mikroskop KEYENCE VHX-6000

Mikroskop KEYENCE VHX-6000 (Obrázek 39) disponuje objektivem a variabilními zvětšeními, které mohou dosahovat vysokých rozlišení. Výměnný objektiv dokonce poskytne zvětšení až 1000x. Mikroskop umožňuje automatický posuv objektivu a tím se zajistí i automatické ostření měřícího objektu, popřípadě lze získat trojrozměrný obraz, který může sloužit pro ilustraci a pochopení případných vzniklých problémů. [30]

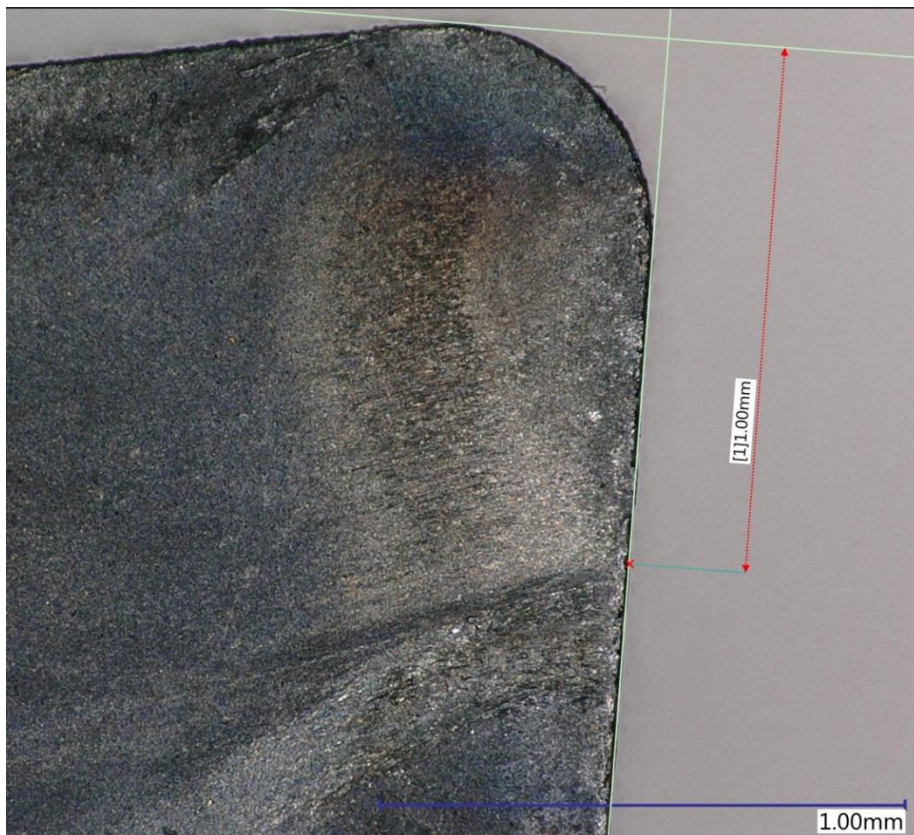
Mikroskop byl použit k ilustraci vytvořených opotřebení na břitové destičce a jejich možné případné komparace.



Obrázek 39 – Mikroskop KEYENCE VHX-6000 [30]

5.1.2 Opotřebení břitových destiček

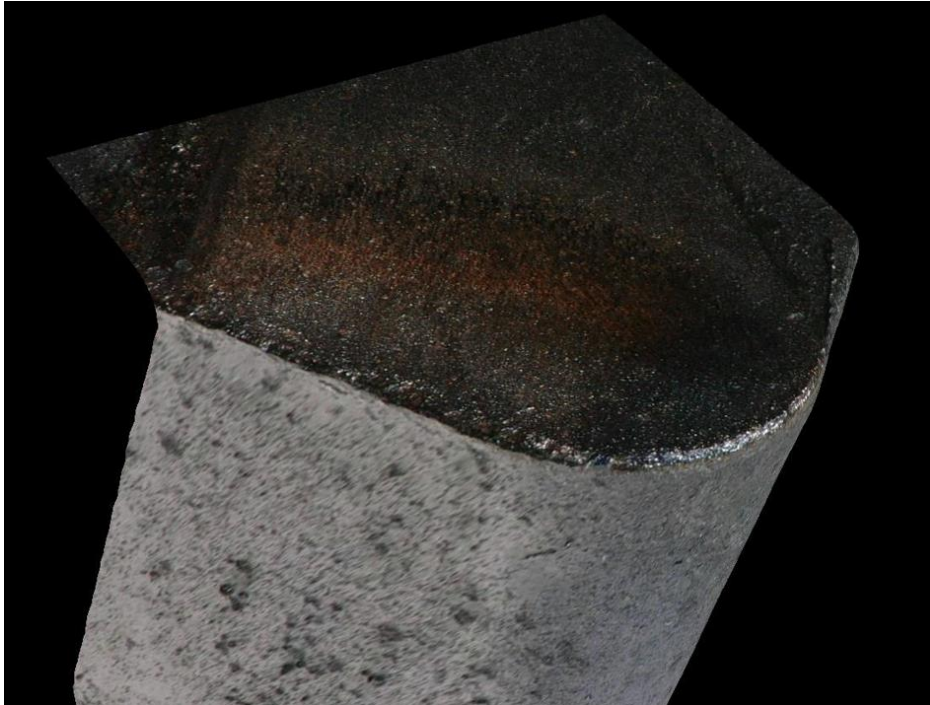
Na mikroskopu byly prohlédnuty jednotlivé destičky. Při pozorování na mikroskopu je možnost vyfotit obrazovku, a dokonce i měřit velikosti opotřebení při daných zvětšeních, aby byly vady dobře viditelné.



Obrázek 40 – Destička s 0° úhlu čela – opotřebení

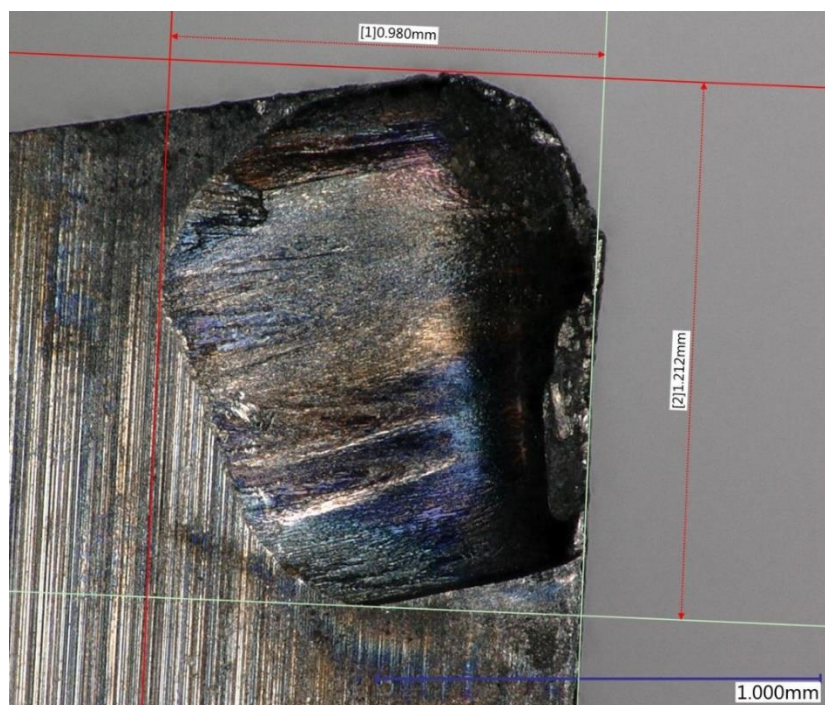
Břítová destička s úhlem čela 0° nevykazuje žádné výraznější opotřebení. Na (Obrázek 40) vidíme pouze lehce otřené čelo od toho, jak odcházeli po jeho povrchu třísky a v okolí částečnou tepelně ovlivněnou oblast.

Na (Obrázek 41) je vidět zobrazení břítové destičky ve 3D, kde není žádné narušení řezné hrany a opotřebování mimo těch, které jsou detailně vidět na (Obrázek 40).



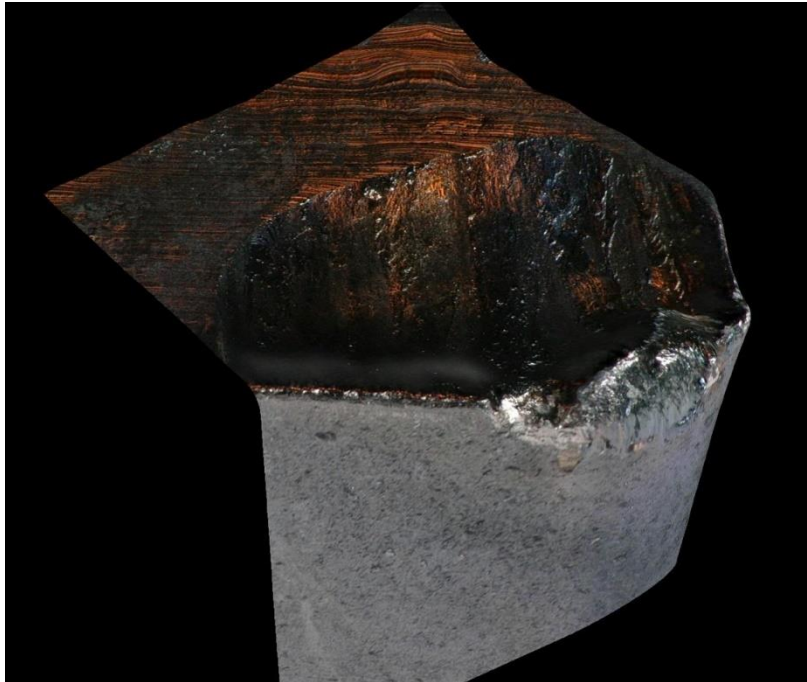
Obrázek 41 – 3D pohled na BD s úhlem čela 0°

Břítová destička s úhlem čela 7° vykazuje už značné opotřebení. Na (Obrázek 42) je vidět dokonale vytvořený výmol na čele i s jeho rozměry, které byly vytvořeny po 2 podélných řezech v $l = 40$ mm.



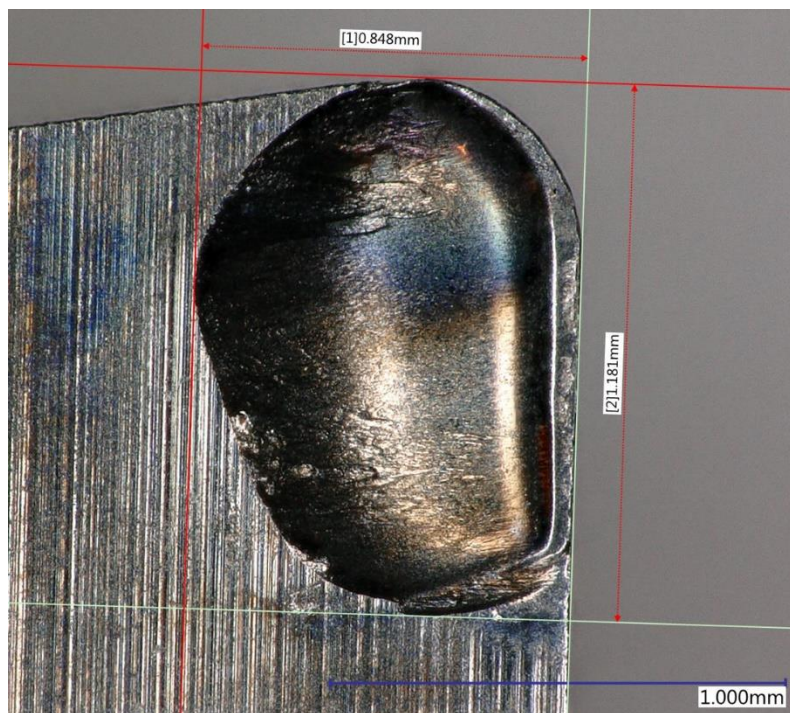
Obrázek 42 – Destička s úhlem čela 7° – opotřebení

Na (Obrázek 43) je vidět zobrazení břitové destičky ve 3D, kde pozorujeme závažné narušení řezné hrany, došlo k vylomení špičky břitové destičky a došlo k opotřebením, které jsou detailně vidět na (Obrázek 42). Destička je kompletně zničena.



