

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Porovnání vlivu geometrie frézovacího nástroje na jeho životnost

Autor: **Bc. Jiří HOLADA**

Vedoucí práce: **Ing. Jiří Vyšata, Ph.D.**

Akademický rok 2014/2015

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákon o vysokých školách č. 111/1998 Sb. Je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, bez nichž by tato práce nemohla vzniknout, za jejich odborné informace a cenné rady. Zejména bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Jiřímu Vyšatovi Ph.D. za vedení, rady a trpělivost.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | | | |
|----------------------|--|----------------------|-------------------------|
| AUTOR | Příjmení Holada | Jméno Jiří | |
| STUDIJNÍ OBOR | Strojírenská technologie - technologie obrábění | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Vyšata, Ph.D. | Jméno Jiří | |
| PRACOVISŤE | ZČU - FST - KTO | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Porovnání vlivu geometrie frézovacího nástroje na jeho životnost | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KTO | ROK ODEVZD. | 2015 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| CELKEM | 72 | TEXTOVÁ ČÁST | 56 | GRAFICKÁ ČÁST | 16 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

| | |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p style="text-align: center;">ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p> | <p>Tato práce se zabývá problematikou špičky nástroje a její vliv na životnost nástroje. Cílem je porovnat dva druhy monolitních nástrojů ze slinutého karbidu z hlediska jejich trvanlivosti. Odlišují se od sebe pouze změnou úpravy špičky. Nástroj A je bez úpravy, na nástroji B je vytvořené sražení 0,6 mm x 45°. Stanoví se hypotéza, že fréza se sražením bude vykazovat vyšší trvanlivost. Pro ověření hypotézy se provede zkouška trvanlivosti a výsledky poslouží k dalšímu vývoji nástrojů.</p> |
| <p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> | <p style="text-align: center;">trvanlivost, monolitní frézy, úprava špičky nástroje, opotřebení, čelně-obvodové frézování</p> |

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

| | | | |
|--------------------------|--|----------------------------|----------------------------|
| AUTHOR | Surname Holada | Name Jiří | |
| FIELD OF STUDY | Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Vyšata, Ph.D. | Name Jiří | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KTO | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Comparison of the influence the geometry of the milling tool on his service life | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | Machining Technology | SUBMITTED IN | 2015 |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and aq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| TOTALLY | 72 | TEXT PART | 56 | GRAPHICAL PART | 16 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|---|---|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | This thesis deals with the tool tip and its influence on tool life. The aim is to compare the two types of monolithic carbide endmills in terms of their durability. They differ from each other only by changing the adjustment tool tip. The tool A is without modification, on the tool B is formed chamfer 0.6 mm x 45 °. Establishes the hypothesis that the chamfer endmill will show greater durability. Carry out the test dureability and the results will be used to further develop the tools. |
| KEY WORDS | durability, carbide end mill, chamfer tool tip, wear, frontal-countour milling |

OBSAH:

| | |
|---|----|
| Obsah | 6 |
| Přehled značek veličin, symbolů a zkratek | 8 |
| 1 Úvod [21,15] | 10 |
| 1.1 Cíle diplomové práce | 11 |
| 2 Rozbor současného stavu | 11 |
| 2.1 Otupování břitu [1, 2, 3] | 12 |
| 2.2 Formy a kriteria opotřebení [1, 2, 3]..... | 13 |
| 2.3 Vznik tepla při řezání [1, 2, 3] | 15 |
| 2.4 Trvanlivost a životnost [1, 2, 3, 10]..... | 16 |
| 2.4.1 Dlouhodobá zkouška trvanlivosti [1, 2, 3] | 17 |
| 2.4.2 Krátkodobá zkouška trvanlivosti [2] | 19 |
| 2.4.3 Akustická emise [18]..... | 21 |
| 2.5 Příklady stopkových nástrojů [9, 4, 21]..... | 21 |
| 2.5.1 Monolitní stopková fréza s ostrým rohem [9] | 21 |
| 2.5.2 Monolitní stopková fréza s rádiusem [4]..... | 22 |
| 2.5.3 Monolitní stopková fréza se sražením [20] | 23 |
| 2.6 Představení hypotézy | 23 |
| 2.6.1 Úvahy nad jednotlivými možnými faktory..... | 23 |
| 2.6.2 Souhrnná hypotéza možných vlivů u nástroje se sražením špičky.... | 27 |
| 3 realizace experimentu..... | 27 |
| 3.1 Plánování experimentu [8]..... | 27 |
| 3.1.1 Hlavní faktory..... | 28 |
| 3.1.2 Blokové faktory | 28 |
| 3.1.3 Vliv času..... | 28 |
| 3.1.4 Stanovení doby nástroje v řezu..... | 29 |
| 3.1.5 Měření opotřebení | 31 |
| 3.2 Popis uspořádání experimentu | 32 |
| 3.2.1 Nástroje a obráběný materiál..... | 32 |
| 3.2.2 Strategie obrábění | 35 |
| 3.2.3 Volba řezných podmínek pro dlouhodobou zkoušku [19] | 36 |
| 3.2.4 Uspořádání experimentu v halové laboratoři | 38 |
| 3.3 Zpráva o průběhu experimentu | 39 |
| 4 Vyhodnocení výsledků experimentu včetně porovnání užitečných vlastností testovaných nástrojů | 41 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Dlouhodobá zkouška nástroje typu A | 42 |
| 4.1.1 | Nástroj číslo 1 | 42 |
| 4.1.2 | Nástroj číslo 2 | 44 |
| 4.1.3 | Nástroj číslo 3 | 46 |
| 4.2 | Dlouhodobá zkouška nástroje typu B | 48 |
| 4.2.1 | Nástroj číslo 1 | 48 |
| 4.2.2 | Nástroj číslo 2 | 50 |
| 4.2.3 | Nástroj číslo 3 | 52 |
| 4.3 | Sumarizace a vyhodnocení výsledků měření | 54 |
| 4.3.1 | Statistické zhodnocení [11, 12, 13] | 57 |
| 5 | Technicko-ekonomické zhodnocení | 58 |
| 6 | Závěr | 60 |
| 7 | Seznam použité literatury | 62 |
| | Seznam obrázků | 64 |
| | Seznam grafů | 66 |
| 8 | Přílohy | 67 |
| 8.1 | Použité stroje a zařízení [5] | 67 |
| 8.1.1 | CNC frézovací centrum MCV 750A | 67 |
| 8.1.2 | Rotační dynamometr KISTLER 9123C [2, 5, 17] | 68 |
| 8.1.3 | Optický mikroskop Multicheck PC500 [16] | 70 |
| 8.2 | Tabulka výpočtů | 71 |

PŘEHLED ZNAČEK VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Značka veličiny, symbol | Jednotka | Popis |
|----------------------------|----------------|---|
| a_p | [mm] | hloubka odřezávané vrstvy |
| a_e | [mm] | šířka odřezávané vrstvy |
| a_{max} | [mm] | maximální tloušťka třísky |
| D | [mm] | průměr nástroje |
| VB | [μ m] | opotřebení na hřbetě |
| KT | [μ m] | opotřebení na čele |
| VB _{stř} | [μ m] | střední hodnota opotřebení na hřbetě |
| VB _B | [μ m] | opotřebení na hřbetě bříty |
| Q | [J] | teplo |
| v_c | [m/min] | řezná rychlost |
| T | [min] | trvanlivost |
| c_{Tv} | [-] | konstanta Taylorova vztahu |
| I | [μ m/min] | intenzita opotřebení |
| Δ VB | [μ m] | přírůstek opotřebení |
| HRC | [-] | tvrdost ve stupních Rockwella |
| VB _{krit} | [μ m] | kriteriální opotřebení na hřbetě |
| f_z | [mm/zub] | posuv na zub |
| n | [ot/min] | otáčky |
| v_f | [mm/min] | posuvová rychlost |
| F_x | [N] | složka řezné síly vose x |
| F_y | [N] | složka řezné síly vose y |
| F_z | [N] | složka řezné síly vose z |
| Δ t | [min] | přírůstek času řezání |
| T _{krit} | [min] | trvanlivost při kriteriálním opotřebení |

| | | |
|-------------------|--------------------|---------------------------------------|
| Q | [cm ³] | celkové množství odebraného materiálu |
| t _{celk} | [min] | celkový čas obrábění |
| Q _{krit} | [cm ³] | množství odebraného materiálu |
| VB _{max} | [μm] | maximální opotřebení na hřbetě |
| s | [m] | ujetá dráha nástroje |
| z | [-] | počet břitů |
| m | [-] | směrnice Taylorovi přímky |

| Zkratka | Popis |
|----------------|------------------------------|
| AlTiN | hliník-titan nitrid |
| RO | rychlořezná ocel |
| SK | slinutý karbid |
| ŘK | řezná keramika |
| ČSN | česká státní norma |
| VBD | vyměnitelná břitová destička |
| ISO | mezinárodní norma |
| HSC | vysokorychlostní obrábění |
| HPC | vysokovýkonné obrábění |
| C | uhlík |
| Mn | mangan |
| Si | křemík |
| P | fosfor |
| S | síra |
| Cr | chrom |
| Cu | měď |
| Ni | nikl |
| H ₀ | nulová hypotéza |

1 ÚVOD [21,15]

Ve strojírenské technologii zaujímá třískové obrábění významné místo. Při výrobě strojní součástí činí podíl pracnosti strojního obrábění přibližně 30 – 40 %. Většina strojních součástí se vyrábí třískovým obráběním. Na technologii třískového obrábění jsou kladeny vysoké kvalitativní parametry. Zvyšování se výrazně promítá do technologie obrábění. Zvyšující se požadavky na kvalitu vyráběných součástí mají zpravidla negativní dopad na ekonomickou stránku technologie obrábění. Za účelem snižování výrobních nákladů je důležité optimalizovat proces obrábění a racionalizovat výrobu vůbec. Racionalizace by se měla provádět jak na sledu technologických operací, tak na volbě vhodného nástroje. Pokud se provede vhodná racionalizace daného uspořádání, je možné optimalizovat řezné a další pracovní podmínky.

Proces obrábění probíhá v soustavě stroj – nástroj – obrobek – přípravek. V dnešní době se stále zdokonalují technologie. Snahou výrobců strojů je dosahování co nejvyšších parametrů, jako jsou otáčky a výkon vřetena, posuvová rychlost, tuhost a přesnost polohování. Obrobky, které se dostávají do výroby, jsou navrhovány s daleko složitějším tvarem než v dřívější době, protože výrobu takovýchto součástí umožňuje technologie v dnešní době dostupná a stále stoupající technologičnost konstrukce. I volba materiálu jde průběžně dopředu. Požívá se nových slitin hliníku, které dosahují pevnosti oceli. Dále se používá vysokopevnostních a žárupevných slitin. Jelikož je takovýto trend ve strojírenské technologii, musí se pro tyto stroje a obrobky vyvíjet vhodné nástroje. U nástrojů se optimalizuje řezný materiál, případně depozice tenké vrstvy a vhodná volba geometrie nástroje. I když činí náklady na nástroje ve výrobě dané součásti ne příliš vysoké procento nákladů viz. Obr. 1, je důležité celý proces obrábění zracionalizovat tak, abychom mohli posunout nové řezné podmínky na optimální hodnoty. Při optimalizaci se hledá vhodný poměr mezi trvanlivostí nástroje a výkonností. Při takto najitých podmínkách se docílí optimálního řešení z hlediska



Obr. 1 Rozložení nákladů obrábění [15]

nástroje, aby se dosáhl větší životnosti nástroje a tím i většímu objemu odebraného materiálu a tím následně snížení nákladů na řezný materiál. V této věci má svůj podíl otázka geometrie břitu. Aby bylo možno dosahovat vyšších výkonů obrábění, hledají se takové geometrie břitu, které k tomuto zvýšení přispějí. Jedna z možností jak geometrie nástroje může přispět ke zvýšení výkonu obrábění, je úpravou špičky u těch nástrojů, kde na špičce dochází k nadměrnému opotřebení.

Tato práce se bude zabývat měřením a porovnáním životnosti dvou frézovacích nástrojů. Jedná se o stopkové válcově čelní frézovací nástroje průměru 12 mm sloužící i jako drážkovací frézy. Materiál nástrojů byl zvolen slinutý karbid. Povrch je opatřen deponovanou vrstvou TiAlN. Těmito nástroji se provede experiment, při kterém se bude zjišťovat životnost nástrojů. První fréza je považována za nástroj s ostrou špičkou, i když má skutečné sražení $0,15 \text{ mm} \times 45^\circ$. Na druhé fréze se vybrousilo sražení $0,6 \text{ mm} \times 45^\circ$. Tato úprava je realizovaná ve firmě Hofmeister, která s univerzitou úzce spolupracuje.

1.1 Cíle diplomové práce

Při některých frézovacích operacích jako je drážkování či hrubování se ukazoval zajímavý jev, kdy se při obrábění stopkovou frézou zdálo, že nástroje s upravenou špičkou vykazují větší trvanlivost než nástroje bez této úpravy. Úpravou se myslí její sražení nebo vytvoření rádiusu. O jevu se dověděl výrobce nástrojů firma Hofmeister a projevil zájem prozkoumat, zda to tak skutečně je a zda by podobná úprava znamenala vyšší trvanlivost nebo zda to byly pouze nahodilé jevy. Cílem práce je tedy porovnání dvou druhů monolitních nástrojů z hlediska jejich trvanlivosti. Nástroje se od sebe liší pouze změnou úpravy špiček břitů nástroje. Hlavním úkolem je tedy ověření hypotézy, že fréza se sražením na špičce bude vykazovat vyšší trvanlivost a lepší stabilitu řezu v porovnání s frézovacími nástroji bez takové úpravy. Dříve však je nutné tuto pracovní hypotézu formulovat tak jasně a exaktně, aby bylo možné ji náležitě vyhodnotit. Dosažené výsledky projdou technicko-ekonomickým zhodnocením.

Vzhledem ke skutečnosti, že při obrábění konstrukčních uhlíkových ocelí stopkovými nástroji docházelo k degradaci špičky a při porovnání s nástroji s úpravou geometrie špičky, jež vykazovaly vyšší trvanlivost, budou vyrobeny dva nástroje odlišující se od sebe velikostí sražení na špičce. Podstata pokusu bude tkvět v zopakování stejného druhu obrábění s tím, že se provede testování se třemi nástroji bez úpravy a se třemi nástroji s úpravou. Ostatní faktory se budou blokovat na konstantních hodnotách. Omezený počet nástrojů bude mít i omezenou vypovídající hodnotu. Lze tedy vzít tento experiment jako zkoušku, která by mohla být první fází pro další výzkum v této problematice.

2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU

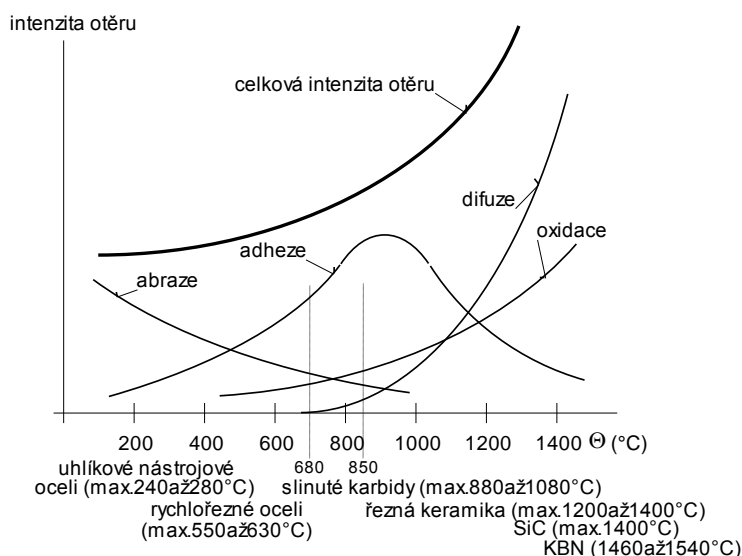
Experiment, který má ověřit, zda pozorované jevy byly jen náhodné, anebo zda jsou skutečně systematické a umožní zvýšení životnosti nástroje vhodnou úpravou jeho špičky, se dotýká tematiky opotřebením břitů nástroje. Ta je již náležitě prozkoumána a její závěry jsou publikovány. Všechny výsledky dosavadních výzkumů je tedy možno vzít v úvahu při formulaci hypotézy, která by měla nějak vysvětlit možný vztah mezi trvanlivostí břitů a zmíněnou úpravou špičky. Proto bude vhodné v následujícím textu souhrnně uvést dosavadní teoretické poznatky dotýkající se tematiky otupování břitů a všech myslitelných faktorů, které proces mohou ovlivňovat. Na základě jejich zohlednění pak lze formulovat hypotézu, která by se měla experimentem ověřit nebo vyvrátit.

2.1 Otupování břitu [1, 2, 3]

Předmětem této práce je porovnání trvanlivosti dvou typů nástrojů. Tudiž je třeba stanovit, co se na břitu děje, a k tomu poslouží teorie týkající se otupování břitu vlivem fyzikálně-chemické podstaty opotřebení.

Opotřebení je složitý děj. Dochází při něm ke složitým fyzikálním a chemickým jevům, jejichž důsledkem mění břit nástroje svoje vlastnosti a tvar. Dochází k otupení a to závisí na mnoha faktorech, jako jsou fyzikální a mechanické vlastnosti nástrojového a obráběného materiálu, geometrie nástroje, řezné prostředí, pracovní podmínky, druh obráběcí operace). Během obrábění působí na proces mnoho odlišných fyzikálně-chemických jevů nazývaných mechanismy opotřebení. Základní mechanismy opotřebení jsou:

- Abraze- brusný otěr postihuje všechny druhy řezných materiálů. Je způsoben tvrdými mikročásticemi (karbidy, tvrdé nečistoty, nárůstek) přítomné v obrobku, které do měkčích partií materiálu břitu vytváří mikrorýhy.
- Adheze- tento typ otěru vzniká u řezných materiálů chemicky příbuzných s obráběným materiálem. Na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky dochází tak ke vzniku mikrosvarů, které jsou velmi tvrdé a způsobují vytrhávání částic.
- Difúze- k tomuto typu opotřebení dochází v případě, když teplota v místě řezu přesáhne disociační teplotu, která je vyšší než 680°C.
- Oxidace- dochází při něm k chemické reakci některých prvků při teplotě nad 700°C. Vytváří se za přítomnosti kyslíku oxidy na povrchu břitu a způsobují úbytek materiálu.
- Plastická deformace- dochází k ní při překročení limitních teplot daných pro příslušný řezný materiál a mechanického zatížení. Důsledek se projeví ve formě lavinovitého opotřebení břitu.
- Křehký lom- při překročení meze pevnosti v ohybu materiálu břitu dojde k vylovení menší nebo větší části ostří.



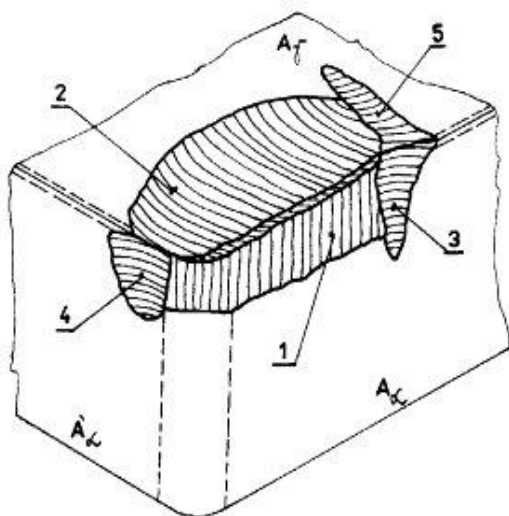
Obr. 2 Vliv teploty řezání na podíl jednotlivých typů opotřebení [1]

2.2 Formy a kriteria opotřebení [1, 2, 3]

Jelikož se trvanlivost bude stanovovat na základě měření opotřebení, slouží tato kapitola jako teoretický základ ke vzniku forem opotřebení. Na tomto základě se bude v experimentu vyhodnocovat míra opotřebení zkoušených nástrojů. Kriteria opotřebení jsou dána normou, a proto je důležité znát jejich označení a polohu.

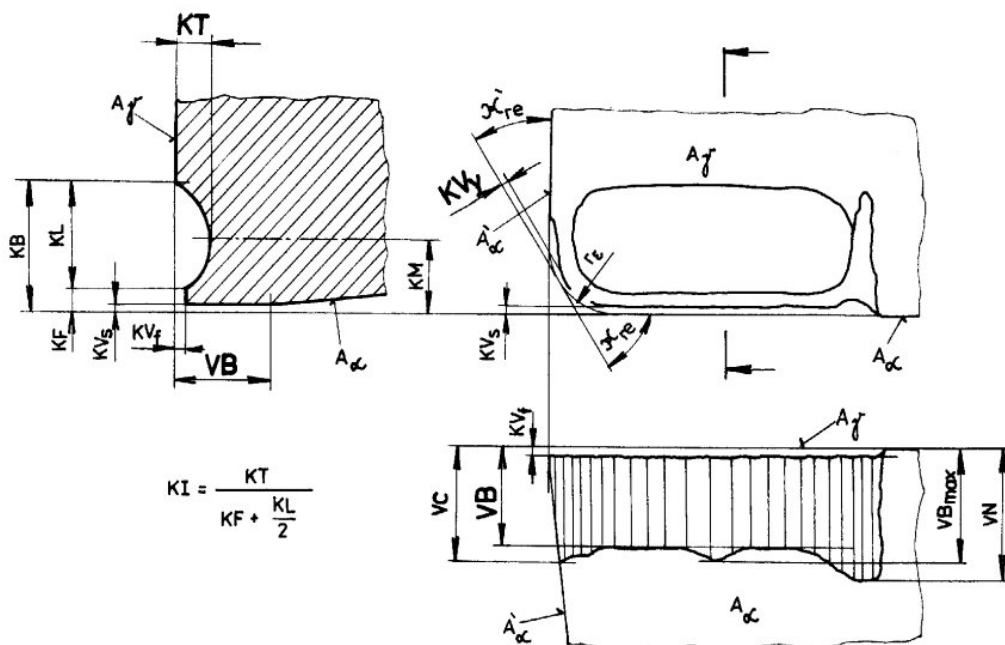
Při procesu řezání dochází k relativnímu pohybu mezi nástrojem a třískou a mezi nástroj a obrobek. Při relativním pohybu se do kontaktu dostává tříška s čelem nástroje a obrobek s hřbetní plochou nástroje. Při tomto pohybu a kontaktu se vyvíjí měrný tlak v řádech 10^3 - 10^4 MPa a teplota na funkčním povrchu v rozmezí 300-1200°C. Takovéto tepelné a silové namáhání má za následek opotřebení břitu nástroje. Opotřebení se projeví na břitu řezného nástroje ve formě změny jeho tvaru. Otupení je složitý děj, poněvadž závisí na mnoha faktorech (technologická operace, řezné podmínky, obráběný materiál, řezný materiál, řezné prostředí a geometrie nástroje). Způsoby otupení byly popsány v kapitole 2.1.

Každý druh řezného materiálu má své specifické formy opotřebení. Jiný tvar opotřebení nastává u RO, jiný u ŘK a jiný u SK. Pro své velké využití uvedených řezných materiálů jsou známy jejich formy opotřebení. Experiment využívá jako řezný materiál SK, proto Obr. 3 ukazuje typické tvary opotřebení, které na břitu nástroje mohou vzniknout. Na obrázku jsou jednotlivé formy opotřebení následovně označeny: 1 – plocha opotřebení na hřbetu, 2 - žlábek na čele, 3 – primární rýha na hřbetu, 4 – sekundární rýha na hřbetu, 5 – rýha na čele.



Obr. 3 Formy opotřebení na břitu nástroje ze SK [3]

Aby bylo možné vznikající formy otupení kvantifikovat, používají se kritéria opotřebení Obr. 4. Tyto kritéria určují místo a velikost opotřebení. Nejčastěji používaná kritéria jsou VB - šířka fazetky opotřebení na hřbetě řezného nástroje, KT - hloubka výmolu na čele nástroje. Kriterium KV_y - radiální opotřebení špičky, zjišťuje se hlavně u nástrojů, které se používají k dokončovacím operacím. Toto kritérium má za následek změnu rozměru obrobenej plochy, což je u dokončovací operace nežádoucí. Jednotlivá kritéria jsou určena normou ČSN ISO 3685. Tato norma se však nepatrně liší od místních zvyklostí. Norma označuje opotřebení na hřbetě jako VB_B , na obrázku je toto opotřebení označeno jako VB, dále se jedná o $VB_C=VC$, $VB_N=VN$, $VB_{Bmax}=VB_{max}$.



