



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJE PŘI OBRÁBĚNÍ

ON THE EVALUATION OF CUTTING PERFORMANCE WHEN MACHINING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Štěpán Kolomý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Štěpán Kolomý**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hodnocení řezivosti nástroje při obrábění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studie hodnocení řezivosti nástroje při obrábění, přehled sledovaných veličin, návrh metodiky pro experimentální obrábění, její verifikace.

Cíle bakalářské práce:

- Studie hodnocení řezivosti nástroje při obrábění.
- Definice sledovaných veličin.
- Návrh metodiky pro experimentální obrábění.
- Verifikace řezivosti pro danou aplikaci.
- Vyhodnocení výsledků.

Seznam doporučené literatury:

TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.

BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne. Slovensko, Trenčín, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástrojů. VŠ učebnice. Brno: CERM, 2006. s. 230. ISBN 80-214-2374-9.

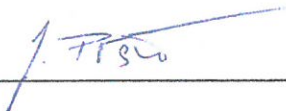
KUTTOLAMADON, M. A., MEARS, M. L., KURFESS, T. R. On the Volumetric Assessment of Tool Wear in Machining Inserts With Complex Geometries – Part 1: Need, Methodology and Standardization. Transactions of the ASME. Journal of International Manufacturing Science and Engineering. October 2012, Vol. 134, pp. 051002-1-8. ISSN 1087-1357.

KUTTOLAMADON, M. A., MEARS, M. L., KURFESS, T. R., BURGER, U. On the Volumetric Assessment of Tool Wear in Machining Inserts With Complex Geometries – Part II: Experimental Investigation and Validation on Ti-6Al-4V. Transactions of the ASME. Journal of International Manufacturing Science and Engineering. October 2012, Vol. 134, pp. 051003-1-9. ISSN 1087-1357.

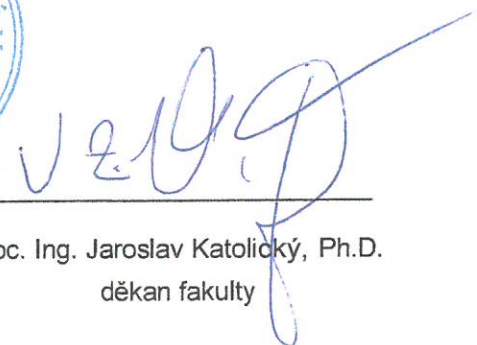
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 25. 10. 2018





prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na testování řezivosti nástrojů v podmínkách přerušovaného řezu a na problematiku přerušovaného soustružení. V experimentální části je testována řezivost vyměnitelných břitových destiček z kubického nitridu bóru a řezné keramiky v podmínkách přerušovaného čelního soustružení. Vzniklé opotřebení a tvary vzniklých třísek jsou analyzovány. Výstupem práce je zpracování naměřených hodnot a jejich vzájemné porovnání.

Klíčová slova

Řezivost nástroje, opotřebení nástroje, přerušovaný řez, soustružení, tříška.

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on cutting performance during interrupted cutting conditions and on the problems of intermittent turning. There is tested cutting performance of indexable inserts from cubic boron nitride and ceramic during interrupted face turning in experimental part. Tools wear and shape of chips are analyzed. The output of this work is data processing and their comparison.

Key words

Tool cutting performance, tool wear, interrupted cut, turning, chip.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOLOMÝ, Štěpán. *Hodnocení řezivosti nástroje při obrábění*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 47 s., 2 přílohy. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Hodnocení řezivosti nástroje při obrábění** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Štěpán Kolomý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Tomáši Vaňurovi a Vojtěchu Smolákovi za pomoc a rady při zpracování praktické části bakalářské práce. Tímto bych rád poděkoval paní Dagmar Polzerové za pomoc při focení snímků pro experimentální část bakalářské práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za podporu a především za trpělivost, kterou se mnou měli při psaní mé bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 PŘERUŠOVANÉ ŘEZNÉ PROCESY	9
1.2 Přerušované soustružení	10
1.2.1 Princip soustružení.....	10
1.2.2 Přerušovaný řez.....	10
1.2.3 Vhodný výběr břitové destičky.....	11
1.3 Fáze řezného procesu.....	11
2 TŘÍSKY PŘI OBRÁBĚNÍ KOVŮ	14
2.1 Tvary třísek podle obráběného druhu materiálu	15
2.2 Vlivy způsobující vznik stupňovité třísky	17
3 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	18
3.1 Klasifikace typů opotřebení břitu nástroje.....	18
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	21
4.1 Používaný obráběcí stroj.....	21
4.2 Druhy používaných nástrojových držáků	22
4.3 Používané měřicí přístroje	22
4.4 Materiál obrobku.....	23
4.4.1 Popis oceli 1.2379.....	23
4.4.2 Zušlechťování oceli 1.2379	24
4.5 Přípravek na upnutí obrobku.....	24
4.6 Výpočty.....	25
4.7 Testování řezných destiček – první série	27
4.7.1 Vyhodnocení dosažených výsledků v první sérii	28
4.8 Testování řezných destiček – druhá série	35
4.8.1 Vyhodnocení dosažených výsledků ve druhé sérii	35
ZÁVĚR	41
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	48
SEZNAM PŘÍLOH.....	49

ÚVOD

Kovoobrábění dnes pokrývá velkou část výrobních procesů. Konvenční obráběcí procesy jako soustružení, vrtání nebo frézování, jsou nejrozšířenějšími kovoobráběcími procesy ve strojním průmyslu. Soustružení je typickým příkladem plynulého rezného procesu, pokud na obrobku nejsou přítomny žádné nespojitosti. Je však možné se setkat i s přerušovaným soustružením. Přerušovaný rezný proces nastane, když se na obrobku budou vyskytovat drážky, díry nebo mazací kanálky. Obecným příkladem přerušovaného řezu je frézování. Právě přerušovaný řez při soustružení bude hlavním předmětem této práce. U nástrojů určených pro přerušovaný řez je vyžadována dlouhá trvanlivost a dobrá kvalita obrobeného povrchu. Existuje mnoho rezných nástrojů, které se dají využít pro přerušovaný rezný proces.

Obráběcí nástroje mohou být vyráběny například ze slinutých karbidů, rychlořezné oceli, rezné keramiky, cermetů, polykrystalického diamantu a kubického nitridu bóru (KNB). Z nichž však ne každý je vhodný pro přerušovaný rezný proces. Každý z nich má svoje výhody a nevýhody, které je důležité uvážit při výběru vhodného nástroje.

Před samotným uvedením daného nástroje do prodeje jsou zapotřebí patřičné zkušební testy. Pro výrobce je velmi důležitá zpětná vazba ohledně funkčnosti nástroje. Díky zpětné vazbě jsou získávány velmi cenné informace o tom, jak je nástroj efektivní ve výrobním procesu. Tyto informace mohou být dále analyzovány a využity k dalšímu vývoji rezných nástrojů.

Praktická část bakalářské práce se zabývá testováním vyměnitelných břitových destiček (VBD) při přerušovaném čelním soustružení. Následuje analýza vzniklého opotřebení a vyhodnocení tvaru vzniklých třísek.

1 PŘERUŠOVANÉ ŘEZNÉ PROCESY

V práci [1] bylo zjištěno, že přírůstek řezné rychlosti u přerušovaných řezů je doprovázen snížením všech složek sil celkové síly při obrábění. Dále bylo zjištěno, že řezná složka celkové síly je významně ovlivněna posuvem, zatímco na velikost pasivní složky celkové síly má největší vliv šířka záběru ostří. Z této práce vyplývá, že posuv a šířka záběru ostří mají větší vliv na velikost průměrných složek celkové síly než řezná rychlost. V článku [2] byl prokázán vzájemný vztah mezi tvorbou segmentové třísky a okamžitými složkami celkové síly. Dále že kolísání velikosti okamžitých složek celkové síly je vyvoláno tvorbou stupňovité třísky. Toto kolísání je možné považovat za vysoko cyklické únavové zatěžování břitu nástroje. Zatížení způsobené vstupem a výstupem nástroje z řezu je možné označit za nízko cyklické únavové zatěžování. Tato únavová zatěžování způsobují tvorbu mikrotrhlin, které urychlují únavový lom.

V práci [3] byly zkoumány vlivy procesních kapalin na tvorbu teplotních trhlin v podmínkách přerušovaného řezu. Použití řezné kapaliny vedlo ke vzniku těžkých teplotních trhlin, a to z důvodu silných teplotních šoků. Menší teplotní trhliny byly nalezeny při suchém obrábění a při chlazení olejovou mlhou se stlačeným vzduchem. Bylo zjištěno, že počet teplotních trhlin a jejich šířky byly v tomto případě menší než při obrábění s řeznou kapalinou.

V článku [4] byl analyzován vliv geometrie břitu na řezivost nástroje při přerušovaném obrábění. Čím více sražení má břit, tím delší je kontaktní plocha mezi nástrojem a obrobkem, která zvyšuje zatížení nástroje stejně jako jeho opotřebení. Podle tohoto článku lze navýšení tření považovat za faktor, který zvyšuje jednotlivé složky celkové síly. Vyšší síly potřebují vyšší dodávanou energii, která se mění v teplo ve třech oblastech plastické deformace, a proto je možno dedukovat, že vyšší síly přispívají k vyšším procesním teplotám. Kompromisu mezi pevností břitu a mechanickým a teplotním zatížením bylo dosaženo při použití břitu s jedním sražením.

V práci [5] byl pozorován vliv přerušovaného podélného soustružení na opotřebení nástroje na čtyřech válcových obrobkách, které nejdříve neměly na povrchu žádnou drážku, poté jednu drážku a následně pak dvě a čtyři drážky způsobující přerušovaný řez. Testování proběhlo při dvou různých řezných rychlostech. Z výsledků je vidět, že největšího opotřebení bylo dosaženo při obrábění obrobku se čtyřmi drážkami. Naopak nejmenšího bylo dosaženo při obrábění obrobku bez drážek. Výsledky práce dokazují, že s nárůstem řezné rychlosti se snižuje trvanlivost nástroje. Patrné je to při nepřerušovaném obrábění.

V článku [6] byly dva druhy řezných destiček z KNB testovány v podmínkách plynulého a přerušovaného řezu: tzn. *high CBN* (vysoký KNB), který obsahuje okolo 90 % KNB a tzn. *low CBN* (nízký KNB), který obsahuje méně KNB (okolo 60 %) s přidanými keramickými fázemi. Bylo zjištěno, že nízký KNB vykazoval delší trvanlivost než vysoký KNB v plynulém řezání i v podmínkách polo-přerušovaného řezu. Pouze v podmínkách přerušovaného řezu vykazoval vysoký KNB vyšší trvanlivost než nízký KBN. V článku [7] byl zkoumán důvod delší trvanlivosti nízkého KNB a vysokého KNB v podmínkách přerušovaného řezu než při plynulém a polo-přerušovaném, bez ohledu na mikro geometrii břitu. Důvodem se ukázaly nižší procesní teploty. Vyšší teploty v plynulých a polo-přerušovaných procesech způsobují difúzi, která zapříčiní rychlejší opotřebení nástroje. V práci [8] byla zpozorována zvýšená trvanlivost řezných destiček při přerušovaném frézování, a to z důvodu nižších procesních teplot. V článku [9] byla porovnána trvanlivost

destiček z polykrystalického KNB a z řezné keramiky při obrábění kalené oceli při plynulém a přerušovaném řezu. Bylo zjištěno, že v plynulém řezání vykazoval polykrystalický KNB přibližně třikrát větší trvanlivost než řezná keramika. Avšak v přerušovaném řezání vykazovaly obě destičky podobnou trvanlivost. V práci [10] vykazoval KNB nižší opotřebení než řezná keramika v obou případech řezání (v plynulém i v přerušovaném). VŠB – Technická univerzita Ostrava hraje v oblasti testování řezných nástrojů v podmínkách přerušovaného řezu významnou roli [11-16].

1.2 Přerušované soustružení

1.2.1 Princip soustružení

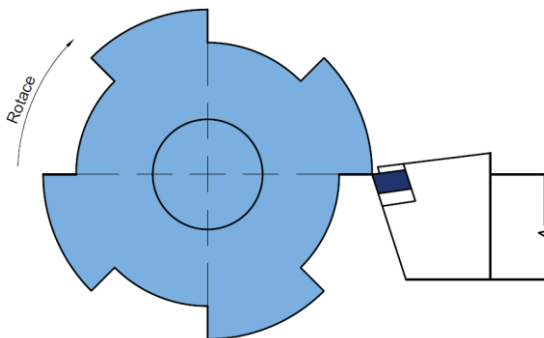
Soustružení je způsob, který je ve strojírenství nejvíce používanou metodou. Tato metoda je používána na výrobu rotačních součástí pomocí jednobřitého nástroje nazývaného soustružnický nůž. Pomocí této metody lze opracovávat například vnější a vnitřní válcové plochy a mnoho dalšího. Hlavní řezný pohyb je realizován pomocí rotačního pohybu obrobku kolem osy z vřetene. Vedlejší pohyb je přímočarý a provádí ho řezný nástroj. Jedním ze základních druhů soustružení jsou soustružení podélné a příčné [17, 18].

1.2.2 Přerušovaný řez

Pokud se na obráběné součásti při soustružení vyskytne nějaká nespojitost, jako je třeba drážka, tak nástroj nebude ve stálém kontaktu s obrobkem, a vznikne přerušovaný řezný proces (viz obr. 1.8) [11; 12]. Kvůli kolísání teplotního a mechanického zatížení může být negativně ovlivněno ostří nástroje. Dále to může mít vliv na produktivitu a spolehlivost výroby [12]. Analýza vzniklého opotřebení nástroje a provedení patřičné změny v geometrii nástroje může vést k překonání vlivů přerušovaného řezu [13].

V průběhu přerušovaného řezného procesu je břit vystaven proměnnému silovému a tepelnému zatížení, což způsobuje cyklické namáhání ostří mechanickými a teplotními rázy. Pokud by se k tomu navíc přidalo obrábění odlitků nebo výkovků, poté bude ostří vystaveno tvrdým vměstkům nacházejících se v povrchové vrstvě. Tyto vměstky mohou způsobovat nadměrné opotřebení hřbetu, projevující se jako hluboké rýhy [14].