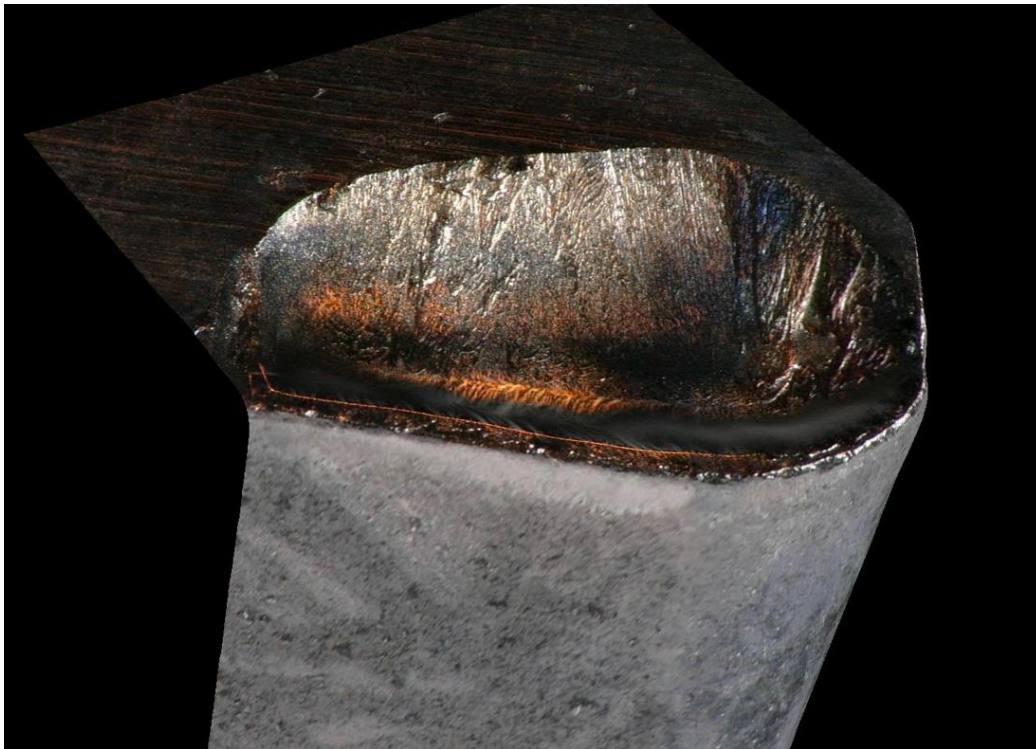
Obrázek 43 – 3D pohled na BD s úhlem čela 7°

Břitová destička s úhlem čela -7° také vykazuje značné opotřebení. Na (Obrázek 44) je vidět dokonale vytvořený výmol na čele i s jeho rozměry, které byly vytvořeny po 2 podélných řezech v $l = 40$ mm, tedy stejně jako v případě pozitivního úhlu čela.



Obrázek 44 – Destička s úhlem čela -7° – opotřebení

Na (Obrázek 45) je vidět zobrazení břitové destičky ve 3D, kde je možné pozorovat závažné narušení řezné hrany, došlo k vylomení břitové špičky destičky a došlo k opotřebení, které je detailně vidět na (Obrázek 44). Destička je kompletně zničená.



Obrázek 45 – 3D pohled na BD s úhlem čela 7°

5.1.3 Závěr z preexperimentu

Tyto extrémní případy opotřebení břitové destičky jsou dány především tím, že při vytváření variabilních úhlů čela docházelo k přebroušení břitových destiček. Právě toto přebroušení mělo za následek to, že z břitové destičky byl odstraněn řezný povlak, který zajišťuje dostatečnou mechanickou a tepelnou odolnost řezného břitu.

Řezný povlak vykonává proces odebrání materiálu ve formě třísky. S absencí řezné vrstvy s jistou nadsázkou je možno říct, že měkčí materiál obráběl ten tvrdší. Proto došlo tak k masivnímu zdeformování a opotřebení břitových destiček.

Výsledky z preexperimentu jsou irelevantní, proto je nelze použít dále do statistiky. Postrádalo by smysl vyhodnocovat „správně naměřené hodnoty“ destičky s úhlem čela 0° , kde řezná vrstva je celistvá a tyto „zkreslené hodnoty“, kde vlivem absence řezné vrstvy nelze tyto hodnoty komparovat, natož je vyhodnocovat.

Z preexperimentu je možno určit komparaci opotřebení břitových destiček při $+7^\circ$ a -7° . Při tomto porovnání lze říci, že při stejné soustružené délce, tedy $v_l = 80$ mm je více opotřebovaná pozitivní břitová destička, protože pozitivní destička má subtilnější řezný klín, který je křehčí.

Dále si bylo z preexperimentu odneseno plno cenných poznatků, čemu se vyhnout při tvorbě samotného experimentu. Tyto poznatky nejsou brány jako neúspěch, nýbrž jako zpětná vazba toho, co bylo uděláno špatně či se opomenulo.

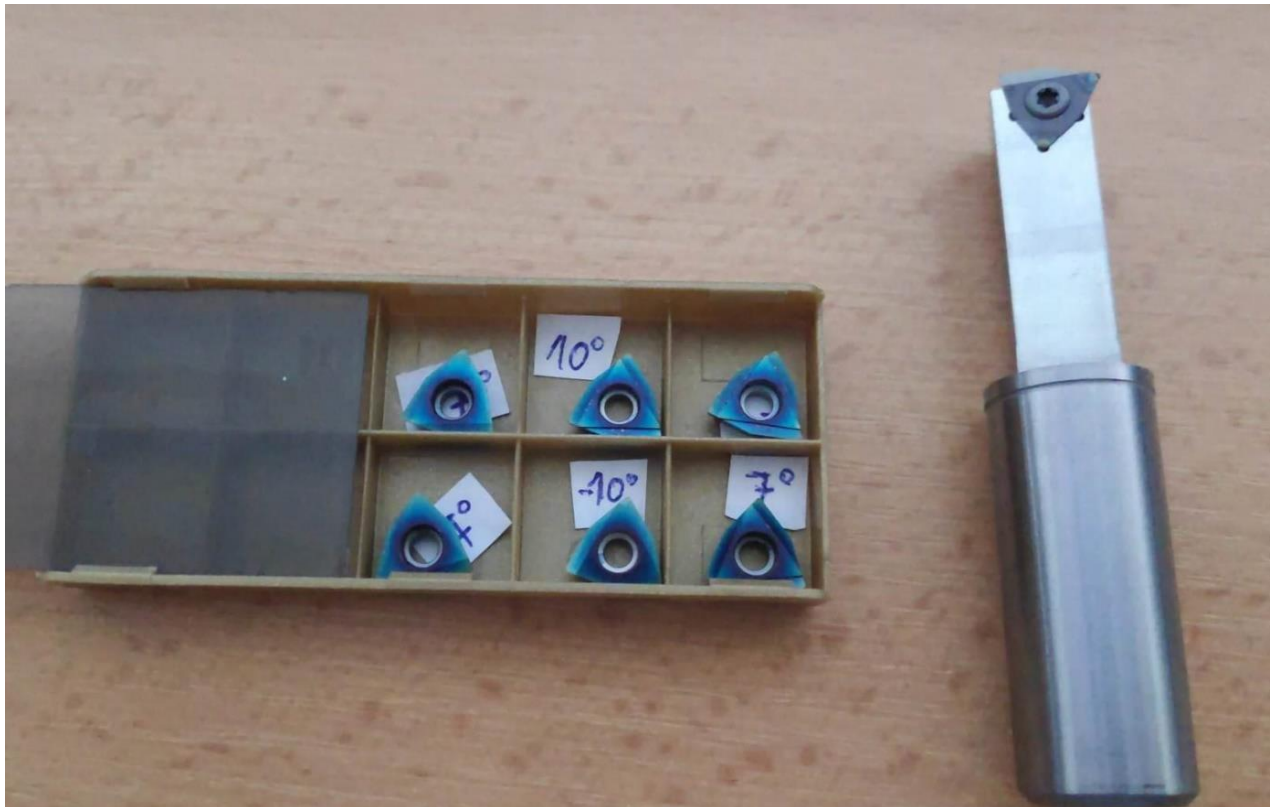
Pro experiment se nechaly břitové destičky opět přebrousit na požadované úhly na stroji ANCA MX7 a následně byly napovlakovány metodou tripple coating.

5.2 Experiment

Z preexperimentu bylo odneseno plno cenných poznatků, který byly odstraněny a zlepšeny. Bylo nutno tedy celý proces experimentálního měření ještě jednou zopakovat a získat takové hodnoty, které by byly vhodné pro vyhodnocení a nebyly ovlivněny opotřebením nástroje, jak tomu bylo v preexperimentu.

Jedním z hlavních důvodů, proč preexperiment nevyšel, byl zaviněn tím (jak je popsáno výše), že se opomenula nanést řezná vrstva materiálu. Nové destičky byly naostřeny na požadované úhly čela a následně byly napovlakovány metodou tripple coating, která zajišťuje povrchovou řeznou vrstvu. Nově napovlakované destičky jsou viděny na (Obrázek 46).

Plán experimentu byl totožný jako plán preexperimentu (viz Tabulka 3). Experiment se provedl bez jakýkoliv problémů a záznamy řezných sil byly uloženy pomocí SW Dynoware do počítače. Tyto záznamy poté byly následně vyhodnoceny. K vyhodnocení měřených dat byla využita statistická metoda DoE (Design of Experiment).



Obrázek 46 – Napovlakované destičky metodou tripple coating

Experiment se odehrával stejně jako preexperiment v prostorách katedry obrábění. Na začátku experimentu bylo nutno stanovit hodnoty konstant, které se průběhem experimentu nebudou měnit. Byla to především řezná rychlost v_c , která byla stanovena na 100 m/min – velikost hloubky řezu zůstává stejná, tedy $a_p = 1$ mm. Tyto dva parametry zůstanou konstantní po celou dobu měření experimentu. Při nedodržení těchto konstant by vyhodnocení experimentu ztratilo smysl a bylo by irrelevantní.

6. Vyhodnocení naměřených dat

6.1 Statistické vyhodnocení experimentu

Jak již bylo výše uvedeno, tak pro analýzu řezných sil při obrábění, tedy konkrétně v našem případě při soustružení, byl zvolen takový centrální plán, který zahrnuje dvě nezávislé faktory, kterými jsou otáčkový posuv f a úhel čela γ_0 . Hledaná závislost funkce je ve tvaru (vztah 16):

$$F_c = f(f, \gamma_0)[N] \quad (16)$$

V první řadě bylo započato analýzou opakovaných měření řezných sil z důvodu, že regresní triplet (data, model, rezidua) je nezbytný pro vytvoření korektního modelu. Na skupinu, které tvoří data, je kladen především důraz na Gaussovo normální rozdělení opakovaných měření z důvodu vhodného výběru střední hodnoty (aritmetický průměr, medián), která je bude ve výpočtu jednotlivých měření reprezentovat.