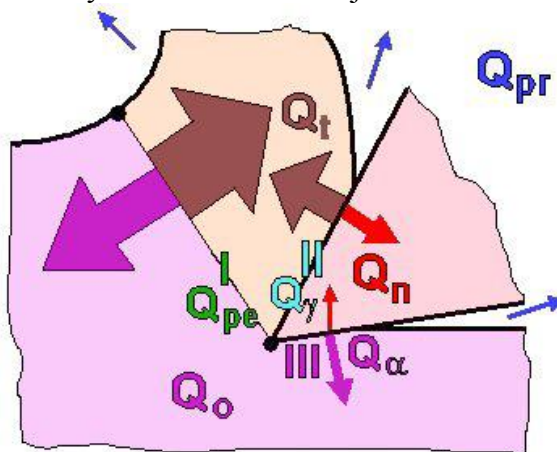
Obr. 4 Kritéria opotřebení břitu řezného nástroje [3]

2.3 Vznik tepla při řezání [1, 2, 3]

Teplu vznikající při obrábění ovlivňuje tvar a velikost plastických oblastí. Vlivem teploty se mění plasticita třísky, obrobku i nástroje. Změna teploty má nejenom vliv na otupování břitu, ale i na teplotní ovlivnění nástroje. Vysoká teplota a tlak je spouštěcí faktor pro vznik plastické deformace břitu. Teplu bude jeden z uvažovaných faktorů při stanovování hypotézy o vzniku opotřebení na špičce nástroje, proto je účelné připomenout teorie vzniku tepla při řezání.

Mechanická práce (výkon) vynaložená na proces řezání se více jak z 95% přemění v teplo (tepelný výkon). To tedy znamená, že teplo, které vznikne při rezném procesu odebráním určitého množství materiálu, se přibližně rovná práci spotřebované při daném rezném procesu. Toto teplo má výrazný vliv na proces řezání, protože:

- negativně ovlivňuje rezné vlastnosti nástroje
- způsobuje zpevňování a pěchování obráběného materiálu
- působí na mechanické vlastnosti obráběného materiálu
- ovlivňuje podmínky tření na čele nástroje i na hřbetě nástroje



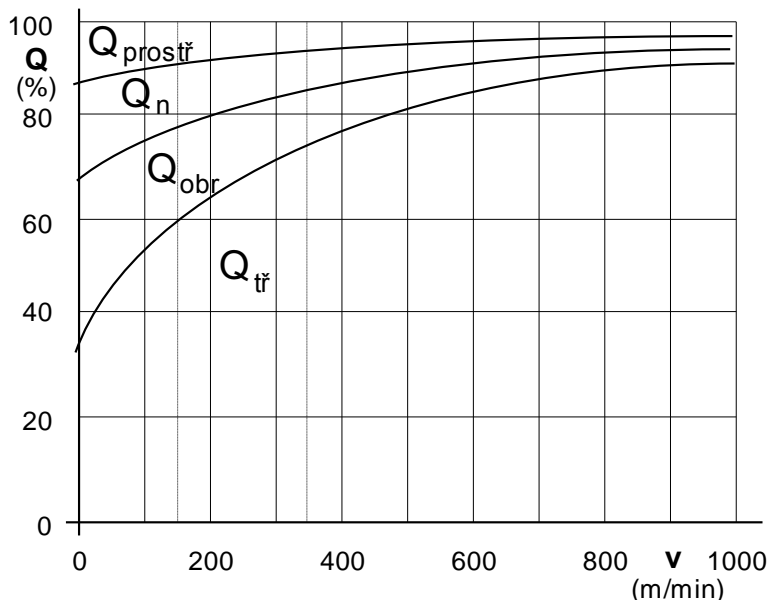
Obr. 5 Zdroj a odvod tepla [3]

Obr. 5 znázorňuje teplo vznikající při obrábění. Teplo vzniká v oblasti primární plastické deformace Q_{pe} důsledkem plastických a elastické deformace. V oblasti sekundární plastické deformace Q_γ vzniká teplo důsledkem tření mezi třískou a čelem nástroje. Teplo Q_α vzniká třením hřbetu nástroje o přechodovou plochu na obrobku. Aby byl proces v tepelné rovnováze, musí se vzniklé teplo odvést. Teplo se odvádí třískou Q_t , obrobkem Q_o , nástrojem Q_n a rezným prostředím Q_{pr} . Tuto rovnováhu představuje následující rovnice:

$$Q_{pe} + Q_\gamma + Q_\alpha = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad [J/s]$$

Obr. 6 zobrazuje podíl jednotlivých složek odvedených tepel. Z diagramu vyplývá $Q_t > Q_o > Q_n > Q_{pr}$. Dále znázorňuje vliv rezných podmínek a to především rezné rychlosti. Odvod tepla závisí i na tepelné vodivosti materiálu nástroje a obrobku, rezném prostředí a geometrii nástroje. Teplo, které odvádí nástroj, nemá největší podíl v tepelné bilanci, ale pokud dáme do poměru odvedená tepla s objemem materiálu, do kterého dané teplo přestupuje, je nástroj během obrábění vysoce tepelně zatěžován.

Tepelné zatížení rychle snižuje tvrdost břitu, zvyšuje se opotřebení (dochází k difúzi) a nástroj ztrácí dobré řezné schopnosti.



Obr. 6 Experimentálně zjištěná tepelná bilance [1]

2.4 Trvanlivost a životnost [1, 2, 3, 10]

V experimentu budou testovány nástroje ze slinutého karbidu opatřeny tenkou vrstvou. V případě takového typu a rozměru nástrojů často nedochází k obnově nástroje. Postup obnovení nástroje je takový, že nejdříve musí dojít ke strippingu, při němž dojde k odstranění povlaku z použitého nástroje. Poté se nástroj přeostří. Přeostření se provádí po strippingu kvůli degradaci břitu působením chemických činidel. Po přeostření se provede depozice nové tenké vrstvy. U nástrojů menších rozměrů není takový postup ekonomicky výhodný. Na základě skutečnosti, kdy nedochází k obnově ostří, je možné říci, že životnost se v tomto případě rovná trvanlivosti.

Trvanlivost lze chápat jako čas T , který je dán časem řezání nástroje v minutách. Po tento čas je břit řezného nástroje schopen obrábět od nového stavu (výměny VBD či naostření) až do stavu otupení.

Stav otupení a z toho následně vyplývající velikost otupení se posuzuje z hledisek:

1. Technologických
 - a. Zaručení spolehlivé funkce břitu (nedojde k destrukci nástroje)
 - b. Dosažení předepsané přesnosti rozměrů obrobku
 - c. Dosažení předepsané jakosti obrobeného povrchu
2. Ekonomických
 - a. Dosažení maximální životnosti břitu
 - b. Dosažení minimálních nákladů na nástroj

Životnost nástroje lze pak definovat jako součet všech trvanlivostí jednotlivých břitů. U monolitních nástrojů se jedná o součet všech strojních časů mezi jednotlivými přebroušeními až do doby, kdy je nástroj vyřazen. V případě VBD se jedná o součet časů, kdy byly použity všechny její břity.

Vlivy na trvanlivost řezného břitu:

1. Vliv řezných podmínek
 - a. Vliv řezné rychlosti
 - b. Vliv posuvu a hloubky řezu
2. Vliv geometrie břitu
 - a. Vliv úhlu řezu
 - b. Vliv úhlu hřbetu
3. Ostatní vlivy na trvanlivost
 - a. Obrobitelnost materiálu obrobku
 - b. Řezivost materiálu nástroje
 - c. Řezné prostředí
 - i. Přirozené- okolní vzduch
 - ii. Umělé – mlha, plyny, pevné látky, přiváděná kapalinaSprávně zvolené řezné prostředí může zvýšit hospodárny úběr o 50 – 200%. Řezné prostředí ovlivňuje procesy na povrchu břitu, jako je adheze a součinitel tření, dále ovlivňuje teplotu řezání a teplotní pole. Řezné prostředí se tedy používá pro své účinky: chladicí, mazací a čistící.

2.4.1 Dlouhodobá zkouška trvanlivosti [1, 2, 3]

V experimentu se bude provádět porovnání trvanlivostí dvou typů nástrojů na základě měření opotřebení břitu nástroje. Musí se tedy provést zkoušky trvanlivosti, a proto je vhodné připomenout princip dlouhodobé zkoušky trvanlivosti.

Dlouhodobá zkouška trvanlivosti břitu je v praxi nenahraditelná. Tato zkouška zachycuje ve svém velkém rozsahu vliv mechanických, fyzikálních a technologických vlastností jednotlivých subjektů, které se účastní procesu obrábění. Jelikož se jedná o zkoušku, která při svém laboratorním nebo dílenském testování nabývá velkého rozsahu, je popsána normou ISO. Pro čelní frézování předepisuje podmínky norma ISO 8688-1:1989 (Tool life testing in milling – Part1:Face milling), pro válcové čelní frézování předepisuje podmínky norma ISO 8688-2:1989 (Tool life testing in milling – Part2: End milling). Norma má za cíl unifikovat zkoušky obrábění, zlepšovat spolehlivost výsledků a následnou srovnatelnost dosažených výsledků zkoušky. Norma doporučuje:

1. Obrobek – jeho materiál, rozměry, tvar a upnutí
2. Řezný nástroj – materiál, upnutí, geometrii řezného břitu
3. Řezné prostředí – druh a použití
4. Řezné podmínky – kombinaci, velikost
5. Měřicí vybavení
6. Kriteria trvanlivosti břitu – velikost a druh
7. Průběh měření, záznam výsledků a jejich vyhodnocení

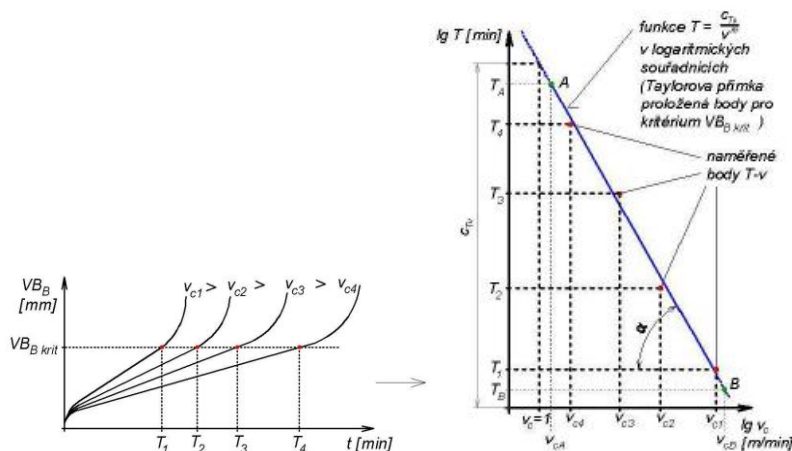
Vlastní princip dlouhodobé zkoušky trvanlivosti spočívá v obrábění doporučenými nebo předem určenými řeznými podmínkami. Obrábění probíhá až do doby, kdy je nástroj opotřeben. Stav opotřebenosti je takový stav, při kterém velikost opotřebenosti na hřbetě břitu dosáhne mezní stanovené hodnoty VB_B . Z naměřených výsledků se sestaví $T - v_c$ závislost. Tato závislost umožní stanovit doporučenou řeznou rychlost pro zvolenou optimální trvanlivost. Míra opotřebenosti se určí dle zkušeností a z pre-experimentu zkoušky trvanlivosti. Opotřebenosti je dáno nejčastěji kritériem VB_B či KT . Tyto kritéria se však liší podle toho, jaký je použit řezný materiál a jaké jsou podmínky obrábění, jež ovlivňují mechanismy opotřebování.

Doporučený postup při experimentálním zjišťování trvanlivosti shrnují následující body:

- 1) Eventuelní provedení předběžné zkoušky trvanlivosti břitu. Stanoví se tak reálný rozsah řezných podmínek (hlavně řezná rychlost). Řezné podmínky jsou voleny takovým způsobem, aby trvanlivost při nejvyšší řezné rychlosti neklesla pod 5 minut.
- 2) Vlastní provedení praktické zkoušky. Při odlišných řezných rychlostech se změní nárůst zvoleného kritéria opotřebenosti. Velikost opotřebenosti závisí na čase řezání. Z naměřených hodnot se stanoví charakteristická křivka opotřebenosti. Aby bylo možné sestavit křivku s dostatečnou přesností, je třeba minimálně 5 bodů (5 časů řezání). Poslední čas řezání by se měl nacházet nad kritickou velikostí opotřebenosti, protože nelze křivku extrapolovat mimo čas řezání. Z hlediska statistické důvěryhodnosti je vhodné opakovat měření pro minimálně 3 řezné rychlosti.
- 3) Následně se odečte pro zvolenou velikost kritéria opotřebenosti trvanlivost břitu T_1-T_4 pro jednotlivé řezné rychlosti $v_{c1}-v_{c4}$.
- 4) Sestrojení $T-v$ závislosti v grafu v logaritmických souřadnicích. Proložení bodů přímkou se provede od „oka“ nebo pomocí metody nejmenších čtverců.

Přímka v diagramu je určena obecnou rovnicí $m=k \cdot \text{tga} \alpha$. Velikost konstanty c_{TV} se odečte ze sestaveného grafu pro $v_c=1$ nebo při zjištění hodnoty m je konstanta dopočtena z následující rovnice:

$$\lg c_{TV} = \lg T_A + m \times \lg v_{cA}$$



Obr. 7 Výsledná $T-v_c$ závislost při dlouhodobé zkoušce [1]

2.4.2 Krátkodobá zkouška trvanlivosti [2]

Krátkodobé zkoušky se provádějí za zvýšených podmínek za účelem snížení nákladnosti této zkoušky a za účelem zkrácení celkové doby zkoušení oproti reálnému. Nevýhodou je malá věrohodnost zkoušky a proto slouží spíše pro relativní porovnání podobných řezných materiálů.

Zkrácení zkoušky se může docílit několika způsoby:

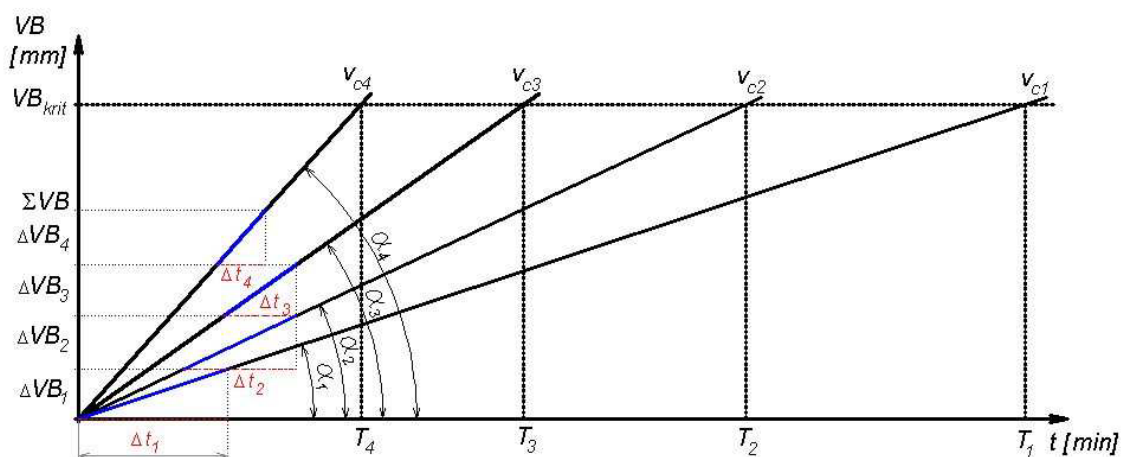
1. zvýšením řezných podmínek (hlavně řezné rychlosti) oproti skutečnosti
2. snížením hodnoty opotřebení břitu jako kritéria trvanlivosti
3. speciální způsobem měření při použití jednoho břitu (podle intenzity opotřebení břitu)- WEARRATE metoda

Určení $T-v_c$ závislosti dle intenzity opotřebení metodou WEARRATE:

Hlavním předpokladem této metody je použití kvalitního ostří břitu. Tímto důsledkem se eliminuje relativně nevýznamná počáteční fáze rychlého opotřebení břitu. Dalším důsledkem je lineární charakter nárůstu opotřebení hřbetu s časem řezání. Výhodami této metody je krátká doba trvání, malá spotřeba zkušebního a řezného materiálu.

Princip zkoušky je založen na přímé úměře mezi intenzitou opotřebení a řeznou rychlostí. Pro daný nástroj a obrobek se zvolí řezné vhodné řezné podmínky. Zvolí se minimálně 4 řezné rychlosti a určitou řeznou rychlostí se obrábí po předem zvolený časový úsek. Následně se řezná rychlost zvýší a opět se obrábí určitý časový úsek. Po každém časovém úseku se změří nárůst opotřebení ΔVB . Intenzita opotřebení I je pak definována jako nárůst opotřebení za jednotku času:

$$I = \frac{\Delta VB}{\Delta t}$$



Obr. 8 Graf závislosti opotřebení a trvanlivosti na řezné rychlosti po provedení krátkodobé zkoušky trvanlivosti [2]

Pokud se předpokládá lineární nárůst opotřebení viz. Obr. 8, vyjádří se intenzita opotřebení vztahem pro v_1 :

$$I_1 = \frac{\Delta VB_1}{\Delta t_1} = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{VB_{krit}}{T_1}$$

a vyjádření je podobné pro rychlosti v_1 - v_4 . Z tohoto vztahu se odvodí vztah pro trvanlivost při dané řezné rychlosti:

$$T_1 = VB_{krit} \cdot \frac{\Delta t_1}{\Delta VB_1} = \frac{VB_{krit}}{I_1}$$

a opět podobné vyjádření pro všechny rychlosti v_1 - v_4 .

Pokud se dosadí zobecněný vztah vyjádření intenzity opotřebení do Taylorova vztahu, dostane se výraz:

$$\frac{VB_{krit}}{I} = \frac{c_{Tv}}{v^m} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{VB_{krit}}{c_{Tv}} \cdot v^m = c_{Iv} \cdot v^m$$

$$\text{kde} \quad c_{Iv} = \frac{VB_{krit}}{c_{Tv}}$$

Parametry funkce $I = f(v)$, tj. konstantu c_{Iv} a exponent m lze z naměřených hodnot určit grafickou metodou nebo metodou lineární regrese pomocí zlinearování tvaru:

$$\ln I = \ln c_{Iv} + m \ln v$$

Grafickým vyjádřením této lineární funkce je přímka. Exponent m udává směrnici přímky k ose v :

$$m = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I}{\Delta v}$$

a konstanta c_{Iv} je hodnotou intenzity I opotřebení hřbetu při řezné rychlosti $v = 1$. Velikost konstanty c_{Tv} je možné určit ze vztahu:

$$c_{Tv} = \frac{VB_{krit}}{c_{Iv}}$$

a pak je možné dopočítat hodnotu konstanty c_{Tv} pro předem stanovou velikost kritériálního opotřebení břitu. Dále je možné určit trvanlivost řezného břitu pro zvolenou řeznou rychlost nebo určit řeznou rychlost při trvanlivosti 15 minut.

2.4.3 Akustická emise [18]

Akustická emise je projev vlnění v mechanicky namáhaném tělese. Při pohledu na hodnocení akustické emise se může hodnotit způsobem objektivním nebo subjektivním. V případě vyhodnocení akustické emise objektivním způsobem byly vypracovány metody u nás i v zahraničí na různých výzkumných pracovištích, které se zaměřovaly na hlučnost při obrábění a tím na stabilitu respektive nestabilitu řezného procesu, což se ukázalo jako obtížně reprodukovatelné v reálném provozu. Zde nastává problém s umístěním mikrofónu na správné místo a dále s rušivými hluky vznikajícími v pozadí jako je například hluk od pohonů. Nicméně byly učiněny pokusy s vyhodnocením akustické emise pomocí frekvenční analýzy. Postup se přibližoval subjektivnímu hodnocení akustické obsluhou stroje. Subjektivní hodnocení je založeno na zkušenostech obsluhy obráběcího stroj, kdy obsluha disponuje technickými prostředky biologického původu, což umožňuje provádět analýzu akustické emise. Zkušená obsluha sluchem zaznamená chvění. Takovéto hodnocení má svou významnou relevanci a to z důvodu, že dělníci již desítky let regulují řezné podmínky, aby odstranili vibrace vzniklé od nestability řezného procesu. Dokud se nezdokonalí záznam akustické emise, bude mít hodnocení dělníkem významný podíl při regulaci procesu obrábění.

Při testování se subjektivního hodnocení obsluhy využije. Obsluha rozliší podle vznikajícího hluku nestabilní proces od stabilního a to tak, že se začne projevovat tón, nebo skupina tónů. Tóny hluboké se projeví díky nízké tuhosti těles. Doprovází je chvění zjizvitelné hmatem až vibrace základů stroje. Tóny vysoké souvisí s třením mezi poměrně tuhými tělesy. Nestabilita se tedy projeví při opotřebení nástroje. Opotřebení s časem řezání narůstá, až nástroj dosáhne limitního opotřebení. Tento stav se projeví i v akustické emisi a poté se vyřadí, protože dosáhl své trvanlivosti při daných podmínkách.

2.5 Příklady stopkových nástrojů [9, 4, 21]

Tato kapitola se věnuje přehledu stopkových nástrojů různých výrobců, protože nabídka je široká. Problematika týkající se úpravy špičky je z hlediska výroby vyřešena. Jednotliví výrobci nabízí různé úpravy špiček, popisují jejich výhody a nasazení. Kromě zmíněné úpravy se však nástroje liší i ostatní geometrií, použitým slinutým karbidem a depozicí tenké vrstvy, protože každý výrobce má své know-how, tudíž není možné získat dva nástroje, aby se odlišovali pouze úpravou špičky, a tedy do experimentu nevstupovaly ostatní vlivy rozdílné geometrie.

2.5.1 Monolitní stopková fréza s ostrým rohem [9]

Firma SANDVIK Coromant nabízí monolitní drážkovací frézy pod označením CoroMill Plura. Tato řada disponuje velkou škálou nástrojů. Nástroje jsou určeny pro hrubovací, polo-dokončovací a dokončovací operace, pro HFM i HSM obrábění, pro výrobu forem a zápustek. Pro nástroje CoroMill Plura je charakterizující vysoký výkon, bezpečnost obrábění, maximální využití stroje, obrobení součástí různých tvarů a materiálů. Nástroje pro materiály do 48 HRC určené pro hrubování a polodokončování mají na špičce nástroje sražení. Toto sražení pro průměr frézy 12 mm činí 0,1 x 45°. Výrobci nástrojů nemohou vyrobít nikdy ostrý roh, proto se musí vždy vytvořit sražení.



Obr. 9 Nástroje řady CoroMill Plura [9]

2.5.2 Monolitní stopková fréza s rádiusem [4]

Rádiusové a toroidní frézy od firmy WNT s označením SCR patří mezi nástroje určené primárně pro hrubovací operace, kdy se kombinuje HSC a HPC obrábění. Při nasazení ve výrobě není potřeba vyměňovat nástroje mezi dvěma uvedenými strategiemi hubování. Fréza je dále schopná provádět různé konvenční frézovací operace.



Obr. 10 Čelní pohled na nástroj SCR [4]

Pro frézy SCR byla vyvinuta speciální patentovaná geometrie čelních drážek, čelní plochy a poloměrů. Geometrii na čele tvoří dva poloměry, které vytváří teoretický poloměr ($r3D$), jenž se používá při programování. Rohový poloměr prodlužuje životnost nástroje. Rádus chrání břit proti předčasnému opotřebení při konvenčním frézování. Hlubší provedení drážek a axiální přívod vzduchu napomáhá odvodu třísky z řezu během plného frézování drážek až $1x D$. Díky profilu čelní plochy břitu ve tvaru S a nerovnoměrné zubové mezeře dochází k menšímu řeznému odporu.

2.5.3 Monolitní stopková fréza se sražením [20]

Monolitní stopkové frézy od firmy Iscar s označením CHATTER FREE patří mezi nástroje určené k hrubovacím a polo-dokončovacím operacím. K odebrání materiálu při hrubování se provádí strategií HPC. Fréza je schopná při drážkování obrábět s hloubkou řezu $2x D$. Sražení na špičce, pro průměr frézy 12 mm $0,5 \times 45^\circ$, zvyšuje trvanlivost nástroje a unikátní geometrie poskytuje vynikající povrch.