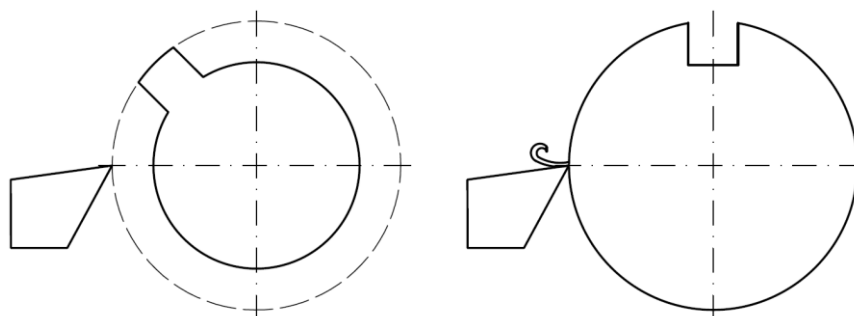
Pokud se břit zrovna nachází mimo záběr tak teplo, které je v něm naakumulováno, je odváděno okolním vzduchem, což má za následek menší tepelné zatížení břitu než při nepřerušovaném řezu. Výhodou je menší pravděpodobnost vzniku plastické deformace, ale na druhou stranu je větší nebezpečí vzniku křehkého lomu břitu. To vše způsobuje cyklické namáhání břitu destičky [14].



Obr. 1.8 Přerušované soustružení, podle [15].

1.2.3 Vhodný výběr břitové destičky

Optimální výběr VBD je vhodnou cestou pro zvýšení produktivity a spolehlivosti výrobního systému. Vliv na výběr má i geometrie destičky. Opomenout se nesmí vhodný výběr utvařeče třísky, dále správnou volbu řezných podmínek a v neposlední řadě musí být uvážěn druh obráběného materiálu. Svoji roli hraje také tuhost obráběcího stroje a upínání obrobku [12]. Důležitý faktor je i druh nespojitosti (viz obr. 1.9). Frekvence přerušování je v obou případech stejná. Je však dobře patrné, že se jedná o různé druhy přerušovaného řezu [16].



Obr. 1.9 Stejně druhy frekvencí u přerušovaného řezu, podle [16].

Vhodné destičky při přerušovaném řezu jsou ty, které mají větší obsah kobaltu [14]. Se zvyšujícím se obsahem kobaltu narůstá také lomová houževnatost [17]. Díky zvýšené lomové houževnatosti vykazuje břit menší nebezpečí proti mechanickému porušení. Pokud je břit aplikován při velkém mechanickém zatížení, a navíc v podmínkách těžkého přerušovaného řezu, je nejlepší volbou materiál s velkým množstvím Co, na který je nanesen vícevrstvý nanokrystalický kompozitní povlak PVD [14].

Obecné doporučení při přerušovaném soustružení [18]:

- jestliže se na obrobku vyskytuje více nespojitostí, jako tomu je například při obrábění šestihranných tyčí, tak je doporučeno použít destičky s PVD povlakem. Ten zaručuje houževnatost břitu destičky,
- při obrábění dílů velkých rozměrů za podmínek těžkého přerušovaného řezu, je doporučen nástroj s CVD povlakem, který zaručí dostatečnou houževnatost v celém objemu,
- ke zvážení je také, zda odolnější utvařeče třísky nezajistí větší odolnost proti vylamování částic z ostří,
- vypnutí chlazení může zabránit vzniku teplotních trhlin.

1.3 Fáze řezného procesu

Obráběcí proces může být přerušovaný. Patrné je to u hoblování, protahování nebo u soustružení vnitřních a vnějších nespojitých povrchů [19]. Čtyři různé časové úseky nebo jinak nazývané řezné fáze mohou být rozlišeny, jedná-li se o přerušovaný řezný proces [20]:

- vstupní fáze, řezný nástroj vstupuje do řezu,
- stacionární fáze, řezný nástroj je v řezném procesu,

- výstupní fáze, řezný nástroj vystupuje z řezu,
- volná fáze, řezný nástroj se nachází mimo řez.

Všechny výše zmíněné fáze ovlivňují činnost řezného nástroje a jeho opotřebení. Stacionární fáze má převládající efekt, pokud se jedná o nepřerušovaný řez například u podélného soustružení [20].

Vstupní fáze při přerušovaném řezu

Nárůst síly, který je pozorován během vstupní fáze při přerušovaného řezu, je možno rozdělit do dílčích fází. Definice říká, že vstupní fáze přerušovaného řezu trvá, dokud řezné síly nezískají průměrnou úroveň stacionární fáze. Rozlišitelné dílčí fáze jsou [21]:

- počáteční plastická deformace a počáteční rozvoj bodu stagnace,
- vývoj kontaktní délky,
- prodloužení kontaktní délky, dokud se nedosáhne stacionární fáze.

Geometrie obráběné součásti se přizpůsobuje geometrii obráběcího nástroje během prvotní dílčí fáze. Je to způsobeno lokální deformací obrobku a vývojem dočasného bodu stagnace na řezném nástroji. Místo, kde se daný bod stagnace nachází, je vysoce závislé na geometrii břitů. Jestliže má řezný nástroj pozitivní geometrii, bod stagnace bude z počátku ležet v blízkosti ostří a poté se v průběhu fáze záběru přesune směrem k místu, které bude zaujímat v průběhu stacionární fáze. Jestliže má však nástroj negativní geometrii, poloha bodu stagnace bude z počátku dále na čelní ploše a poté se přesune směrem k místu, které bude zaujímat v průběhu stacionární fáze [21].

Stacionární fáze při přerušovaném řezu

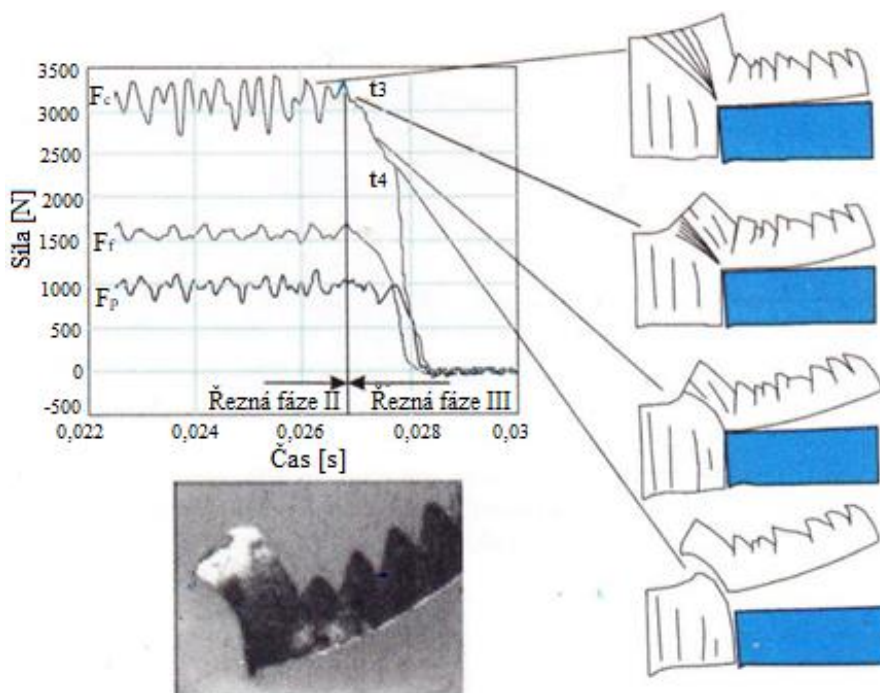
Stacionární fáze u přerušovaného řezu je rozdílná od stacionárních fází u plynulých řezných procesů. U plynulých řezných procesů je doba řezu v řádu minut, zatímco u přerušovaných řezů je v rozsahu několika milisekund až po jednu sekundu [21]. Stacionární procesní teplota se u nepřerušovaného řezu může snadno rozvíjet, zatímco u přerušovaných řezů jí není nikdy dosaženo. U plynulé stacionární fáze je možné, že hodnota řezných sil je ovlivněna tribologickým opotřebením, které zde vzniká. Ani v jednom z těchto případů nemůže být vývoj řezných sil přesně předpovězen z topografie povrchu řezného nástroje. Není samozřejmé, že řezný nástroj, který má hladší povrch bude mít také menší řezné síly, avšak obecně řečeno to vede ke zkrácené trvanlivosti nástroje [20].

Výstupní fáze při přerušovaném řezu

Během výstupní fáze dochází k odlehčení řezného nástroje. Výstupní fáze obsahuje pět po sobě jdoucích dílčích fází [20]:

- redukce sil, a to jak hlavní, tak vedlejší z důvodu plastické deformace vnějšího povrchu,
- začátek vývoje smykové roviny,
- změna směru smykového napětí na čelní ploše,
- odlehčení čelní plochy od zatížení,
- odlehčení hřbetní plochy od zatížení.

Na obrázku 1.10 je možné vidět vývoj složek sil celkové síly během výstupní fáze. Sloupec obrázků vpravo reprezentuje geometricky znázorněné příklady objevující se v prvních čtyřech dílčích fázích. Je to zobrazeno na obrábění vysoce houževnatého materiálu obrobku. Celá výstupní fáze je charakteristická redukcí zatížení. Průběh snižování zatížení je stejný jako nárůst zatížení během vstupní fáze akorát v opačném směru [21].



Obr. 1.10 Dynamické složky síly během prvních čtyř dílčích fází výstupní fáze při přerušovaném soustružení oceli, kde $f = 0,5$ mm, $a_p = 3$ mm a $v_c = 100$ m/min [20].

Tříška je z obrobku oddělována s charakteristickým tvarem boty (viz obr. 1.10). Na konci obrobku vzniká množství otřepů a zkosení. Tvar třísky ve tvaru boty je závislý na vlastnostech obráběného materiálu. Výraznější tvar je při obrábění houževnatějších materiálů. V průběhu výstupní fáze přerušovaného řezu se zatížení na nástroj mění a zatížení řeznou silou na čelní plochu nástroje může dokonce obrátit svůj směr. Zvýšené tahové napětí v nástroji a vyšší smykové napětí na ostří nástroje vedou k vylamování částic bříty a k deformaci nástroje na mnohem menší hloubce záběru ostří než při plynulých řezných procesech [22].

Volná fáze při přerušovaném řezu

V této fázi je břit zbaven mechanického zatížení. Zatížení, které se zde nachází jsou zapříčiněna napětími spojenými s ochlazováním řezného nástroje [20].

2 TRÍSKY PŘI OBRÁBĚNÍ KOVŮ

Obrábění kovů je doprovázeno vznikem třísek jako vedlejších produktů. Třísky mají mít takový tvar a rozměr, aby měly co nejmenší objem, který zajišťuje lepší manipulování při odvádění ze stroje a další dopravě [23]. Důraz na tvar třísky se především klade při obrábění na automatizovaných obráběcích strojích [24]. Pokud je vyžadováno efektivní používání nástroje, tak by měl být zajištěn náležitý tvar třísky. Dlouhá nedělená tříska může při namotání na nástroj způsobit jeho poškození. Dále může ovlivnit kvalitu obrobeneho povrchu. Tato nebezpečí je možné eliminovat snahou o dosažení dělené třísky [25].

Tvar vzniklé třísky závisí na mnoha faktorech, nejvíce však na [25]:

- vlastnostech obráběného materiálu zvláště ze strany jeho obrobitelnosti,
- geometrii nástroje a tvaru břitu (úhel čela, utvařeče třísek),
- materiálu řezného nástroje (řezivost a vznikající tření),
- řezných podmínkách (řezná rychlost, posuv).

Vlastnost obráběného materiálu hraje důležitou roli. Například nezelezné kovy tvoří extrémně dlouhou třísku. Oceli vytváří dlouhou třísku. Litiny a kalené materiály formují krátkou třísku. Pak jsou zde i materiály, které tvoří nepravidelnou třísku, jako jsou korozivzdorné oceli, vysoce legované oceli nebo titanové slitiny. Podstatnou vlastností materiálu je jeho tvrdost. Čím je tvrdost materiálu vyšší, tím jsou tvořící se třísky kratší. Naopak je tomu u tažnosti. Vyšší tažnost má za následek tvorbu delších třísek [26]. Důležitou roli hraje tepelná vodivost materiálu, protože ta určuje, kolik tepla je z místa řezu odváděno třískou. Čím více tepla bude odvedeno třískami, tím méně tepla bude přecházet do řezného nástroje a obrobku [27].

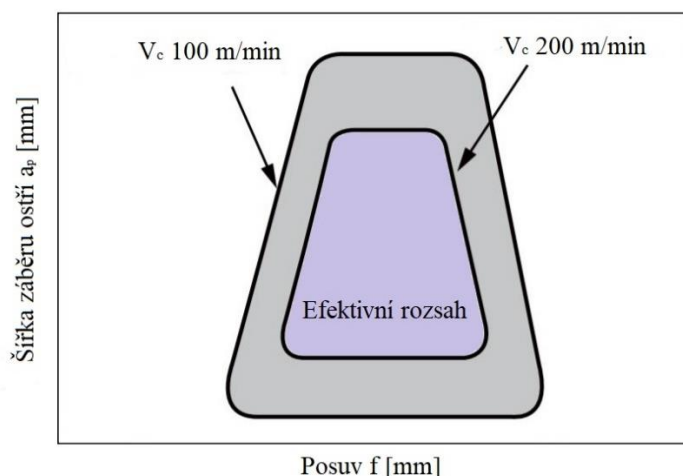
Dalším významným prvkem je geometrie řezného nástroje. Snížení složek sil celkové síly lze dosáhnout použitím pozitivního úhlu čela. V tomto případě je pravděpodobné, že se budou tvořit dlouhé třísky [26].

Významnými činiteli jsou také řezné podmínky. Správná tvorba třísek je zaručena vhodnou volbou šířky záběru ostří v kombinaci se správným posuvem. Každý výrobce udává ve svém katalogu aplikační diagramy pro dané VBD, ve kterých je znázorněn optimální tvar vzniklé třísky v závislosti na šířce záběru ostří a_p a na posuvu f . V případě, že poměr mezi šířkou záběru ostří a posuvem bude příliš velký, vznikne příliš dlouhá tříska, a tudíž mohou nastat problémy při obrábění. Naopak je tomu při malém poměru, u kterého se tvoří příliš krátká tříska. Pokud bude nastaven vysoký posuv a zároveň velká šířka záběru ostří, může dojít k vylomení břitu z důvodu mechanického přetížení [26]. Na obrázku 2.1 je vidět efektivní rozsah, ve kterém se bude tvořit optimální tvar třísky. Tento efektivní rozsah je pro optimální hodnoty posuvu a šířky záběru ostří. Platí, že tloušťka třísek je úměrná posuvu, šířka záběru ostří je úměrná šířce třísek a řezná rychlost je nepřímo úměrná tloušťce třísky. Efektivní rozsah se zmenšuje při vyšších řezných rychlostech [28].

Na tvar vzniklé třísky má také vliv opotřebení nástroje. Se zvyšujícím se opotřebením přechází tvar třísky z krátké článkovité na třísku nedělenou [29].