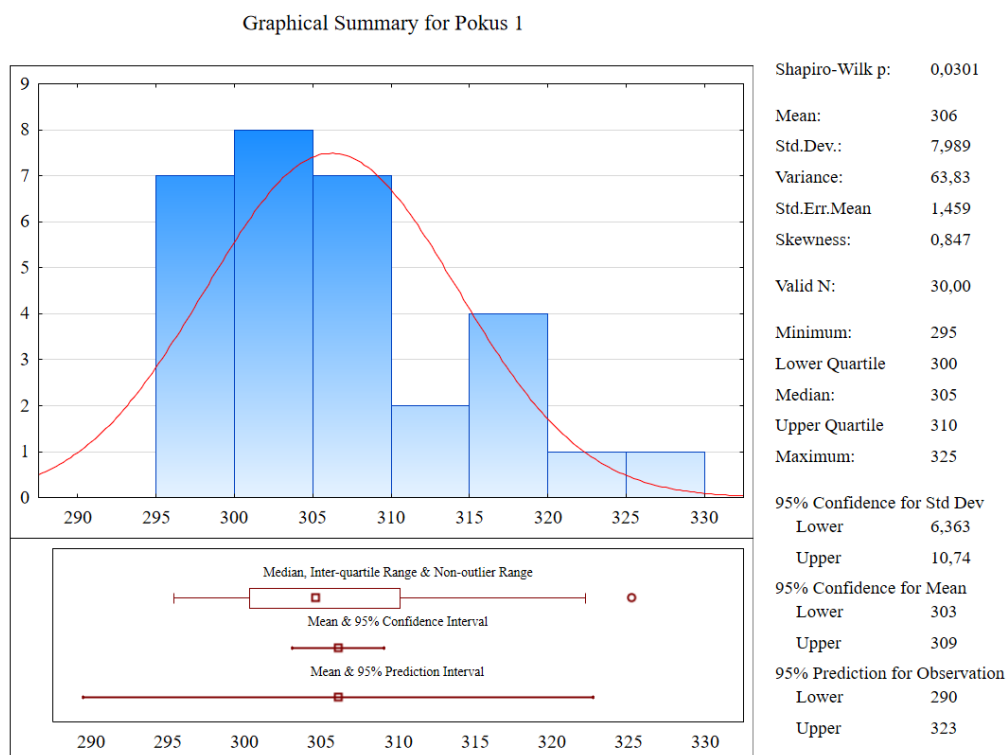
Tyto hodnoty byly vytvořeny tak, že jednotlivé pokusy byly ještě parciálně rozděleny. Hodnoty byly změřeny pomocí dynamometru a následně zaznamenány pomocí SW Dynoware, který zaznamenává hodnoty velikostí řezných sil každou 0,0001s. Tyto hodnoty byly následně pomocí aritmetického průměru zprůměrovány – tedy celý trvajících záznam jednoho řezu byl zaznamenán hodnotami desítky tisíc záznamů řezné síly. Celý proces byl opakován až hodnota opakování dosáhla šesti měření. Těchto 6 měření bylo následně zprůměrováno a dosáhla se hodnota, které nahrazuje hodnotu celého pokusu – tím dostaneme velice přesnou výchozí hodnotu.

Druhou podmínkou je, aby v opakovaných měřeních nebyly přítomny odlehlé hodnoty (hrubé chyby). Jednotlivé hodnoty pokusů jsou definovány v (Tabulka 4), kde jsou viděny minimální a maximální hodnoty řezných sil v průběhu pokusů měření, jejich medián či hodnoty, které jsou důležité pro stanovení statistiky jako takové.

Tabulka 4 – Deskriptivní statistika základního souboru

| Variable | Valid N | Mean | Median | Min. | Max. | Lower Quartile | Upper Quartile | Std.Dev. | Skewness | Kurtosis |
|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------------|----------------|----------|-----------|----------|
| Pokus 1 | 30 | 306,1100 | 304,6500 | 295,4000 | 325,2000 | 300,3000 | 310,1000 | 7,98906 | 0,847236 | -0,07532 |
| Pokus 2 | 30 | 272,0167 | 269,2500 | 255,1000 | 288,6000 | 264,8000 | 279,2000 | 9,45720 | 0,114753 | -1,14102 |
| Pokus 3 | 30 | 722,9867 | 722,8500 | 711,1000 | 740,5000 | 716,7000 | 725,6000 | 8,81150 | 0,701514 | -0,34333 |
| Pokus 4 | 30 | 683,7000 | 683,9000 | 661,2000 | 716,8000 | 679,4000 | 689,1000 | 11,48222 | 0,448496 | 1,30819 |
| Pokus 5 | 30 | 193,6233 | 192,1500 | 179,0000 | 216,9000 | 185,5000 | 198,6000 | 9,52820 | 0,649235 | -0,21368 |
| Pokus 6 | 30 | 767,7533 | 768,6500 | 743,3000 | 793,0000 | 759,7000 | 772,5000 | 12,64436 | 0,034312 | -0,03181 |
| Pokus 7 | 30 | 539,0367 | 536,5000 | 525,4000 | 563,8000 | 530,4000 | 542,9000 | 11,04222 | 1,034443 | 0,13632 |
| Pokus 8 | 30 | 503,0200 | 504,1000 | 482,5000 | 521,6000 | 493,8000 | 514,2000 | 12,16562 | -0,157310 | -1,41721 |
| Pokus 9 | 30 | 509,3567 | 507,1500 | 495,0000 | 527,1000 | 505,3000 | 511,1000 | 8,35595 | 0,986517 | 0,46259 |
| Pokus 10 | 30 | 509,0567 | 506,2000 | 496,1000 | 529,5000 | 500,6000 | 517,4000 | 9,85910 | 0,575375 | -0,81341 |

Z těchto hodnot bylo vytvořené grafické rozdělení dat opakovaných měření pro jednotlivé pokusy (pokud je hodnota Shapiro-Wilk $p < 0.05$ pak data nemají normální Gaussovo rozdělení). Takto byla provedena u všech jednotlivých pokusů (Graf 12).



Graf 12 – Grafická deskriptivní statistika pro F_c

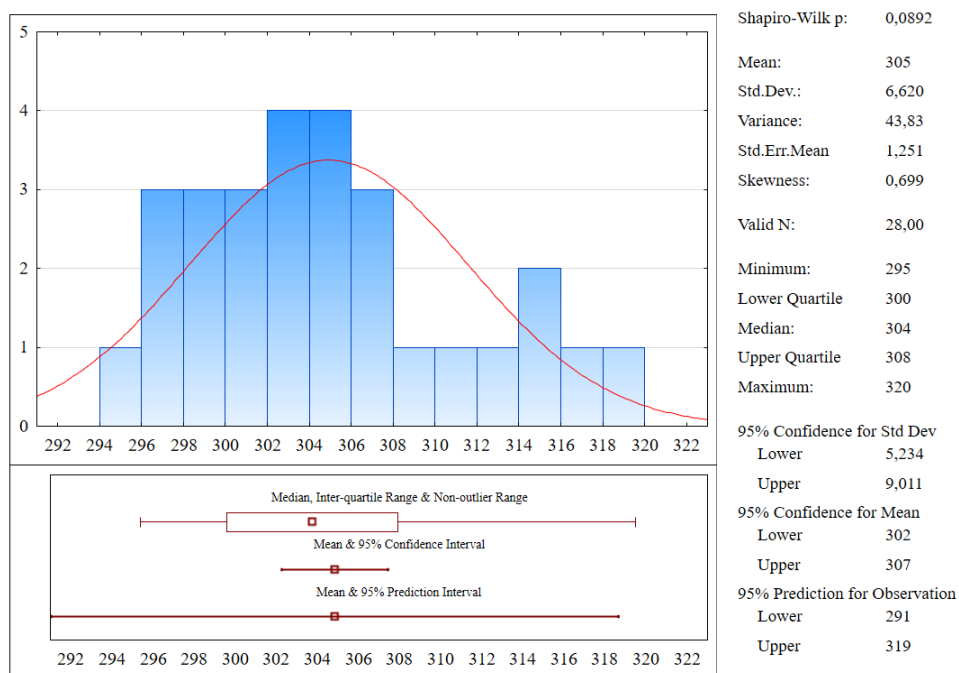
V dalším kroku bylo pomocí Grubsova testu zjištěny odlehlé hodnoty (hrubé chyby – kroužky v histogramu) a po jejich odstranění, tedy odstranění hrubých chyb je finální tvar jednotlivých parametrů polohy, rozptýlení, šikmosti a špičatosti uveden v (Tabulka 5).

Tabulka 5 – Deskriptivní statistika základního souboru bez hrubých chyb

| Variable | Valid N | Mean | Median | Min. | Max. | Lower Quartile | Upper Quartile | Std.Dev. | Skewness | Kurtosis |
|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------------|----------------|----------|-----------|----------|
| Pokus 1 | 28 | 304,8536 | 303,7500 | 295,4000 | 319,5000 | 299,6000 | 307,9000 | 6,62042 | 0,699199 | -0,28874 |
| Pokus 2 | 30 | 272,0167 | 269,2500 | 255,1000 | 288,6000 | 264,8000 | 279,2000 | 9,45720 | 0,114753 | -1,14102 |
| Pokus 3 | 28 | 721,7536 | 722,3500 | 711,1000 | 738,9000 | 715,9500 | 725,4500 | 7,72895 | 0,752726 | 0,21164 |
| Pokus 4 | 28 | 683,3214 | 683,9000 | 667,2000 | 702,1000 | 679,9500 | 688,9500 | 9,06260 | -0,213129 | -0,35343 |
| Pokus 5 | 30 | 193,6233 | 192,1500 | 179,0000 | 216,9000 | 185,5000 | 198,6000 | 9,52820 | 0,649235 | -0,21368 |
| Pokus 6 | 28 | 765,9643 | 768,0500 | 743,3000 | 786,7000 | 759,1500 | 772,2500 | 11,04225 | -0,347320 | -0,07499 |
| Pokus 7 | 25 | 534,8360 | 535,2000 | 525,4000 | 548,4000 | 529,7000 | 537,6000 | 5,95503 | 0,334493 | -0,33796 |
| Pokus 8 | 30 | 503,0200 | 504,1000 | 482,5000 | 521,6000 | 493,8000 | 514,2000 | 12,16562 | -0,157310 | -1,41721 |
| Pokus 9 | 23 | 506,8826 | 506,6000 | 499,7000 | 512,3000 | 505,3000 | 509,2000 | 3,22612 | -0,444422 | 0,23300 |
| Pokus 10 | 25 | 506,0680 | 504,6000 | 496,1000 | 519,8000 | 500,4000 | 510,2000 | 7,51575 | 0,621227 | -0,82748 |

Z těchto hodnot, kde byly eliminovány hrubé chyby bylo opět vytvořeno grafické rozdělení dat opakovaných měření pro jednotlivé pokusy. Pokud by nebyla dodržena hodnota Shapiro-Wilk $p < 0.05$ pak data nemají normální Gaussovo rozdělení. To bylo opět provedeno u všech pokusů (Graf 13).