Obr. 11 Fréza ISCAR CHATTER FREE [20]

2.6 Představení hypotézy

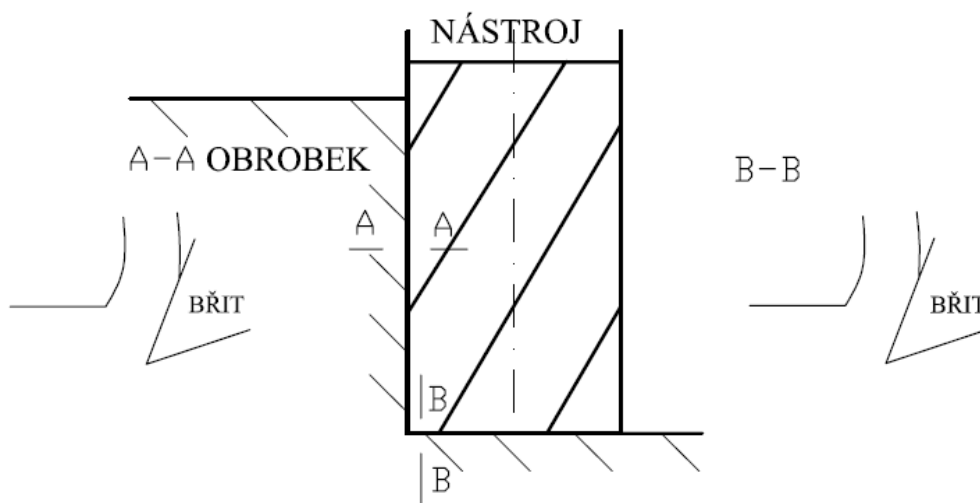
Při vzájemném kontaktu a relativním pohybu strojních součástí dochází k opotřebení. K opotřebení dochází i při řezném procesu, kdy nastává relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem, mezi třískou a nástrojem. Během tohoto relativního pohybu přichází do kontaktu nástroj s plochou řezu (v místě hřbetu a špičky nástroje) a s odcházející třískou po čele nástroje, což vede k opotřebovávání nástroje.

Pokud jevy, které způsobují otupení, nebyly pouze náhodné, byly systematické a mají nějaký vztah k reálným skutečnostem, bylo by vhodné ujasnit si, co by mohlo být příčinou. Je potřeba hledat, který jevy by na špičce mohly zapříčinit její nadměrné opotřebení a ohledat stavy, které mohou nastat při obrábění.

2.6.1 Úvahy nad jednotlivými možnými faktory

Podstatný faktor, který působí na nástroj především na jeho zrna, jsou soudržené síly. Soudržené síly působí mezi zrny materiálu nástroje. Pokud se zrna materiálu zatíží vlivem řezných sil, dojde k tahovému a smykovému namáhání mezi jednotlivými zrny. A pokud se bude na špičku nahlížet jako na takové místo, kde se protíná hlavní a vedlejší ostří, tudíž zrna na špičce jsou silově vázaná ke zbytku materiálu jednostranně, může se tedy formulovat tvrzení, že soudržnost materiálu nástroje nemusí být v takovémto místě tak vysoká, jako je soudržnost materiálu na ostří. Při obrábění do rohu bude vznikat v místě špičky tlak. Tlakové zatížení vyvolá smykové a tahové napětí mezi zrny v místě špičky. Toto zatížení bude působit do takové míry, až dojde k porušení jejich soudržných sil. Tvrzení lze shrnout tak, že vlivem prostorového rozmístění degradujících faktorů v geometricky stísněném prostoru špičky nástroje může dojít k nárůstu zatížení (tepelného i mechanického). Nedostatkem materiálu, který

nepůsobí oporu při momentálním silovém přetížení, dojde k defektu krajních zrn řezného materiálu.



Obr. 12 Zobrazení odřezávané vrstvy na vedlejším ostří

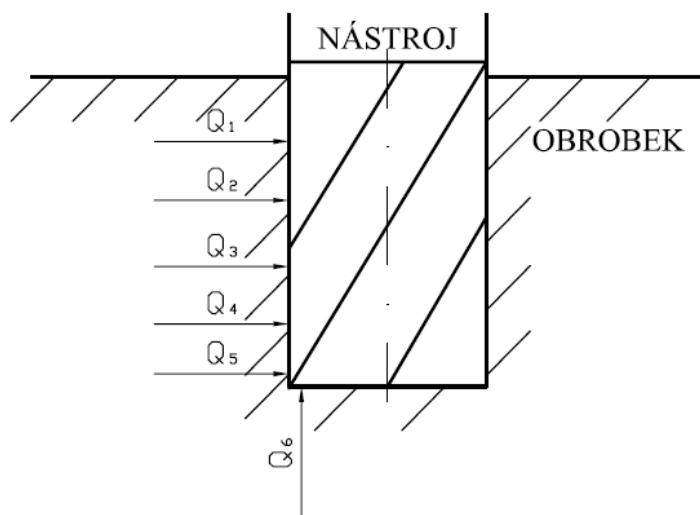
Obr. 12 zobrazuje tvorbu třísky při obrábění do rohu. Řez A-A je aktuální všude v místě, kde ostří proniká do místa, kde původně byl materiál polotovaru (obrobku s přídavkem). Zde dochází k oddělování třísky důsledkem pronikání ostří do obráběného materiálu. A protože vedlejší ostří sice v omezené míře také odřezává materiál z obrobku, tak i v tomto omezeném rozsahu vytvořit rovinu, kde lze naznačit tvorbu třísky a tím i všechny tři druhy plastické deformace, proto je důležité a žádoucí mít na čele nástroje vybroušené ostří. Kdyby zde však nedocházelo k odřezávání, bylo by možné používat válcové frézy. Řez vedlejším ostřím představuje řez B-B. Následně tedy můžeme říci, že v místě špičky se scházejí opotřebení na čele ze dvou směrů. Z toho tedy plyne, že v místě špičky je zintenzivněný projev opotřebení a tím i následná degradace špičky během procesu obrábění.

Další faktor, který na špičce působí je od odcházející třísky. Tříska vzniká vlivem působení hlavního ostří i vedlejšího na obráběný materiál. Tříska musí odcházet z místa řezu od dvou na sebe kolmých ostří. To by mohlo mít za následek, že se zde třísky bude pěchovat, dojde k nárůstu měrného tlaku, tím se zintenzivní abrazivní opotřebení a to se projeví na intenzitě opotřebovávání nástroje právě v místě špičky.

Při procesu řezání dochází ke vzniku tepla. Teplo vzniká ve všech oblastech plastické deformace (primární, sekundární i terciální). Další příčinou vzniku tepla je tření třísky o čelo nástroje a tření obrobkové plochy o hřbet nástroje. Vzniklé teplo se odvádí třískou, obrobkem, nástrojem a prostředím. Tepelná bilance ukazuje, že teplo, které odchází do nástroje, je co do své velikosti až třetí v pořadí. Pokud se však vezme v potaz, do jakého objemu odchází teplo do obrobku a do jakého objemu odchází teplo do nástroje, může se říci, že teplota v nástroji bude vyšší než teplota v obrobku. Teplo bereme jako projev změny teploty. A protože se zvyšuje teplota, dochází k velkému

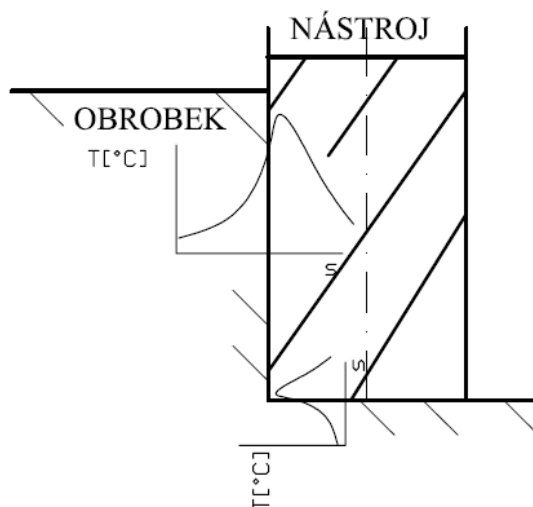
narůstá opotřebením. Teplota ovlivňuje druh opotřebením. Se zvyšující teplotou dochází k difuzi a oxidaci.

Jako názorný příklad si můžeme uvést technologické operaci drážkování do plného materiálu nebo obrábění do rohu stopkovou frézou. Při takovýchto operacích můžeme pozorovat vznik tepla a následného opotřebením v místě špičky nástroje. Ve skutečné praxi lze tedy pozorovat jev, kdy špička frézy je nejvíce tzv. opálená. Jak bylo dříve řečeno, teplo ovlivňuje trvanlivost břitu. Tok tepla do nástroje zobrazuje Obr. 13. Pokud technologická operace prováděná tak, že bude docházet k obrábění obvodem i čelem nástroje, je možné považovat za kritické místo špičku nástroje. Špička nástroje je tepelně ovlivněna ze dvou stran. Proto dochází k velkému toku tepla do malého objemu nástroje a následně k opotřebením špičky, protože se zvyšující teplotou narůstá opotřebením břitu.



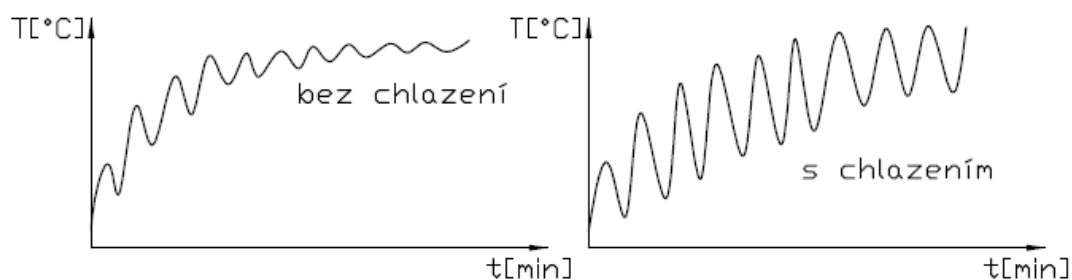
Obr. 13 Ovlivnění nástroje teplem při drážkování

Průběh teploty na břitu nástroje zobrazuje Obr. 14. Lze namítnout, že největší teplota není na ostří, ale kousek dál. Vzdálenost závisí na velikosti odřezávané třísky. Pomocí nákresu lze tedy situaci zhodnotit tak, že i když největší teplota není přímo na ostří, ale o nepatrnou vzdálenost dál, teplota, která je v této vzdálenosti nejvyšší, se nachází po celé délce břitu v záběru. Jelikož i na vedlejším ostří dochází k odřezávání, s průběhem teploty je to i zde podobné. Pokud se teploty setkají v místě špičky nástroje, dojde zde k nárůstu teploty, což může vést k selhání objemu materiálu, který byl vzniklou teplotou ovlivněn.



Obr. 14 Průběh teploty na břitu nástroje

Jak už vyplývá z textu předem, kritické místo při obrábění čelem a obvodem je špička nástroje. Lze tedy říci, že by se mohlo jednat o nejexponovanější místo na nástroji. Vystává tedy otázka, proč nenavrhnout chlazení. Chlazení by se v tomto případě navrhlo vnější. Vezme-li se v potaz, že se jedná o drážkování, technologická kapalina se obtížně dostane do místa řezu, protože tříska zůstává v drážce, tím pádem brání přístupu k nástroji a není tolik účinná. Dalším argumentem, proč nepoužít technologickou kapalinu, je ten, že nástroj při takovéto technologické operaci zatížíme teplotním šokem. Tento teplotní šok pro nástroj vzniká tak, že břit polovinu otáčky nástroje řeže a druhou polovinu je ostříkován chladnou technologickou kapalinou. Obr. 15 zobrazuje průběh teplot na břitu a následného tepelného šoku nástroje při použití technologické kapaliny a při obrábění bez kapaliny. Jelikož však od nástroje požadujeme, aby vykazoval malé opotřebování a co největší trvanlivost, je důležité zvolit vhodnou úpravu geometrie nástroje. Jako vhodná úprava geometrie bylo zvolené sražení na špičce 0,6 mm x 45° -0,1 mm. Toto sražení by mělo zabránit rychlému opotřebení špičky nástroje, protože v daném místě nebude ostrý roh, ale i když malé přímkové ostří. Dalším přínosem by mělo být zvýšení tepelné odolnosti špičky nástroje. Nástroj bude tepelně namáhán ve větším objemu a teplota v tomto místě poroste pomaleji, než za předpokladu ostré špičky.



Obr. 15 Průběh teplot na břitu při obrábění bez chlazení a s chlazením

2.6.2 Souhrnná hypotéza možných vlivů u nástroje se sražením špičky

Špička je takové místo, kde se stýká hlavní a vedlejší ostří. V případě čelních válcových fréz jsou na sebe ostří kolmá. Z toho dále plyne, že špička je krajním bodem obou ostří. Při zatížení takového krajního bodu je možné předpokládat, že soudržnost materiálu nástroje nemusí být v takovémto místě tak vysoká, jako je soudržnost materiálu na ostří. Navíc při obrábění do rohu a abrazivní formě otupení bude vznikat v místě špičky větší tlak a teplota. Zatížení bude působit na zrna materiálu nástroje a na jejich soudržné síly. Tvrzení lze shrnout tak, že vlivem prostorového rozmístění degradujících faktorů v geometricky stísněném prostoru špičky nástroje může dojít k nárůstu zatížení (tepelného i mechanického). Nedostatek okolního materiálu nepůsobí oporu při momentálním silovém přetížení. Dále teplo nemá velký prostor, kam se odvádět, způsobí nárůst teploty a společně s působením tlaku dojde ke vzniku plastické deformace.

3 REALIZACE EXPERIMENTU

Cílem experimentu je porovnání trvanlivosti dvou typů monolitních fréz. Nástroje jsou ze slinutého karbidu a liší se od sebe úpravou geometrie nástroje. Úprava spočívá ve vytvoření sražení $0,6 \times 45^\circ$ na špičce nástroje. Nástroje se až na zvolenou úpravu geometrie shodují. Jako obráběný materiál byla zvolena ocel ČSN 12 050.1.

V experimentu se trvanlivost stanoví na základě měření opotřebení VB. Až hodnota opotřebení dosáhne kritériální hodnoty, odečte se hodnota trvanlivosti. Dále se v experimentu budou měřit řezné síly pomocí rotačního dynamometru. Záznam řezných sil se provádí z důvodu, aby se zaznamenalo, jak se změní rozložení sil vlivem úpravy geometrie nástroje.

Testované nástroje byly až na zvolenou úpravu totožné, takže se nelišily geometrií, deponovanou tenkou vrstvou, mikrogeometrií ani substrátem SK. Z toho tedy plyne, že se odlišují pouze sražením na špičce, a tudíž do experimentu bude vstupovat pouze vliv této změny geometrie nástroje.

3.1 Plánování experimentu [8]

Na způsobu naplánování experimentu závisí vlastní provedení testování a korektnost dosažených výsledků. Při plánování je důležité definovat blokové faktory a zafixovat je na předem určených hodnotách, které bude možné během experimentu udržet konstantní. Kromě blokových faktorů do experimentu dále vstupuje vliv času. Proto během plánování je důležité navrhnout taková opatření, aby se vliv času minimalizoval. Používají se techniky replikace, což je opakování při stejné úrovni, nebo znáhodnění, které odstraní vznik systematických chyb. Plánování také zahrnuje prošetření přesného postupu testování, aby se zamezilo vzniku zbytečných komplikací a tedy se využilo času pouze dvou dnů, po který bylo možné na stroji testovat. Takováto omezená doba je z důvodu toho, že stroj je kapacitně vytížen a do experimentu vstupují pouze 3+3 nástroje.

3.1.1 Hlavní faktory

Hlavní faktory jsou předmětem experimentu. Provedením experimentu se dokazuje nebo vylučuje jejich vliv na zadanou problematiku. Tato diplomová práce se zabývá porovnáním životností dvou typů nástroje. Odlišují se od sebe úpravou špičky a zjišťuje se, zda má vliv na životnost nástroje. Hlavním faktorem tohoto experimentu je tedy úprava špičky nástroje, protože se porovnává vliv velikosti sražení. I když se porovnávají pouze dvě velikosti sražení, je brán tento faktor jako hlavní.

3.1.2 Blokové faktory

Dále mohou experiment ovlivňovat blokové faktory. Blokové faktory nepatří mezi náhodné vlivy, ale nejsou ani předmětem experimentu. Mezi blokové faktory byly zahrnuty:

- Řezná rychlost
- Posuvová rychlost
- Šířka záběru
- Hloubka řezu
- Sousedné frézování
- Obrábění bez řezných kapalin

Vliv uvedených faktorů nebyl předmětem experimentu, tedy se hodnoty faktorů stanoví jako neměnné a celý experiment proběhne za stejných podmínek. Zároveň jsou tyto faktory jako omezující podmínky ze strany stroje.

3.1.3 Vliv času

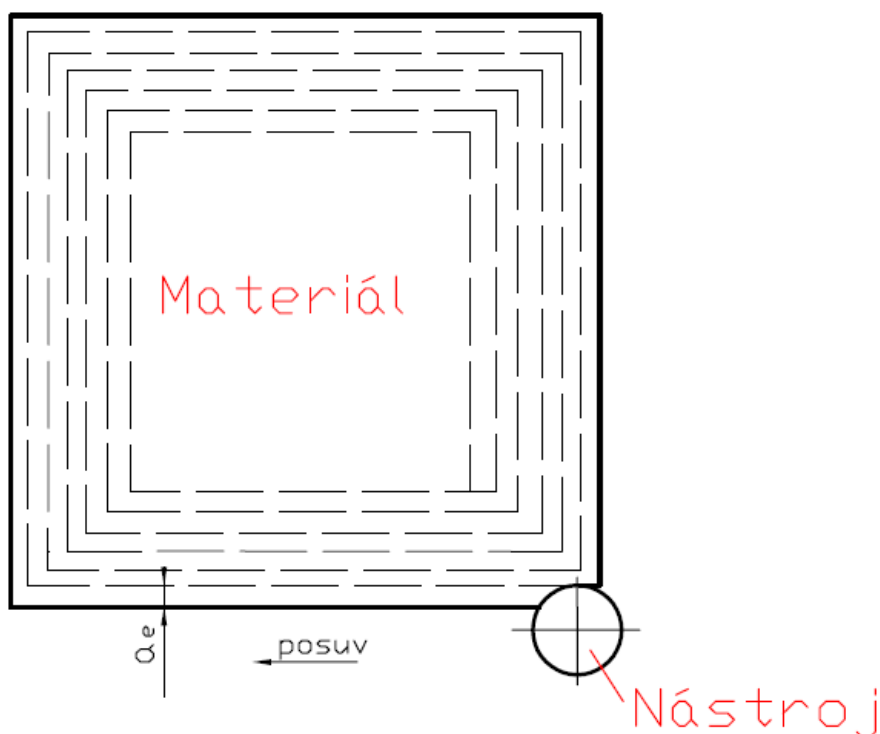
Vlivem času se rozumí vliv neznámých faktorů, o kterých nevíme, že do experimentu vstupují a mohou se vyvíjet podle neznámé funkce. Vývojem by však mohla nastat skutečnost, že by došlo ke vstupu těchto neznámých faktorů do experimentu. Do vlivu času se však zahrnují i neznámé faktory, jejichž přítomnost je známá, ale není možné je regulovat. Jako příklad neznámých faktorů by mohla být uvedena teplota okolí a zahřátí vedení stroje. Jelikož experiment probíhal v halové laboratoři, zůstávala teplota relativně neměnná. Vlivem zahřátí se může ve vedení změnit třecí odpor, vymezit či vytvořit vůle. Aby se vstupu neznámých faktorů předešlo, bylo by rozumné uspořádat testování tak, aby se faktory minimalizovali, nebo alespoň neovlivňovali.

Při měření se mohou vyskytovat určité druhy chyb. Chyby se dělí na hrubé, náhodné a soustavné. Nejvíce zajímavé jsou chyby soustavné, protože jsou většinou funkcí času. Aby se předešlo vstupu soustavných chyb do experimentu, je snaha jednotlivá měření znáhodnit. Z hlediska znáhodnění by bylo optimální mít k dispozici větší počet nástrojů s různými úpravami špiček. K experimentu jsou k dispozici pouze 3 dvojice nástrojů. Kdyby nástrojům byly přiřazeny boolovské hodnoty 0 a 1 (0- ostrá fréza, 1- fréza se sražením), vytvořila by se sekvence šesti boolovských hodnot. Pokud

jsou hodnoty pouze dvě, vzniklá sekvence bude tvořena podle funkce. Malý počet vzorků, třebaže jsou náhodné, snadno vždy vytvoří sekvenci, která se podobá funkci. Funkce je to, čemu je vhodné se v experimentu vyhnout. V tomto případě však nelze znáhodnění provést tak, aby se vyloučilo chování sekvence podle funkce. Uvažujme tedy pravidelné střídání, kdy se nejdříve otestuje nástroj s ostrou špičkou a poté nástroj se sražením. Při takovémto střídání by byl vliv faktorů konstantní, tím by mohlo dojít k vyloučení vlivu času. Paradoxně lze tedy říci, že pravidelné střídání vytvoří největší vyloučení vlivu času. Z toho plyne, že experiment bude proveden v pravidelném střídání ostrého nástroje a se sražením.

3.1.4 Stanovení doby nástroje v řezu

Před zahájením vlastního testování se stanovil časový interval, po který bude nástroj obrábět. Délka tohoto intervalu byla stanovena na 5 minut. Po uplynutí této doby se na nástroji změní opotřebení za pomoci mikroskopu. Cyklus použitý k experimentu má název IMACHINING. Tento cyklus se nenachází ve standardní nabídce cyklů v řídicím systému Heidenhein TN426. Byl vytvořen dříve pro jiné účely, ale kvůli vhodnému generování drah se využil pro tento experiment. Cyklus vytváří ostrůvek tak, že nástroj obrábí dokola tohoto prvku. Nástroj koná trajektorii po čtyřúhelníkové „spirále“ zobrazené na Obr. 16 se stoupáním hodnoty šířky řezu až do okamžiku, kdy dosáhne rozměru ostrůvku. Z hlediska generování drah se do cyklu zadávají rozměry polotovaru a konečný rozměr ostrůvku.