Dále na tvar může mít vliv druh naneseného povlaku, zejména pak jeho tribologické vlastnosti. A dále jeho schopnost tvořit oxidické filmy. Tyto oxidické filmy se tvoří

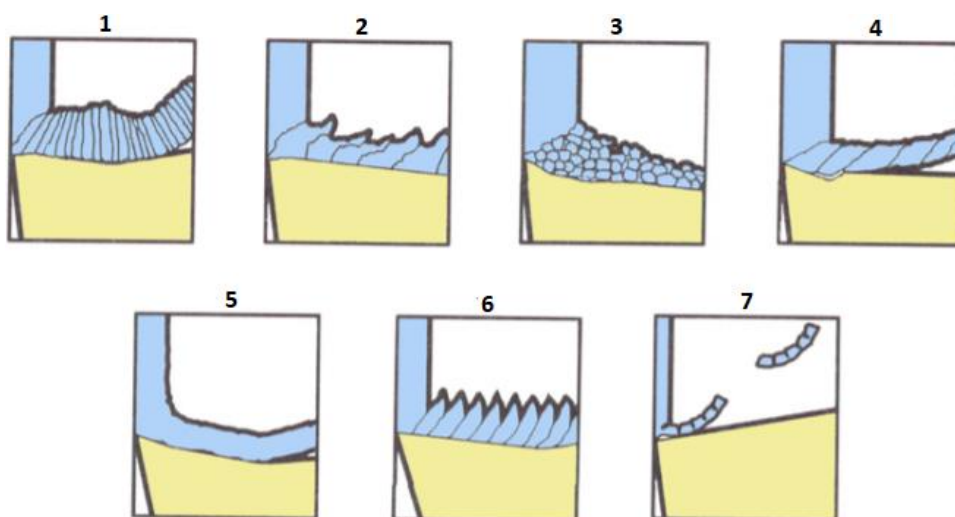
v důsledku teplotního ohřevu během obrábění. Pokud je na břit destičky nanesen povlak TiAlN, potom se na jeho povrchu budou tvořit oxidické vrstvy na bázi Al_2O_3 , které mají nízkou tepelnou vodivost. Kvůli nízké tepelné vodivosti je vytvořena vysoce účinná tepelná bariéra. Díky této bariéře teplo přestupuje více do třísky, která je odváděna z místa řezu, což má za následek menší teplotní namáhání rezného nástroje. Lze vyvodit, že čím účinnější bude tepelná bariéra, tím více tepla bude přestupovat do třísky, a ne do nástroje a obrobku [29].



Obr. 2.1 Tvary třísek v závislosti na šířce záběru ostří a_p a posuvu f , podle [28].

2.1 Tvary třísek podle obráběného druhu materiálu

Podle druhu obráběného materiálu se třísky mohou zařadit do sedmi základních typů, jak je možné vidět na obrázku 2.2 [30]:

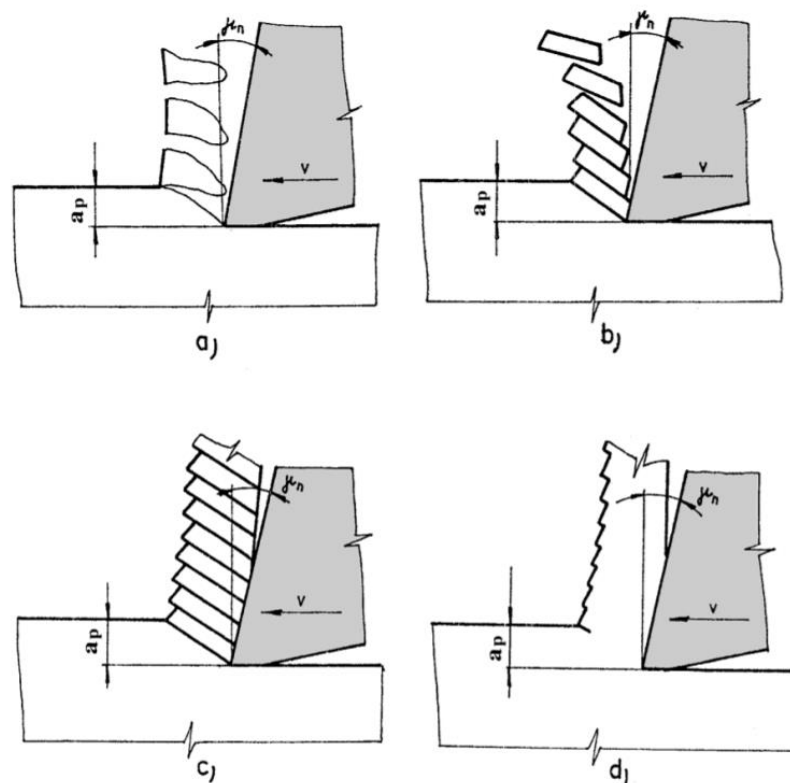


Obr. 2.2 Základní druhy vznikajících třísek při obrábění kovů [31]

- 1 – plynulá článkovitá soudržná tříska vznikající u většiny ocelí,
- 2 – plynulá soudržná lamelovitá tříska, která vzniká při obrábění korozivzdorných ocelí,

- 3 – tvářená elementární tříška, která vzniká u obrábění litin,
- 4 – nepravidelně článkovitá plynulá tříška, která vzniká u většiny vysoce legovaných materiálů,
- 5 – tvářená plynulá soudržná tříška, která vzniká při malých řezných silách, např. při obrábění hliníku,
- 6 – plynulá stupňovitá tříška, která vzniká při obrábění titanu,
- 7 – dělená segmentová tříška, která vzniká při velkých řezných silách a vysokých teplotách řezání, např. při obrábění tvrdých materiálů.

Segmentová tříška (viz obr. 2.3c), která vzniká při obrábění tvrdých a tvárných materiálů, je složená z jednotlivých elementů, které jsou vzájemně spojeny. Každý element má rozdílný tvar i velikost. Při tvorbě této třísky jsou jednotlivé částice stupňovité třísky odstřiženy, což je dobře patrné na vnějším povrchu třísky. Jednotlivé částice jsou rozlišitelné i na straně přilehlé k čelní ploše nástroje a jsou od sebe snadno oddělitelné. Tříška je odváděna po čelní ploše v kratších celcích. Jednotlivé celky jsou složeny z jedné nebo mnoha částic [25]. Segmentová tříška je charakteristická oblastmi intenzivního stříhu, které se střídají s oblastmi s poměrně málo zdeformovaným materiálem. Tato tříška vzniká při obrábění mnoha materiálů při vyšších řezných rychlostech. Avšak u materiálů mající nízkou tepelnou vodivost a nízkou tepelnou kapacitu, jako například titanové slitiny nebo austenitické korozivzdorné oceli, vzniká segmentová tříška již při nižších řezných rychlostech. Se zvyšující se řeznou rychlostí je stupňovitost třísky čím dál více zřetelná a následně začne vznikat tříška na obr. 2.3b [32].



Obr. 2.3 Oddělování třísek trhaných a stříhaných [25].

2.2 Vlivy způsobující vznik stupňovité třísky

Vliv řezné rychlosti

U mnoha materiálů je plynulá tříska tvořena při malých řezných rychlostech. Se zvyšující se řeznou rychlostí mají třísky tendenci přecházet z plynulé (viz obr. 2.3d) na segmentovou [41, 42]. Segmentová tříska hraje důležitou roli při obrábění titanových slitin. Tvorba segmentové třísky může znamenat vysokofrekvenční kolísání řezné síly, které může urychlit opotřebení řezného nástroje [33].

Vliv tvrdosti obráběného materiálu

U materiálu AISI 1045 (ČSN 41 2050 [34]) bylo zjištěno, že jeho tvrdost ovlivňuje mechanismus lomu v oblasti primární plastické deformace v průběhu tvorby stupňovité třísky [35]. S narůstající tvrdostí klesá tepelná vodivost materiálu a zároveň klesá kritická řezná rychlost, při které se stupňovitá tříska začíná tvořit [45, 46]. Kritická řezná rychlost klesá s narůstající šířkou záběru ostří, ale roste se zvyšujícím se úhlem čela [36].

Vliv tepelné vodivosti obráběného materiálu

Pomocí metody konečných prvků bylo zjištěno, že stupňovitá tříska se tvoří při nižších hodnotách tepelné vodivosti materiálu obrobku. Pokud se tepelná vodivost obrobku zvyšuje, stává se tříska čím dál více plynulou. Kolísání řezné síly způsobené tvorbou stupňovité třísky se zmenšuje s narůstající tepelnou vodivostí [37].

Vliv nástrojového úhlu čela

U slitiny TC21 (titanová slitina) bylo zjištěno, že tvorba stupňovité třísky je dobře patrná u nástrojového úhlu čela 0° . Se zvyšujícím se úhlem čela je stupňovitost třísky čím dál méně patrná [38].

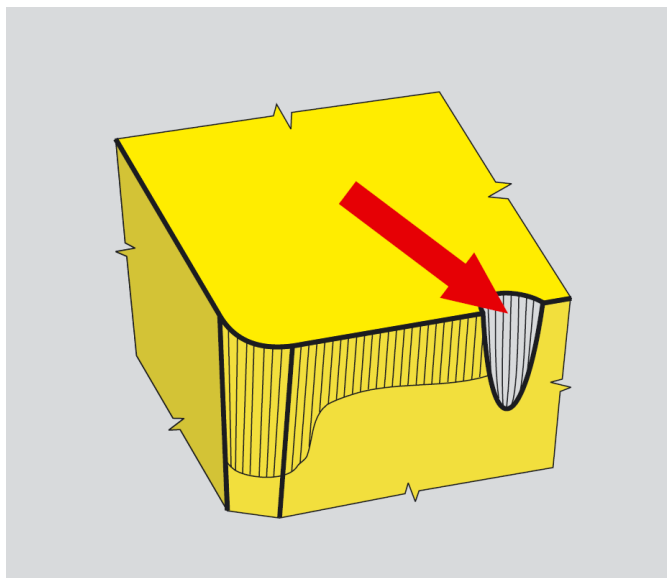
3 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Opotřebení řezného nástroje je velmi složitý proces závisející na mnoha okolnostech jako například na vlastnostech materiálu obrobku a řezného materiálu dále na druhu obráběcí operace, nástrojové geometrii, zvolených řezných podmínkách a na řezném prostředí. V tomto procesu se vyskytuje mnoho odlišných fyzikálně-chemických mechanismů. Hlavními mechanismy opotřebení jsou například abraze, adheze, difúze, oxidace, plastická deformace a křehký lom [39].

3.1 Klasifikace typů opotřebení břitu nástroje

Vrubové opotřebení břitu

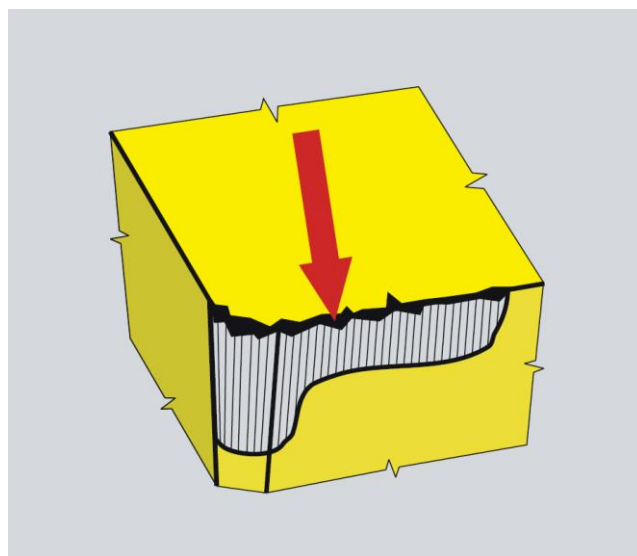
Vrubovému opotřebení je břit vystaven, je-li povrchová vrstva tvrdší nebo abrazivnější než je obrobek v jádře. Tvrdá povrchová vrstva může být způsobena tzn. deformačním zpevněním při předchozím obrábění. Tvrdé povrchové vrstvě je břit vystaven i v případě obrábění odlitků nebo výkovků. V místě kontaktu nástroje s touto tvrdou vrstvou může dojít k rychlejšímu opotřebení. Vznik vrubového opotřebení je podporován lokální koncentrací napětí [40]. Břit je vlivem tlakových napětí, které vznikají při kontaktu nástroje a obrobku namáhán v místě nacházejícím se v nastavené šířce záběru ostří, zatímco ostatní místa břitu nejsou prakticky v žádném kontaktu. Tento druh opotřebení může být způsoben přítomností tvrdých mikroskopických částic obráběného materiálu nebo lehce přerušovaným řezem [27]. Vrubové opotřebení je vidět na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Vrubové opotřebení na hlavním břitu [41].

Vylamování částic břitu

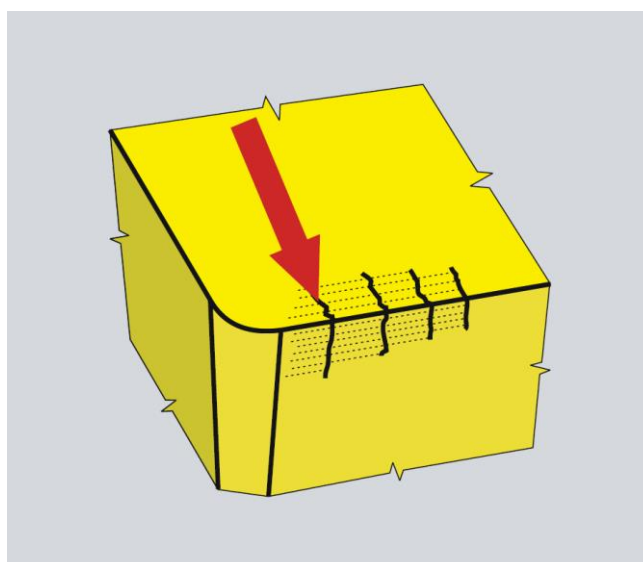
Při tomto druhu opotřebení dochází k vydrolování částic břitu vlivem lokálních zatížení. Pokud je obráběno přerušovaným řezem, tak je tento druh opotřebení velmi častý. Vydrolená místa jsou potenciálními oblastmi, kde může nastat lom břitu. Dalším faktorem, který může zapříčinit vylamování břitu, je například nevhodně zvolený řezný materiál [42]. Svoji roli hraje taky tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek. Toto opotřebení může být způsobeno přítomností tvrdých fází, které se vyskytují u precipitačně vytvrzených materiálů obrobků [27]. Vylamování částic břitu je vidět na obrázku 3.2.



Obr. 3.2 Křehké porušení nástrojového ostří [41].

Teplotní trhliny

Vznikají vlivem kombinace měnící se teploty působící na břit, rozdílu teplot mezi teplými a chladnými místy břitu a mechanických šoků. Velmi často se tento druh opotřebení vyskytuje u frézování nebo přerušovaného soustružení [40]. Vzniklé trhliny jsou kolmé na ostří. V místech mezi teplotními trhlinami může docházet k vydrolování ostří a následnému lomu břitu [42]. Použití procesní kapaliny by mohlo ještě více přispět k rozvoji teplotních trhlin [43]. Proto v tomto případě není chlazení doporučeno [25]. Opotřebení teplotními trhlinami je vidět na obrázku 3.3.