Graphical Summary for Pokus 1



Graf 13 – Grafická deskriptivní statistika s eliminací hrubých chyb

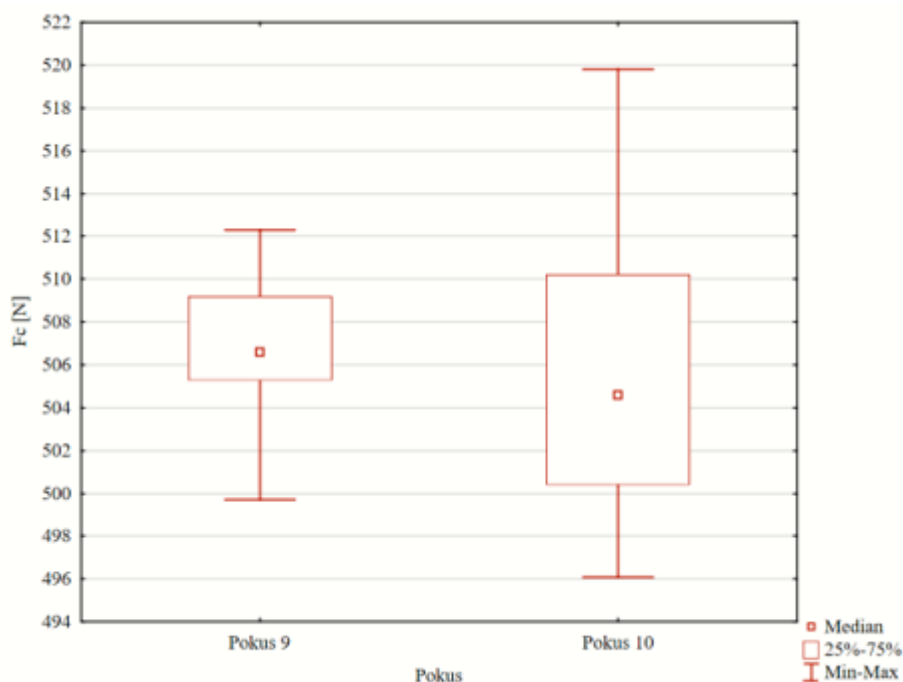
Z analýzy vyplývá, že opakovaná měření při pokusu čj. 3, č.8 a č.10 i po odstranění odlehklých měření nemají Gaussovo normální rozdělení a z toho důvodu jako střední hodnota je při těchto pokusech použit medián.

Pro zachycení chyby měření v nulových bodech plánu experimentu byly analyzovány střední hodnoty pokusu č.9 a č.10. Protože opakovaná měření při pokusu č.10 nevykazují normální Gaussovo rozdělení na komparaci středních hodnot byl volen neparametrický Mann-Whitneyův test (Tabulka 6).

Tabulka 6 – Analýza nulových bodů plánu experimentu

| variable | Mann-Whitney U Test (w/ continuity correction) (Data 2) By variable Pokus Marked tests are significant at $p < .05000$ | | | | | | | | | |
|----------|--|-------------------|----------|----------|----------|------------|----------|-----------------|------------------|------------------|
| | Rank Sum Pokus 9 | Rank Sum Pokus 10 | U | Z | p-value | Z adjusted | p-value | Valid N Pokus 9 | Valid N Pokus 10 | 2*1sided exact p |
| Fc [N] | 623,0000 | 553,0000 | 228,0000 | 1,217617 | 0,223370 | 1,217782 | 0,223308 | 23 | 25 | 0,225638 |

Na základě dosažené hladiny významnosti ($p=0.22337$) lze konstatovat, že opakovaná měření pokusu č.9 a č.10 pocházejí z téhož rozdělení a na zvolené hladině významnosti ($\alpha = 5\%$) lze jejich střední hodnoty považovat za statisticky stejné. Skutečně naměřené difference středních hodnot je tak možno považovat ve statistickém smyslu za náhodu (Obrázek 47).



Obrázek 47 – Box plot opakovaných měření pokusu č.9 a pokusu č.10

Tabulka 7 představuje souhrn analýzy vhodnosti modelu působení faktorů pro změnu hodnoty řezné síly Fc. Z tabulky je patrné, že podíl variability hodnoty F (RSquare) představuje hodnotu 99,899 % a upravený index determinace (RSquare Adj) podmiňující míru vysvětlení variability dat daným modelem dosahuje hodnoty 99,8495 %. Na tomto místě je třeba podotknout, že vzhledem k vysoké hodnotě upraveného indexu determinace můžeme hovořit o funkčním modelu. Průměrná chyba modelu představuje hodnotu 7,5229 N a průměrná hodnota složky řezné síly je 499,3N.

Tabulka 7 – Shrnutí vlastnosti modelu pro Fc

| Source | Value |
|----------------------------|----------|
| RSquare | 0,998997 |
| RSquare Adj | 0,998495 |
| Root Mean Square Error | 7,52291 |
| Mean of Response | 499,3 |
| Observations (or Sum Wgts) | 10 |
| AIC | 86,62957 |
| BIC | 75,1425 |

Z analýzy rozptylu (ANOVA) viděno v (Tabulka 8), lze říci, že variabilita způsobená náhodnými chybami je výrazně menší, než variabilita naměřených hodnot vysvětlená modelem a hodnota dosažené hladiny významnosti ($Prob > F$) poukazuje na adekvátnost použitého modelu na základě Fisher – Snedecorova testovacího kritéria. Důvodem je povaha testu. Nulová statistická hypotéza, která se testuje tvrdí, že žádný z efektů (členů) v modelu nemá vliv na hodnotu zkoumané proměnné. Protože bylo pracováno s hladinou významnosti 5 % a dosažená hodnota $Prob > F$ je menší než hladina významnosti, můžeme tedy říci, že v modelu existuje alespoň jeden nenulový člen, který má vliv na hodnotu zkoumané proměnné.

Tabulka 8 – ANOVA pro F_c

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio | Prob > F |
|----------|----|----------------|-------------|----------|----------|
| Model | 3 | 338144,5 | 112715 | 1991,634 | <0,0001* |
| Error | 6 | 339,57 | 57 | | |
| C. Total | 9 | 338484,1 | | | |

Další testování použitého modelu testem chyby nedostatečného přizpůsobení modelu, kde testujeme rozptyl reziduí a rozptyl naměřených dat (Tabulka 9).

Test chyby nedostatečného přizpůsobení modelu tedy zkoumá, zda variabilita reziduí je větší než variabilita hodnot uvnitř skupin. Nulová statistická hypotéza (H_0) tohoto testu vychází z předpokladu, že rozptyl reziduí je menší nebo roven jako rozptyl uvnitř skupin. Alternativní statistická hypotéza (H_1) zase tvrdí, že rozptyl reziduí je větší, než rozptyl uvnitř skupin. Protože hodnota ($Prob > F$) je 0,1299 a my pracujeme s hladinou významnosti 5 % můžeme konstatovat, že důkazy na to, abychom nulovou statistickou hypotézu zamítli, jsou správné. Tedy výsledek je, že model je dostatečný. Nesmí však být opomenuto, že vliv, který byl vložen do modelu je nesignifikantní, ale bez tohoto vlivu by nebylo možno dosáhnout splnění této podmínky.

Tabulka 9 – Chyba nedostatečného přizpůsobení modelu

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio | Prob > F | Max RSq |
|-------------|----|----------------|-------------|---------|----------|---------|
| Lack Of Fit | 5 | 337,565 | 67,513 | 33,7565 | 0,1299 | 1 |
| Pure Error | 1 | 2 | 2 | | | |
| Total Error | 6 | 339,565 | | | | |

Jakmile jsou splněny výše uvedenými kroky, tak základní předpoklady jsou splněny a model je označen jako adekvátní. Dále byla vytvořena tabulka odhadů parametrů modelu (viz Tabulka 10). Tabulka označuje signifikantní ukazatele.

Tabulka 10 – Tabulka odhadů parametrů modelu pro F_c

| Term | Estimate | Std Error | t Ratio | Prob> t | Lower 95% | Upper 95% | VIF |
|-----------------|----------|-----------|---------|----------|-----------|-----------|-----|
| Intercept | 512,5 | 3,482434 | 147,17 | <0,0001* | 503,9788 | 521,0212 | . |
| x_1 | 204,6165 | 2,659754 | 76,93 | <0,0001* | 198,1084 | 211,1247 | 1 |
| x_2 | -14,4801 | 2,659754 | -5,44 | 0,0016* | -20,9883 | -7,97192 | 1 |
| $x_1 \cdot x_2$ | -16,5001 | 3,179023 | -5,19 | 0,0020* | -24,2789 | -8,72128 | 1 |

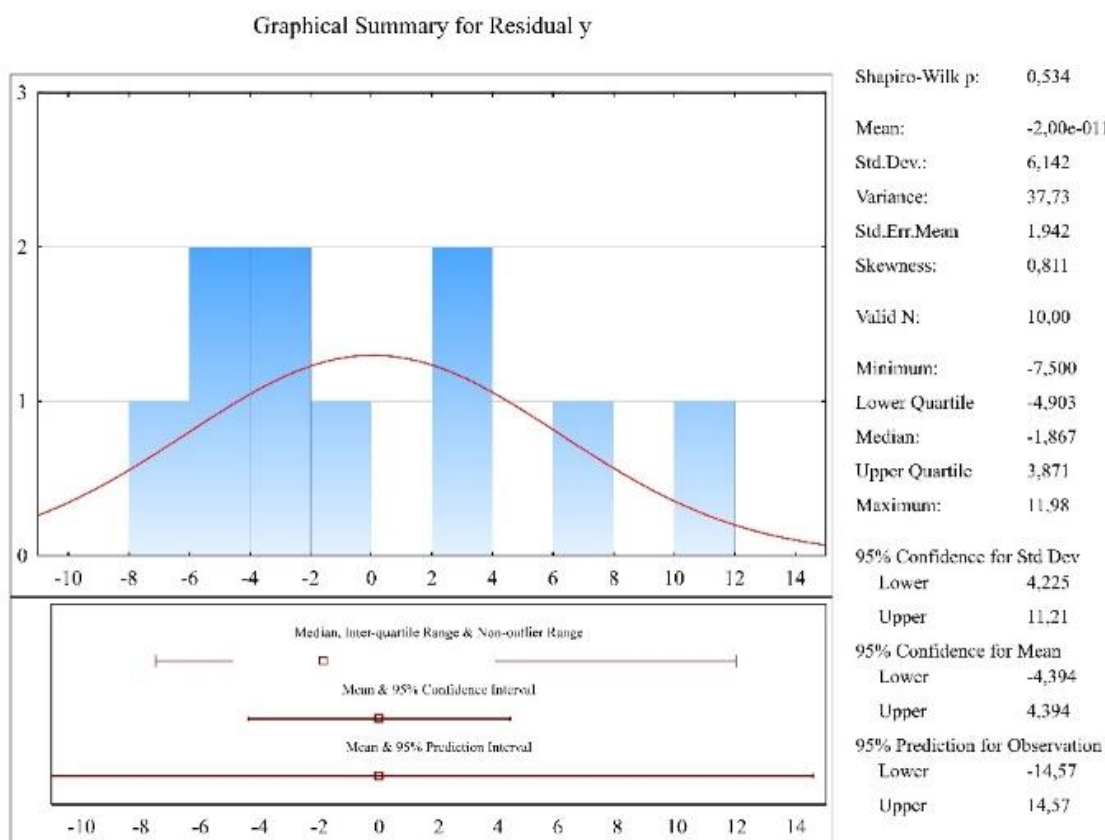
Z odhadu parametrů modelu lze sestavit predikovanou statistickou rovnicí v kódovacím tvaru (viz Obrázek 13).

$$y = 512.5 + 204.6172 \cdot x_1 - 14.480 \cdot x_2 - 16.500 \cdot x_2^2 \quad (17)$$

Pro sestavení vhodné predikční rovnice závislosti je potřeba převést parametry zpět z kódovacího měřítka dle (vztah 14). Pomocí predikované statistické rovnice (vztah 17) a převodového vztahu z kódovacího měřítka (vztah 14) dochází ke vzniku nové rovnice, která popisuje zkoumanou závislost hlavní složky řezné síly F_c (vztah 18).