Obr. 16 Čtyřúhelníková spirála trajektorie nástroje

Pohyb nástroje je přítom po křivce, kterou lze pracovníě nazvat lomenou pravoúhelníkovou plochou spirálou. Tento výraz snad lze použít z důvodu terminologické nouze, ale i proto, že definice spirály požaduje pouze, aby křivka obíhala ústřední bod a aby existoval princip, podle kterého bod na jednom místě křivky je dále od ústředního bodu než jiný bod křivky daný zmíněným principem. Ten princip také determinuje způsob parametrizace křivky. Dílčí obvody jednotlivých čtyřúhelníků mají od sebe odlišné hodnoty. Po sobě jdoucí dílčí obvody jsou zmenšené o čtyřnásobek hodnoty šířky záběru. Obr. 16 zobrazuje vznikající trajektorii a je možné pozorovat zkrácení jednotlivých obvodů. Aby se docílilo požadované doby nástroje v řezu, musí se stanovit vzdálenost, kterou musí nástroje ujet. Pokud je známa rychlost posuvu nástroje, vzdálenost, šířka záběru a počáteční rozměr polotovaru, dopočítají se konečné rozměry ostrůvku. Tyto rozměry se zadávají do cyklu. Vize je taková, že nástroj bude obrábět po dobu zvoleného časového intervalu a po uplynutí této doby skončí cyklus a nástroj se vrátí do výchozího bodu. Proto se vytvořila tabulka výpočtů v programu Microsoft Excel Obr. 17. Tabulka výpočtů bude výhodná i z hlediska operátorského, kdy chod stroje nebude nutné zastavovat po uplynutí časového intervalu tlačítkem stop stroje, ale zastaví se ukončením cyklu po uplynutí stanoveného intervalu.

| dopočtené | | | tabulka výpočtů | | ROZMĚRY KONEČNÉHO OSTRŮVKU | | PŘEPOČET PŘES hm | |
|--------------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------------|-----|------------------|-----------|
| Parametry.zadané | jednotky | DILČÍ OBVODY mm | | UJETÁ VZDÁLENOST XX | | YY | mm | S NÁJEZDY |
| v_c | 220 m/min | o1 | 1168 | 1168 | 292 | 292 | | 0,4780687 |
| a_p | 4 mm | o2 | 1152 | 2320 | 288 | 288 | | 0,9497832 |
| a_e | 2 mm | o3 | 1136 | 3456 | 284 | 284 | | 1,4151435 |
| n | 5834 ot/min | o4 | 1120 | 4576 | 280 | 280 | | 1,8741495 |
| | | o5 | 1104 | 5680 | 276 | 276 | | 2,3268012 |
| f_z | 0,2 mm/zub | o6 | 1088 | 6768 | 272 | 272 | | 2,7730987 |
| v_f | 4667 mm/min | o7 | 1072 | 7840 | 268 | 268 | | 3,2130419 |
| h_m | 0,0816497 mm | o8 | 1056 | 8896 | 264 | 264 | | 3,6466309 |
| | | o9 | 1040 | 9936 | 260 | 260 | | 4,0738657 |
| v_f pomocí h_m | 0,08 mm/min | o10 | 1024 | 10960 | 256 | 256 | | 4,4947462 |
| f_z | 0,1959592 mm/zub | o11 | 1008 | 11968 | 252 | 252 | | 4,9092724 |
| v_f | 2518 mm/min | o12 | 992 | 12960 | 248 | 248 | | 5,3174444 |
| | | o13 | 976 | 13936 | 244 | 244 | | 5,7192622 |
| nástroj D | 12 mm | o14 | 960 | 14896 | 240 | 240 | | 6,1147257 |
| z | 4 | o15 | 944 | 15840 | 236 | 236 | | 6,5038349 |
| obrobek | | o16 | 928 | 16768 | 232 | 232 | | 6,8865899 |
| x | 296 mm | o17 | 912 | 17680 | 228 | 228 | | 7,2629907 |
| y | 296 mm | o18 | 896 | 18576 | 224 | 224 | | 7,6330372 |

Obr. 17 Tabulka výpočtů sloužící ke stanovení konečného rozměru ostrůvku

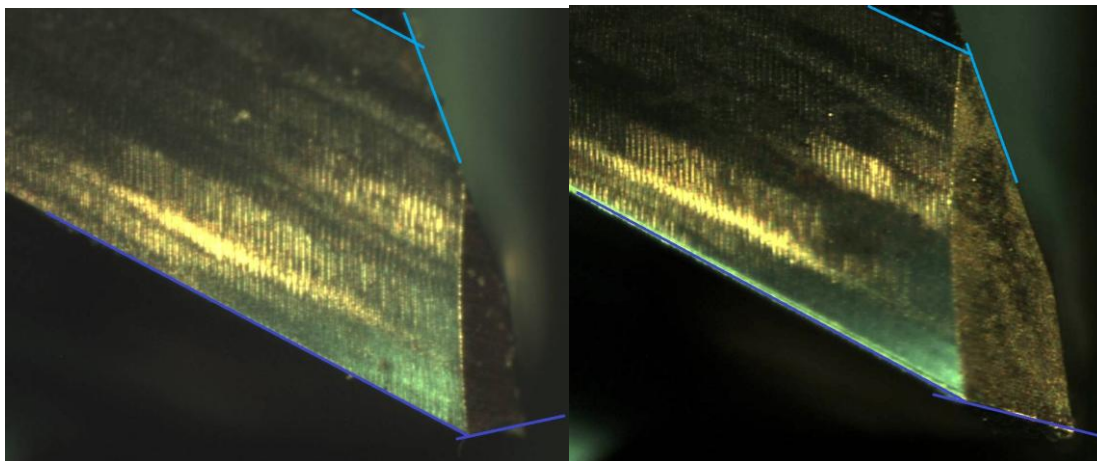
Hlavním úkolem této tabulky výpočtů je tedy stanovení konečného rozměru ostrůvku, při stanové době obrábění. Pracuje tak, že v levé dolní části se zadá rozměr polotovaru, poté se v pravém sloupci se zeleným označením vyhledá řádek, který je nejbližze hodnotě pěti minut. V tomto řádku se v prostřední části odečte konečný rozměr ostrůvku. Tato hodnota je zadána do cyklu a zajišťuje, že nástroj bude obrábět po dobu 5 minut. Poté dojde k měření opotřebením na mikroskopu. V dalším kroku se jako rozměr polotovaru zadá rozměr předchozího dokončeného ostrůvku. Opět se vyhledá pro daný čas v řezu hodnota konečného rozměru ostrůvku. Ta se znovu bude zadávat jako konečná hodnota do cyklu. Postup zadávání hodnot je obrázkově popsán v kapitole 8.2.

Další účel vytvoření tabulky byl takový, že se jednotlivé trajektorie při obrábění zkracují a nástroje tedy koná pohyb po čtyřúhelníkové spirále. Toto zkrácení výpočty též zahrnují, takže doba vypočtená pomocí tabulky koresponduje s dobou naměřenou při reálném obrábění. Následně tato tabulka usnadnila již časově náročný experiment. Byla k dispozici v osobním počítači přítomném v halové laboratoři a zadávání a výpočet probíhalo velice rychle a tudíž nedocházelo k časovým ztrátám vlivem zjišťování hodnot potřebných pro zadání cyklu.

Může vyvstat připomínka, že vypočtený interval neodpovídá přesně stanovenému intervalu. Rozdíl mezi hodnotou stanovenou a skutečně naměřenou se však pohybuje v řádech sekund. A jelikož opotřebení je závislé na čase obrábění, tato nepřesnost nebude mít na výsledky měření zásadní vliv. Dále i z hlediska technologického, není možné dodržet absolutně přesně zvolený interval. Stroj by se musel zastavovat v nedokončené trajektorii, mohlo by docházet k negativním projevům na nástroj a následně by se každý další cyklus musel přeprogramovat a mohlo by docházet k nadměrným komplikacím při testování.

3.1.5 Měření opotřebení

V samotné fázi plánování je důležité stanovit způsob měření opotřebení, jelikož pomocí měření opotřebení se stanoví trvanlivost nástrojů. Měření bude probíhat na dílenském mikroskopu od firmy Carl Zeiss s odměřováním na monitoru. Před vlastním měřením se musí zdokumentovat jednotlivé břity nástrojů. Jelikož vlivem opotřebovávání dochází k úbytku materiálu na břit, bylo nutné vytvořit masku Obr. 18 původního ostří. Masku se poté přikládala k opotřebovaným frézám. Od této masky se potom měřilo opotřebení. Masku tvořily tři úsečky, které kopírovaly obrys frézy v místě špičky.



Obr. 18 Maska na ostrém nástroji a se sražením

Před samotným měřením se stanovilo místo měření opotřebení. Jednalo se o břit na válcové části frézy v místě špičky nástroje. Tento úsek byl zvolen z důvodu předpokládaného opotřebení v místě špičky. Při sledování opotřebení se používalo zvětšení 60x. Dále se stanovila hodnota kritériálního opotřebení $VB_{krit} = 250 \mu m$.

3.2 Popis uspořádání experimentu

Ta kapitola je věnována vlastnímu provedení experimentu. Popisuje nejen nástroje a obráběný materiál, které byly k experimentu použité, ale i strategii obrábění. Ve strategii obrábění jsou naznačeny hodnoty úběru materiálu, ale i směr úběru. Následně bude docházet k pohybu po již zmíněné čtyřúhelníkové „spirále“. Další částí této kapitoly je postup stanovení řezných podmínek a poté předeptání jejich konečných hodnot. V poslední části této kapitoly se popisuje reálné uspořádání v halové laboratoři a použité zařízení. Popis experimentu je zde také z důvodu toho, že by v budoucnu mohla být snaha tento experiment rozšířit. Při zachování stejného postupu a zařízení mohou být výsledky tohoto měření použity a tudíž se nemusí měření opakovat a tedy se může provést měření za například jiných řezných podmínek.

3.2.1 Nástroje a obráběný materiál

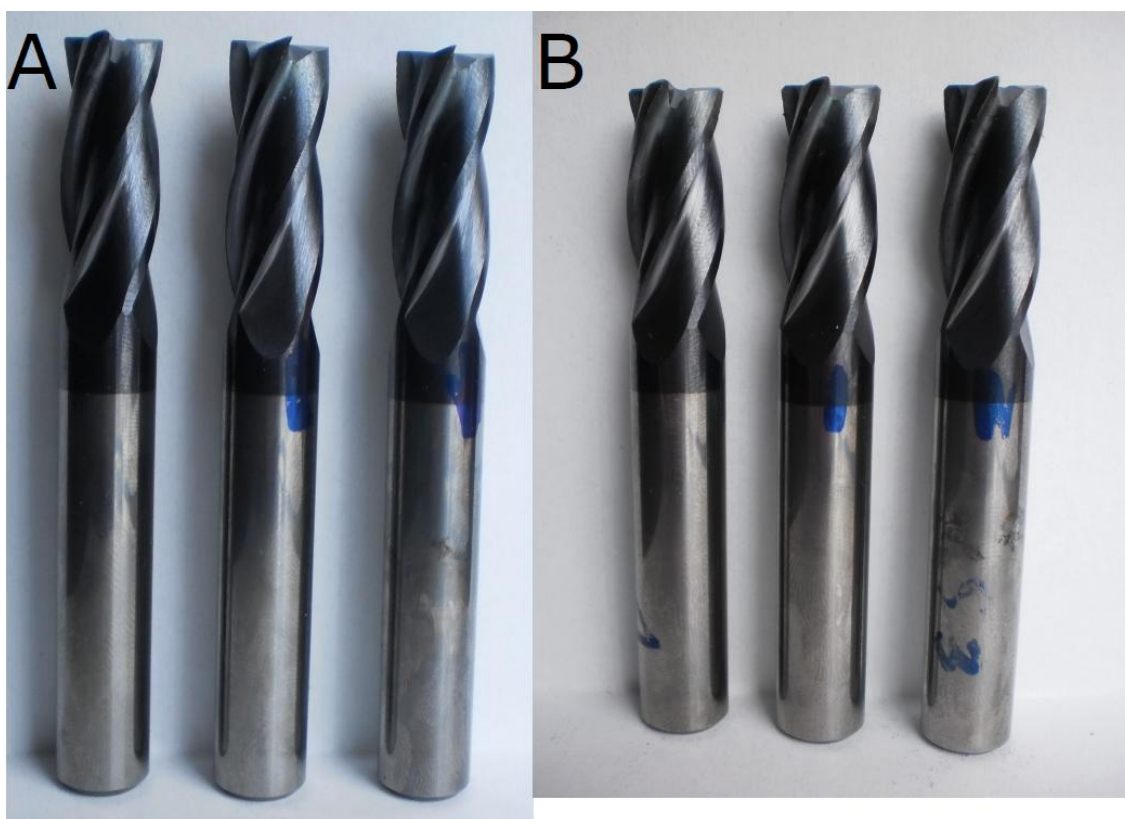
3.2.1.1 Nástroje

Pro experiment bylo celkem použito 6 nástrojů. Jednalo se o čtyřbřité čelně válcové monolitní frézy ze slinutého karbidu opatřeny tenkou vrstvou. Základní parametry nástrojů jsou uvedeny v Tab. 1. Obr. 19 zobrazuje skutečné použité nástroje. Tyto nástroje byly dvou typů a označeny jako A a B. Od každého typů nástroje byly k dispozici 3 stejné nástroje. Řezný materiál byl dodán firmou Hofmaister. Nástroj typu A má katalogové číslo 422825. Nástroj typu B je tentýž nástroj. Došlo však u něj k dodatečné úpravě špičky nástroje. Vytvořilo se na těchto nástrojích na špičce sražení $0,6 \times 45^\circ$.

Na trhu s řeznými nástroji jsou v nabídce různé úpravy špičky nástrojů, ale jednotlivé nástroje se od sebe liší řeznými úhly, typem substrátu, deponovanou vrstvou a mikrogeometrií. Díky skutečnosti, že firma Hofmeister dodala nástroje a opatřila nástroj požadovaným sražením, v experimentu by se měl projevit pouze vliv špičky nástroje, protože všechny nástroje jsou vyrobeny ve stejné sérii.

| Nástroj | A | B |
|---------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Průměr D [mm] | 12 | 12 |
| Počet zubů | 4 | 4 |
| Skutečné sražení na špičce [mm] | $0,15 \times 45^\circ$ | $0,6 \times 45^\circ$ |
| Stoupání šroubovice [°] | 50° | 50° |
| Celková délka [mm] | 83 | 83 |
| Délka řezné části [mm] | 26 | 26 |

Tab. 1 Základní parametry nástrojů



Obr. 19 Použité typy nástrojů

3.2.1.2 Obráběný materiál [6,7]

Jako materiál polotovaru použitého při testování byla využita ocel ČSN 12 050.1. Jedná se o uhlíkovou konstrukční ocel určenou k zušlechťování a povrchovému kalení. Materiál byl zvolen na základě požadavků zadavatele a na základě skutečnosti, že se používá jako etalonový materiál při zkouškách obrobitelnosti. Polotovar byl ve formě bloku 305 x 305 x 185 mm. Před provedením testu byl z důvodu odstranění tepelně ovlivněné oblasti předchozím dělením přefrézován na rozměry 296 x 296 x 180 mm. Na pracovním stole frézky byl upnut pomocí čtyř upínek.



Obr. 20 Upnutý obráběný polotovar

| Označení oceli dle norem | | |
|--------------------------|--------|-----|
| ČSN | W. Nr. | DIN |
| 12 050 | 1.1191 | C45 |

Tab. 2 Označení oceli dle norem [6]

Ocel ČSN 12 050.1 patří mezi nejpoužívanější uhlíkové oceli. Díky svému chemickému složení je ocelí vhodnou k zušlechťování a povrchovému kalení. Je dodávána v žíhaném stavu. V tomto stavu vykazuje vysokou houževnatost a dobrou tvarovou stabilitu po tepelném zpracování. Při kalení je nutné počítat s nižší prokalitelností. Ocel je velmi dobře obrobitelná a používá se jako etalonový materiál při zkouškách obrobitelnosti.

Ocel se používá pro pevnostní díly ve všeobecném strojírenství, které se následně tepelně zpracovávají. Za takovýchto podmínek jsou využity maximálně mechanické vlastnosti oceli. Z této oceli se vyrábějí hřídele těžebních strojů, karuselů, turbokompresorů, větší ozubená kola, rotory šroubových kompresorů, pístnice, ojnice, čepy, pevnostní kolíky, frézovací trny a vrtací tyče.

| Chemický prvek | C | Mn | Si | P max | S max | Cr max | Cu max | Ni max |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Obsah [%] | 0,42-0,50 | 0,50-0,80 | 0,17-0,37 | 0,040 | 0,040 | 0,25 | 0,30 | 0,30 |

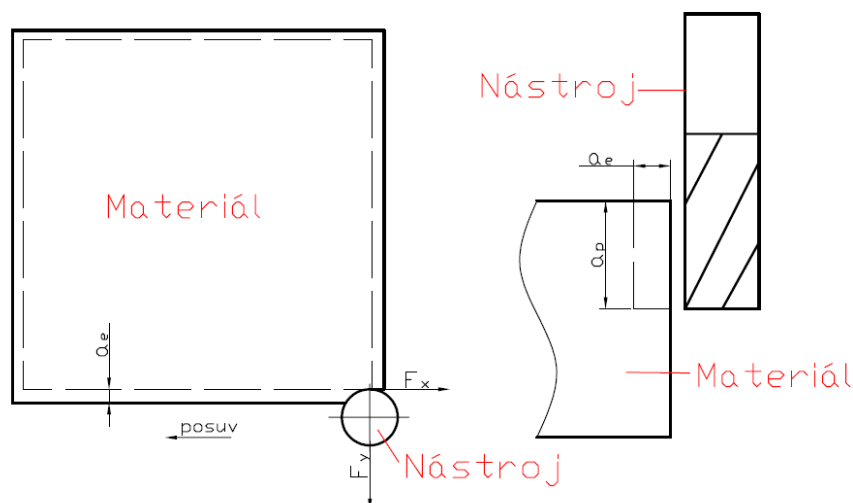
Tab. 3 Chemické složení oceli ČSN 12 050.1 [7]

Mechanické a fyzikální vlastnosti:

| | |
|---|---|
| Tvrдость | 207 HB |
| Obrobitelnost | 14 b |
| Mez pevnosti R_m [MPa] | 590-710 |
| Mez kluzu R_e [MPa] | 325-390 |
| Hustota [kg/m ³] | 7 870 |
| Teploty přeměn: | $A_{C1} \sim 725 \text{ }^\circ\text{C}$, $A_{C3} \sim 785 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_S \sim 310 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Tepelná vodivost λ [W/m.K] | 49 |
| Teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹] | $11,6 \cdot 10^{-6}$ |

3.2.2 Strategie obrábění

Pro experiment byla zvolena strategie obrábění nazývaná stranové či rohové frézování. Podstatou je to, že dochází k odebrání materiálu obvodem i čelem nástroje. Cyklus, který byl pro experiment využitý, se nazývá IMACHINING. Cyklus vytváří ostrůvek ve středu polotovaru. Materiál byl tedy odebírán ze všech stran polotovaru stejně a to sousledným frézováním, jelikož stroj, na kterém experiment probíhal, byla NC frézka s bezvřolovými posuvovými šrouby.



Obr. 21 Schematický náčrt způsobu obrábění

Obrábění probíhalo tak, že nástroj vytvářel ostrůvek uprostřed obrobku. Jelikož dráha nástroje tvořila čtvercový tvar, nástroj musel vyjíždět z řezu, a tudíž byl řez přerušovaný. U frézování však nemá velký význam přerušovaný řez, protože každý zub během jedné otáčky vjede do řezu a opět z něj vyjede. Přerušovaný řez je tedy pro

frézování charakterizující. Jednotlivé úběry materiálu probíhaly vždy konstantní šířkou řezu a_e a konstantní hloubkou řezu a_p . Za předpokladu, že došlo k odebrání materiálu v celé ploše obrobku, cyklus se zastavil. Dále došlo k posunutí nulového bodu o velikost hloubky řezu a obrábění probíhalo dále od vnějšího tvaru za stále stejných podmínek. Schematický postup obrábění představuje Obr. 21.



Obr. 22 Dynamometr a přesná kleština ER25

Jelikož se během experimentu měřily řezné síly a nebylo možné použít tříložkový frézovací statický dynamometr, protože obráběný materiál měl větší hmotnost a rozměry, než bylo možné upnout na plochu statického dynamometru, použil se tedy rotační nástrojový dynamometr Kistler. Na rotačním dynamometru, který je dostupný ve vybavení halové laboratoře Obr. 22, je možné upínat pouze do přesného kleštinového upínače ER25. I když kleština nepatří mezi způsoby upínání s největší tuhostí, byl tento způsob upnutí dostačující, protože samotný dynamometr vykazuje omezenou tuhost a ta nepřevyšuje tuhost upínače.

3.2.3 Volba řezných podmínek pro dlouhodobou zkoušku [19]

Při větším počtu nástrojů by se využilo pro volbu řezných podmínek krátkodobé zkoušky trvanlivosti. Z výsledků získaných krátkodobou zkouškou je možné určit optimální řezné podmínky s využitím Taylorova vztahu. Pomocí krátkodobé zkoušky se tedy stanoví optimální řezná rychlost a posuvová rychlost. Toto stanovení je popsáno v kapitole 2.4.2. Metoda Wearrate se používá pro nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami. Další v praxi využívanou metodou krátkodobých zkoušek trvanlivosti je metoda dle A. S. Kondratova. Jelikož k experimentu byl dodán omezený počet nástrojů, bylo možno provádět zkoušku dlouhodobou. Řezné podmínky se stanovily pomocí doporučených řezných podmínek výrobců nástrojů podobných parametrů. Dále ohledně stanovení řezných podmínek proběhl odborný posudek na základě zkušeností

z laboratoře technologie obrábění ve Vědeckotechnickém parku, kde jsou nástroje typu A ve velké míře využívány. Takovýmto odborným posouzením se zkrátil čas experimentu a dodané nástroje se využily pro dlouhodobé zkoušky trvanlivosti.

Na Obr. 23 můžeme vidět prvotní stanovení řezných podmínek pomocí kalkulátoru řezných podmínek výrobců řezných nástrojů firmy ISCAR. Pro podobný typ frézy a zadané podmínky obrábění doporučuje firma ISCAR řeznou rychlost $v_c = 221$ m/min a posuv na zub $f_z = 0,1$ mm/zub.

| Tool | |
|---------------------|------------------------------------|
| Product Family | CHATTERFREE SOLID MILL LINE |
| Designation | - |
| Catalog No | - |
| Dia (mm) | 12 |
| Z / Flute | 5 |
| Ap (mm) | 30 |
| Insert | |
| Designation | EC-E5L 12-30W12CF83 |
| Catalog No | 5622542 |
| Solid/MM dia | 12 |
| Grade | IC900 |
| Estimated cut.cond. | |
| Ap per pass (mm) | 6 |
| Ap - NOP | 1 |
| Ae per pass (mm) | 2 |
| Ae - NOP | 1 |
| Vc (m/min) | 221 |
| fz-(mm/tooth) | 0.1 |
| P (KW) | 2.321 |
| Q-MRR (cm3/min) | 35.18 |

Obr. 23 Doporučené řezné podmínky [19]

Po volbě řezných podmínek pomocí kalkulátoru řezných podmínek proběhl posudek odborníkem z praxe. Ten tyto podmínky zhodnotil jako podmínky, při kterých se setkával ve své strojírenské praxi s nadměrným opotřebením špičky nástroje. V Tab. 4 jsou uvedeny konečné hodnoty řezných podmínek použité při experimentu.

| | |
|----------------|------|
| v_c [m/min] | 220 |
| a_p [mm] | 4 |
| a_e [mm] | 2 |
| n [ot/min] | 5834 |
| f_z [mm/zub] | 0.11 |
| v_f [mm/min] | 2518 |

| | |
|-----------------|------|
| a_{\max} [mm] | 0.08 |
|-----------------|------|

Tab. 4 Zvolené řezné podmínky

3.2.4 Uspořádání experimentu v halové laboratoři

Experiment byl realizován v halové laboratoři katedry technologie obrábění ZČU v Plzni. K experimentu se používaly stroje a přístroje dostupné v laboratoři. Stroj, na kterém probíhalo obrábění, byl MCV 750 A. Jedná se o tříosé NC frézovací centrum s CNC řízením. Ve vřetenu byl umístěn rotační dynamometr KISTLER. Aby bylo možné zaznamenávat řezné síly z rotačního dynamometru, byl přišroubován do otvorů se závitem ve vřeteníku frézky držák se snímačem elektrického náboje, který podle zatížení nástroje upnutého v dynamometru vzniká na principu piezoelektrického jevu. Tento snímač je spojen se zesilovačem Kistler 5223 speciálním uhlíkovým kabelem. Uhlíkovým kabelem přichází malý elektrický náboj [pC] do zesilovače. Úkolem zesilovače je přeměnit tento elektrický náboj na měřitelné napětí [V]. Napětí je úměrné očekávanému silovému zatížení dynamometru. Další částí měřicí soustavy je radič. Pomocí radiče se výstupní napětí všech měřených složek řezných sil ze zesilovače soustředí do jednoho datového kabelu. Datový kabel je vstupem do měřicí karty. Měřicí karta, umístěná v počítači, zachycuje měřené analogové signály a přeměňuje je digitální signál, který se v osobním počítači zaznamenává pomocí softwaru LabVIEW 8.2.



Obr. 24 Rozmístění strojů a zařízení během experimentu

Obr. 24 zobrazuje reálné rozmístění použitého zařízení v halové laboratoři. Na obrázku je vidět, že měřicí soustava je umístěna v pojízdném pracovním stole ve vzdálenosti přibližně 1 metru od obráběcího centra. Stůl je z důvodu okolního vlnění, které nastávalo od stroje, odstíněn tenkým plechem umístěným okolo pojízdného stolu.

Propojovací uhlíkový kabel byl veden do stroje otvorem v horním krytu stroje, aby bylo možné uzavření předních posuvných dveří.

Mezi uspořádání experimentu je důležité uvést i umístění nástroje. Nástroj, jak již bylo popsáno, byl upnutý v kleštině ER25. Aby se předešlo velkému vyložení nástroje a tím vzniku nežádoucích jevů spojených s nadměrným vyložení nástroje, fréza se umístila až na dno kleštiny. Tak vzniklo při délce nástroje 83 mm vyložení 45 mm.



Obr. 25 Upnutí polotovaru

Obráběný polotovaru byl blok o rozměrech 305 x 305 x 185 mm, vážil přibližně 130 kg. Takto rozměrný polotovaru bylo důležité upnout. Upnutí se vyřešilo tak, že se na bokách bloku vyfrézovali dvě drážky ve vzdálenosti 20 mm od hrany a 30 mm široké. Drážky se vytvořily na stranách proti sobě (Obr. 25). Pomocí takto připravených drážek se blok upnul čtyřmi upínkami k ploše stolu obráběcího stroje.

3.3 Zpráva o průběhu experimentu

Jak již bylo uvedeno, experiment probíhal v halové laboratoři katedry technologie obrábění. Čas potřebný pro realizaci byl stanoven na dva dny. Tato doba odpovídala i časové mezeře v harmonogramu stroje, kdy jinak kapacitně vytížený stroj neprováděl výzkumnou činnost. Už během plánování se odhadlo, že vyhrazená doba dvou dnů bude muset být plně využita. Provedla se taková opatření, aby nedošlo ke vzniku ztrátových časů vlivem nepřipravenosti experimentu. Těmito kroky byla včasná příprava experimentu a vytvoření již zmíněné tabulky výpočtů pro snadnější zadávání rozměrů obrobku.