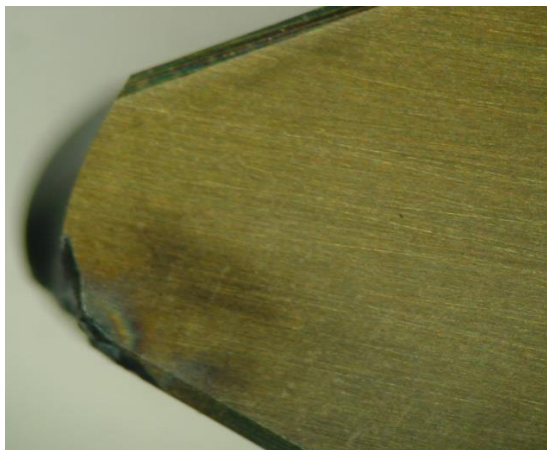


Obr. 3.3 Hřebenové trhliny [41].

Lom břitu nástroje

Obecně se za lom břitu považuje větší odlomení části břitu. Toto opotřebení může být způsobeno mnoha faktory jako například vibracemi, přerušovaným řezem nebo

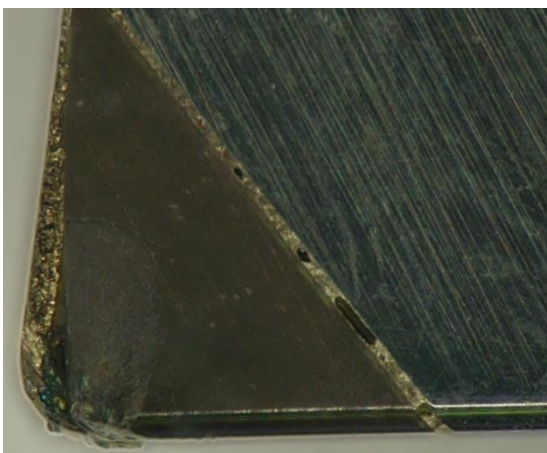
mechanickým přetížením břitu [27]. Představuje vyřazení nástroje z provozu a lze ho označit za konec trvanlivosti nástroje. Je velmi nebezpečný a je dobré se mu vyvarovat [42]. Křehký lom břitu je vidět na následujícím obrázku 3.4.



Obr. 3.4 Křehký lom břitu nástroje z rezné keramiky.

Odprýsknutí břitu při přerušovaném řezu

Toto opotřebení se pozná tak, jestliže se z čela nástroje oddělí část břitu ve formě plochého úlomku. Odprýsknutí nastane, pokud je přesažena materiálová pevnost ve střihu v důsledku vysokých obráběcích sil. Proto je obvykle toto opotřebení považováno za mechanické [27]. Opotřebení je vidět na obrázku 3.5.



Obr. 3.5 Odprýsknutí na břitu z KNB.

V přerušovaných řezných procesech může být řezný nástroj náhle porušen, kvůli mechanické a teplotní únavě. Porušení řezného nástroje je způsobeno zlomením nebo vylomením břitu z nějakého důvodu během přerušovaného řezu. Nelze určit, který důvod je závažnější, protože každý z nich hraje důležitou roli [44].

Trvanlivost nástroje je ovlivněna řeznými podmínkami, především řeznou rychlostí a posuvem. Při malé řezné rychlosti jsou hlavním faktorem porušení nástroje mechanické trhliny, které se mohou objevit během vstupu a výstupu nástroje z řezu. V tomto případě jsou řezné síly vyšší, zatímco teploty jsou nižší [44].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část byla provedena v jedné strojírenské firmě poblíž Brna. V průběhu experimentu byly testovány VBD, které se lišily svojí geometrií, naneseným povlakem a řezným materiálem. Jako řezný materiál byl v první sérii zvolen kubický nitrid bóru a následně ve druhé sérii byla zvolena řezná keramika. Testování těchto VBD proběhlo při čelním soustružení v podmínkách přerušovaného řezu.

4.1 Používaný obráběcí stroj

Čelní soustružení bylo provedeno na CNC obráběcím stroji s názvem DMG MORI (viz obr. 2.1). Další specifikace jsou uvedeny v tabulce 2.1.



Obr. 2.1 CNC obráběcí stroj DMG MORI.

Tab. 2.1 Bližší specifikace stroje [45].

Obráběcí stroj:	DMG MORI
Název:	NLX 2500/700
Řídicí systém:	Mitsubishi
Jmenovitý výkon vřetene:	18,5 kW
Max. otáčky vřetene:	4000 min ⁻¹
Rok výroby:	Říjen 2014
Druh chlazení:	ALUSOL ABF 10
koncentrace emulze:	5 – 6 %
Rozsah os:	Osa x = 260 mm
	Osa z = 795 mm
Zásobník nástrojů:	Revolverová hlava, max. 12 nástrojů

4.2 Druhy používaných nástrojových držáků

Jednotlivé druhy břitových destiček KNB byly upnuty vždy do stejného držáku, což usnadnilo jejich výměnu. Držák byl následně upnut do revolverové hlavy soustruhu. Po provedení daného testu byla VBD vyjmuta a vložena místo ní nová. Následně byl použit držák pro upnutí destiček z řezné keramiky. Na obrázku 2.2 je možné vidět použité držáky již s prvními testovanými destičkami.



Obr. 2.2 Použité držáky: a) držák na VBD z KNB s označením PCLNR 2525M 12, b) držák na VBD z řezné keramiky s označením DDNR 2525.

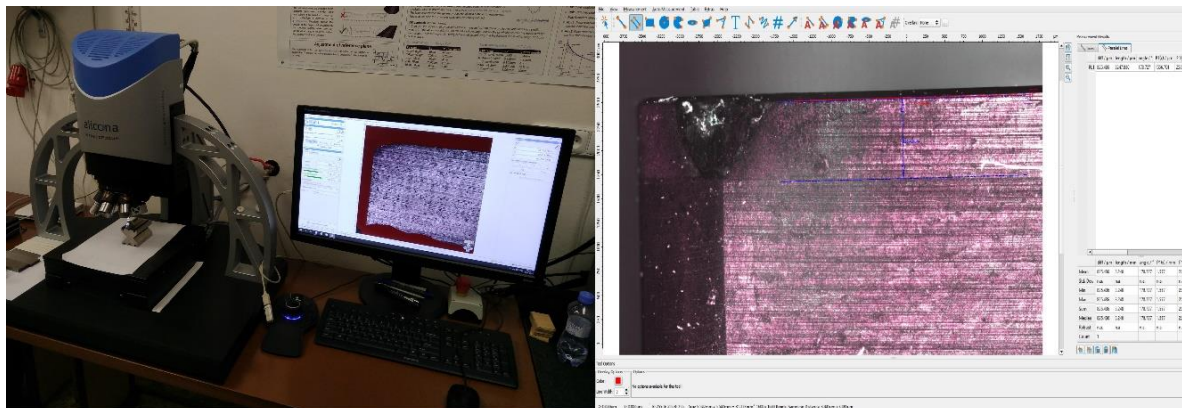
4.3 Používané měřicí přístroje

Vzniklé opotřebení na VBD bylo nasnímáno na mikroskopu ZEISS Stemi 2000-C. Pořízené fotografie byly upraveny v programu LUCIA Image. Měřicí pracoviště je možno vidět na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 Používaný mikroskop ZEISS 2000-C.

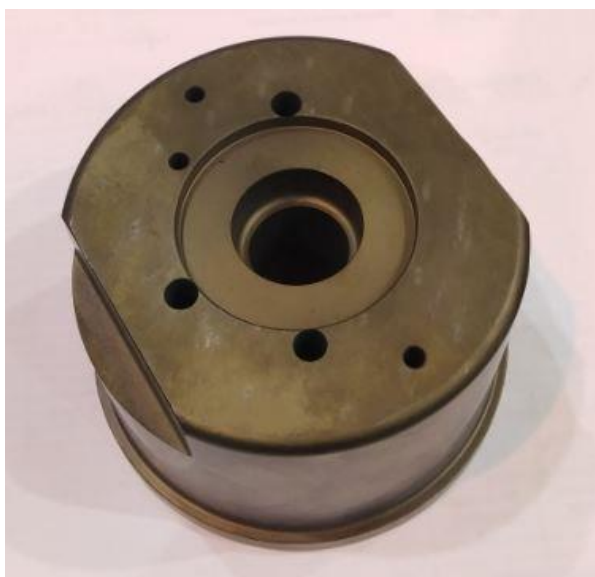
Opotřebení, konkrétně nepravidelné opotřebení břitu VB_c bylo měřeno na přístroji Alicona infinite focus-G5 (viz obr. 2.4). Dále na tomto přístroji bylo provedeno měření geometrie břitů destiček.



Obr. 2.4 Používaný měřicí přístroj Alicona infinite focus-G5.

4.4 Materiál obrobku

Obráběným materiálem byla kalená nástrojová ocel 1.2379 (ČSN 41 9573 [46]). Součást byla nejdříve obrobena z polotovaru na požadované rozměry a následně byla zakalena na tvrdost 60 – 62 HRC. Testované VBD byly použity na dokončovací operaci na čele obrobku. Jak je možné vidět na obrázku 2.5, tak čelní plocha obrobku obsahuje jisté nespojitosti (drážky a díry), které způsobují přerušovaný řez nástroje.



Obr. 2.5 Obráběná součást z nástrojové oceli 1.2379.

4.4.1 Popis oceli 1.2379

Chrom - molybden - vanadová je vysoce legovaná nástrojová ocel odolná proti opotřebení a namáhání v tlaku. Vyznačuje se velkou prokalitelností. Kalí se v oleji a na vzduchu. Zachovává si rozměry při tepelném zpracování a obtížně se brousí [47]. Chemické složení oceli 1.2379 je zobrazeno v tabulce 2.2.

Tab. 2.2 Chemické složení oceli 1.2379 [47].

Označení oceli:	chemické složení v %								
	Fe	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P max.	S max.
1.2379	82,9 - 85,8	1,40 - 1,60	0,20 - 0,45	0,20 - 0,45	11,0 - 12,5	0,60 - 0,95	0,80 - 1,20	0,030	0,035

4.4.2 Zušlechťování oceli 1.2379

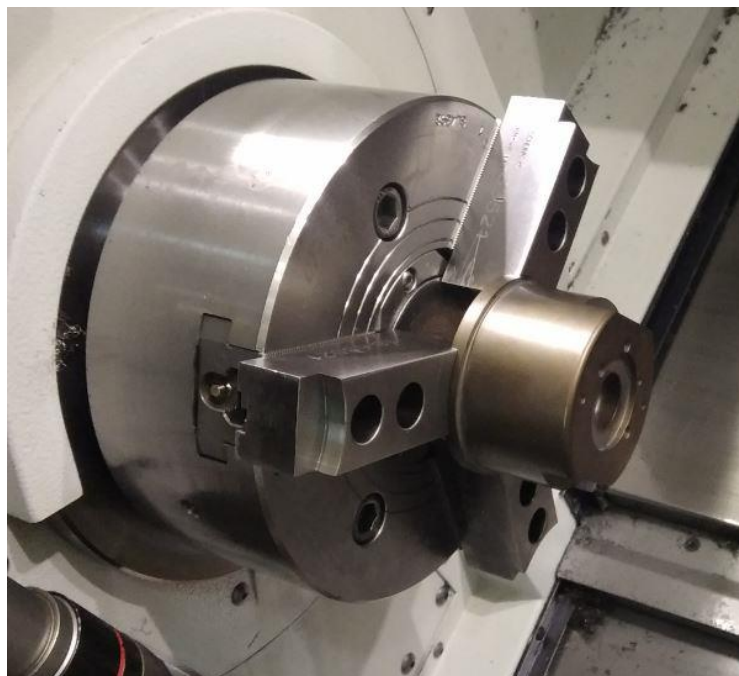
Proces zušlechťování se skládá z kalení a následného vysokoteplotního popouštění [48]. Ocel 1.2379 má kalící teploty mezi 1050 – 1080 °C. Po dosažení vhodné kalící teploty je ocel kalena na vzduchu nebo v solné lázni. Popouštěcí teploty jsou v závislosti na tvrdosti uvedeny v tabulce 2.3 [47]. Ocel byla v případě tohoto experimentu popouštěna třikrát.

Tab. 2.3 Tabulka popouštěcích teplot v závislosti na tvrdosti [47].

Teplota [°C]	100	200	300	400	500	525	550	600
Tvrdost [HRC]	61	60	58	59	62	62	57	50

4.5 Přípravek na upnutí obrobku

Obrobek byl upnut do sklíčidla, jak je možné vidět na obrázku 2.6. Parametry sklíčidla udává tabulka 2.4.



Obr. 2.6 Upnutí obrobku ve sklíčidle.

Tab. 2.4 Parametry sklíčidla.

Maximální otáčky:	Maximální hmotnost:	Maximální průměr:	Maximální upínací síla:
4500 min ⁻¹	38,3 kg	460 mm	48,8 kN

4.6 Výpočty

Jednotkový strojní čas při čelním soustružení za konstantní řezné rychlosti byl vypočítán podle vztahu (2.1). Ve vztahu 2.1 písmeno S představuje velikost obrobené plochy. Obráběný díl byl vymodelován v programu Solidworks, který také umožňuje velikost obráběné plochy vypočítat. Jednotkový strojní čas je potom dále vynásoben příslušným počtem záběrů, které daná destička vykonala.

Jednotkový strojní čas pro obrábění konstantní řeznou rychlostí [49]:

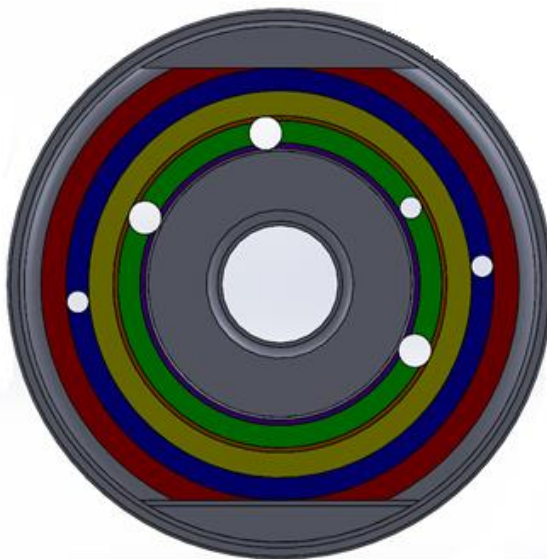
$$t_{AS,v} = \frac{i \cdot L_S \cdot 60}{10^3 \cdot v_c} = \frac{i \cdot S \cdot 60}{10^3 \cdot v_c \cdot f} \quad [s] \quad (2.1)$$

Příklad výpočtu:

$$t_{AS,v} = \frac{i \cdot S \cdot 60}{10^3 \cdot v_c \cdot f} = \frac{1 \cdot 3606,91 \cdot 60}{10^3 \cdot 100 \cdot 0,1} = 21,64 \text{ s}$$

Počet rázů

Byla provedena separace celkové obráběné plochy na menší podoblasti (viz obr. 2.7), ve kterých bylo jednotlivě spočítáno množství rázů. Celkové množství rázů je potom dáno součtem rázů z jednotlivých podoblastí. Jednotlivá podoblast se změní v jinou pokud dojde ke změně počtu nespojitostí nebo pokud se změní typ nespojitosti z drážky na díru. Touto úvahou je zanedbán plynulý přechod nástroje mezi dvěma podoblastmi. Je uvažována skoková změna nástroje z jedné podoblasti na druhou, což může způsobit drobnou nepřesnost.