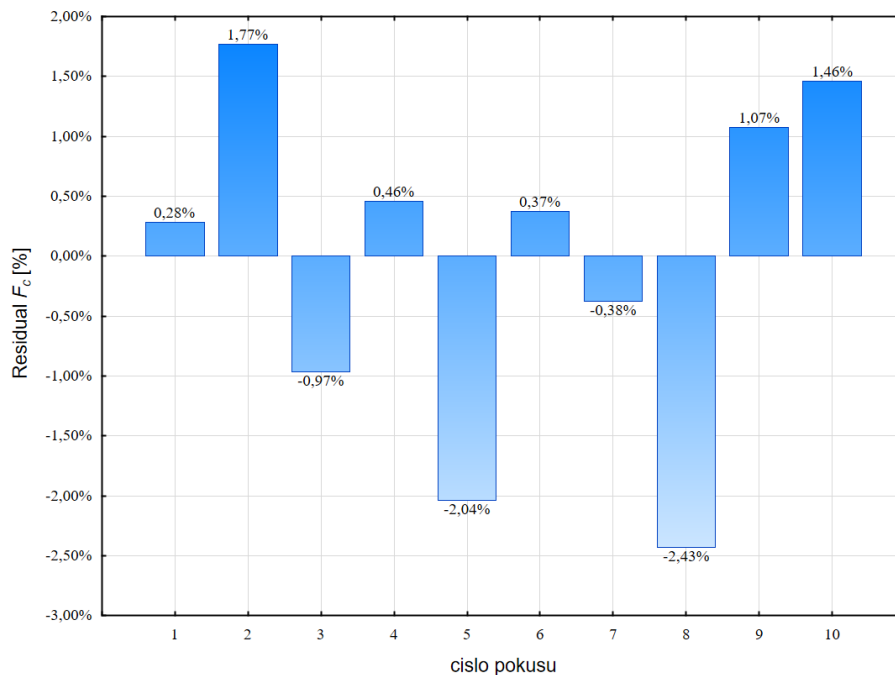
$$F_c = 40.339 + 3070.931 \cdot f - 2130.695 \cdot f^2 - 2.069 \cdot \gamma_o \quad (18)$$

Aby byla analýza označena za komplexní a byla potvrzena správnost a vhodnost daného modelu, je nezbytné ověřit rezidua (Graf 14), tedy samotné rozdíly mezi skutečně naměřenými a předpovídanými hodnotami vypočítaný predikčním modelem. Především z hlediska rozložení a autokorelace. Rezidua vykazují střední hodnotu nula a zároveň lze na základě Shapiro-Wilksova testu říci, že mají Gaussovo normální rozdělení, a proto lze regresní model (vztah 18) považovat za numericky i statisticky správný.



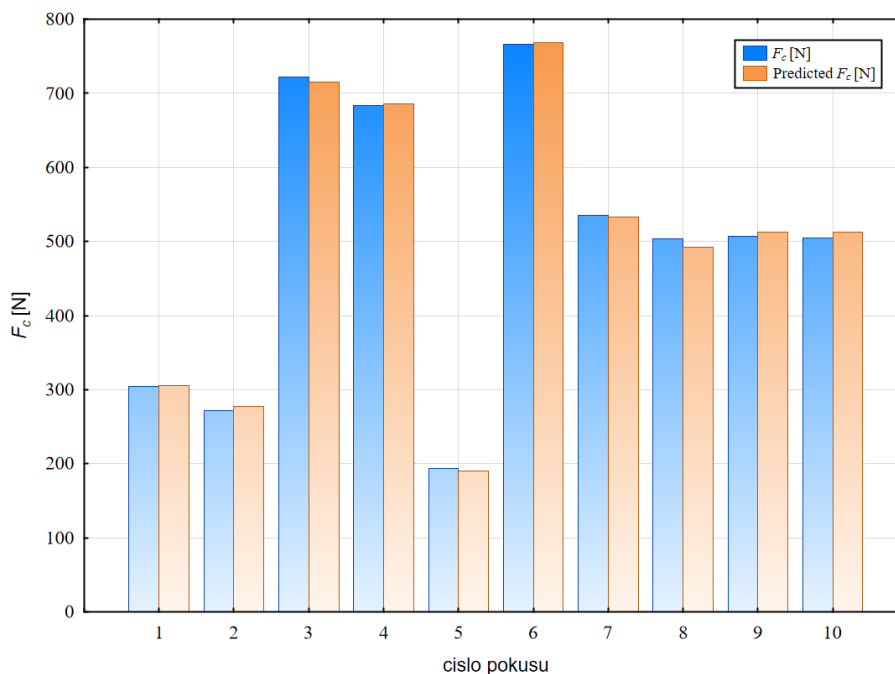
Graf 14 – Grafická analýza reziduí řezné síly

Procentuální vyjádření reziduí jsou viděna na (Graf 15), kde pro jednotlivé pokusy je přiřazena maximální možná odchylka vypočítané hodnoty od naměřené. Toto grafické vyjádření poukazuje jen velice malou odchylku výsledků od naměřených, čímž je opět utvrzena správnost predikovaného modelu.



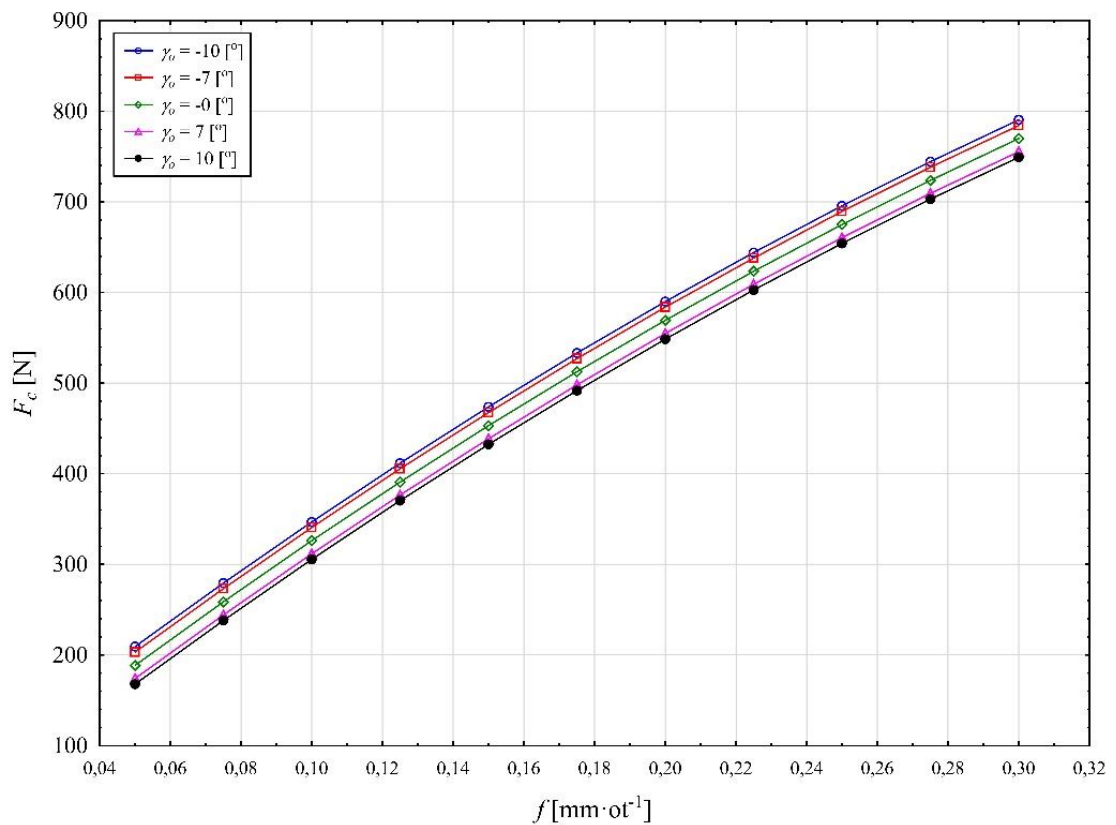
Graf 15 – Rezidua pro jednotlivé pokusy plánu experimentu F_c

Graficky vyjádřená komparace mezi naměřenými (modrá barva) a vypočtenými hodnotami F_c (oranžová barva) (Graf 16), které byly zjištěny pomocí výše vytvořeného modelu a dle uvedených specifik, utvrdili správnost předloženého predikovaného modelu.



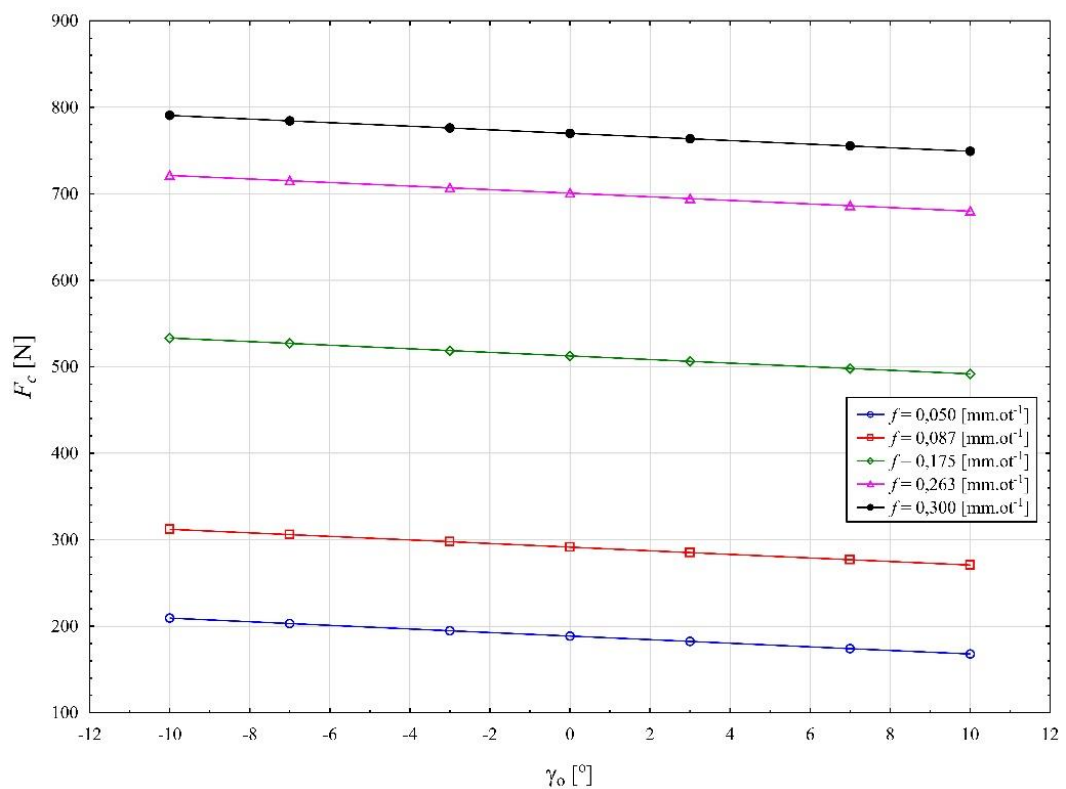
Graf 16 – Porovnání naměřených a zjištěných hodnot F_c [N]

Na základě regresního modelu lze stanovit závislost námi zkoumanými veličinami. Tato závislost lze nejlépe vystihnout graficky, tedy pomocí grafu.



Graf 17 – Závislost F_c na posuvu

Jednotlivé závislosti hlavní složky řezné síly mohou být viděny na (Graf 17) a (Graf 18).