Příprava experimentu již proběhla den předem. Na polotovaru se vytvořily prvky důležité ke správnému upnutí. Před upnutím se polotovaru umístil do středu stolu obráběcího stroje, následně se vyrovnal do směru os souřadného systému stroje a poté se upnul pomocí upínek k ploše stolu. Jelikož byl obrobek blok oceli dělený laserovým paprskem, nacházela se na stranách tepelně ovlivněná vrstva a vrstva oxidu železa. Tato vrstva se odstranila stopkovou frézou o průměru 16 mm do hloubky 30 mm. Tím se

docílilo i přesného vyrovnání obvodu bloku do kartézského souřadného systému stroje. Konečný rozměr po orovnání bloku byl tedy 296 x 296 mm. Potom se stejným nástrojem frézovala vrchní plocha bloku. Stejným nástrojem proto, aby v případě použití frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami s větším průměrem, která by byla pro danou operaci vhodnou volbou, nedošlo k případnému nežádoucímu zpevnění obrobené plochy.

Po přípravě polotovaru určeného k testování se zapojila soustava pro měření řezných sil. Skládala se z rotačního čtyř-složkového dynamometru, snímače, uhlíkového kabelu, zesilovače, řadiče a sběrné karty s osobním počítačem. Záznam řezných sil se prováděl pomocí softwaru LabVIEW. Postup záznamu řezných sil probíhal tím způsobem, že došlo ke spuštění cyklu na obráběcím stroji, poté se spustilo nahrávání softwarovým tlačítkem MONITOR a tlačítkem START v programu LabVIEW a nakonec se spustil zesilovač přepínačem z polohy RESET do polohy ON. Záznam řezných sil probíhal po dobu 30 s na začátku každého měřeného úseku, tj. na začátku zvoleného časového intervalu, po kterém proběhlo měření opotřebení. Konec záznamu se provedl tak, že se přepínač na zesilovači dal do polohy RESET a softwarovým tlačítkem se vypnulo nahrávání.

Po zvoleném časovém intervalu se obráběcí cyklus zastavil, nástroj společně s dynamometrem se vyjmul z vřetena stroje. Nástroj i s dynamometrem se upnuly do mikroskopu Obr. 26a provedlo se měření opotřebení na hřbetě na všech čtyřech břitech. Změřená hodnota a snímek ostří se zaznamenaly. Následně se vytvořily tabulky a grafy opotřebení.



Obr. 26 Mikroskop Carl Zeiss

Vlastní experiment trval po dobu dvou dnů. Nástroje se testovaly první den v následujícím pořadí: bez úpravy, s úpravou, bez úpravy. Druhý den bylo pořadí nástrojů: s úpravou, bez úpravy, s úpravou. Během experimentu došlo ke změně způsobu upnutí nástroje. Tato změna se provedla po otestování dvou nástrojů s ostrou špičkou a dvou nástrojů se sražením. Důvod změny upnutí byl takový, že se upnutí do kleštiny zdálo být málo tuhé. Již se neprovádělo měření řezných sil, protože rotační

dynamometr není vybaven hydraulickým upínačem. Dynamometr se nahradil hydraulickým upínačem a již nebylo použito jiného například statického dynamometru již z dříve uvedených důvodů. Po otestování zbylých dvou nástrojů došlo k závěru, že se změna upnutí neprojevila na změnu trvanlivosti nástroje. Nástroj se do hydraulického upínače (Obr. 27) umístil tak, aby se zajistilo stejné vyložení, jaké bylo u kleštiny. Vyložení nástroje bylo 45 mm.



Obr. 27 Hydraulický upínač [16]

Parametry, které se po jednotlivých intervalech měnily, byly počáteční rozměr polotovaru a konečný rozměr ostrůvku. Tyto rozměry se generovaly pomocí tabulky výpočtů vytvořené v programu Microsoft Excel, aby se dodržela stanovená doba obrábění 5 minut. Ostatní parametry zůstávali bez změny. Po skončení měření opotřebením se zjistil konečný rozměr ostrůvku při době obrábění 5 minut. Tento rozměr se zadal jako konečný rozměr a počáteční rozměr polotovaru se zadala hodnota, která v předchozím cyklu byla hodnotou konečnou. Takovýto postup zajišťoval, že docházelo k postupnému úběru materiálu na horní ploše bloku. Když došlo k přefrézování vrchní plochy, posunul se nulový bod a hodnotu hloubky řezu. Poté se pokračovalo stejným způsobem.

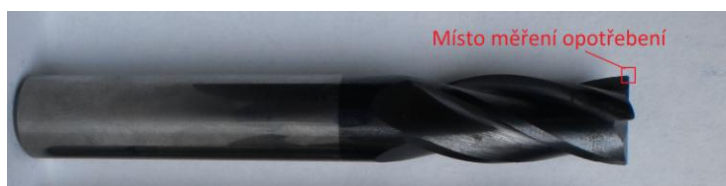
Další parametr cyklu, který bylo nutné přepočítat, byl posuv. Do cyklu se nezadával posuv na zub ani posuvová rychlost. Cyklus byl naprogramován pomocí se zadáním maximální tloušťky třísky a se zadáním šířky záběru a_e . Z těchto dvou hodnot cyklus determinoval posuv na zub. Na počátku se hodnota maximální tloušťky třísky určila pomocí posuvu na zub, průměru frézy a šířky záběru. Nástroje po celou dobu experimentu obráběly za stejných technologických podmínek.

4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU VČETNĚ POROVNÁNÍ UŽITNÝCH VLASTNOSTÍ TESTOVANÝCH NÁSTROJŮ

V experimentu byla provedena dlouhodobá zkouška trvanlivosti všech šesti nástroj. Testování probíhalo za konstantních podmínek, které se stanovily před zahájením experimentu odborným odhadem a za pomoci doporučených řezných podmínek výrobců nástrojů.

Obrábění probíhalo podle strategie navržené při plánování experimentu. Dostupný materiál byl obráběn jednotlivými nástroji podle předem stanoveného postupu stálou řeznou rychlostí. Po určitých časových intervalech bylo měřeno opotřebením VB. Po

dosažení stanového kritériálního opotřebení byla vyhodnocena trvanlivost nástrojů. Velikost kritériálního opotřebení byla stanovena na hodnotu $VB_{krit}=250 \mu\text{m}$.



Obr. 28 Místo měření opotřebení

Měření opotřebení probíhalo vždy na všech čtyřech břitech nástroje. Na začátku měření každého nástroje se stanovil jeden břit jako první, od něho se postupovalo v měření dalších břitů ve směru hodinových ručiček. Tím se docílilo toho, že při následném otupení a měření docházelo k vyhodnocování břitů ve stejném pořadí a první břit byl prvním po celou dobu testování. Opotřebení se měřilo v místě špičky (

Obr. 28), jelikož experiment byl zaměřen na tento parametr. Výsledná hodnota opotřebení se stanovila jako průměrná hodnota pro daný časový interval.

4.1 Dlouhodobá zkouška nástroje typu A



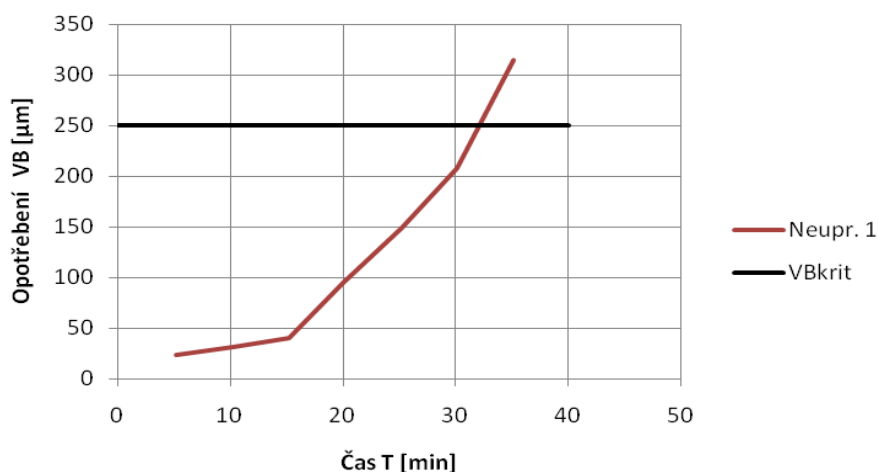
Obr. 29 Nástroj typu A

4.1.1 Nástroj číslo 1

Nástrojem typu A (Obr. 29) se obrábělo za konstantních řezných podmínek stanovených v návrhu experimentu. Interval, po kterém docházelo k měření opotřebení, se stanovil na 5 minut. Hodnoty opotřebení naměřené v průběhu obrábění jsou uvedeny v Tab. 5 .

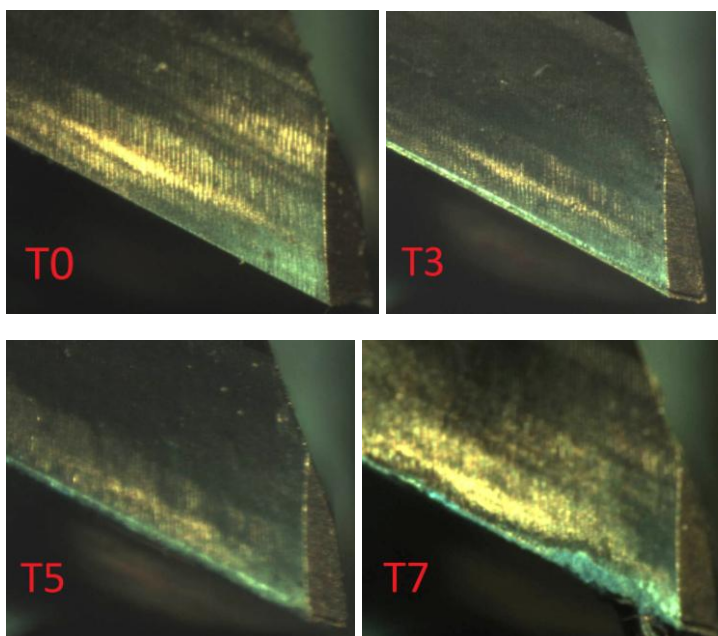
| Nástroj A č. 1 | | | | | | |
|----------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------|
| | Δt [min] | VB_1 [μm] | VB_2 [μm] | VB_3 [μm] | VB_4 [mm] | $VB_{stř}$ [μm] |
| T_1 | 5,17 | 25 | 21 | 30 | 19 | 24 |
| T_2 | 4,98 | 41 | 32 | 30 | 25 | 32 |
| T_3 | 5,02 | 46 | 46 | 43 | 28 | 41 |
| T_4 | 4,83 | 49 | 43 | 97 | 192 | 95 |
| T_5 | 5,17 | 83 | 232 | 73 | 209 | 149 |
| T_6 | 4,97 | 179 | 303 | 129 | 222 | 208 |
| T_7 | 5 | 394 | 289 | 255 | 319 | 314 |

Tab. 5 Naměřené hodnoty opotřebení nástroje A



Graf 1 Závislost opotřebení nástroje A1

Při obrábění tímto nástrojem se opotřebení do 15. minuty zvyšovalo jen mírně Graf 1. Tento nízký nárůst opotřebení se projevoval i akustickou emisí, kdy proces obrábění byl bez přítomnosti vysokých a hlubokých tónů. Poté došlo až k exponenciálnímu nárůstu opotřebení. I když byl nárůst opotřebení náhlý, na břítu bylo opotřebení rovnoměrné bez vzniku plastické deformace. Nárůst opotřebení se projevil v akustické emisii. Začaly být slyšet tóny spojené s nestabilitou procesu řezání, jako jsou tóny vysoké. Ty se projeví chvěním stroje zjistitelným hmatem až vibrací podlahy stroje. Od 25. minuty do 35. minuty se nástroj projevoval vysokými tóny spojenými s výrazným opotřebením. Kriteriačního opotřebení nástroj dosáhl po 32 minutách.

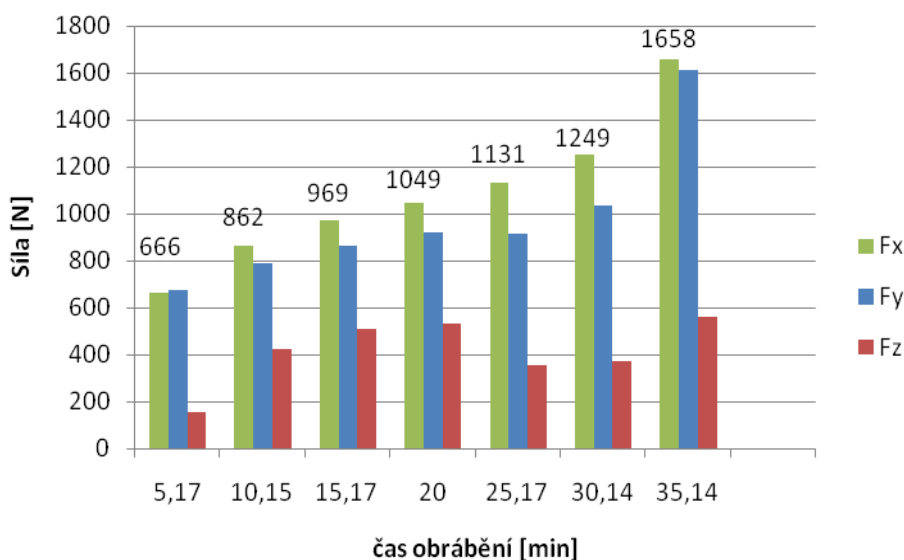


Obr. 30 Stav břítu v intervalech měření nástroje 1

K opotřebení docházelo rovnoměrně na hřbetě i na čele nástroje. Materiál nijak neulpíval v zubové mezeře. V posledních 5 minutách obrábění docházelo vlivem

opotřebení ke vzniku většího množství tepla a vnikající třísky odcházela v rozžhaveném stavu.

Na počátku každého intervalu byly měřeny řezné síly. Průběh řezných sil zobrazuje Graf 2. Podle předpokladu nejvyšších hodnot dosahovaly složky F_x a F_y a nárůst řezných sil byl rovnoměrný.



Graf 2 Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje A1

4.1.2 Nástroj číslo 2

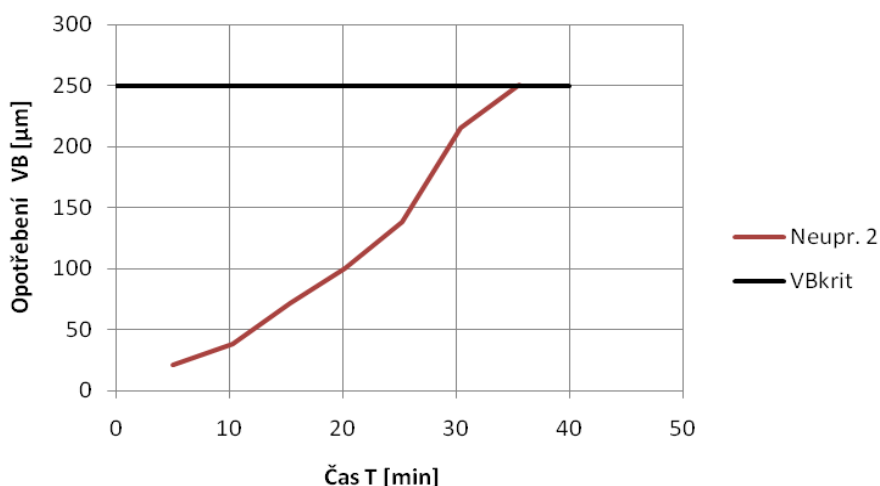
Hodnoty opotřebení naměřené v průběhu obrábění nástroje číslo 2 jsou uvedeny v Tab. 6. Obrábění probíhalo za stejných podmínek jako u nástroje číslo 1.

| Nástroj A č. 2 | | | | | | |
|----------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------------------------------|
| | Δt [min] | VB_1 [μm] | VB_2 [μm] | VB_3 [μm] | VB_4 [mm] | $VB_{\text{stř}}$ [μm] |
| T_1 | 5,02 | 19 | 20 | 24 | 22 | 21 |
| T_2 | 5,23 | 37 | 51 | 37 | 27 | 38 |
| T_3 | 5,12 | 40 | 48 | 124 | 73 | 71 |
| T_4 | 4,83 | 43 | 62 | 154 | 143 | 101 |
| T_5 | 5,13 | 57 | 173 | 202 | 121 | 138 |
| T_6 | 5,12 | 273 | 205 | 195 | 189 | 216 |
| T_7 | 5,17 | 284 | 267 | 235 | 216 | 251 |

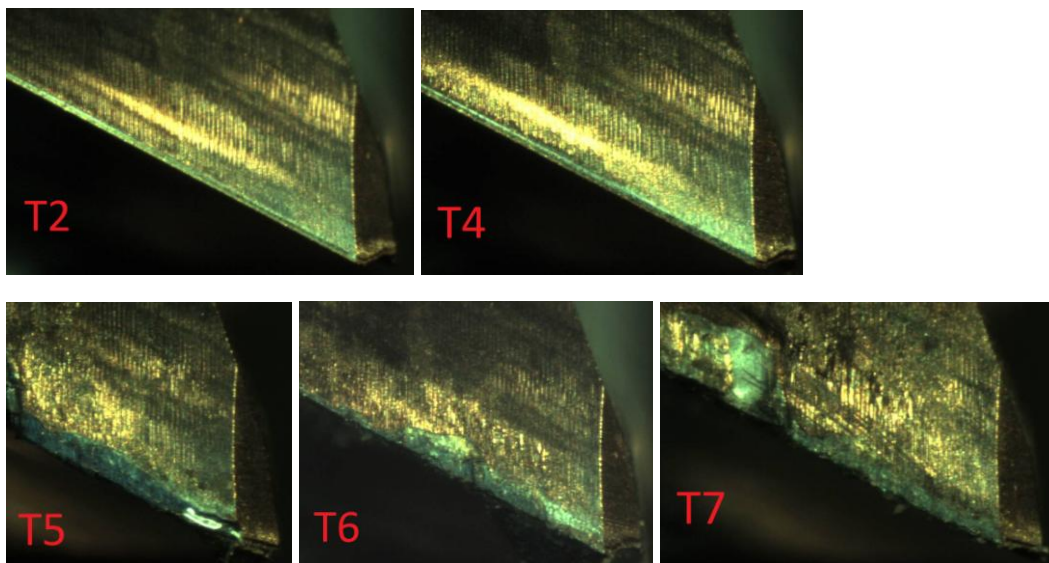
Tab. 6 Naměřené hodnoty opotřebení nástroje A

Při obrábění nástrojem číslo 2 bez úpravy špičky se opotřebení rovnoměrně zvyšovalo. Při pohledu na průběh testování tohoto nástroje z hlediska akustické emise

byl takový, že do 25. minuty se proces jevil jako stabilní. Poté došlo k nárůstu opotřebení a začaly se vyznačovat vysoké a hluboké tóny charakterizující nestabilitu řezného procesu. Dosáhly takové míry, že se u nástroje ihned po dosažení kritériální hodnoty opotřebení nepokračovalo v testování. Kritériálního opotřebení se dosáhlo po 34 minutách.

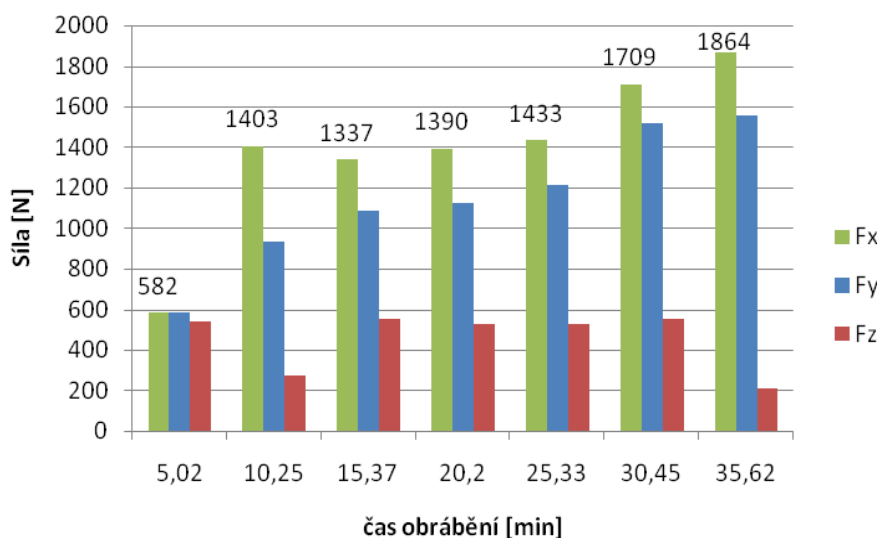


Graf 3 Závislost opotřebení na čase nástroje A2



Obr. 31 Stav bříty v intervalech měření nástroje 2

K opotřebení docházelo rovnoměrně na hřbetě i čele nástroje. Materiál nijak neulpíval v zubové mezeře. V posledních 5 minutách obrábění docházelo vlivem opotřebení ke vzniku většího množství tepla a vnikající třísky odcházela v rozžhaveném stavu. Vznik většího množství tepla a teplotních rázů se projevilo jako křehký lom bříty. Řezné síly jsou zaznamenány v Graf 4. V čase obrábění 10 minut došlo k rychlému nárůstu řezné složky F_x , poté se síla ustálila. V posledních dvou měřených intervalech mírně vzrostla. Rychlý nárůst by mohl být způsobený změnou geometrie nástroje vlivem opotřebení.



Graf 4 Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje A2

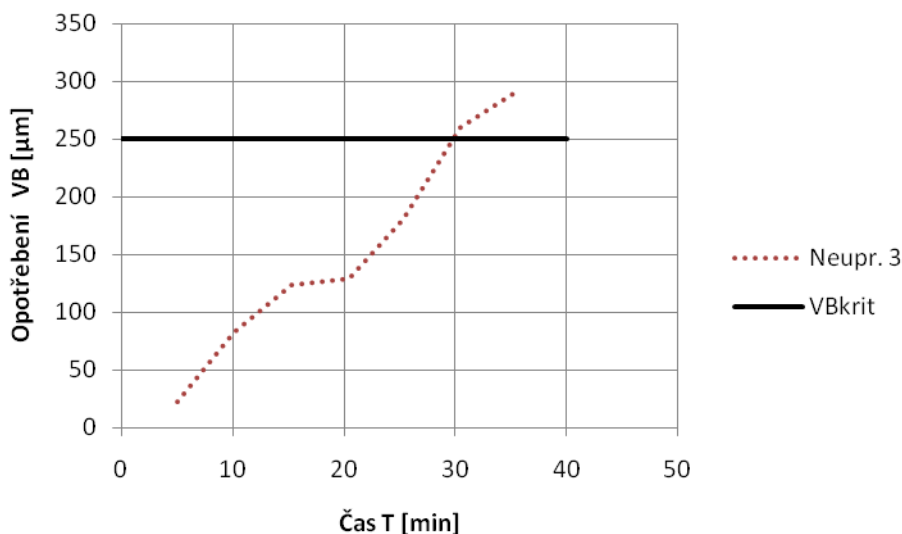
4.1.3 Nástroj číslo 3

Nástrojem číslo 3 se obrábělo opět v intervalech po 5 minutách. Před zahájením testování proběhla již zmíněná úprava experimentu. Došlo ke změně upínačů, a tudíž se neměřily řezné síly, protože dynamometr není vybaven hydraulickým upínáním nástrojů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 7.

| Nástroj A č. 3 | | | | | | |
|----------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------|
| | Δt [min] | VB_1 [μm] | VB_2 [μm] | VB_3 [μm] | VB_4 [mm] | $VB_{stř}$ [μm] |
| T_1 | 5,1 | 19 | 27 | 22 | 23 | 23 |
| T_2 | 5,08 | 35 | 33 | 122 | 140 | 83 |
| T_3 | 5,17 | 65 | 111 | 154 | 165 | 124 |
| T_4 | 5,17 | 81 | 112 | 159 | 166 | 130 |
| T_5 | 4,8 | 140 | 141 | 199 | 240 | 180 |
| T_6 | 5,22 | 335 | 229 | 232 | 245 | 260 |
| T_7 | 5,02 | 352 | 280 | 282 | 250 | 291 |

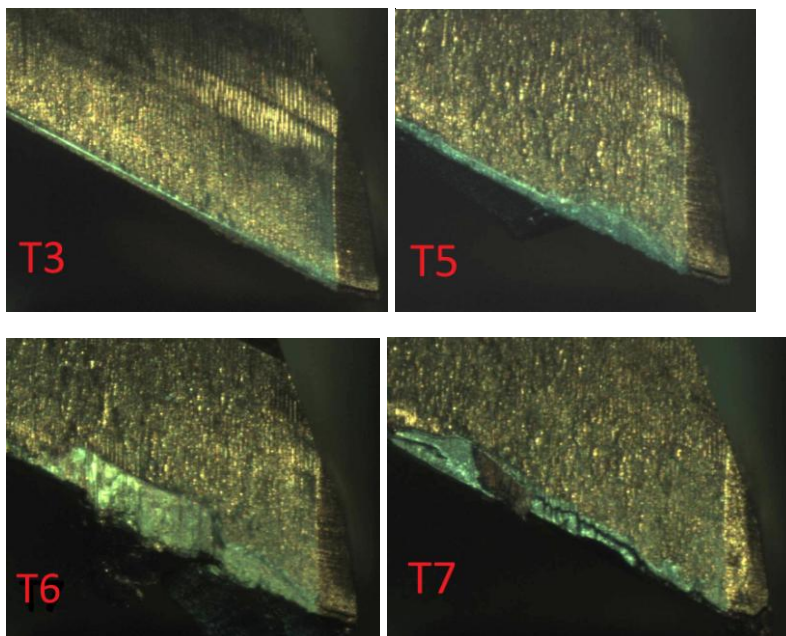
Tab. 7 Naměřené hodnoty opotřebení nástroje A

Hodnoty kritériálního stavu opotřebení došlo přibližně v čase $t = 30$ min. Průběh opotřebení na čase obrábění zobrazuje Graf 5. Opotřebení do 20. minuty pomalu rostlo na hodnotu 130 μm , poté došlo k rychlému nárůstu opotřebení. Při změně upínače se předpokládalo, že se zvýší tuhost upnutí a tím dojde ke zvýšení trvanlivosti nástroj. Nástroj však vykázal nejnižší trvanlivost z testovaných nástrojů bez úpravy špičky nástroje. Na základě tohoto porovnání lze říci, že hydraulický upínač nemusí mít větší tuhost než upínač kleštinový.