Obr. 2.7 Znázornění jednotlivých podoblastí na obrobené čelní ploše.

Plošný obsah každé podoblasti byl spočítán programem Solidworks. Jednotlivé obsahy jsou uvedeny v tabulce 2.5 a jsou seřazeny postupně tak, jak jdou postupně za sebou od vnějšího průměru směrem k vnitřnímu. Dále jsou v tabulce 2.5 uvedeny šířky jednotlivých podoblastí a počty nespojitostí, které dané plochy obsahují. Následně je podle vztahu (2.2) vypočten počet rázů v jednotlivých oblastech. Celkový počet rázů je potom vynásoben počtem záběrů, které daná destička vykonala.

Tab. 2.5 Jednotlivé parametry dílčích ploch.

Podoblast	Obsah S [mm ²]	Šířka l _r [mm]	Počet nespojitostí n [-]
1	919,85	4,50	2
2	892,21	4,00	2
3	911,85	4,50	0
4	146,87	0,83	3
5	604,02	4,00	4
6	132,11	0,91	3

Vztah pro výpočet rázů [50]:

$$R = \frac{n \cdot l_r}{f} [-] \quad (2.2)$$

Příklad výpočtu:

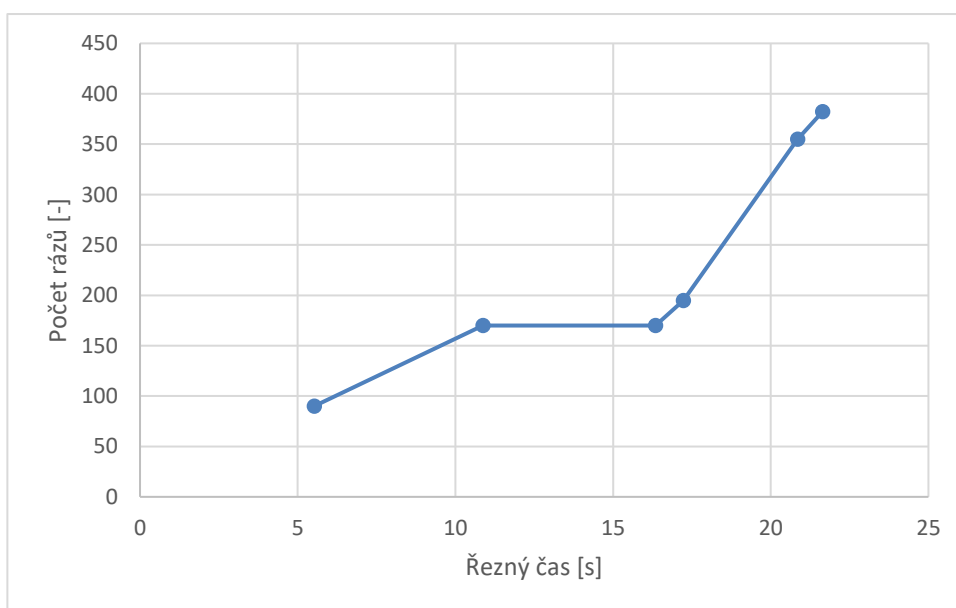
$$R_1 = \frac{n \cdot l_{r1}}{f} = \frac{2 \cdot 4,5}{0,1} = 90 [-]$$

Stejným způsobem byly dopočítány počty rázů v jednotlivých podoblastech. Počty rázů v jednotlivých podoblastech jsou znázorněny v tabulce 2.6.

Tab. 2.6 Počet rázů v jednotlivých dílčích oblastech.

R ₁ [-]	R ₂ [-]	R ₃ [-]	R ₄ [-]	R ₅ [-]	R ₆ [-]	Celkem (1. záběr nástroje) [-]
90	80	0	25	160	28	383

Obrázek 2.8 ukazuje grafickou závislost vzniklých rázů na řezném čase.



Obr. 2.8 Průběh rázů v průběhu řezného času z jednoho záběru nástroje.

4.7 Testování řezných destiček – první série

Druhy testovaných VBD

Testovaný řezný materiál byl v první sérii zvolen podle druhu obráběné oceli. Jelikož se jedná o kalenou nástrojovou ocel 1.2379, tak řezným nástrojem byl v první sérii zvolen KNB, který se vyznačuje svojí vysokou tvrdostí. Celkem bylo testováno pět VBD z tohoto materiálu, které se lišily svojí geometrií a také druhem povlaku (viz tabulka 2.7).

Tab. 2.7 Druhy testovaných destiček z KNB.

Druh VBD:	Počet břitů na jedné VBD	Délka ostří [mm]	Poloměr zaoblení špičky [mm]	Druh povlaku
A	2	2,2	0,8	TiCN
B	2	2,3	0,4	TiCN
C	4	1,7	1,2	TiAlN
D	4	1,7	1,2	TiAlN
E	2	2,4	1,2	TiCN

Řezné podmínky

Řezné podmínky byly nastaveny podle obvyklých řezných podmínek používaných při obrábění této nástrojové oceli v této firmě. Obrábění probíhalo bez použitého chlazení a za konstantní řezné rychlosti. Aby bylo možné porovnat řezivost nástrojů, byly použity u všech testovaných destiček v první sérii stejné řezné podmínky, které jsou vidět v tabulce 2.8.

Tab. 2.8 Používané řezné podmínky v první sérii.

Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na otáčku f [mm]	Šířka záběru ostří a_p [mm]
100	0,1	0,1

Popis experimentu

Celkový přídavek na obrábění na čelní ploše obrobku činil 0,2 mm. Celá technologická operace byla provedena na dva záběry nástroje (ZN). Pro zamezení větší šířky záběru než 0,1 mm, byl proveden ještě jeden záběr navíc, který zajišťoval zarovnání čelní plochy za předpokladu, že daný přídavek byl na začátku větší než 0,2 mm. Upnutí nástroje bylo popsáno v kapitole 2.2.

Před začátkem obrábění byl soustruh vyčištěn od předchozích třísek. Po každém ZN byl odebrán vzorek třísek vzniklých při obrábění a následně byl soustruh vyčištěn pro další ZN. Protože každá destička vykazovala značné opotřebení už po dvou záběrech, byl třetí záběr proveden nikoli jako dokončovací záběr, nýbrž pouze jako první záběr na novém kuse. Jelikož testování VBD probíhalo přímo ve firmě, kde nebyl přítomný žádný mikroskop, nebylo možné měřit postupné opotřebení. Aby bylo možné alespoň částečně zaznamenat postupné opotřebení, a ne pouze opotřebení na konci testu, byl na jednotlivých břitech nástroje proveden adekvátní počet záběrů. To znamená, že první břit nástroje provedl jeden záběr, druhý břit provedl dva záběry a třetí břit provedl tři záběry. Tímto způsobem probíhalo testování u všech destiček v první sérii.

4.7.1 Vyhodnocení dosažených výsledků v první sérii

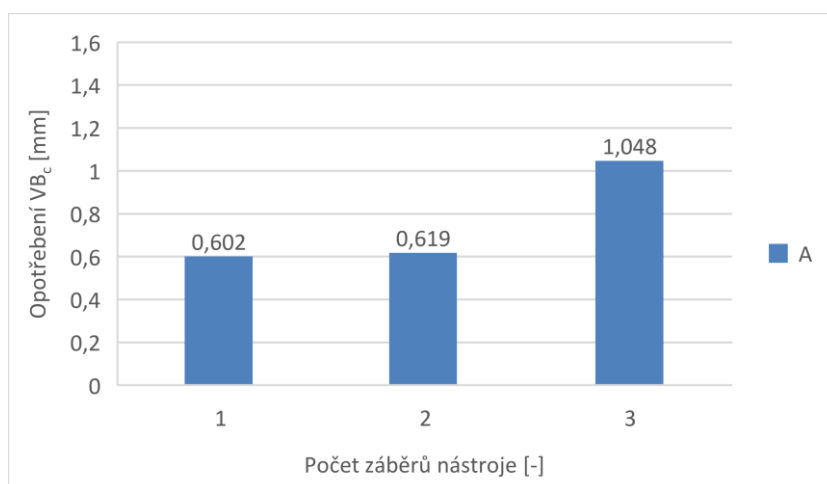
Vyhodnocení vzniklého opotřebení

Jednotlivé hodnoty VB_c byly postupně měřeny a zapisovány do tabulky 2.9.

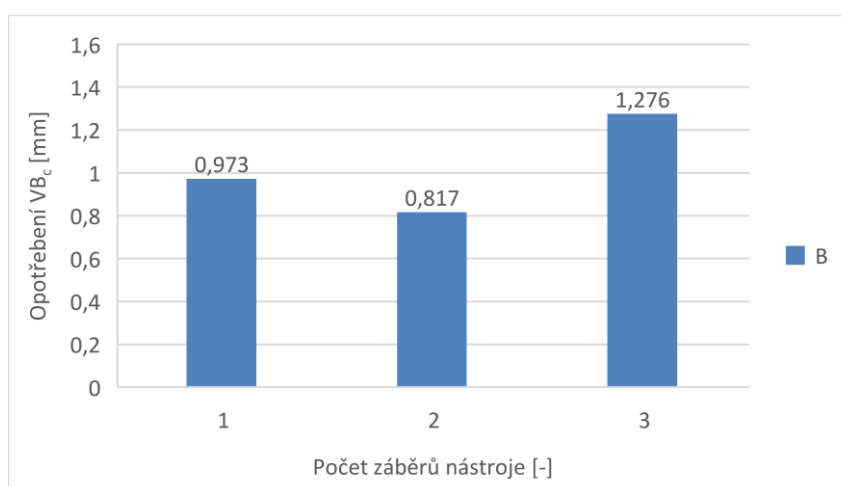
Tab. 2.9 Naměřené hodnoty VB_c u testovaných VBD.

Testovaná VBD	VB_c , 1. ZN [mm]	VB_c , 2. ZN [mm]	VB_c , 3. ZN [mm]
A	0,602	0,619	1,048
B	0,973	0,817	1,276
C	0,794	1,007	1,242
D	0,348	1,082	1,152
E	0,399	0,753	0,825

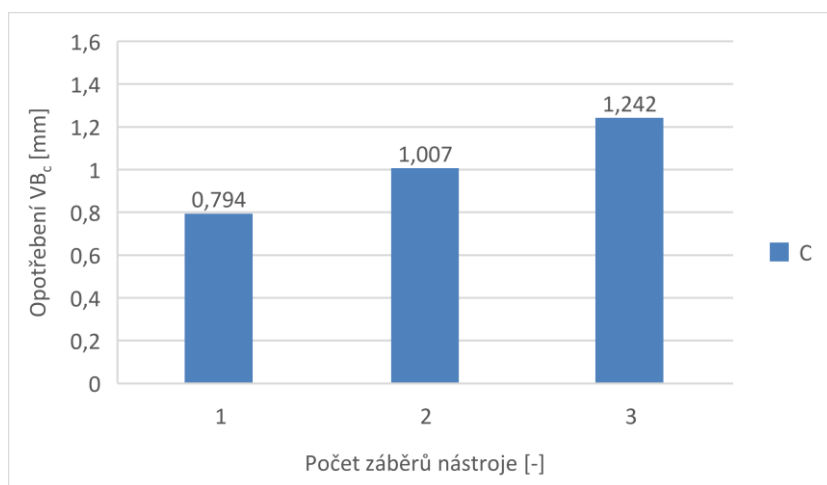
Na obrázcích 2.9 až 2.13 je vidět opotřebení jednotlivých destiček, které bylo dosaženo po příslušném ZN.



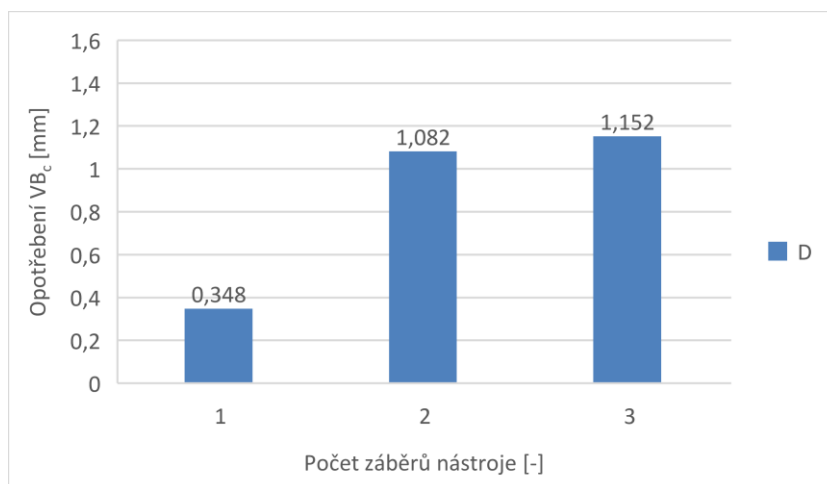
Obr. 2.9 Zobrazené opotřebení destičky A pro daný ZN.



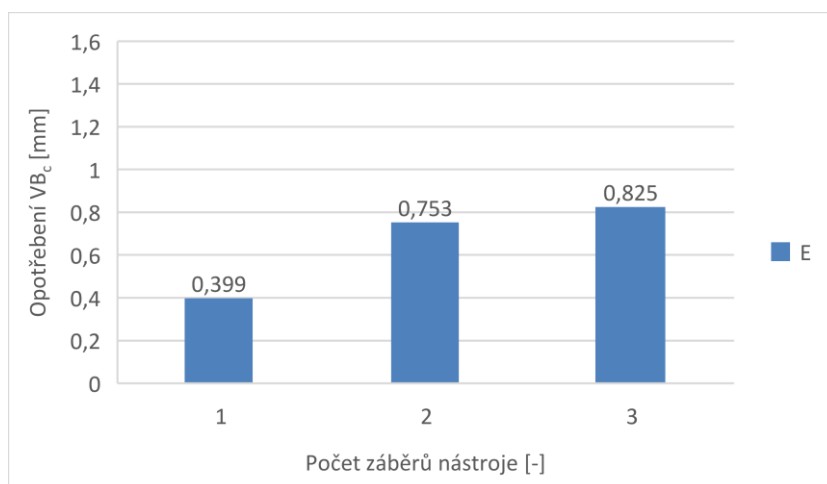
Obr. 2.10 Zobrazené opotřebení destičky B pro daný ZN.