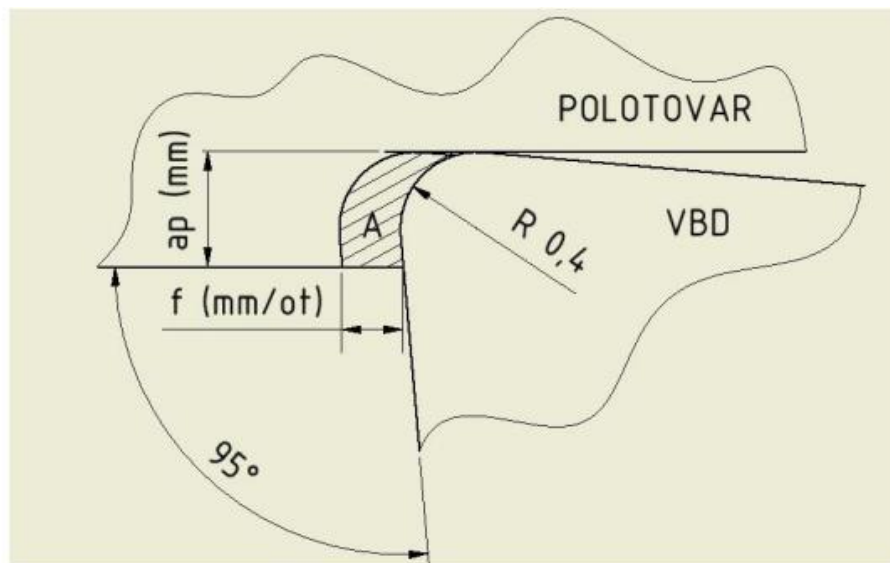


Graf 18 – Závislost F_c na úhlu čela

6.2 Vyhodnocení výpočtu řezného odporu

Pro správné vyhodnocení je potřeba dodržet již výše zmíněné nezávislosti vstupných proměnných, protože nastala rozeprě – nejprve bylo potřeba změřit složku hlavní řezné síly F_c , která je funkcí (γ_o, f) . Řezný odpor k_c je také funkcí více proměnných, kterými jsou (γ_o, f, F_c, ap) . Podmínka nezávislosti vstupných proměnných tedy dodržena nebyla, řezný odpor nelze zjišťovat přímo.

Pro výpočet řezného odporu byl využit (vztah 10). Avšak průřez třísky A_D byl zjištěn pomocí vymodelování samotného tvaru břitu v SW Creo (orientační schéma Obrázek 48). Důvodem bylo hlavně zpřesnění měření, kdy při pouhém použití základní myšlenky vynásobit posuv hloubkou třísky ($f \times ap$) by došlo ke snížení výpovědní hodnoty a zkreslení výpočtu.



Obrázek 48 – Úběr třísky z polotovaru [5]

Výpočet byl proveden v SW Creo, kdy pomocí funkce změření byla změřena plocha (na Obrázek 48 vyšrafovaná plocha A_D). Hodnoty obsahu plochy, hlavní složky řezné síly byly doplněny do plánu experimentu a byl vypočítán měrný řezný odpor k_c . Tyto hodnoty byly sesbírány z experimentálního měření (Tabulka 11). Hodnoty potřebné k určení k_c byly stanoveny tvarem plochy A_D , avšak vliv úhlu čela zde započítáván ještě nebyl. Tento vliv tam byl následně implementován pomocí DoE. Metoda je tedy založena na testování kombinací různých hodnot (úrovni) faktorů a pomocí ní se zúží počet testovaných kombinací na ty podstatné. Bez použití DoE by byla k sestavení modelu průběhu grafů potřeba daleko rozsáhlejší tabulka hodnot.

Tabulka 11 – Vypočtené, zjištěné a stanovené hodnoty dle plánu experimentu

| Pokus [-] | f[mm/ot] | γ [°] | F_c [N] | A_D [mm ²] | k_c [MPa] |
|-----------|----------|--------------|-----------|--------------------------|-------------|
| 1 | 0,087 | -7 | 305 | 0,08619 | 3538,587 |
| 2 | 0,087 | 7 | 272 | 0,08619 | 3155,723 |
| 3 | 0,263 | -7 | 722 | 0,25901 | 2787,559 |
| 4 | 0,263 | 7 | 683 | 0,25901 | 2636,984 |
| 5 | 0,05 | 0 | 194 | 0,04989 | 3888,555 |
| 6 | 0,3 | 0 | 766 | 0,29422 | 2603,503 |
| 7 | 0,175 | -10 | 535 | 0,17458 | 3064,463 |
| 8 | 0,175 | 10 | 504 | 0,17458 | 2886,896 |
| 9 | 0,175 | 0 | 507 | 0,17458 | 2904,079 |
| 10 | 0,175 | 0 | 505 | 0,17458 | 2892,624 |

Tabulka 12 představuje souhrn analýzy vhodnosti modelu působení faktorů pro změnu řezného odporu. Z tabulky je zřejmé, že podíl variability hodnoty k_c (RSquare) představuje hodnotu 97,716 % a upravený index determinace (RSquare Adj) podmiňující míru vysvětlení variability dat daným modelem dosahuje hodnoty 96,574 %. Na tomto místě je třeba podotknout, že vzhledem k vysoké hodnotě upraveného indexu determinace můžeme hovořit o funkčním modelu. Průměrná chyba modelu představuje hodnotu 70,242 MPa a průměrná hodnota složky řezného odporu je 3029,041 MPa.

Tabulka 12 – Shrnutí vhodnosti modelu pro k_c

| Source | Value |
|----------------------------|----------|
| RSquare | 0,97716 |
| RSquare Adj | 0,965739 |
| Root Mean Square Error | 70,24241 |
| Mean of Response | 3029,041 |
| Observations (or Sum Wgts) | 10 |

Z analýzy rozptylu (ANOVA) viděno v (Tabulka 13), lze říci, že variabilita způsobené náhodnými chybami je výrazně menší než variabilita naměřených hodnot vysvětlená modelem. Hodnota dosažené hladiny významnosti (Prob>F) poukazuje na adekvátnost použitého modelu, na základě Fisher – Snedecorova testovacího kritéria. Důvodem je povaha testu. Nulová statistická hypotéza, která se testuje tvrdí, že žádný z efektů (členů) v modelu nemá vliv na hodnotu zkoumané proměnné. Protože bylo pracováno s hladinou významnosti 5 % a dosažená hodnota Prob> F je menší než hladina významnosti, můžeme tedy říci, že v modelu existuje alespoň jeden nenulový člen, který má vliv na hodnotu zkoumané proměnné.

Tabulka 13 – ANOVA pro k_c

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio | Prob > F |
|----------|----|----------------|-------------|---------|----------|
| Model | 3 | 1266522 | 422174 | 85,5643 | <0,0001* |
| Error | 6 | 29604 | 4934 | | |
| C. Total | 9 | 1296126 | | | |

Jakmile jsou splněny výše uvedenými kroky, tak základní předpoklady jsou splněny a model je označen jako adekvátní. Dále byla vytvořena tabulka odhadů parametrů modelu (viz Tabulka 14). Tabulka označuje signifikantní ukazatele.

Tabulka 14 – Tabulka odhadů parametrů modelu k_c

| Term | Estimate | Std Error | t Ratio | Prob> t | Lower 95% | Upper 95% |
|-----------------|----------|-----------|---------|----------|-----------|-----------|
| Intercept | 2927,357 | 32,51595 | 90,03 | <0,0001* | 2847,793 | 3006,921 |
| x_1 | -370,556 | 24,83448 | -14,92 | <0,0001* | -431,324 | -309,788 |
| x_2 | -98,4642 | 24,83448 | -3,96 | 0,0074* | -159,232 | -37,6964 |
| $x_1 \cdot x_1$ | 127,105 | 29,68297 | 4,28 | 0,0052* | 54,47342 | 199,7366 |

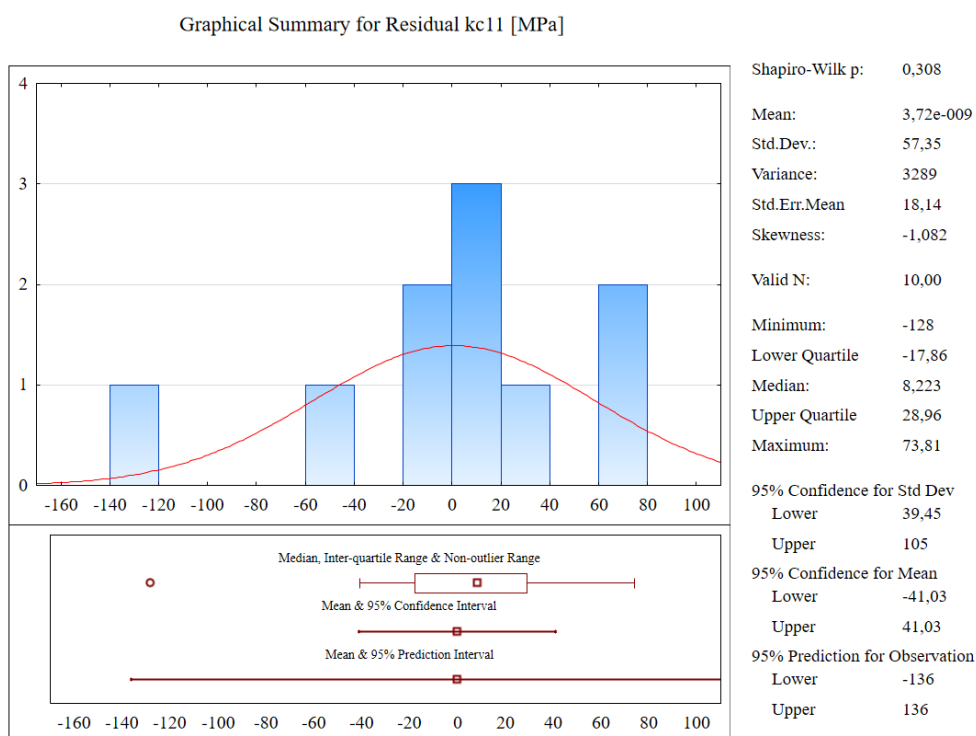
Z odhadu parametrů modelu lze sestavit predikovanou statistickou rovnicí v kódovacím tvaru (viz Obrázek 13).

$$y = 2927.357 - 370.556 \cdot x_1 - 98.462 \cdot x_2 - 127.105 \cdot x_1^2 \quad (19)$$

Pro sestavení vhodné predikční rovnice závislosti je potřeba převést parametry zpět z kódovacího měřítka dle (vztah 14). Pomocí predikované statistické rovnice (vztah 19) a převodového vztahu z kódovacího měřítka (vztah 14) dochází ke vzniku nové rovnice, která popisuje zkoumanou závislost řezného odporu k_c (vztah 20).

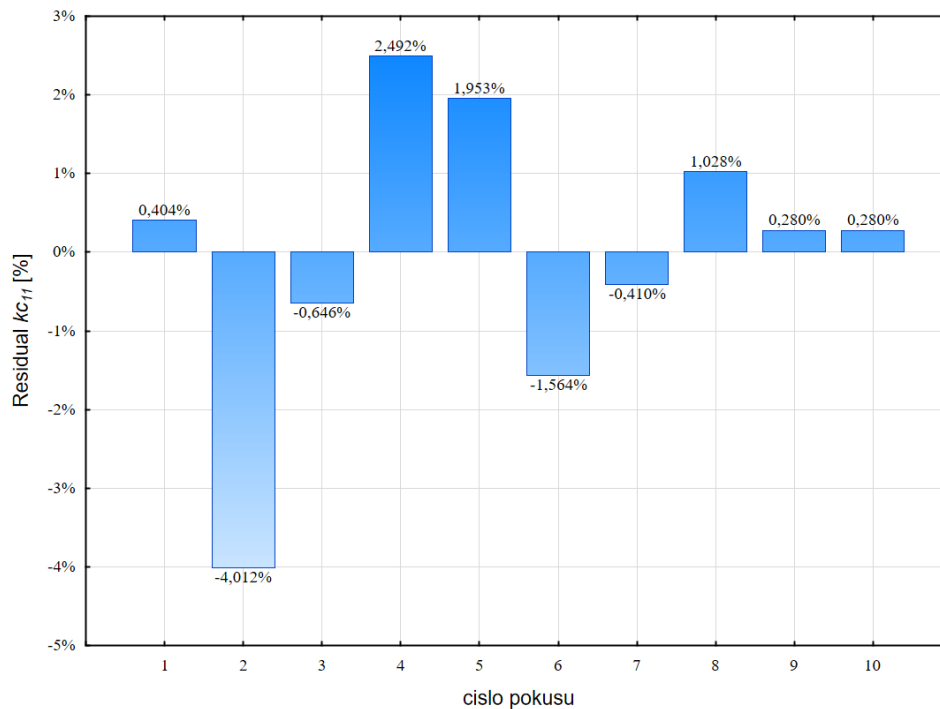
$$k_c = 4166.917 - 9955.537 \cdot f - 14.066 \cdot \gamma_o + 16413.352 \cdot f^2 \quad (20)$$

Aby byla analýza označena za komplexnější a byla potvrzena správnost a vhodnost daného modelu, je nezbytné ověřit rezidua (Graf 19), tedy samotné rozdíly mezi skutečně naměřenými a předpovídanými hodnotami vypočítaný predikčním modelem. Především z hlediska rozložení a autokorelace. Rezidua vykazují střední hodnotu nula a zároveň lze na základě Shapiro-Wilksova testu říci, že mají Gaussovo normální rozdělení, a proto lze regresní model (vztah 20) považovat za numericky i statisticky správný.