Graf 5 Závislost opotřebení nástroje A3

Obr. 32 zobrazuje průběh opotřebení na hřbetě břitu v jednotlivých časových intervalech. Do 25. minuty vznikalo na břitu opotřebení abrazivního charakteru. Po této době začala na břitu vznikat vytrhávání břitu způsobené adhezí. V tomto čase začala vznikat nestabilita řezného prostředí, která se projevila akustickou emisí. Vznikaly hluboké tóny, které přecházely do základu stroje. Projevily se i tóny vysoké vzniklé od opotřebení nástroje. Dále se opotřebení projevilo i na vznikající tříске, kdy začala odletovat žhavá tříska. Žhavá tříska je projevem zvýšené teploty v místě řezu a proto lze považovat opotřebení na břitu jako křehký lom malých částí břitu.



Obr. 32 Stav břitu v intervalech měření nástroje 3

4.2 Dlouhodobá zkouška nástroje typu B



Obr. 33 Nástroj typu B

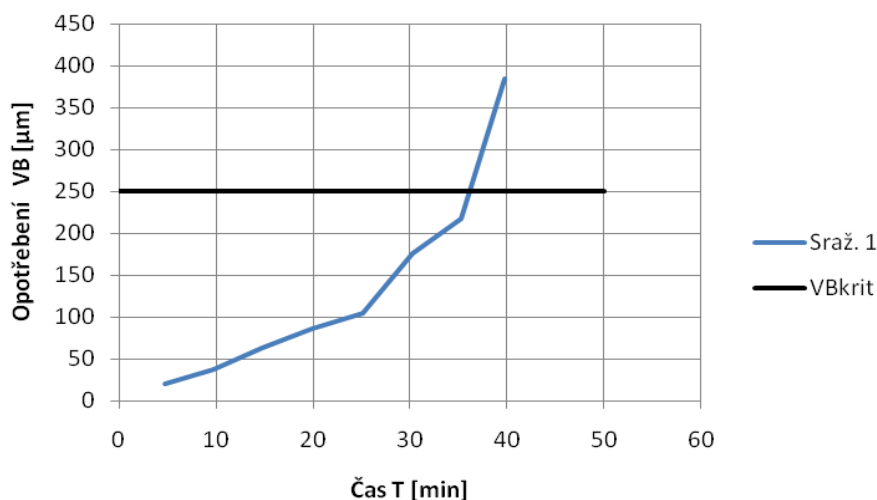
4.2.1 Nástroj číslo 1

Nástrojem typu B (Obr. 33) se obrábělo za konstantních řezných podmínek stanovených v návrhu experimentu. Interval, po kterém docházelo k měření opotřebení, se stanovil na 5 minut. Hodnoty opotřebení naměřené v průběhu obrábění jsou uvedeny v Tab. 8. Tab. 8 Naměřené hodnoty opotřebení nástroje B.

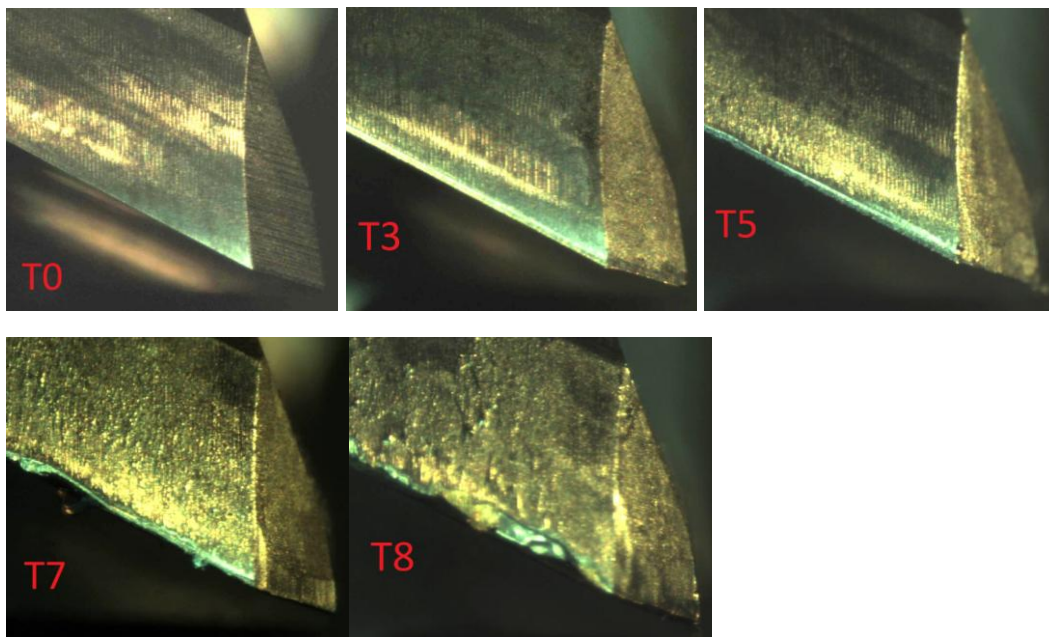
| Nástroj B č. 1 | | | | | | |
|----------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------------------------------|
| | Δt [min] | VB_1 [μm] | VB_2 [μm] | VB_3 [μm] | VB_4 [mm] | $VB_{\text{stř}}$ [μm] |
| T_1 | 4,77 | 22 | 21 | 20 | 20 | 21 |
| T_2 | 5,02 | 41 | 43 | 37 | 30 | 38 |
| T_3 | 4,98 | 49 | 62 | 78 | 65 | 64 |
| T_4 | 5,12 | 87 | 87 | 87 | 86 | 87 |
| T_5 | 5,28 | 89 | 117 | 109 | 106 | 105 |
| T_6 | 5,07 | 173 | 201 | 205 | 127 | 177 |
| T_7 | 4,97 | 195 | 272 | 244 | 157 | 217 |
| T_8 | 4,53 | 396 | 507 | 327 | 308 | 385 |

Tab. 8 Naměřené hodnoty opotřebení nástroje B

Hodnoty kritériálního stavu opotřebení došlo přibližně v čase $t = 36$ min. Průběh opotřebení na čase obrábění zobrazuje Graf 6 Závislost opotřebení nástroje B1 Graf 6. Opotřebení do 25. minuty pomalu rostlo na hodnotu $100 \mu\text{m}$. Do tohoto okamžiku se nástroj neprojevoval výraznou akustickou emisí. Poté došlo k rychlému nárůstu opotřebení. Začaly vznikat hluboké tóny, následovali vysoké vzniklé od opotřebení nástroje. Tento nástroj se v porovnání s nástrojem bez úpravy projevoval nižší intenzitou akustické emise.



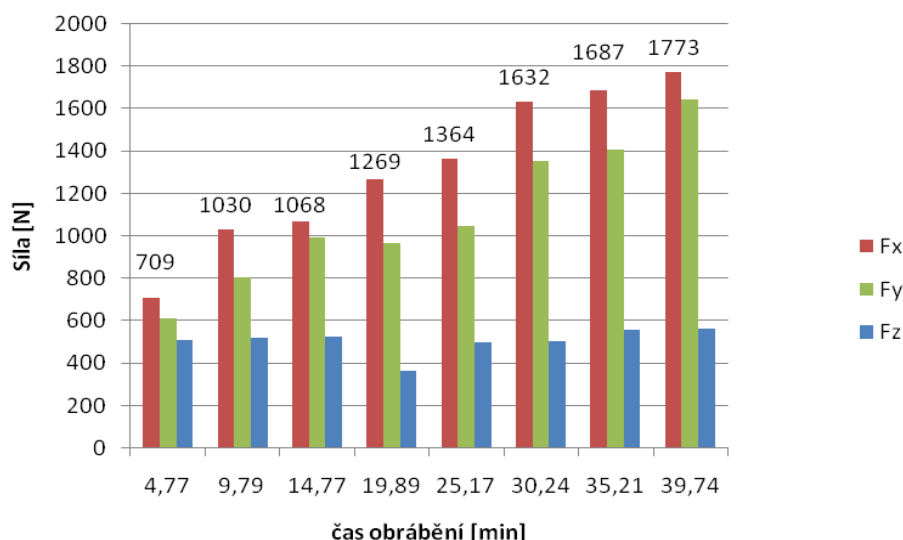
Graf 6 Závislost opotřebení nástroje B1



Obr. 34 Stav břitu v intervalech měření nástroje 1

V průběhu obrábění se břit opotřeboval rovnoměrně na čele i na hřbetě břitu v celé hloubce řezu. Obr. 34 Stav břitu v intervalech měření nástroje 1 Obr. 34 zobrazuje vznik opotřebení na hřbetě v jednotlivých intervalech. Do doby obrábění 25 minut mělo opotřebení abrazivní charakter. Poté se zvyšující se teplotou a tlakem a působením adheze vznikl křehký lom břitu a vydrolování ostří. Nárůst opotřebení se projevil také na barvě třísky, protože odletovala rozžhavená tříska.

U tohoto nástroje se měřily řezné síly. Předpokládalo se, že zvolená úprava špičky se projeví na průběhu řezných sil. Nástroj s úpravou vykazoval na počátku vyšší řezné síly. Rozdíl mezi řeznými silami naměřenými u nástroje bez úpravy a s úpravou byl přibližně 100 N.



Graf 7 Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje B1

4.2.2 Nástroj číslo 2

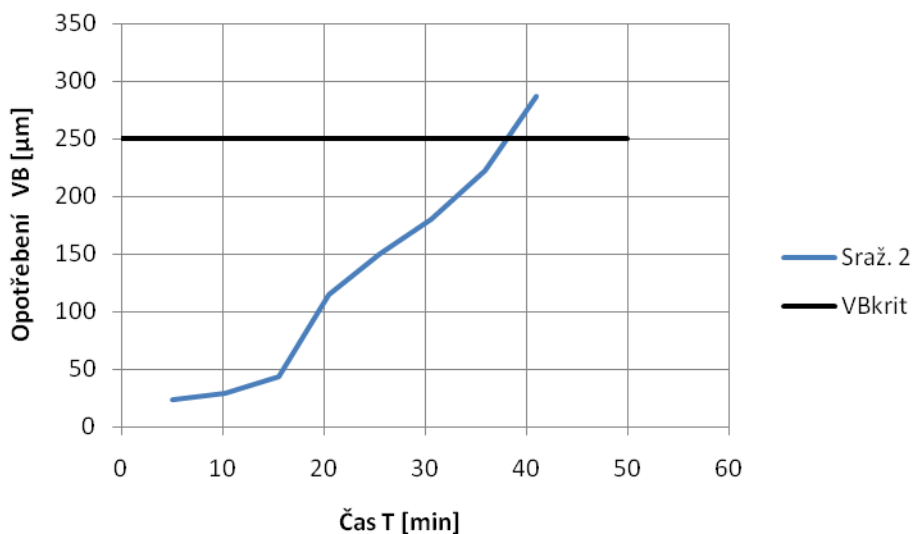
Nástrojem typu B (Obr. 33) se opět obrábělo za konstantních řezných podmínek stanovených v návrhu experimentu. Interval, po kterém docházelo k měření opotřebení, byl tedy 5 minut. Hodnoty opotřebení naměřené v průběhu obrábění jsou uvedeny v Tab. 9 Tab. 8 Naměřené hodnoty opotřebení nástroje B.

| Nástroj B č. 2 | | | | | | |
|----------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------------------------------|
| | Δt [min] | VB_1 [μm] | VB_2 [μm] | VB_3 [μm] | VB_4 [mm] | $VB_{\text{stř}}$ [μm] |
| T ₁ | 5,03 | 25 | 19 | 21 | 27 | 23 |
| T ₂ | 5,23 | 27 | 25 | 26 | 35 | 28 |
| T ₃ | 5,22 | 35 | 41 | 51 | 46 | 43 |
| T ₄ | 5 | 63 | 62 | 133 | 200 | 115 |
| T ₅ | 4,97 | 78 | 117 | 193 | 211 | 150 |
| T ₆ | 5,08 | 95 | 193 | 209 | 226 | 181 |
| T ₇ | 5,3 | 219 | 217 | 203 | 251 | 223 |
| T ₈ | 5,1 | 246 | 384 | 242 | 277 | 287 |

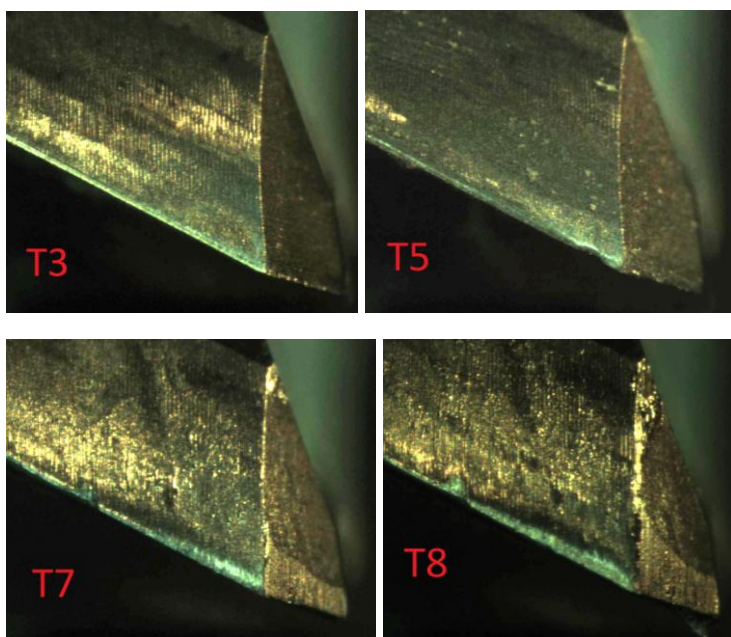
Tab. 9 Naměřené hodnoty opotřebení nástroje B

Při obrábění nástrojem číslo 2 s úpravou špičky se opotřebení rovnoměrně zvyšovalo. Nárůst opotřebení by bylo možné charakterizovat téměř jako lineární, pouze v čase obrábění 15 min došlo k poklesu naměřeného opotřebení. Při pohledu na průběh testování tohoto nástroje z hlediska akustické emise je nástroj choval 30. minuty stabilně. Poté došlo k nárůstu opotřebení a začaly se vyznačovat vysoké a hluboké tóny charakterizující nestabilitu řezného procesu. Dosáhly takové míry, že se u nástroje ihned

po dosažení kritériální hodnoty opotřebení nepokračovalo v testování. Kritériálního opotřebení se dosáhlo přibližně po 38 minutách.



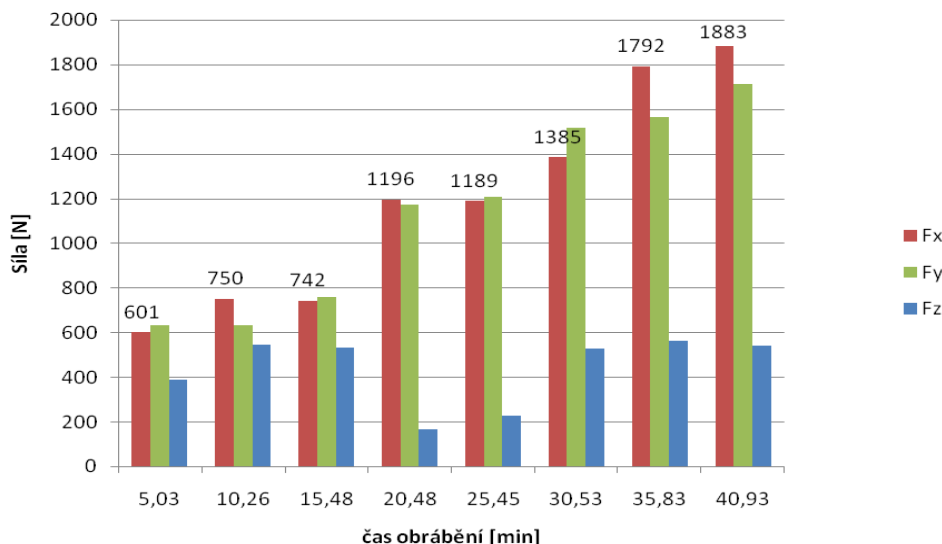
Graf 8 Závislost opotřebení nástroje B2



Obr. 35 Stav břitu v intervalech měření nástroje 2

Obr. 34 Stav břitu v intervalech měření nástroje 1 zobrazuje vznik opotřebení na hřbetě v jednotlivých intervalech. Po celou dobu obrábění mělo opotřebení abrazivní charakter. Docházelo k rovnoměrnému opotřebování břitu v celé hloubce řezu. Nástroj vykazoval nejvyšší stabilitu řezu. Tříška nikde neulpívala na nástroji ani nedocházelo ke křehkému lomu břitu. U tohoto nástroje se projevilo opotřebení změnou barvy třísky. Z místa řezu odletovala rozžhavená tříška.

U tohoto nástroje se také měřily řezné síly. V porovnání s nástrojem bez úpravy, tento nástroj vykazoval na počátku testování podobné řezné síly, avšak na konci testování narostly oproti nástroji bez úpravy.



Graf 9 Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje B2

4.2.3 Nástroj číslo 3

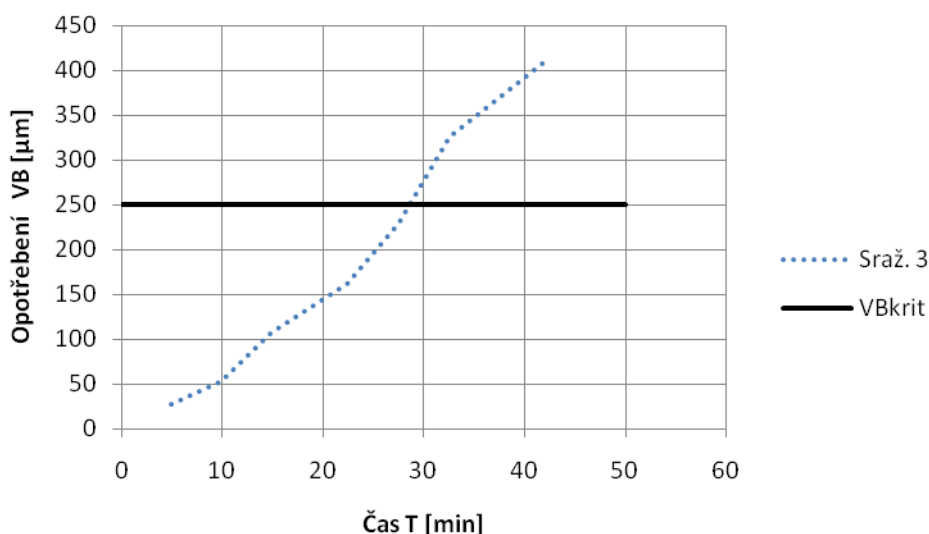
Nástrojem číslo 3 se obrábělo opět v intervalech po 5 minutách. Před zahájením testování proběhla již zmíněná úprava experimentu. Došlo ke změně upínačů, a tudíž se neměřily řezné síly, protože dynamometr není vybaven hydraulickým upínáním nástrojů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10.

| Nástroj B č. 3 | | | | | | |
|----------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------------------------------|
| | Δt [min] | VB_1 [μm] | VB_2 [μm] | VB_3 [μm] | VB_4 [mm] | $VB_{\text{stř}}$ [μm] |
| T_1 | 4,98 | 30 | 27 | 25 | 26 | 27 |
| T_2 | 4,92 | 67 | 41 | 40 | 62 | 53 |
| T_3 | 5,02 | 71 | 228 | 62 | 67 | 107 |
| T_4 | 7,5 | 143 | 249 | 136 | 117 | 161 |
| T_5 | 5,13 | 241 | 283 | 253 | 141 | 230 |
| T_6 | 5,12 | 304 | 332 | 350 | 320 | 327 |
| T_7 | 4,77 | 377 | 347 | 461 | 290 | 369 |
| T_8 | 4,98 | 443 | 385 | 445 | 382 | 414 |

Tab. 10 Naměřené hodnoty opotřebení nástroje B

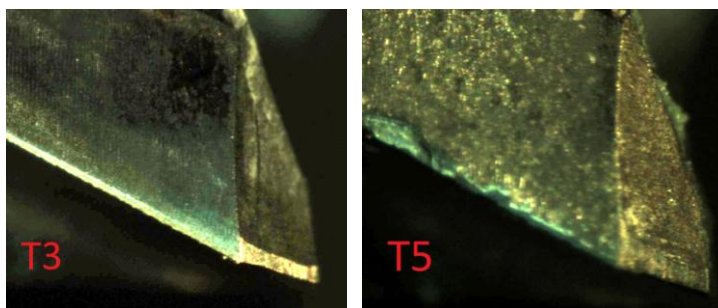
Hodnoty kritériálního stavu opotřebení došlo přibližně v čase $t = 29$ min. Průběh opotřebení na čase obrábění zobrazuje Graf 10. Opotřebení mělo lineární charakter. Při změně upínače se předpokládalo, že se zvýší tuhost upnutí a tím dojde ke zvýšení trvanlivosti nástroj. Nástroj však vykázal nejnižší trvanlivost z testovaných nástrojů s

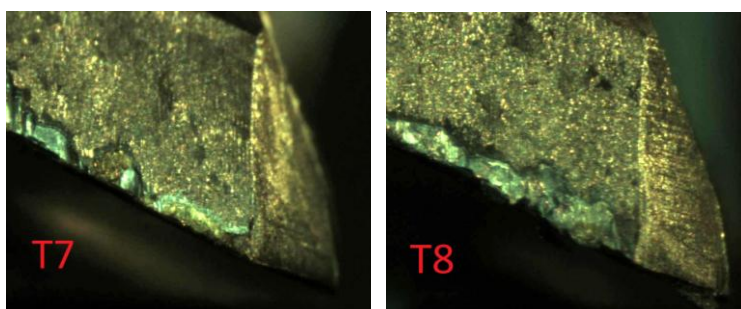
úpravou špičky nástroje. Na základě tohoto porovnání lze i v tomto případě říci, že hydraulický upínač nemusí mít větší tuhost než upínač kleštinový.



Graf 10 Závislost opotřebení nástroje B3

Obr. 36 zobrazuje průběh opotřebení na hřbetě břitu v jednotlivých časových intervalech. Do 20. minuty vznikalo na břitu opotřebení abrazivního charakteru. Po této době začala na břitu vznikat vydrolování břitu a křehký lom v podobě vylamování lasturovitých šupinek z břitu. Nestabilita řezného prostředí se však začala projevovat akustickou emisí až po 35 minutách v řezu i když výrazné opotřebení nástroje nastalo v intervalech dříve. Toto oddálení nestabilního řezu má za příčinu úprava geometrie špičky. I když nástroj dosáhl kritériálního opotřebení, bylo možné s ním dále obrábět. Po 35 minutách vznikaly hluboké tóny, které přecházely do základu stroje. Projevily se i tóny vysoké vzniklé od opotřebení nástroje. Dále se opotřebení projevilo i na vznikající třísce, kdy začala odletovat žhavá tříska.