Obr. 2.11 Zobrazené opotřebení destičky C pro daný ZN.



Obr. 2.12 Zobrazené opotřebení destičky D pro daný ZN.


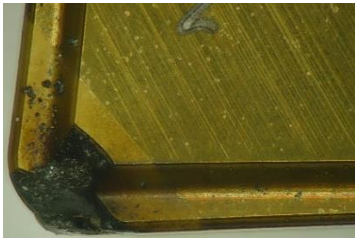
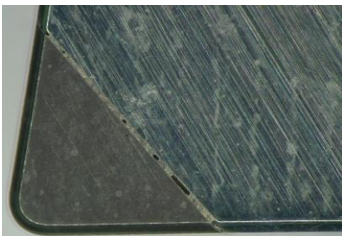
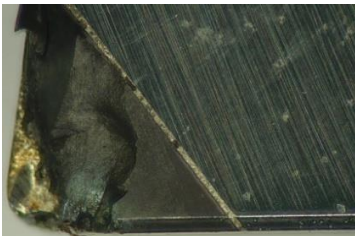








Obr. 2.13 Zobrazené opotřebení destičky E pro daný ZN.

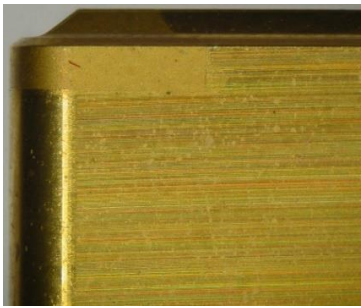
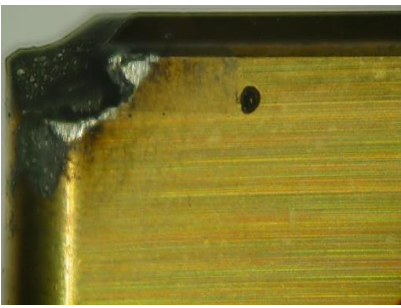
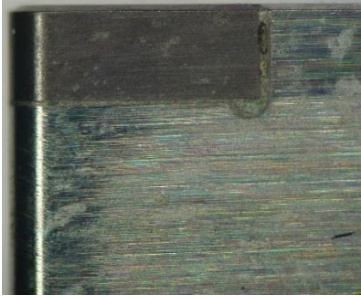
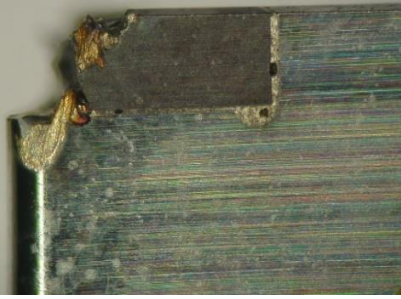
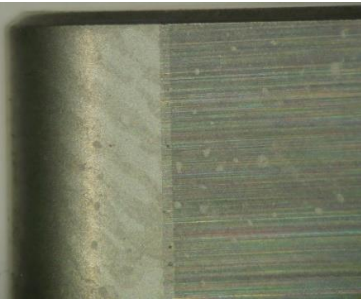

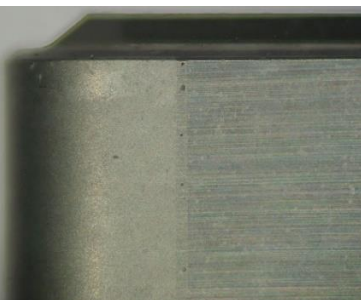
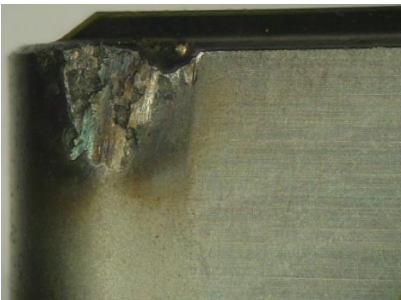
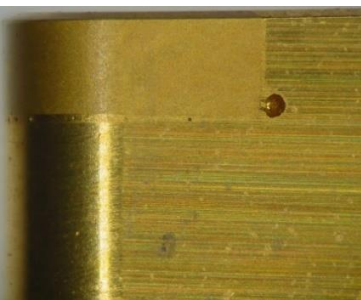

Na obr. 9 je vidět, že opotřebení VBD po jednom ZN je téměř stejné jako po dvou ZN. Na obr. 10 VBD dokonce vykazovala menší opotřebení po dvou ZN než po jednom. Na základě těchto informací lze říci, že opotřebení nástroje probíhalo velmi nepravidelně a nepředvídatelně. Stabilnější průběh opotřebení je zobrazen na obr. 11 až 13. Na těchto obrázcích opotřebení VBD postupně narůstá se zvyšujícím se počtem záběrů. Tato skutečnost může být přisouzena většímu poloměru zaoblení špičky u použitých destiček C, D, E než u destiček A a B. Větší poloměr zaoblení špičky zvyšuje stabilitu a pevnost břitových destiček.

Vzniklé opotřebení na čele a na hřbetě nástroje po třetím ZN bylo nasnímáno na mikroskopu ZEISS 2000-C při pětinasobném zvětšení viz tab. 2.10 respektive 2.11.

Tab. 2.10 Vzniklé opotřebení na čele VBD.

VBD	Nová VBD	Opotřebovaná VBD
A		
B		
C		
D		
E		

Tab. 2.11 Vzniklé opotřebení na hřbetě VBD.

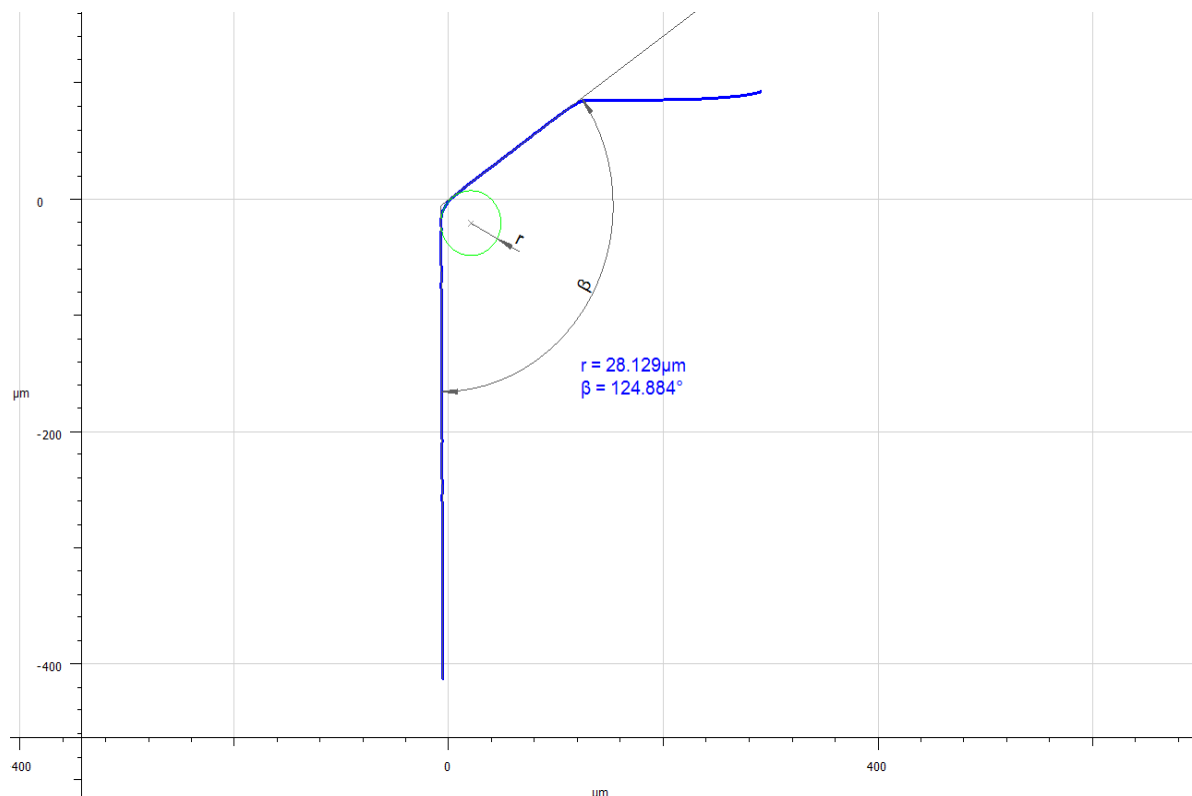
VBD	Nová VBD	Opotřebená VBD
A		
B		
C		
D		
E		

U destiček A i B byl po třetím ZN zaznamenán lom břitu. Protože na břitu nástroje nejsou patrné žádné teplotní trhliny, lze usoudit, že tento lom mohl být zapříčiněn spíše mechanickými než teplotními rázy, které jsou způsobeny kolísáním složek sil celkové síly při neustálém vstupu nástroje do řezu a následném výstupu nástroje z něj. K lomu mohlo také dojít kvůli nedostatečné tuhosti nástroje způsobené příliš malým poloměrem zaoblení špičky.

U destiček C, D, E nedošlo po třetím ZN k lomu břitu, ale pouze k uštípnutí části břitu. Tato skutečnost může být přisouzena vyšší tuhosti břitu díky většímu poloměru zaoblení špičky. Opotřebení je nejvíce patrné na hřbetu nástroje, zatímco čelo nástroje je prakticky nedotčené. Je tomu tak z důvodu použití velkého záporného úhlu čela při obrábění. Pouze u destičky D je možno vidět, že na čele nástroje došlo k vyštípnutí části břitu. U destičky C je vidět, že nejdříve docházelo k postupnému zvětšování opotřebení na hřbetě nástroje až do velikosti $VB_c = 0,543$ mm a následně došlo k náhlému uštípnutí části hřbetní plochy až do velikosti $VB_c = 1,242$ mm. Dále toto opotřebení může být způsobené tvrdými vměstkami uvolňujícími se vlivem vysoké teploty z obrobku. Tyto vměstky způsobují abrazivní opotřebení.

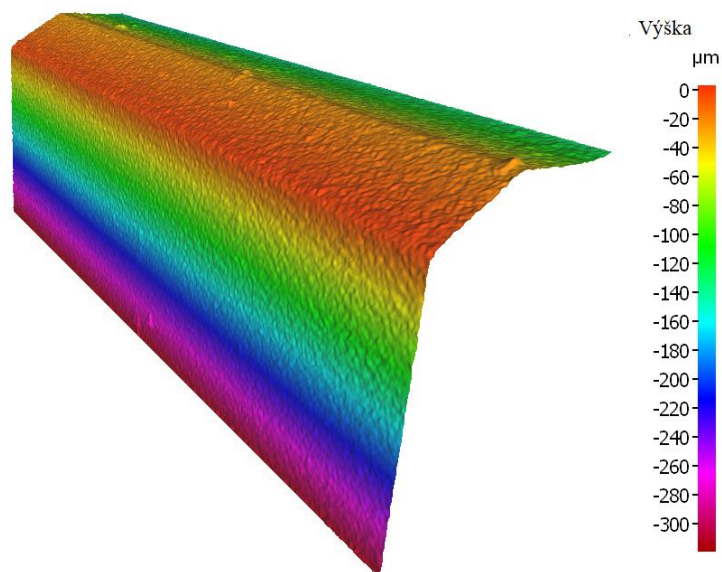
Měření geometrie břitu

Na destičce A bylo provedeno měření geometrie břitu pomocí přístroje Alicona. Na obrázku 2.14 respektive 2.15 je zobrazena geometrie břitu.



Obr. 2.14 Měření geometrie břitu destičky A.

Bylo provedeno 50 řezů podél břitu destičky pomocí přístroje Alicona, ze kterých byly stanoveny výsledné rozměry geometrie břitu. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce, která tvoří přílohu této práce.



Obr. 2.15 Geometrie břitu destičky A.

Vyhodnocení tvaru vzniklých třísek

Jak už bylo popsáno, třísky byly odebrány vždy bezprostředně po ZN. Třísky byly nafoceny na mikroskopu ZEISS 2000-C při pětinasobném zvětšení. V tabulce 2.12 jsou zobrazeny vzniklé třísky po prvním ZN.

Vzniklá tříška vykazuje ve všech případech článkovitý tvar. Tento tvar je zapříčiněn vysokou tvrdostí materiálu obrobku, který snižuje jeho tepelnou vodivost. Zároveň tvorba této třísky je podpořena relativně nízkou řeznou rychlostí a velkým záporným úhlem čela. Tento tvar třísky způsobuje kolísání okamžitých složek sil celkové síly, které způsobuje vysoko cyklické únavové namáhání břitu. Je možné říci, že tvar třísky se podepsal na vzniklém opotřebení. Charakteristický tvar třísky ve tvaru boty nebyl na žádném obrázku nalezen. Důvodem může být, že obráběný materiál je velmi tvrdý a tento druh třísky se vyskytuje u obrábění houževnatých materiálů v podmínkách přerušovaného řezu.

Tab. 2.12 Vzniklé třísky po prvním záběru nástroje pro každou VBD.



Destička A



Destička B



Destička C



Destička D



Destička E

4.8 Testování řezných destiček – druhá série

Druhy testovaných VBD

Ve druhé sérii byl použit jeden a ten samý druh řezné keramiky (viz tabulka 2.13). Tyto destičky jsou určeny pro obrábění kaleného materiálu.

Tab. 2.13 Druh testované břitové destičky z řezné keramiky.

Druh VBD:	Počet břitů na jedné VBD	Poloměr zaoblení špičky [mm]	Druh povlaku
F	4	1,2	TiN

Řezné podmínky

Ve druhé sérii byla u řezné keramiky postupně zvyšována řezná rychlost. Šířka záběru ostří společně s posuvem zůstaly nezměněny oproti první sérii (viz tabulka 2.14).

Tab. 2.14 Použité řezné podmínky ve druhé sérii.

Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na otáčku f [mm]	Šířka záběru ostří a_p [mm]
100	0,1	0,1
150	0,1	0,1
200	0,1	0,1

Popis experimentu

Experiment probíhal velmi podobně jako v první sérii. Upnutí první destičky z řezné keramiky bylo popsáno v kapitole 2.2. Po provedení testu na první destičce byla tato destička vyměněna za novou. Došlo k navýšení řezné rychlosti ze 100 m/min na 150 m/min. Po ukončení testu na druhé destičce byla testována třetí destička a opět došlo k navýšení řezné rychlosti už na 200 m/min.