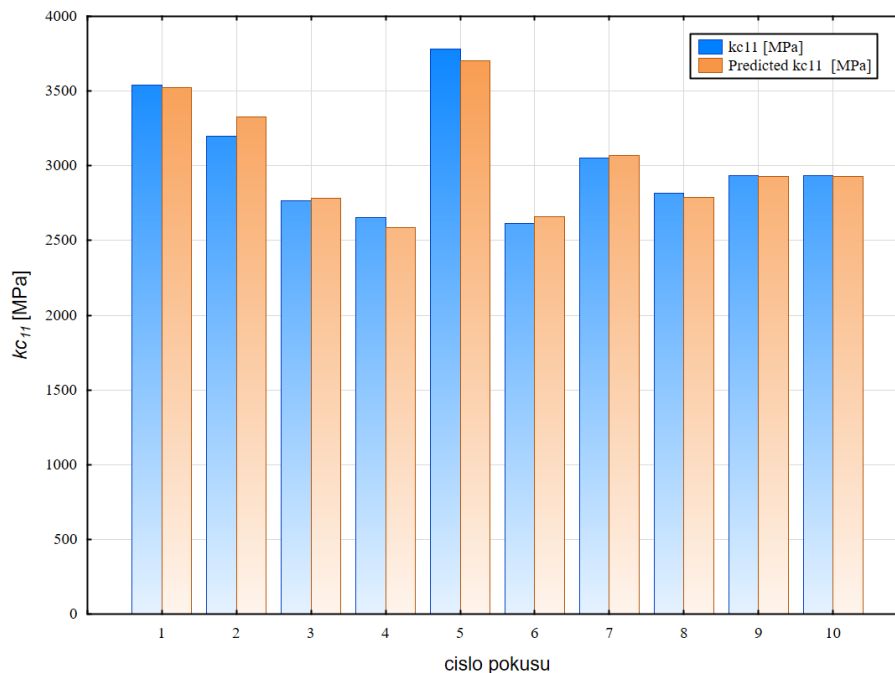
Graf 19 – Grafická analýza reziduí řezného odporu

Procentuální vyjádření reziduí jsou viděna na (Graf 20), kde pro jednotlivé pokusy je přiřazena maximální možná odchylka vypočítané hodnoty od naměřené. Toto grafické vyjádření poukazuje jen velice malou odchylku výsledků od naměřených, čímž je opět utvrzena správnost predikovaného modelu.



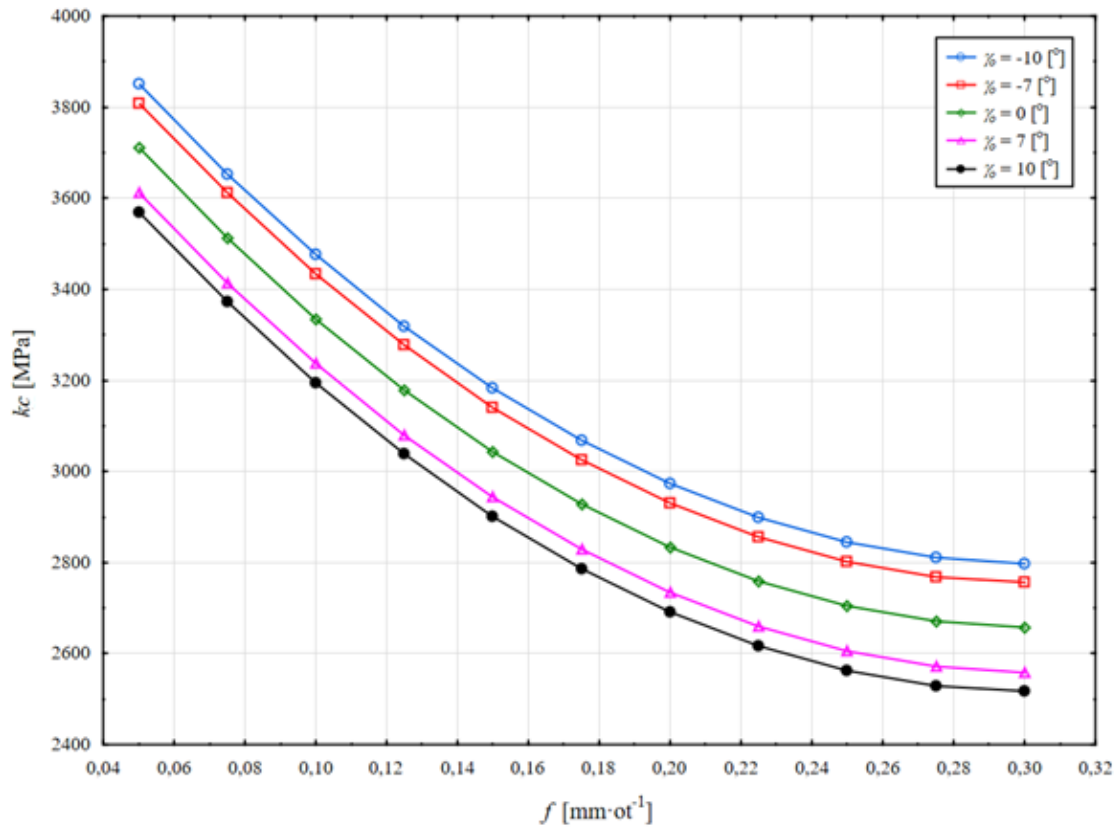
Graf 20 – Rezidua pro jednotlivé pokusy plánu experimentu k_c

Graficky vyjádřená komparace mezi naměřenými (modrá barva) a vypočtenými hodnotami k_c (oranžová barva) (Graf 21), které byly zjištěny pomocí výše vytvořeného modelu a dle uvedených specifik, utvrdili správnost předloženého predikovaného modelu.



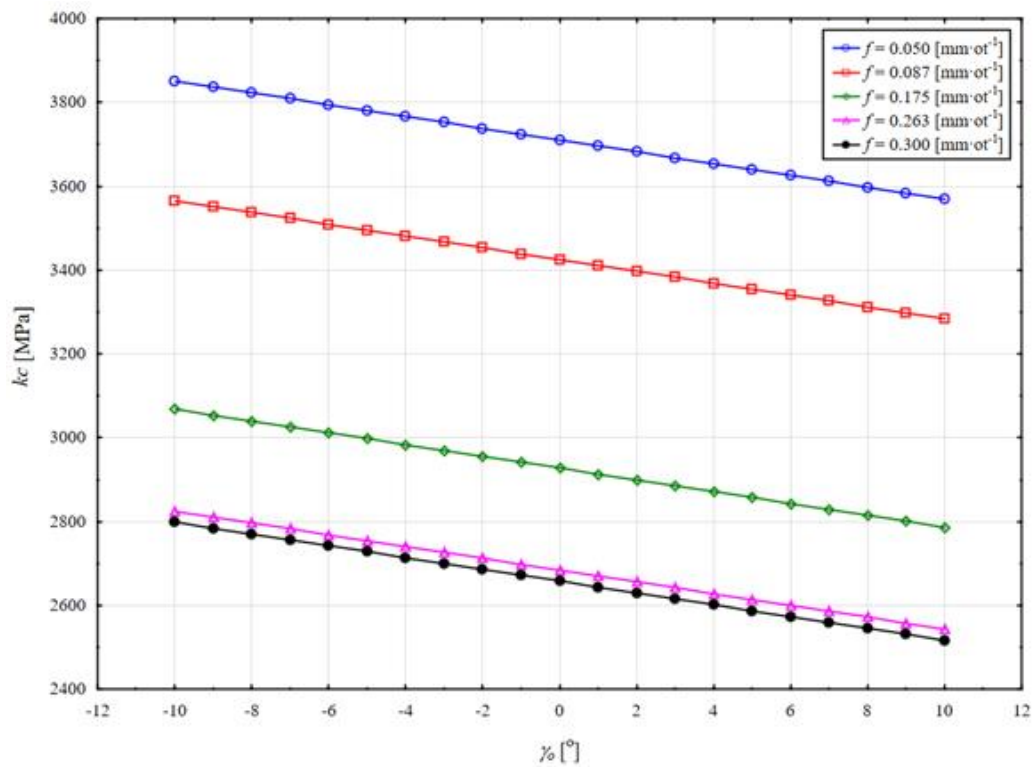
Graf 21 – Porovnání naměřených a zjištěných hodnot k_c [MPa]

Na základě regresního modelu lze stanovit závislost námi zkoumanými veličinami. Tato závislost lze nejlépe vystihnout graficky, tedy pomocí grafu.



Graf 22 – Závislost řezného odporu na úhlu čela

Jednotlivé závislosti řezného odporu mohou být viděny na (Graf 22) a (Graf 23).



Graf 23 – Závislost řezného odporu na posuvu

7. Hodnocení dat

Pro to, aby byla data hodnocena musí být nejdříve naměřena. Naměření i sbírání dat bylo zajištěno pomocí experimentálního měření a snímacího zařízení ve formě dynamometru Kistler 9119AA2, které převádělo data ze stroje do SW Dynoware. Pomocí SW Dynoware byly následně záznamy jednotlivých měření zaznamenány v potřebné délce, systematicky uloženy a řazeny do složek pokusů, které odpovídali danému měření dle plánu experimentu.

Další na řadě bylo samotné vyhodnocení experimentu jako takového. K tomuto vyhodnocení jsme použili jako vhodný nástroj statistiku – konkrétně metodu DoE (Design of Experiment), která nejen specifikovala průběh a plán testování, nýbrž také kvalitativně a co s nejmenším počtem pokusů provedla hodnocení celého procesu obrábění. Metoda je velice oblíbená právě z hlediska, že je velice účinná – pro kvalitativní výsledky potřebujeme minimální množství pokusu, což jak z ekonomického, tak z časového hlediska žádoucí.

Metoda DoE nejprve vytvořila základní statistiku deskriptivního souboru, která slouží jako výchozí bod pro další výpočty. V první řadě muselo být zjištěno, zdali naměřená data vyhovují Gaussovu normálnímu rozdělení, tedy pomocí Shapiro-Wilkovo testu bylo zjištěno, zdali pokusy dosáhnou hodnotu větší než $p > 0,05 \Rightarrow$ pokud by tomu tak nebylo, tak byly nahrazeny mediánem (tedy střední hodnotou). Následně byly podrobeny Grubsovo testu, aby se odstranili hrubé chyby. Mann-Whitneyův test slouží k zjištění případné difference a pomocí komparace vyhodnotí, zda-li se jednalo pouze o náhodu nebo stálou chybu měření. Model byl poté vyhodnocen a ilustrován procentuální hodnotou, která označuje jeho věrohodnost. Metoda ANOVA nám zajišťuje tvrzení, že v modelu je minimálně jeden člen, který má vliv na zkoumané veličiny. Poté se zkoumali rezidua a jejich vliv uvnitř skupin, zda-li jsou v rozumných rozsazích. Poté se přešlo k odhadu parametrů modelu, které poukazují důležitosti jednotlivých faktorů. Poté díky tomuto může být sestavená predikována statistická rovnice v kódovacím tvaru. Tento tvar se poté znovu převrátí spolu z kódovací měřítka a místo obecných proměnných tam již jsou dosazeny zkoumané veličiny a k nim je přiřazena jistá důležitost.