Obr. 36 Stav břitu v intervalech měření nástroje 3

4.3 Sumarizace a vyhodnocení výsledků měření

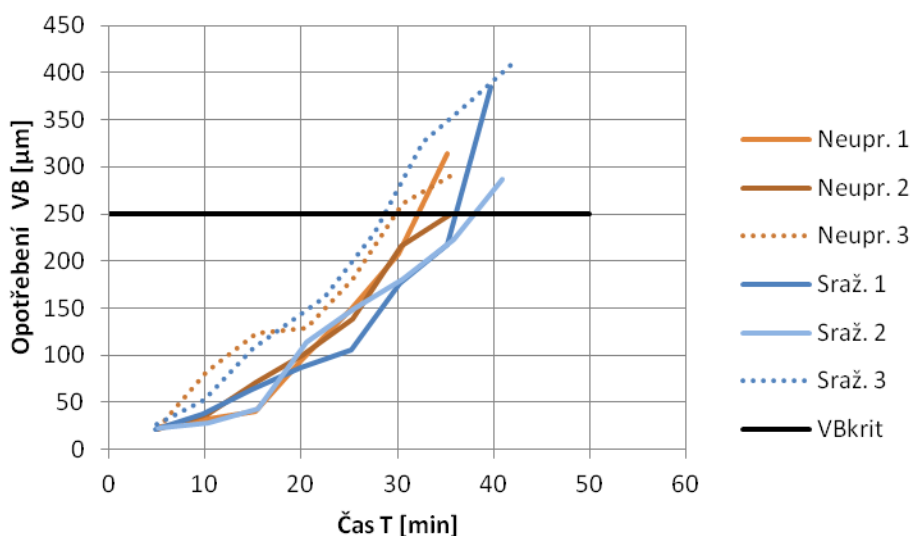
V experimentu byla provedena dlouhodobá zkouška trvanlivosti dvou typů nástrojů. Testovalo se celkem šest nástrojů, proto měl každý typ nástroje dvě opakování. Opakování je statistický termín a znamená to, že každý typ nástroje měl tři pokusy. Podmínky se stanovily na základě doporučení výrobců řezných nástrojů a dále za pomoci odborníka z praxe. Materiál byl odebírán nástroji postupně ve zvoleném pořadí, aby se omezil vliv času. Po jednotlivých intervalech se měřilo opotřebení na hřbetě břitu VB. Sestavily se grafy křivek opotřebení závislé na čase obrábění. Následně se vyhodnotila trvanlivost každého nástroje pro zvolené kritériální opotřebení VB_{krit} . Opotřebení bylo měřeno na všech čtyřech břitech ve stále stejném pořadí a vždy na stále stejném místě každého břitu.

V Tab. 11 jsou uvedeny naměřené hodnoty maximálního dosaženého opotřebení jednotlivých nástrojů a čas, za který bylo těchto hodnot dosaženo. Zároveň je v tabulce uvedena trvanlivost nástrojů T_{krit} . Hodnota udává čas, při kterém bylo dosaženo stanoveného kritériálního opotřebení VB_{krit} .

| Nástroj | A | | | B | | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| T_{krit} [min] | 32 | 34 | 30 | 36 | 38 | 28 |
| VB_{max} [μm] | 314 | 251 | 291 | 385 | 287 | 414 |
| t_{celk} [min] | 35.14 | 35.62 | 35.56 | 39.74 | 40.93 | 42.42 |

Tab. 11 Hodnoty dosažené dlouhodobou zkouškou

Závislost velikosti opotřebení na čase obrábění znázorňuje Graf 11. Všechny nástroje dosáhly kritériálního opotřebení. S nástroj B3 se obrábělo ještě dva časové intervaly, protože jeho projev akustickou emisí nenaznačoval dostatečné otupení k vyřazení nástroje z testování.



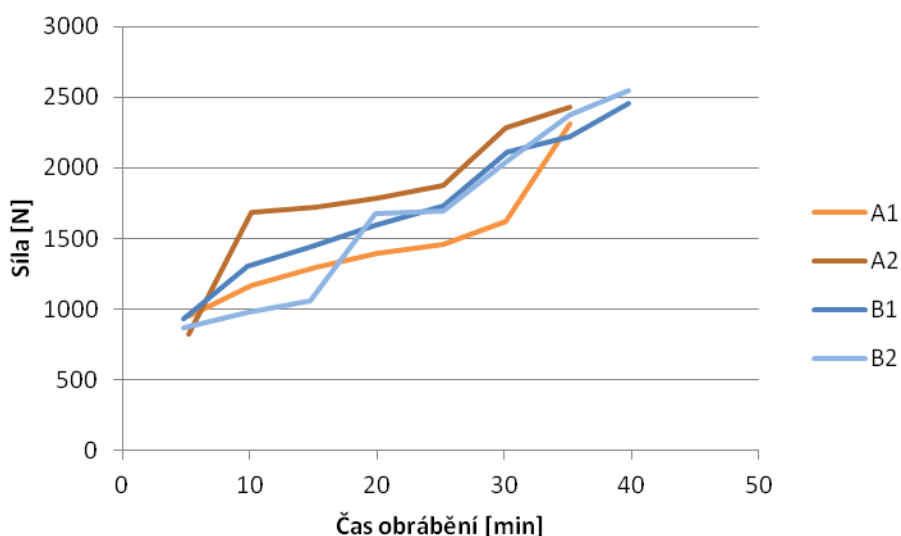
Graf 11 Průběh opotřebení v čase všech nástrojů

Graf zobrazuje porovnání všech nástrojů. Je patrné, že nejvyšší trvanlivosti dosáhl nástroj B2. Kritériálního opotřebení dosáhl přibližně v čase 38 min, na tomto nástroji též nevznikala opotřebení křehkým lomem ani plastickou deformací, ale mělo abrazivní charakter. Opotřebení bylo podél břitu rovnoměrné v celé hloubce řezu. Všechny nástroje dosahovaly ze subjektivního pohledu dobré kvality obrobeneho povrchu.

Nástroje A3 a B3 dosáhly nejmenší trvanlivosti. Oba tyto nástroje ale oproti ostatním byly užity s jiným upínačem a je pravděpodobné, že tato změna a snížení trvanlivosti spolu souvisejí. Upínač použitý u těchto dvou nástrojů byl hydraulický. Při provádění experimentu se předpokládalo, že tuhost hydraulického upínače bude větší než tuhost kleštiny. Tento odhad se ukázal jako nesprávný. Podle výsledků experimentu vykazuje hydraulický upínač nižší tuhost než upínač kleštinový. Výrobci nástrojů a upínačů tuto skutečnost uvádějí ve svých katalogích, s čímž je tento mimoděčný výsledek v souladu. Je tedy třeba přiznat, že volba hydraulického upínače byla chybou. Na druhou stranu poskytla příležitost ke dvěma zajímavým zjištěním. Jedním z nich bylo již zmíněné potvrzení katalogových údajů o tuhosti. Druhým zajímavým zjištěním je skutečnost, že poměr trvanlivosti nástroje s úpravou a nástroje bez úpravy byl v tomto případě opačný než v případě upnutí do tužší kleštiny. Nástroj s úpravou totiž vykazoval nižší trvanlivost než nástroj bez úpravy. Je tedy možné, že sama tuhost upnutí by mohla významně ovlivňovat výsledek experimentu. Detailněji bude tato možnost zkoumána ještě níže v souvislosti s rozdílností naměřených sil u nástrojů s úpravou a u nástrojů bez úpravy. Pozoruhodností také bylo, že nástroj B3 sice dosáhl kritériálního opotřebení v nejmenším čase, ale jeho charakter byl přesto i nadále příznivý pro proces obrábění. Při obrábění s tímto nástrojem při čase obrábění 25 min nedocházelo k tvorbě rozžhavené třísky ani k projevu nestabilního procesu řezání akustickou emisí. Proto se obrábělo dále, aby se potenciál nástroje využil až do jeho úplného otupení.

Pokud se nahlédne na graf jako na celek, ukazuje, že zvýšení trvanlivosti mezi jednotlivými dvojicemi nástrojů nastalo o 4 min u prvních dvou dvojic. Zvýšení bylo v souladu s hypotézou, ale předpokládalo se větší. Když se porovnají snímky

z mikroskopu nástrojů bez úpravy a s úpravou, je na nich vidět, že nedochází k nadměrnému opotřebení špičky nástroje ani u nástrojů bez úpravy sražením. Na snímcích je vidět, že nedochází k degradaci špičky, ale k opotřebení podél celého ostří. Je tedy otázka, proč nenastal jev, na kterém je založena hypotéza, kdy dochází k nadměrnému opotřebování špičky. Po zpětném zhodnocení experimentu se jako možné vysvětlení jeví, že nástroj nebyl dostatečně zatížen otupujícími faktory (abraze, adheze, tepelné zatížení...), aby to vedlo k lokální koncentraci. Pohlédneme-li na maximální tloušťku odřezávané vrstvy a_{max} , která byla nastavena na hodnotu 0,08 mm, nepřesahovala tato hodnota ani velikost sražení u nástroje bez úpravy. I když se nástroj nazývá ostrým, vždy je na něm vytvořené sražení, protože z technologického hlediska nelze vyrobit ostrý roh. Sražení činilo 0,15 mm. Pokud by se však hodnota maximální tloušťky třísky přibližovala velikosti sražení u nástroje bez úpravy, pravděpodobně by docházelo k většímu mechanickému a tepelnému namáhání nástroje. Tím by docházelo k degradaci špičky, což byl jev očekávaný v tomto experimentu. Vhodné by tedy bylo zvýšit hodnotu maximální tloušťky odřezávané třísky až na velikost sražení 0,6 mm, ovšem při takovém posuvu by hrozilo zlomení břitu nástroje. Samotná tloušťka odřezávané vrstvy však nemusí být tím podstatným faktorem. Je třeba si uvědomit, že dochází k pěchování třísky a mimoto k pohybu třísky po čele nástroje. Styk třísky s nástrojem a zatěžování nástroje tak může být v mnohem větším rozsahu, než odpovídá tloušťce odřezávané vrstvy. Rozdíl mezi sraženími obou typů nástrojů tedy může i v takovém případě hrát jistou roli.



Graf 12 Výslednice řezných sil jednotlivých nástrojů

Ze záznamu řezných sil byla určena celková síla působící v rovině kolmé na osu. Lze totiž předpokládat, že s osou rovnoběžná složka nebude mít významný vliv na ztrátu stability řezného procesu. Časové průběhy těchto výslednic pro první čtyři nástroje jsou vidět na Graf 12. Nástroje s upravenými špičkami vykazovaly vzájemně jednodušší průběhy těchto sil. V průběhu vyhodnocování se zdálo, že nástroj A1 bez úpravy špičky vykazuje nižší řezné síly. Než nástroje s úpravou. To by mohlo významně přispět k vysvětlení jevu pozorovaného po změně upnutí. Samotný nárůst řezných sil totiž nemusí mít vliv na otupování nástroje. Může se ale projevit ve spojení

s omezením tuhosti soustavy SNOP. Tehdy by vyšší síly mohly vypůsobit intenzivnější kmitání a až sekundárně vyšší otupování, které bylo možno pozorovat u nástroje B3, jak je vidět na Graf 10 na straně 53. Tudíž nedostatečná tuhost stroje použitého k experimentu by mohla být příčinou, že nedošlo k tak jednoznačnému ověření hypotézy o zvýšení trvanlivosti nástroje s úpravou špičky. Pokud jev spojený s degradací špičky byl pozorován na stroji s větší vlastní tuhostí, nedošlo ke ztrátě stability řezného procesu v důsledku vyšších řezných sil, a tedy se mohlo s nástroji obrábět delší dobu. Problém však je, že nástroj A2 tento výklad nepotvrzuje, protože jeho síly byly naopak vyšší, než u nástrojů s úpravou. Příčiny mohou být značně různé a pokud se neprovede experiment s významně vyšším počtem vzorků, nelze dát jednoznačné vysvětlení.

4.3.1 Statistické zhodnocení [11, 12, 13]

Na začátku této práce byla stanovena hypotéza, že nástroj s navrženou úpravou bude mít větší životnost, než nástroj bez úpravy. Z provedeného měření je vidět, že nástroje vykazovaly mírné zvýšení trvanlivosti. To je však značně nevýrazné. Je to sice možno vysvětlit vlivem relativně nízké tuhosti soustavy SNOP, ale pro vyhodnocení bude tím spíše zapotřebí použít těch statistických metod, které jsou vhodné při malém počtu pokusů a při nepřilíš výrazných rozdílech odezvy. Jako vhodná statistická metoda se zvolil Studentův test. Ten má několik forem. Jako nejvhodnější se jevil dvouvýběrový t-test. Tento t-test slouží k testu hypotézy o míře rozdílu středních hodnot ve dvou nezávislých náhodných výběrech se stejným rozptylem. Můžeme tedy za nulovou hypotézu H_0 považovat tvrzení, že úprava špičky nemá vliv na trvanlivost nástroje. Hypotéza H_1 tedy říká, že úprava špičky má vliv na jeho trvanlivost. Pomocí dále uvedeného výpočtů se stanoví hodnota testovací statistiky T.

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - d}{\sqrt{(n-1)s_x^2 + (m-1)s_y^2}} \sqrt{\frac{nm(n+m-2)}{n+m}}$$

Do předchozího vzorce se zadává hodnota rozptylu s^2 . Hodnota rozptylu se vypočítá pro nástroj s úpravou i bez úpravy.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

Do vzorce pro rozptyl se dosazuje výběrový průměr. Ten se vypočítá z časů trvanlivostí nástrojů A a B.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Vypočítaná hodnota testovací statistiky T se zadá do programu Microsoft Excel. Zde se použije funkce TDIST. Ta vrátí P-hodnotu Studentova rozdělení. Poté se stanoví kritický obor pro hladinu významnosti 5 % a porovná se s vypočítanou T-hodnotou.

Výpočet byl rozdělen na dvě části. V první části se stanovila hodnota pravděpodobnosti na základě hodnot všech nástrojů. V druhé části byl stanoven kvantil z hodnot prvních dvou dvojic nástrojů, protože se testovaly za úplně stejných podmínek. Z důvodu malého množství dat nemá statistické zhodnocení velkou věrohodnost.

| | |
|-------------|---------|
| n=m | 3 |
| T | 0,61237 |
| $t_{0,975}$ | 2,776 |

Tab. 12 Vypočtené hodnoty t-testu pro všechny nástroje

V Tab. 12 jsou uvedeny hodnoty vypočítané dvouvýběrovým t-testem pro všechny testované nástroje. Hodnota T neleží v kritickém oboru, protože $T < t_{0,975}$. Z toho tedy plyne, že nulovou hypotézu H_0 o shodnosti nelze zamítnout. Nelze však zamítnout ani hypotézu H_1 , z které by vyplýval vliv úpravy špičky na trvanlivost. Hodnota pravděpodobnosti vyšla 57,3%, nelze tedy prokázat jednoznačný rozdíl mezi dvěma typy testovaných nástrojů.

| | |
|-------------|----------|
| n=m | 2 |
| T | 2,828427 |
| $t_{0,975}$ | 4,303 |

Tab. 13 Vypočtené hodnoty t-testu pro stejné dvě dvojice nástrojů

V Tab. 13 jsou vypočítané hodnoty t-testu pro první dvě dvojice nástrojů. Hodnota T též neleží v kritickém oboru, jelikož $T < t_{0,975}$. Nulovou hypotézu H_0 nelze zamítnout. Hodnota pravděpodobnosti vyšla 10,6%, což je hodnota přibližující se hladině významnosti 5%. Pokud by P-hodnota dosáhla 5% nebo méně, mohla by se potvrdit hypotéza H_1 , a tudíž by sražení mělo vliv na trvanlivost nástroje. Dvě hodnoty vstupující do testu je příliš malý počet, proto tento výsledek nelze brát jako směrodatný.

Důsledek tohoto statistické zhodnocení je takový, že statistika nepotvrdila výrok o jednoznačném vlivu úpravy špičky na trvanlivost nástroje. Také však nezamítla nulovou hypotézu, nelze tedy z takto malého počtu dat udělat konečný závěr o zamítnutí či potvrzení hypotézy.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole se vezme v úvahu nasazení fréz v reálné praxi a provede se technicko-ekonomické zhodnocení z hlediska množství odebraného materiálu. Protože pokud jeden nástroj odebere větší množství materiálu než druhý nástroj při jejich stejné pořizovací ceně, budou u prvního nástroje náklady na jednotku odebraného množství nižší než u druhého. V případě nasazení výkonnějších fréz ve výrobě dojde tedy ke spotřebě menšího množství nástrojů a tím i snížení nákladů na řezný materiál, proto je odebrané množství důležitý parametr. Náklady na nástroje jsou stejné, protože jejich

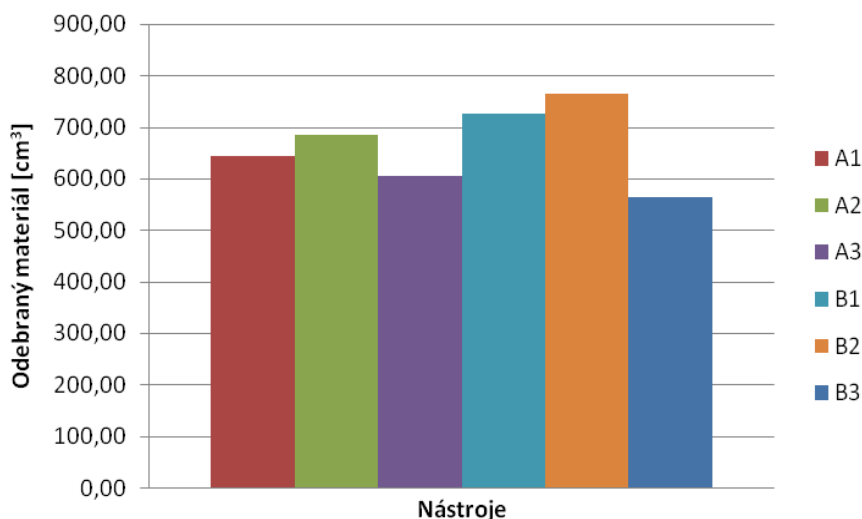
odlišnost je pouze ve sražení na špičce a tudíž se tato úprava na ceně nástroje neprojeví. Hodnocení proběhlo z hlediska množství odebraného materiálu podle vzorce:

$$Q = \frac{v_c \cdot f_z \cdot z \cdot a_p \cdot a_e \cdot 1000}{\pi \cdot D} \cdot T \quad [mm^3]$$

Množství odebraného materiálu je zobrazeno v Tab. 14. Tabulka uvádí množství odebraného materiálu při dosažení kritériálního opotřebení. Množství odebraného materiálu Q_{krit} je vypočteno z doby t_{krit} , za kterou bylo dosaženo kritériálního opotřebení. Tabulka dále uvádí ujetou vzdálenost s , které dosáhly jednotlivé nástroje při dosažení kritériálního stavu opotřebení. Nakonec je v tabulce vypočítané množství odebraného materiálu Q jednotlivých nástrojů za dobu jejich testování.

| Nástroj | A | | | B | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| T_{krit} [min] | 32 | 34 | 30 | 36 | 38 | 28 |
| Q_{krit} [cm ³] | 644.6 | 684.9 | 604.3 | 725.2 | 765.5 | 564 |
| s [m] | 80.58 | 85.61 | 75.54 | 90.65 | 95.68 | 70.5 |
| t_{celk} [min] | 35.14 | 35.62 | 35.56 | 39.74 | 40.93 | 42.42 |
| Q [cm ³] | 708 | 718 | 716 | 801 | 824 | 855 |

Tab. 14 Množství odebraného materiálu



Graf 13 Množství odebraného materiálu jednotlivých nástrojů

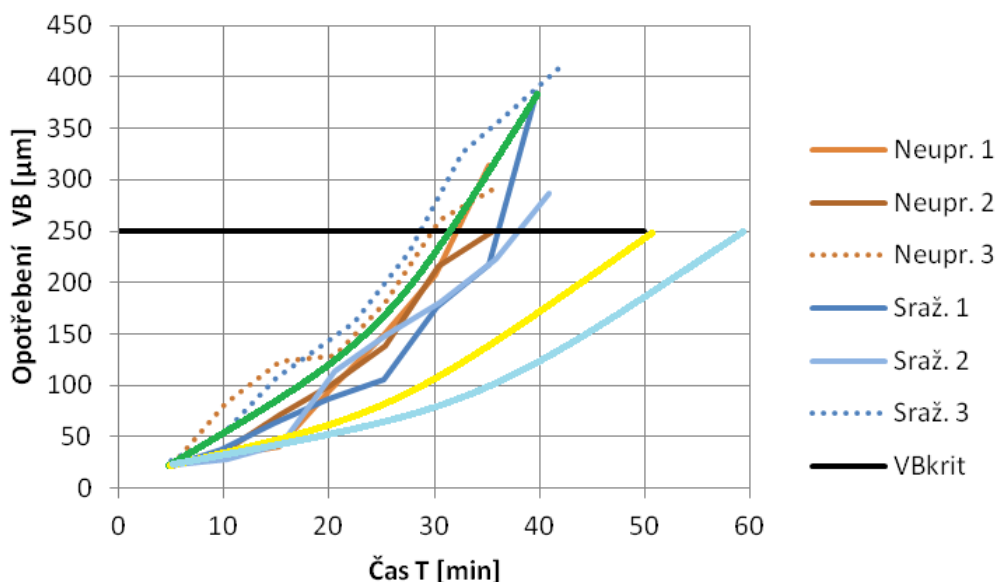
Graf 13 porovnává množství odebraného materiálu za dobu, kdy se dosáhlo stanoveného kritériálního opotřebení. Ukazuje, že největší množství odebraného materiálu dosáhly nástroje 1 a 2 s úpravou špičky. Při zadaných stejných

technologických podmínkách z toho plyne, že vykazují největší trvanlivost. Při předpokládané stejné ceně všech nástrojů je možné říci, že tyto nástroje jsou z hlediska nákladů na jednotku množství odebraného materiálu nejvýhodnější.

6 ZÁVĚR

V rámci této práce se provedl experiment zabývající se problematikou vhodné volby geometrie nástroje a to konkrétně vliv úpravy špičky nástroje na jeho životnost. Cílem bylo porovnat dva druhy monolitních nástrojů z hlediska jejich trvanlivosti. Před vlastním experimentem se provedl rozbor současného stavu a stanovila se hypotéza o vyšší trvanlivosti nástroje s úpravou než nástroje bez úpravy. Poté se určily řezné podmínky na základě požadavků zadavatele a zároveň odborníkem z praxe a to tak, aby se blížily reálným podmínkám používaným ve výrobě. Následně se provedla dlouhodobá zkouška trvanlivosti. Probíhala za neměnných technologických podmínek. Došlo však pouze u posledních dvou testovaných nástrojů ke změně upínače. Po dokončení se však přišlo na skutečnost, že tuhost upnutí má vliv na trvanlivost nástroje. Z výsledků testu je vidět při změně upínače snížení trvanlivosti nástroje. U nástroje s úpravou byla trvanlivost ještě nižší než u nástroje bez úpravy. Tento mimoběžný závěr byl i potvrzen dohledáním informací o tuhosti upnutí u výrobců upínačů z katalogu nástrojů.

Podstatou zkoušky bylo měření opotřebení na hřbetě VB ve stanovených časových intervalech. Z výsledků měření byly sestaveny grafy průběhu opotřebení v čase jednotlivých nástrojů. Následně se vyhodnotila trvanlivost pro zadané kritériální opotřebení. Největší trvanlivostí dosáhl nástroj číslo dvě s úpravou špičky. Jeho trvanlivost byla 38 min, oproti nástroji s nejnižší trvanlivostí byla o 10 min větší.



Obr. 37 Vliv změny tuhosti SNO P

Výsledky experimentu nejsou jednoznačným potvrzením původní hypotézy, a proto v práci bylo zapotřebí hledat příčiny nepřesvědčivosti výsledku. Příčina by mohla být

vlastní tuhost soustavy SNOP. Pokud soustava nemá dostatečnou vlastní tuhost, vznikne nestabilita řezného procesu a tím dojde následně ke snížení trvanlivosti nástrojů. Jestliže byl jev spojený s nadměrným opotřebáváním špičky pozorován na soustavě s vyšší tuhostí, na soustavě s nižší tuhostí tento jev nemusel nastat. Obr. 37 popisuje stav, že pokud by se experiment prováděl na soustavě s vyšší tuhostí, mohlo by docházet k vyšší trvanlivosti nástrojů zobrazené modrou a žlutou křivkou v pravé části obrázku. Zelená křivka by mohla představovat stav tuhosti, při které by nástroje s úpravou a bez úpravy měly stejnou trvanlivost, neboli aplikace úpravy by přinášela stejné výhody jako nevýhody vzhledem k průběhu opotřebení nástroj. Pokud by se tuhost soustavy snížila, pohybovalo by se v oblasti nalevo od zelené křivky. Zde došlo ke skutečnosti, že nástroj s úpravou špičky měl nižší trvanlivost než nástroj bez úpravy. Tuhost soustavy SNOP může být příčinou, že se původní hypotéza jednoznačně nepotvrdila. Při dalším testování by se měl vzít též v potaz vliv posuvu. Příčiny nejednoznačného dosažení výsledků se nenašly, ale byly poukázány možné vlivy, které vedou k doporučení pro další realizaci experimentu s touto problematikou.