4.8.1 Vyhodnocení dosažených výsledků ve druhé sérii

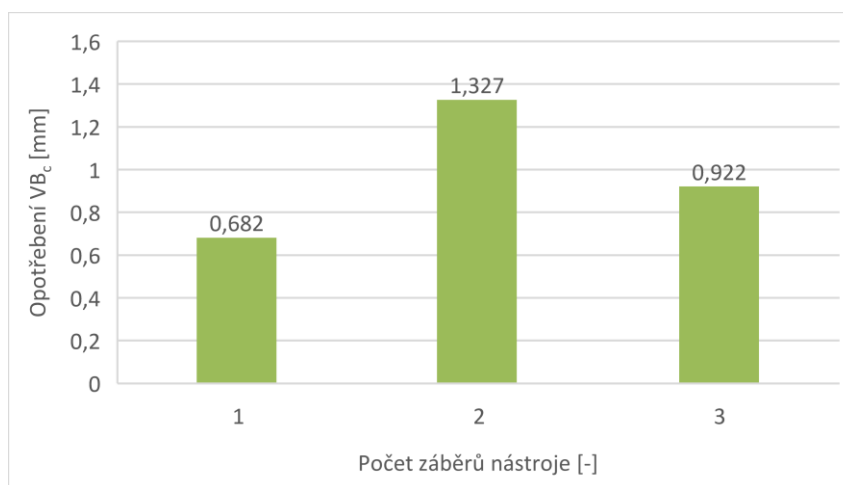
Jednotlivé hodnoty VB_c byly postupně měřeny a zapisovány do tabulky 2.15.

Tab. 2.15 Naměřené hodnoty VB_c pro jednotlivé řezné rychlosti.

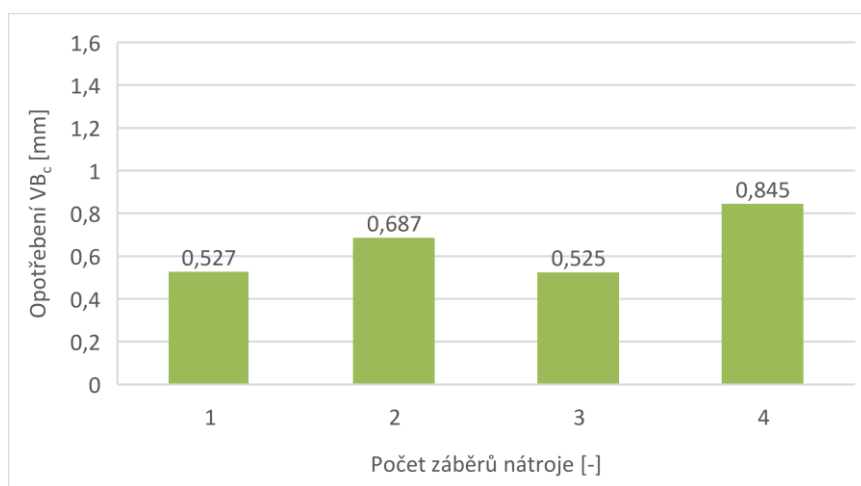
v_c [m/min]	VB_c , 1. ZN [mm]	VB_c , 2. ZN [mm]	VB_c , 3. ZN [mm]	VB_c , 4. ZN [mm]
100	0,682	1,327	0,922	–
150	0,527	0,687	0,525	0,945
200	0,189	0,529	0,462	0,418

Na obrázcích 2.16 až 2.18 je vidět opotřebení jednotlivých destiček, které bylo dosaženo po příslušném ZN.

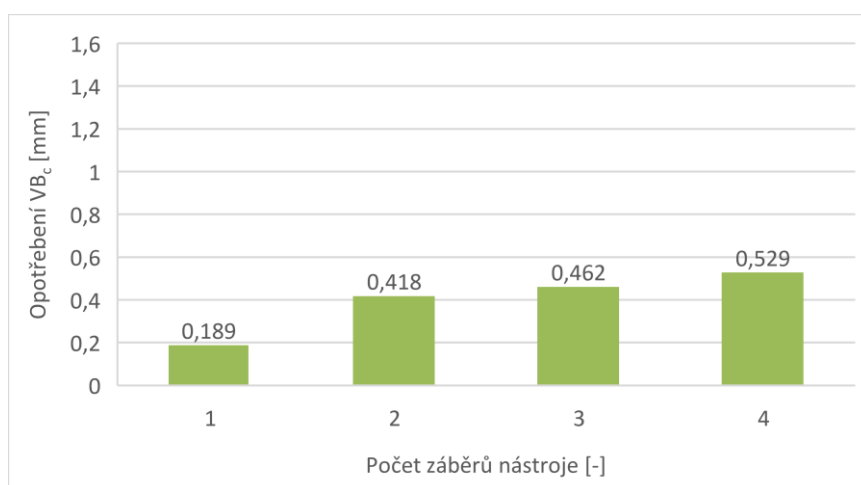
Na obr. 2.16 je vidět, že opotřebení je opět nestabilní a nepředvídatelné. Lze tak usoudit z průběhu opotřebení, které vykazuje větší opotřebení po dvou než po třech ZN. Pokud došlo ke zvýšení řezné rychlosti na 150 m/min (viz obr. 2.17), nevykazuje opotřebení už takové skokové změny. Při navýšení řezné rychlosti na 200 m/min (viz obr. 2.18) je už vidět relativně plynulý nárůst opotřebení. Tato skutečnost je způsobena zvyšující se řeznou rychlostí, se kterou se zároveň zvyšují procesní teploty. Nárůst procesních teplot způsobuje odpevnění materiálu obrobku, které zlepšuje jeho obrobiteľnosť.



Obr. 2.16 Zobrazené opotřebení destičky F pro daný ZN při $v_c = 100$ [m/min].



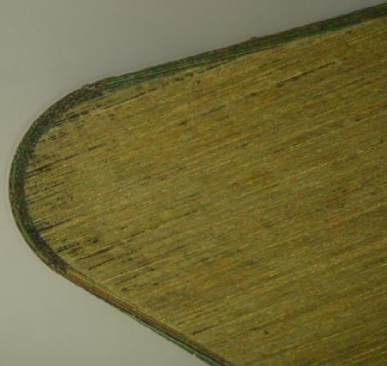
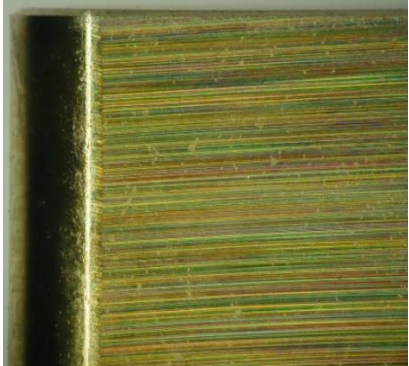

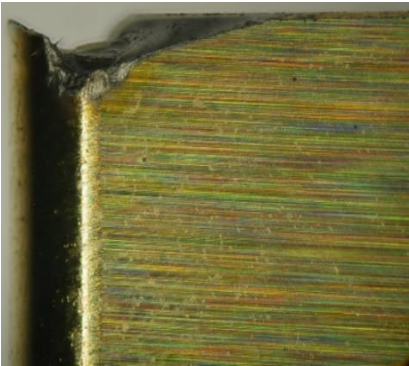
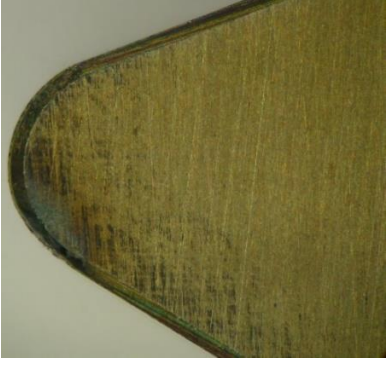
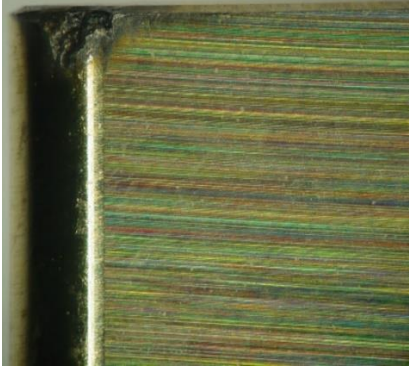
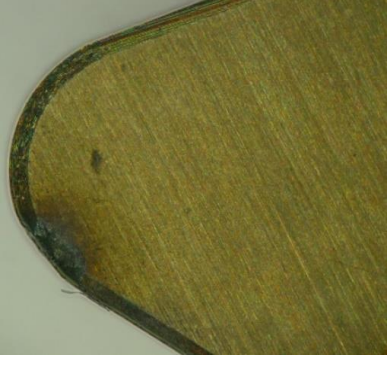
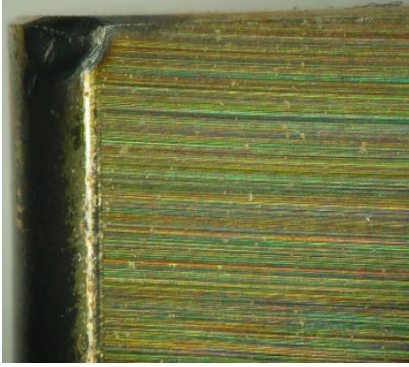
Obr. 2.17 Zobrazené opotřebení destičky F pro daný ZN při $v_c = 150$ [m/min].



Obr. 2.18 Zobrazené opotřebení destičky F pro daný ZN při $v_c = 200$ [m/min].

Vzniklé opotřebení, na čele a na hřbetě nástroje po třetím respektive čtvrtém ZN, bylo nasnímáno na mikroskopu ZEISS 2000-C při pětinasobném zvětšení viz tab. 2.16.

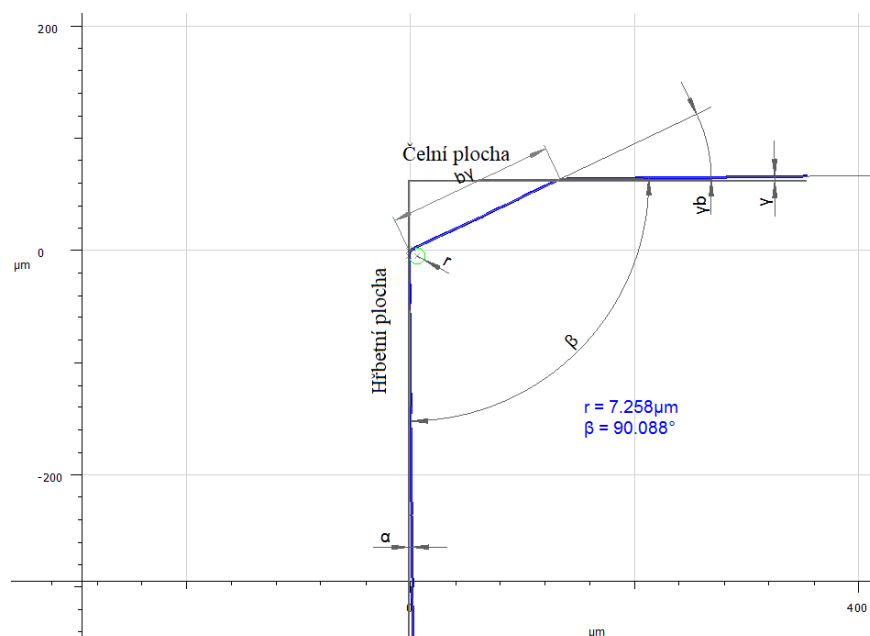
Tab. 2.16 Vzniklé opotřebení na čele a hřbetě nástroje.

	Čelo nástroje	Hřbet nástroje
Nová		
V_c 100 [m/min], 3. ZN		
V_c 150 [m/min], 4. ZN		
V_c 200 [m/min], 4. ZN		

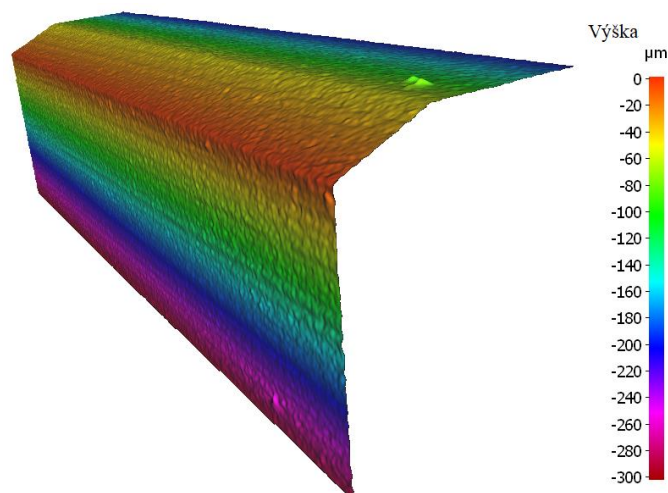
Pokud byla řezná rychlost 100 m/min nastal lom břitu jak po dvou, tak i po třech ZN. Lom břitu mohl být příčinou mechanických rázů, které vznikají v důsledku přerušovaného povrchu obrobku. Navýšení teploty v místě řezu vlivem vyšší řezné rychlosti (150 m/min respektive 200 m/min) nepřineslo tvorbu teplotních trhlin. V případě, kdy byla řezná rychlost 200 m/min, vykazuje hřbetní opotřebení relativně plynulý a předvídatelný průběh. Opotřebení destičky je v těchto případech převážně na hřbetní ploše nástroje, zatímco čelní plocha nástroje vykazuje minimální opotřebení.

Měření geometrie břitu

U destičky z řezné keramiky byla stejně jako u KNB měřena geometrie břitu. Na obrázku 2.19 respektive 2.20 je zobrazena geometrie břitu. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce, která tvoří přílohu této práce.



Obr. 2.19 Měření geometrie břitu destičky z řezné keramiky.



Obr. 2.20 Geometrie břitu destičky z řezné keramiky.

Vyhodnocení tvaru vzniklých třísek

I zde byly třísky odebírány vždy bezprostředně po ZN. V tabulce 2.17 jsou zobrazeny vzniklé třísky po prvním ZN. Tabulka 2.18 ukazuje tvary vzniklých třísek po jednotlivých ZN při řezné rychlosti 200 m/min.

Tab. 2.17 Vzniklé třísky po prvním záběru nástroje pro každou řeznou rychlost.

$V_c = 100 \text{ m/min}$	
$V_c = 150 \text{ m/min}$	
$V_c = 200 \text{ m/min}$	

Na všech obrázcích (viz tab. 2.17) vykazuje tříska opět článkovitý tvar, který vznikl vlivem nízké tepelné vodivosti materiálu obrobku, velkého záporného úhlu čela a relativně malé řezné rychlosti. Pokud se řezná rychlost zvýšila ze 100 m/min na 150 m/min je článkovitost třísky více patrná

Tab. 2.18 Jednotlivé tvary vzniklých třísek při řezné rychlosti 200 m/min.