Výsledkem jsou tedy tyto rovnice – první rovnice bude statisticky predikována a druhá rovnice je sestavena s důležitostí faktorů vstupujících do experimentu.

Pro F_c :

$$y = 512.5 + 204.6172 \cdot x_1 - 14.480 \cdot x_2 - 16.500 \cdot x_2^2$$
$$F_c = 40.339 + 3070.931 \cdot f - 2130.695 \cdot f^2 - 2.069 \cdot \gamma_o$$

kde:

- x_1 (posuv f) ovlivňuje řeznou sílu z 62,698 %
- x_2 (úhel čela γ_o) ovlivňuje řeznou sílu z 32,774 % a zbylá procenta tvoří jejich vzájemná interakce

Pro k_c :

$$y = 2927.357 - 370.556 \cdot x_1 - 98.462 \cdot x_2 - 127.105 \cdot x_1^2$$
$$k_c = 4166.917 - 9955.537 \cdot f - 14.066 \cdot \gamma_o + 16413.352 \cdot f^2$$

kde:

- x_1 (posuv f) ovlivňuje řezný odpor z 79,539 %
- x_2 (úhel čela γ_o) ovlivňuje řezný odpor z 13,181 %, a zbylá procenta tvoří jejich vzájemná interakce

Je ovšem nutno podotknout, že tyto závislosti platí pouze ve zkoumaném intervalu hodnot – tj. v rozsahu posuvu $f < 0,05; 0,3 >$ ot/min a v rozsahu velikosti úhlu čela $\gamma_o < -10; +10 >$ °. V těchto intervalech lze velice přesně stanovit hodnoty hlavní složky řezné síly a řezného odporu.

Zjištěný graf řezného odporu má predikovaný průběh, který se shoduje s teorií obrábění. Diference je zde pozorována z pohledu velikosti úhlu čela. Je logické, že negativní úhel čela bude mít větší řezný odpor, protože při negativní geometrii vzniká větší síla než je tomu u pozitivní geometrie, která způsobuje menší řezný odpor. Tato predikce je správná a při použití logické úvahy dle (Graf 10) je vidět, že pozitivní břitová destička má vyšší trvanlivost, avšak má subtilnější řezný klín, tudíž je křehčí.

Zjištěný graf hlavní složky řezné síly má také predikovaný průběh, který se shoduje s teorií obrábění. Rovnice, která tento problém popisuje (vztah 1) definuje, že při zvětšení úhlu čela γ o 1° způsobí zmenšení řezné síly o 1 %. Toto však není úplně pravda. Z experimentálního měření pro materiál 15 142.6 bylo zjištěno, že se tato hodnota s přibývajícím úhlem čela změní o 2 %, tedy se 100% nárůstem hodnoty.

8. Závěr

Na základě zadání bakalářské práce byla zpracována rešerše, která byla zaměřena především na práce, které zkoumají proces obrábění, především však vliv úhlu čela. Velká pozornost zde byla věnována především složce hlavní řezné síly, řezného odporu, úhlu čela a posuvu a jejich vzájemné interakci. Na základě poznatků z teorie obrábění a vyhodnocení rešerše byl následně navržen experiment, který by teze uvedené v rešerši experimentálně ověřil.

Hlavní úkol této práce představuje část, která se věnuje experimentu a jeho celkovému vyhodnocení. Pro experiment byly zvoleny takové parametry, které vhodně popisují model řezných sil, ale zároveň je možné je provést na stroji EMCO E25. Realizace experimentu proběhla na katedře technologie obrábění ZČU v Plzni v laboratoři, která disponuje nezbytnou technikou pro provedení experimentálního měření. VBD byly speciálně nabroušeny na požadované úhly čela a následně byly použity při experimentálním měření, jehož cílem bylo stanovení hlavní složky řezné síly.

Pomocí změřených hodnot řezné síly u všech měřených testů byl vytvořen statistický model popisující velikost řezné síly a její závislosti na posuvu a úhlu čela.

Na základě naměřené velikosti řezné síly byl následně vypočítán řezný odpor, který byl taktéž podroben statistické analýze a byl vytvořen i model, který tento průběh závislosti popisuje.

Poslední část práce se věnuje porovnání vyhodnocených faktorů s předpoklady, které vycházeli z teorie. Získané výsledky sice korespondují s teorií obrábění, avšak prokazují, že koeficient vlivu úhlu čela není v případě materiálu ČSN 15 142.6 platný. Na základě vyhodnocení experimentu byl pro tento materiál stanoven koeficient nový, který se od obecně udávaného koeficientu liší o celých 100 %. Při změně úhlu čela o 1° se nezmění měrný řezný odpor o 1 %, ale o 2 %.

Tato práce slouží jako základ pro následný výzkum, který se bude chtít interpretovat pro obecné použití – tedy matematické modely se vytvoří na více typů materiálu, větší množství ovlivňujících faktorů při obrábění, a to vše při větších rozsazích intervalů, než je tomu v této práci. Cílem v budoucnu je vytvořit takový matematický model, který by byl vhodný pro praktické využití, a to z hlediska zpřesnění výpočtu podložené experimentálním měření.

9. Citovaná literatura

- [1] *Příručka pro technology - Jak je to s řeznými silami?* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami>
- [2] *Řezné podmínky soustružení* [online]. In: . [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce8.htm>
- [3] *Výpočty řezných podmínek a posuvů-vzorečky* [online]. MIKON TOOLS s.r.o [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.mikon-tools.cz/vypocety-reznach-podminek-a-posuvu-vzorecky>
- [4] NETOLICKÁ, Eliška. *Parametry řezného procesu*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT.
- [5] KNAPP, Jiří. *Experimentální měření řezných sil pro zjišťování řezného odporu*. Plzeň, 2022. Diplomová práce. ZČU.
- [6] SPURNÝ, Martin. *Průřez odebírané vrstvy materiálu a jeho vliv na měrný řezný odpor*. Ostrava, 2016. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [7] KOCCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno, 2003. CERM.
- [8] BRYCHTA, Josef, Čep ROBERT, Nováková JANA a Petřkovská LENKA. *Technologie II - 1.díl*. Ostrava, 2007. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [9] ZLÁMAL, Tomáš. *Příspěvek k obrábění Ni superslitiny a hodnocení řezivosti vybraných řezných materiálů*. Ostrava, 2015. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [10] MÁDL, Jan, Jindřich KAFKA, Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK. *Technologie obrábění: 1. díl*. Praha, 2000. ČVUT.
- [11] *DOE: Plánování experimentů - Průmyslové inženýrství* [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.prumysloveinzenyrstvi.cz/doe-planovani-experimentu/>
- [12] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha, 1989. ČVUT.
- [13] GAZDA, Jaromír. *Teorie obrábění: Řezné síly při obrábění. 1. vyd.* Liberec, 1993. VŠST Liberec.
- [14] ZEMAN, Petr. *Měření užitečného výkonu při podélném soustružení*. Liberec, 2018. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [15] *What is Rake Angle in Cutting Tool? Names, Effects, Functions & Values* [online]. [cit. 2023-11-10]. Dostupné z: <http://www.minaprem.com/machining/cutter/geometry/what-is-rake-angle-in-cutting-tool-names-effects-functions-values/>
- [16] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava, 2011. Učební text. Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava.
- [17] JERSÁK, Jan. *TEPLO A TEPLoty PŘI OBRÁBĚNÍ OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTR.: Technologie III-OBRÁBĚNÍ* [online]. [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/VY_03_36-

- Teplo%20a%20teploty%20p%C5%99i%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD,%20op
ot%C5%99eben%C3%AD%20%C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF
_MZ_6%20%20.pdf
- [18] SANGWAN, Kuldip a Navneet KHANNA. *Interrupted machining analysis for Ti6Al4V and Ti5553 titanium alloys using physical vapor deposition (PVD)-coated carbide inserts*. Ahmedabad, 2013. Institute of Infrastructure Technology Research And Management.
- [19] SANGWAN, Kuldip Singh. *Study on Tool Life and its Failure Mechanisms*. Singapur, 2015. Kamala Institute of Technology and Science.
- [20] *FUNCTION OF TOOL FEATURES FOR TURNING: RAKE ANGLE* [online]. [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: http://www.mmci-carbide.co.in/technical_information/tec_turning_tools/tec_hsk-t/tec_hsk-t_technical/tec_turning_rake_angle
- [21] MORÁVKA, J., B. MAROŠ a K. MICHÁLEK. *Vliv neortogonality plánu experimentu na statistickou korektnost modelu*. VUT Brno, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Třinec, 2000.
- [22] MAROŠ, B. a T. TRÁVNÍČEK. *Plánování experimentu: In Sborník 5th International Conference Aplimat 2006*. Bratislava, 2006. Ústav matematiky FSI STU Bratislava.
- [23] MICHÁLEK, Jiří. *Navrhování a vyhodnocování experimentů (DOE) – Učební texty k semináři* [online]. Brno: Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií, 2010 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_05_1012_2.PDF
- [24] SKLENÍČKA, Josef. *Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení šroubového vrtáku*. Plzeň, 2017. Disertační práce. ZČU.
- [25] GOMBÁR, Miroslav. *Plánovanie experimentov (DoE) ako nástroj efektívneho výskumu technologických procesov*. Prešov, 2017. Podklady k přednáškám.
- [26] MAREK, Josef. *Experimentální ověření závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané*. Plzeň, 2018. Diplomová práce. ZČU.
- [27] *CNC Drehzentrum Emcoturn E25: EMCO Werkzeugmaschinen Drehmaschinen Fräsmaschinen zum CNC Drehen und Fräsen* [online]. [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.emco-world.com/de/produkte/industrie/drehen/emcoturn/emcoturn-e25.html>
- [28] *ISCAR* [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5506013&fnum=1191&mapp=BO&app=0&GFSTYP=M&lang=WZ>
- [29] *Dynamometr KISTLER 9119AA2/* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.kto.zcu.cz/cs/Department/Utilities/Praktika/>
- [30] *Mikroskop KEYENCE VHX 6000* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.kto.zcu.cz/cs/Department/Utilities/Praktika/>
- [31] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Sadílek MAREK, Petřkovská LENKA a Nováková JANA. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava, 2007. Dostupné také z:

- <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978–80–248–1505–3. VŠB-Technická univerzita Ostrava.
- [32] GOMBÁR, Miroslav. *Design of Experiments: Spracovanie a vyhodnotenie experimentálnich dát*. Plzeň, 2017. Učební text. ZČU.
- [33] TOŠENOVSKÝ, Josef. *Plánování experimentů: učební text*. Ostrava, 2012. Dostupné také z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/DOE/Planovani%20experimentu.pdf>. VŠB-TUO.
- [34] *Kleštinový upínač Manok od společnosti Heinbuch* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.hainbuch.com/en/products/stationary-clamping-devices/stationary-chucks/manual-stationary-chuck-manok/>
- [35] *Měřicí stroj ANCA MX7* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: https://machines.anca.com/Anca.CNC/media/Images/Brochures/ANCA_MXlinear_Brochure_2019.pdf?ext=.pdf
- [36] *Obráběcí stroj DMG Mori DMU 40 eVo linear* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=1442>