Hypotéza, kterou měl za úkol tento experiment ověřit, se zdá být jako reálná. Rozhodně ji nelze ze statistického hlediska zamítnout. V souvislosti s tím, jak experiment probíhal a na dosažené výsledky ji však ani není možné přesvědčivě a jednoznačně potvrdit.

Kvůli omezenému počtu nástrojů dostupných pro testování lze vzít tento experiment jako orientační zkoušku, která by mohla být první fází pro další výzkum v oblasti zvyšování trvanlivosti nástrojů vlivem úpravy špičky. Je však nutné provést opatření, která byla během experimentu odhalena.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŘEHOŘ, Jan. *Přednášky z předmětu Teorie obrábění*. ZČU v Plzni [cit. 2015-05-20].
- [2] ŘEHOŘ, Jan. *Přednášky z předmětu Experimentální metody v obrábění*. ZČU v Plzni [cit. 2015-05-20].
- [3] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I* [online]. Brno, 2003 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [4] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM, *Hybridní monolitní fréza ze slinutého karbidu* [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hybridni-monolitni-freza-ze-slinuteho-karbidu.html>
- [5] *Vybavení katedry KTO* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni_katedry/
- [6] *BOLZANO C45* [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_C45.pdf
- [7] *ČSN 12 050* [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.1191>
- [8] MAROŠ, Bohumil. *Plánování experimentu* [online]. 2006 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www2.humusoft.cz/www/papers/witkonf06/prispevky/pdf/maros.pdf>
- [9] *SANDVIK Coromant: CoroMill Plura* [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_plura/Pages/default.aspx
- [10] *Tenké vrstvy* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
- [11] MICHAL, Friesl. *Pravděpodobnost a statistika* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~friesl/hpsb/test2vyb.html>
- [12] *Kvantily Studentova t-rozdělení* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/tabulky.htm#ttest>
- [13] WLOSOKOVÁ, Agáta. *Studentovo t-rozdělení a jeho aplikace* [online]. Olomouc, 2008 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://mant.upol.cz/soubory/OdevzdanePrace/B09/b09-13-aw.pdf>. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce RNDr. Karel Hron, Ph.D.

- [14] FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *EXPERIMENTÁLNÍ METODY* [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf
- [15] VYŠATA, Jiří. *Podklady ke cvičení z předmětu KTO/MTC*. ZČU v Plzni [cit. 2015-01-28].
- [16] BAKŠA, Tomáš. *Trvanlivost řezných nástrojů při obrábění velmi tvrdých a pevných materiálů*. 2014. Diplomová. ZČU v Plzni.
- [17] JADRNÁ, Ivana. *Trvanlivost monolitních nástrojů při dokončovacím obrábění slitiny NIMONIC 80A*. 2011. Diplomová. ZČU v Plzni.
- [18] LERCH, Jan. *Možnosti zvukové analýzy procesu obrábění a její využití*. 2012. Diplomová. ZČU v Plzni.
- [19] Volba řezných podmínek. *ISCAR* [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: - <http://www.iscar.com/ita/MainPage.aspx?sid=59>
- [20] *Katalog nástrojů firmy ISCAR* [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/Products.aspx/CountryID/1/ProductId/3725>
- [21] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II* [online]. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 55 s. [cit. 2015-05-28]. ISBN 80-010-2610-8.
- [22] TOŠENOVSKÝ, Josef a Darja NOSKIEVIČOVÁ. *Statistické metody pro zlepšování jakosti*. Ostrava: Montanex, 2000, 362 s. ISBN 80-722-5040-X.
- [23] STANĚK J., NĚMEJC J.: *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací ZČU, Plzeň, 2005.*

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Rozložení nákladů obrábění [15]..... | 10 |
| Obr. 2 Vliv teploty řezání na podíl jednotlivých typů opotřebení [1] | 13 |
| Obr. 3 Formy opotřebení na břitu nástroje ze SK [3] | 14 |
| Obr. 4 Kritéria opotřebení břitu řezného nástroje [3] | 14 |
| Obr. 5 Zdroj a odvod tepla [3] | 15 |
| Obr. 6 Experimentálně zjištěná tepelná bilance [1]..... | 16 |
| Obr. 7 Výsledná $T-v_c$ závislost při dlouhodobé zkoušce [1] | 18 |
| Obr. 8 Graf závislosti opotřebení a trvanlivosti na řezné rychlosti po provedení krátkodobé zkoušky trvanlivosti [2] | 19 |
| Obr. 9 Nástroje řady CoroMill Plura [9] | 22 |
| Obr. 10 Čelní pohled na nástroj SCR [4]..... | 22 |
| Obr. 11 Fréza ISCAR CHATTER FREE [20]..... | 23 |
| Obr. 12 Zobrazení odřezávané vrstvy na vedlejším ostří | 24 |
| Obr. 13 Ovlivnění nástroje teplem při drážkování | 25 |
| Obr. 14 Průběh teploty na břitu nástroje..... | 26 |
| Obr. 15 Průběh teplot na břitu při obrábění bez chlazení a s chlazením | 26 |
| Obr. 16 Čtyřúhelníková spirála trajektorie nástroje | 29 |
| Obr. 17 Tabulka výpočtů sloužící ke stanovení konečného rozměru ostrůvku | 30 |
| Obr. 18 Masky na ostrém nástroji a se sražením | 31 |
| Obr. 19 Použité typy nástrojů | 33 |
| Obr. 20 Upnutý obráběný polotovár | 34 |
| Obr. 21 Schematický nákres způsobu obrábění..... | 35 |
| Obr. 22 Dynamometr a přesná kleština ER25 | 36 |
| Obr. 23 Doporučené řezné podmínky [19] | 37 |
| Obr. 24 Rozmístění strojů a zařízení během experimentu..... | 38 |
| Obr. 25 Upnutí polotovaru..... | 39 |
| Obr. 26 Mikroskop Carl Zeiss | 40 |

| | |
|---|----|
| Obr. 27 Hydraulický upínač [16] | 41 |
| Obr. 28 Místo měření opotřebení..... | 42 |
| Obr. 29 Nástroj typu A | 42 |
| Obr. 30 Stav břítu v intervalech měření nástroje 1 | 43 |
| Obr. 31 Stav břítu v intervalech měření nástroje 2 | 45 |
| Obr. 32 Stav břítu v intervalech měření nástroje 3 | 47 |
| Obr. 33 Nástroj typu B..... | 48 |
| Obr. 34 Stav břítu v intervalech měření nástroje 1 | 49 |
| Obr. 35 Stav břítu v intervalech měření nástroje 2 | 51 |
| Obr. 36 Stav břítu v intervalech měření nástroje 3 | 54 |
| Obr. 37 Vliv změny tuhosti SNOP | 60 |
| Obr. 38 Příslušenství dynamometru KISTLER 9123 [17] | 69 |
| Obr. 39 Pracovní prostředí softwaru LabVIEW [2] | 69 |
| Obr. 40 Multicheck PC500 [16] | 70 |
| Obr. 41 První krok stanovení rozměrů | 71 |
| Obr. 42 Druhý krok stanovení rozměrů | 72 |

SEZNAM GRAFŮ

| | |
|--|----|
| Graf 1 Závislost opotřebení nástroje A1 | 43 |
| Graf 2 Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje A1 | 44 |
| Graf 3 Závislost opotřebení na čase nástroje A2 | 45 |
| Graf 4 Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje A2 | 46 |
| Graf 5 Závislost opotřebení nástroje A3..... | 47 |
| Graf 6 Závislost opotřebení nástroje B1 | 49 |
| Graf 7 Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje B1 | 50 |
| Graf 8 Závislost opotřebení nástroje B2 | 51 |
| Graf 9 Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje B2..... | 52 |
| Graf 10 Závislost opotřebení nástroje B3 | 53 |
| Graf 11 Průběh opotřebení v čase všech nástrojů..... | 55 |
| Graf 12 Výslednice řezných sil jednotlivých nástrojů..... | 56 |
| Graf 13 Množství odebraného materiálu jednotlivých nástrojů | 59 |

8 PŘÍLOHY

8.1 Použité stroje a zařízení [5]

8.1.1 CNC frézovací centrum MCV 750A



Základní technické parametry stroje:

| | |
|--|--------------------|
| Rozměry stroje [mm]: | 3700 x 2200 x 2735 |
| Pracovní rozsah X, Y, Z [mm]: | 750, 500, 500 |
| Max. otáčky vřetena [ot/min]: | 13000 |
| Jmenovitý výkon vřetena [kW]: | 11,5 |
| Rozměry upínacího stolu [mm]: | 1000 x 500 |
| Pracovní posuvy X, Y, Z [mm/min]: | 1 – 15000 |
| Rychloposuvy X, Y, Z [mm/min]: | 25000 |
| Regulace otáček: | Plynulá |
| Řídicí systém: | Heidenhein TNC 426 |

Tab. 15 Základní technické parametry MCV 750A [5]

8.1.2 Rotační dynamometr KISTLER 9123C [2, 5, 17]

Čtyř-složkový nástrojový dynamometr určený pro frézování snímá tři složky řezných sil a krouticí moment pomocí piezoelektrických krystalů Si.

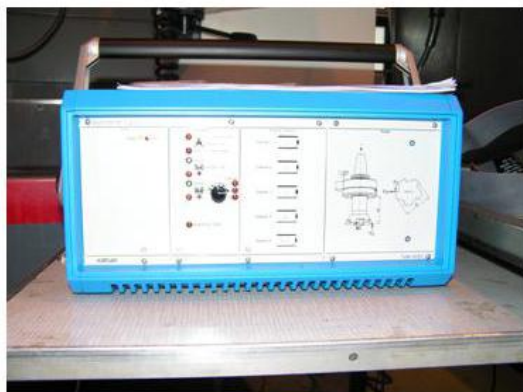


Technické údaje dynamometru:

| | |
|----------------------------------|--|
| Maximální zatížení: | $F_x, F_y = \pm 5 \text{ kN}$ $F_z = \pm 20 \text{ kN}$ $M_z = \pm 200 \text{ Nm}$ |
| Čitlivost: | $F_x, F_y = 2 \text{ mV/N}$ $F_z = 0,5 \text{ mV/N}$ $M_z = 50 \text{ mV/Nm}$ |
| Max. otáčky: | 10000 ot/min |
| Vlastní frekvence: | 2000 Hz |
| Rozsah provozních teplot: | 0 – 60 °C |

Tab. 16 Technické údaje dynamometru KISTLER 9123 [5]

Další zařízení použité pro záznam řezných sil společně s dynamometrem byl zesilovač, sběrná karta a osobní počítač se softwarem LabVIEW, který slouží k záznamu a vyhodnocení řezných sil.



Zesilovač

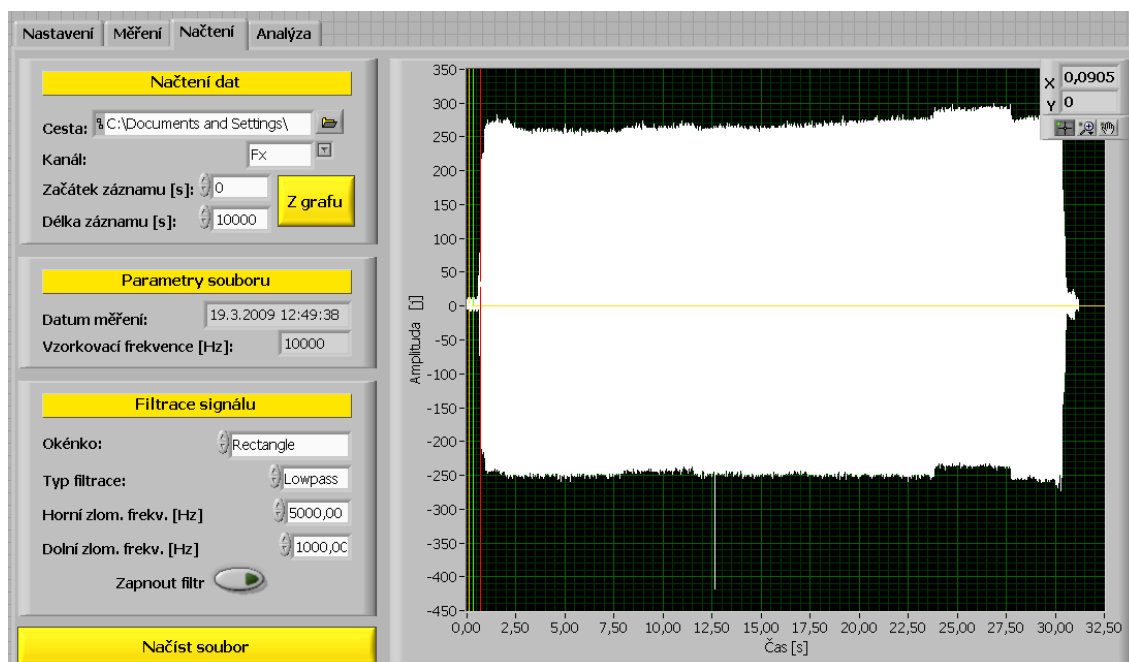


PC + měřicí karta

Obr. 38 Příslušenství dynamometru KISTLER 9123 [17]

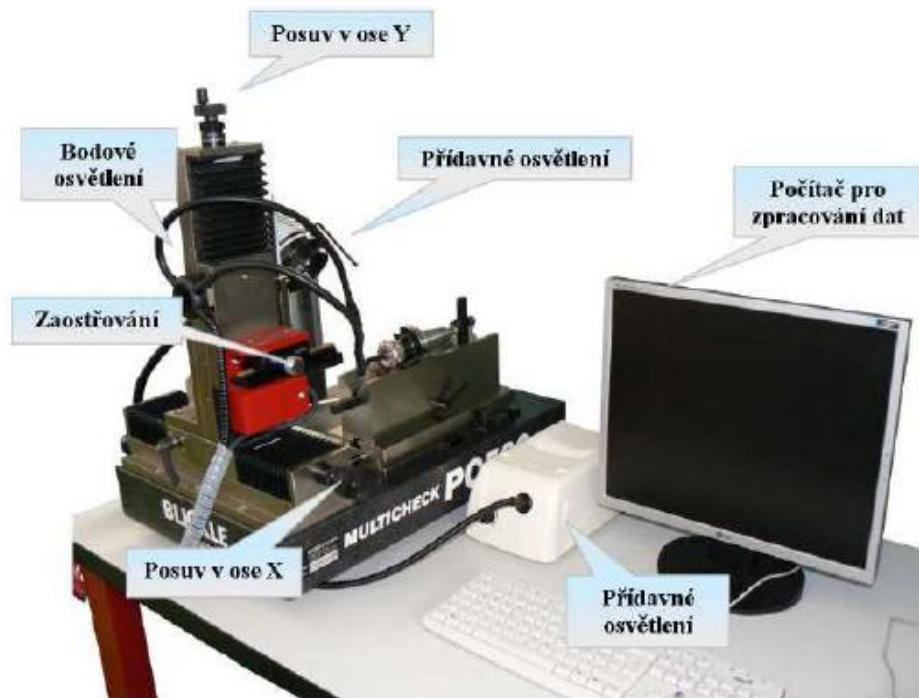
Pro převod elektrického náboje z dynamometru na elektrické napětí byl použit zesilovač Kistler 5223. Elektrické napětí je úměrné velikosti náboje. Dále je dané napětí dle potřeby zesilováno.

Ke zpracování a vyhodnocení řezných sil slouží software LabVIEW 8.2 Obr. 39. Software snímá velikost řezných sil v závislosti na čase. Jako vstupní informace slouží signál ze sběrné karty, která je spojena přes řadič se zesilovačem.



Obr. 39 Pracovní prostředí softwaru LabVIEW [2]

8.1.3 Optický mikroskop Multicheck PC500 [16]



Obr. 40 Multicheck PC500 [16]

Základní charakteristika:

- výrobce - Güehring Machinebau GMBH
- horizontální provedení
- možnosti měření:
 - opotřebení rotačních i nerotačních nástrojů
 - vzdálenosti (např. velikosti opotřebení břitu)
 - úhlů
- možnost nastavení nástroje pod úhlem
- přesnost 0,005 mm
- rozsah v ose X a Y: 0 - 150 mm
- vybavení:
 - osvětlovací aparatura
 - software WMS
 - vyměnitelné objektivy se zvětšením 10x, 30x, 75x a 150x

8.2 Tabulka výpočtů

Tabulka výpočtů slouží k tomu, aby se na základě rozměrů polotovaru a zvolené doby obrábění určil konečný rozměr vnější kapsy. V prvním kroku se zadá rozměr polotovaru, poté se vyhledá řádek s časem nejbližším ke zvolenému intervalu a odečte se konečný rozměr. Odchyly od zvoleného intervalu se pohybují v řádech sekund. Tato odchylka není překážkou, protože opotřebení je závislé na čase obrábění.

| | A | B | C | D | E | F | K | L | M | N | O | P | Q | X | Y | Z | AA | AF | AG | AH | | |
|----|------------------|-----------|----------|---|-----------------|-------------------------|--------------|-----------------|---|---|---|---------|---|----------------------------|-----|-----|----|----|----|----|------------------|-----------|
| 1 | zadat hodnoty | | | | ZKOUŠKA | | | | | | | 0,66667 | | | | | | | | | | |
| 2 | dopočtené | | | | POMOCNÉ HODNOTY | | | tabulka výpočtů | | | | | | ROZMĚRY KONEČNÉHO OSTRŮVKU | | | | | | | PŘEPÓČET PŘES hm | |
| 3 | Parametry,zadané | | jednotky | | | | DILČÍ OBVODY | mm | | | | | | UJETÁ VZDÁLENOST mm | YY | mm | | | | | BEZ NÁJEZDŮ | S NÁJEZDY |
| 4 | v_c | 220 | m/min | | | | o1 | 1168 | | | | | | 1168 | 292 | 292 | | | | | 0,46386 | 0,4780687 |
| 5 | a_p | 4 | mm | | | | o2 | 1152 | | | | | | 2320 | 288 | 288 | | | | | 0,921366 | 0,9497832 |
| 6 | a_e | 2 | mm | | | | o3 | 1136 | | | | | | 3456 | 284 | 284 | | | | | 1,372518 | 1,4151435 |
| 7 | n | 5834 | ot/min | | | | o4 | 1120 | | | | | | 4576 | 280 | 280 | | | | | 1,871315 | 1,8741495 |
| 8 | f_z | 0,2 | mm/zub | | | | o5 | 1104 | | | | | | 5680 | 276 | 276 | | | | | 2,255759 | 2,3268012 |
| 9 | v_f | 4667 | mm/min | | | | o6 | 1088 | | | | | | 6768 | 272 | 272 | | | | | 2,687847 | 2,7730987 |
| 10 | h_m | 0,0816497 | mm | | | střední tloušťka třísky | o7 | 1072 | | | | | | 7840 | 268 | 268 | | | | | 3,113582 | 3,2130419 |
| 11 | v_f | 0,0816497 | mm | | | | o8 | 1056 | | | | | | 8896 | 264 | 264 | | | | | 3,532963 | 3,6466309 |
| 12 | v_f | 0,0816497 | mm | | | | o9 | 1040 | | | | | | 9936 | 260 | 260 | | | | | 3,945989 | 4,0738657 |
| 13 | v_f | 0,0816497 | mm | | | | o10 | 1024 | | | | | | 10960 | 256 | 256 | | | | | 4,32661 | 4,4947662 |
| 14 | v_f | 0,1959592 | mm/zub | | | | o11 | 1008 | | | | | | 11968 | 252 | 252 | | | | | 4,752979 | 4,992724 |
| 15 | v_f | 0,1959592 | mm/zub | | | | o12 | 992 | | | | | | 12960 | 248 | 248 | | | | | 5,146942 | 5,3174444 |
| 16 | v_f | 0,1959592 | mm/zub | | | | o13 | 976 | | | | | | 13936 | 244 | 244 | | | | | 5,534551 | 5,7192622 |
| 17 | nástroj | 12 | mm | | | | o14 | 960 | | | | | | 14896 | 240 | 240 | | | | | 5,915806 | 6,1147257 |
| 18 | obrobek | 4 | mm | | | | o15 | 944 | | | | | | 15840 | 236 | 236 | | | | | 6,290707 | 6,5038349 |
| 19 | obrobek | 4 | mm | | | | o16 | 928 | | | | | | 16768 | 232 | 232 | | | | | 6,659253 | 6,8865899 |
| 20 | x | 296 | mm | | | | o17 | 912 | | | | | | 17680 | 228 | 228 | | | | | 7,021446 | 7,2629907 |
| 21 | y | 296 | mm | | | | o18 | 896 | | | | | | 18576 | 224 | 224 | | | | | 7,377284 | 7,6330372 |

Obr. 41 První krok stanovení rozměrů

Ve stanovení rozměru pro další cyklu je postup stejný. Jako počáteční rozměr polotovaru se zadává konečný rozměr vnější kapsy z předchozího cyklu. V příloze na CD je tabulka výpočtů k dispozici pro další experimenty.

| | A | B | C | D | E | F | K | L | M | N | O | P | Q | X | Y | Z | AA | AF | AG | AH | |
|----|---------|--------------------|-----------|-------------------------|---|---|-----|-----|---|---|-------|---------|---|-----|-----|----|----|----|----|-----------|-----------|
| 1 | | zadat hodnoty | | ZKOUŠKA | | | | | | | | 0,66667 | | | | | | | | | |
| 2 | | dopočtené | | POMOCNÉ HODNOTY | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | Parametry.zadané | jednotky | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | v_c | 220 | m/min | | | o1 | 992 | | | 992 | | | XX | 248 | mm | | | | 0,408172 | |
| 5 | | a_p | 4 | mm | | | o2 | 976 | | | 1968 | | | YY | 244 | | | | | 0,8099897 | |
| 6 | | a_e | 2 | mm | | | o3 | 960 | | | 2928 | | | | 240 | | | | | 1,2054532 | |
| 7 | | n | 5834 | ot/min | | | o4 | 944 | | | 3872 | | | | 236 | | | | | 1,5945625 | |
| 8 | | f_z | 0,2 | mm/zub | | | o5 | 928 | | | 4800 | | | | 232 | | | | | 1,9773175 | |
| 9 | | v_f | 4667 | mm/min | | | o6 | 912 | | | 5712 | | | | 228 | | | | | 2,268467 | |
| 10 | | h_m | 0,0816497 | mm | | | o7 | 896 | | | 6608 | | | | 224 | | | | | 2,624305 | |
| 11 | | | | střední tloušťka třísky | | | o8 | 880 | | | 7488 | | | | 220 | | | | | | 3,087457 |
| 12 | | | | | | | o9 | 864 | | | 8352 | | | | 216 | | | | | | 3,444795 |
| 13 | | v_f pomocí h_m | 0,08 | mm/min | | | o10 | 848 | | | 9200 | | | | 212 | | | | | | 3,7957787 |
| 14 | | f_z | 0,1959592 | mm/zub | | | o11 | 832 | | | 10032 | | | | 208 | | | | | | 4,1404082 |
| 15 | | v_f | 2518 | mm/min | | | o12 | 816 | | | 10848 | | | | 204 | | | | | | 4,4786835 |
| 16 | | | | | | | o13 | 800 | | | 11648 | | | | 200 | | | | | | 4,8106045 |
| 17 | nástroj | D | 12 | mm | | | o14 | 784 | | | 12432 | | | 196 | | | | | | | 5,1361713 |
| 18 | | z | 4 | | | | o15 | 768 | | | 13200 | | | 192 | | | | | | | 5,4553838 |
| 19 | obrobek | | | | | | o16 | 752 | | | 13952 | | | 188 | | | | | | | 5,768242 |
| 20 | | x | 252 | mm | | | o17 | 736 | | | 14688 | | | 184 | | | | | | | 6,074746 |
| 21 | | y | 252 | mm | | | o18 | 720 | | | 15408 | | | 180 | | | | | | | 6,3748958 |

Obr. 42 Druhý krok stanovení rozměrů