Po jednom záběru nástroje je tříska článkovitá dělená. Se zvětšujícím se opotřebením přechází tvar třísky na plynulý smotaný. Třísky mají po jednom ZN tmavou barvu, což značí vysoké teploty, a tudíž že velké množství tepla bylo přeneseno do třísky. Se zvětšujícím se hřbetním opotřebením je vidět, že tříska má světlejší barvu znamenající menší množství tepla odvedeného třískou a více nástrojem a obrobkem.

ZÁVĚR

Při čelním soustružení nástrojové oceli 1.2379 (ČSN 41 9573) s tvrdostí 60 - 62 HRC pomocí KNB a řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu byly zjištěny tyto závěry.

Shrnutí dosažených výsledků v první sérii:

- nevznikly žádné teplotní trhliny na čele ani hřbetě destičky,
- destičky mající poloměr zaoblení špičky 1,2 mm nevykazují lom břitu v takové míře jako destičky mající poloměr zaoblení špičky 0,4 a 0,8 mm,
- destičky byly opotřebené převážně na hřbetní ploše, zatímco čelní plocha nevykazovala žádné výrazné opotřebení,
- opotřebení, které vykazují VBD z KNB, bylo dosaženo při řezné rychlosti 100 m/min, 65 sekundách řezání a obdržení 1149 rázů,
- vzniklá tříška vykazovala ve všech případech článkovitý tvar.

Shrnutí dosažených výsledků ve druhé sérii:

- ani ve druhé sérii nevznikly žádné teplotní trhliny na čele a hřbetě nástroje,
- k lomu břitu došlo pouze pokud byla řezná rychlost 100 m/min, zde řezný čas činil 65 sekund a počet rázů byl 1149,
- opotřebení na VBD z řezné keramiky při řezných rychlostech 150 m/min a 200 m/min bylo dosaženo po 86,6 sekundách řezání a 1532 rázech,
- se zvyšující se řeznou rychlostí vykazují destičky menší hřbetní opotřebení,
- se zvyšující se řeznou rychlostí má hřbetní opotřebení pravidelnější a předvídatelnější průběh,
- vzniklá tříška vykazovala při všech řezných rychlostech článkovitý tvar,
- větší hřbetní opotřebení vede k tvorbě světlejší a nedělené třísky.

Porovnání řezivosti KNB a řezné keramiky při řezné rychlosti 100 m/min:

- pro poloměr zaoblení špičky 1,2 mm vykazuje KNB stabilnější průběh opotřebení než řezná keramika,
- KNB mající poloměr zaoblení špičky 1,2 mm nevykazoval lom břitu v takové míře jako řezná keramika se stejným poloměrem,
- vzniklé třísky u KBN a řezné keramiky mají podobnou barvu i délku a vykazují článkovitý tvar.

Z dosažených výsledků vyplývá, že vhodnějším řezným materiálem pro obrábění této oceli při řezné rychlosti 100 m/min je KNB než řezná keramika. Je však důležité dodat, že cena KNB je mnohem vyšší než cena řezné keramiky. Lze však pro obrábění této oceli doporučit používání vyšších řezných rychlostí než 100 m/min.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CUI, X., J. ZHAO, Y. ZHOU a Z. PEI. Cutting Forces and Tool Wear in Intermittent Turning Processes with Alsub2/subOsub3/sub-Based Ceramic Tools. *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2012, **499**, 205-210 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.499.205. ISSN 1013-9826. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/KEM.499.205>
- [2] WANG, F., J. ZHAO, Z. LI a A. LI. Coated carbide tool failure analysis in high-speed intermittent cutting process based on finite element method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer London, 2016, **83**(5), 805-813 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1007/s00170-015-7632-y. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s00170-015-7632-y>
- [3] YAMAGUCHI, K., T. FUJITA, Y. KONDO, S. SAKAMOTO, M. YAMAGUCHI a K. UEHARA. Effects of Cooling Conditions on Thermal Crack Initiation of Brittle Cutting Tools during Intermittent Cutting. *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2015, **656**, 237-242 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.656-657.237. ISSN 1662-9795. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/KEM.656-657.237>
- [4] VENTURA, C.E.H., J. KÖHLER a B. DENKENA. Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. Elsevier Ltd, 2015, **19**, 129-134 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.06.010. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1526612515000559>
- [5] SAYIT, E., K. ASLANTAS a A. ÇIÇEK. Tool Wear Mechanism in Interrupted Cutting Conditions. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. Taylor & Francis Group, 2009, **24**(4), 476-483 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1080/10426910802714423. ISSN 1042-6914. Dostupné z: <https://www-tandfonline-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/abs/10.1080/10426910802714423>
- [6] DINIZ, A., D. GOMES a A. BRAGHINI. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2005, **159**(2), 240-248 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.05.011. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013604008027>
- [7] DINIZ, A. a A. DE OLIVEIRA. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2007, **195**(1-3), 275-281 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.022. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013607005249>
- [8] KOUNTANYA, R. Cutting tool temperatures in interrupted cutting—The effect of feed-direction modulation. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. Elsevier Ltd, 2008, **10**(2), 47-55 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2009.04.001. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1526612509000218>
- [9] OLIVEIRA, A., A. DINIZ a D. URSOLINO. Hard turning in continuous and

- interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2009, **209**(12), 5262-5270 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.03.012. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013609001022>
- [10] DE GODOY, V. a A. DINIZ. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2011, **211**(6), 1014-1025 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.01.002. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013611000057>
- [11] CAROU, D., E.M. RUBIO a J.P. DAVIM. *Discontinuous cutting: failure mechanisms, tool materials and temperature - a review* [online]. 2013, , 15 [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_23814/02_23814_carou.pdf
- [12] DERRICK, E. Interrupted Turning. *Canadian Industrial Machinery* [online]. 2009 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/article/management/interrupted-turning>
- [13] BENES, J. *Overcoming the Interrupted-Cut Blues* [online]. 2009 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://www.americanmachinist.com/cutting-tools/overcoming-interrupted-cut-blues>
- [14] Hrubovací soustružení nástroji s VBD. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, , 51 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hrubovaci-soustruzeni-nastroji-s-vbd.html>
- [15] *Greenleaf: metalcutting tools and systems* [online]. 2016 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: http://www.greenleafcorporation.com/Greenleaf_Imperial.pdf
- [16] SUBBIAH, S., T. NEWTON a S. N. MELKOTE. Tool Life and White Layer Formation in Interrupted Hard Turning With Binderless cBN Tool. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME* [online]. 2006 [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/27529189_Tool_Life_and_White_Layer_Formation_in_Interrupted_Hard_Turning_With_Binderless_cBN_Tool
- [17] HUMÁR, A. *MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2006 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
- [18] *Sandvik Coromant: Jak při soustružení dosáhnout dobré kvality součástí* [online]. b.r. [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning.aspx?Country=cz&fbclid=IwAR0NLZo3mVAZsO1qf9yHaME24xOTSWVc_sUG2TzfRchD7PNZr1YdaYasnda
- [19] BOL'SHAKOV, A. The Theory of Discontinuous Cutting. *Russian Engineering Research* [online]. Moscow: Pleiades Publishing, 2018, **38**(5), 358-359 [cit. 2019-02-18]. DOI: 10.3103/S1068798X18050040. ISSN 1068-798X. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/content/pdf/10.3103%2FS1068798X18050040.pdf>
- [20] VOS DE, P a Jan-Eric STÅHL. SECO TOOLS AB. *Obrábění kovů: teorie v praxi*.

- Lund: Fagersta: Division of Production and Materials Engineering, Lund University ; Seco Tools AB, 2014, 184 s : barevné ilustrace, fotografie.
- [21] STÅHL, Jan-Eric. *Metal cutting: theories and models*. Lund: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2012, iii, 580 stran : barevné ilustrace. ISBN 978-91-637-1336-1.
- [22] TLUSTÝ, J. *Manufacturing processes and equipment*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000, xxviii, 928 s. : il. ISBN 0-201-49865-0.
- [23] SEDLÁK, J. *Fyzikální základy procesu řezání, tvorba třísky, tvorba povrchů: Technologie obrábění – DTB, Ústav strojírenské technologie*. Brno, b.r. Prezentace z přednášky.
- [24] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
- [25] ČEP, R. a J. PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění* [online]. První. VŠB – TUO: Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011 [cit. 2019-03-29]. ISBN 978 – 80 – 248 – 2533 – 5. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrazeni.pdf
- [26] VOS DE, P. Příručka pro technology - Jak rozpoznat správné utváření třísek?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, , 80 [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-rozpoznat-spravne-utvareni-trisek.html>
- [27] DE VOS, P., J.-E. STÅHL, K. DUFKOVÁ, M. PÍŠKA a M. SLANÝ. *Opotřebení rezných nástrojů: praktické zkušenosti*. Fagersta: Seco Tools AB, 2014, 168 stran : barevné ilustrace, fotografie.
- [28] TUNGALOY, Member. *Katalog nástrojů*. Brno, 2017.
- [29] BENEŠ, P., A. KRÍŽ a J. MARTAN. *VLIV TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV NA TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH TĚŽKO OBRÁBĚLNÝCH OCELÍ* [online]. Plzeň, 2009 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16409/1/Benes.pdf>
- [30] KUDELA, M. SANDVIK COROMANT (FIRMA). *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. české vyd. Praha: Scientia, 1997, 1 sv. (různé stránkování) : il. ISBN 91-972299-4-6.
- [31] TICHÝ, V. *Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=83685. Diplomová práce.
- [32] GRZESIK, W. *ADVANCED MACHINING PROCESSES OF METALLIC MATERIALS* [online]. Second Edition. Amsterdam: Elsevier B.V., 2017 [cit. 2019-04-05]. ISBN 978-0-444-63711-6. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=G3Z_CwAAQBAJ&pg=PA116&lpg=PA116&q=segmented+chips&source=bl&ots=XUA8uPuxHa&sig=ACfU3U07saTFMcjWt443eQoOLjNaM6todQ&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjKt8ftJ_hAhUmMuwKHYXOCUUQ6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=segmented%20chips&f=true
- [33] SUI, S. a P. FENG. Investigation of serrated chip morphology change regular in the burning of titanium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing*

- Technology* [online]. London: Springer London, 2016, **87**(9), 2665-2671 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.1007/s00170-016-8662-9. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/content/pdf/10.1007%2Fs00170-016-8662-9.pdf>
- [34] HK STEEL TRADING, . *Tabulky norem* [online]. b.r. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <http://www.hk-trading.cz/tabulky-norem.php>
- [35] DUAN, Ch., L. ZHANG, H. LI a M. WANG. Ductile Fracture due to Adiabatic Shear during the Serrated Chip Formation in High Speed Cutting: a Microscopic Investigation. *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2011, **467**(1), 181-185 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.467-469.181. ISSN 1013-9826. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/KEM.467-469.181.pdf>
- [36] LI, G., B. YAN a Y. CAI. Experiment Study of Chip Formation and Cutting Force of Hardened AISI 1045 Steel in High Speed Machining. *Advanced Materials Research* [online]. Trans Tech Publications, 2012, **383**, 1915-1920 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.1915. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMR.383-390.1915.pdf>
- [37] BÄKER, M., J. RÖSLER a C. SIEMERS. The influence of thermal conductivity on segmented chip formation. *Computational Materials Science* [online]. Elsevier B.V, 2003, **26**, 175-182 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.1016/S0927-0256(02)00396-8. ISSN 0927-0256. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025602003968>
- [38] WU, H. a S. TO. Serrated chip formation and their adiabatic analysis by using the constitutive model of titanium alloy in high speed cutting. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. Elsevier B.V, 2015, **629**, 368-373 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.12.230. ISSN 0925-8388. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280036529_Serrated_chip_formation_and_their_adiabatic_analysis_by_using_the_constitutive_model_of_titanium_alloy_in_high_speed_cutting
- [39] HUMÁR, A. *Technologie obrábění – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003 [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [40] VOS DE, P. Příručka pro technology - Opotřebenění se nevyhneme!. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, , 56 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [41] *Příručka obrábění* [online]. DORMER PRAMET, 2004 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: http://stachura.cz/novy/data/prirucka_obrabeni_pramet.pdf
- [42] ELUC, . *Opotřebenění nástroje* [online]. b.r. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1203>
- [43] *Sandvik Coromant: Opotřebenění břitu* [online]. b.r. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>
- [44] ALTAN, E., A. UYSAL, Ş. ANAÇ a S. ÖZTÜRK. Effect of work hardening of

- cobalt in sintered carbide cutting tool on tool failure during interrupted cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer London, 2017, **88**(1), 359-367 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1007/s00170-016-8765-3. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s00170-016-8765-3>
- [45] DMG MORI, . *Installation manual*. 2013.
- [46] BOGNER EDELSTAHL, . [online]. b.r. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: http://www.bogner.cz/13-nastrojova-ocel.html?podskupina=Ty%C4%8De+ploch%C3%A9&rozmer_a=&rozmer_b=30&delka=&jakost=&din=&csn=19573&tepelne_zpracovani=&norma=
- [47] *NÁSTROJOVÉ OCELI* [online]. b.r. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/pro-prace-za-studena/w-nr-12379/>
- [48] *Zušlechťování* [online]. b.r. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <http://www.kalirna.cz/cz/sluzby/item/75-zuslechtovani.html>
- [49] HUMÁR, A. *Výpočtová cvičení: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_vypoctova_cv.pdf
- [50] DOBROZEMSKÝ, R. *Testy keramických řezných nástrojů TaeguTec na materiálu 13MoCrV6 na simulátoru přerušovaného řezu* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/88337>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [51] *Soustružení* [online]. b.r. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: https://www.spszenegrova.cz/texty/texty/STT/STT2-9_soustruzeni_RAJ.pdf
- [52] WAN, L., D. WANG a Y. GAO. The investigation of mechanism of serrated chip formation under different cutting speeds. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer London, 2016, **82**(5), 951-959 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.1007/s00170-015-7409-3. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/content/pdf/10.1007%2Fs00170-015-7409-3.pdf>
- [53] MA, W. Investigation of formation mechanisms of chips in orthogonal cutting process. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2012, **26**, [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.1051/epjconf/20122604008. ISBN 9782759807574. ISSN 21016275. Dostupné z: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2012/08/epjconf_dymat2012_04008.pdf
- [54] DOBROZEMSKÝ, R. *Experimentální hodnocení stavu ostří nástrojů z nitridické keramiky při nepravidelném přerušovaném řezu* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/99476>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [55] SOPUCH, M. *Experimentální hodnocení stavu ostří při nepravidelném přerušovaném řezu* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/93629>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [56] KYNCL, L. *Testy keramických řezných nástrojů Greenleaf na materiálu C45 na simulátoru přerušovaného řezu* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2019-04-15]. Dostupné

z: <http://hdl.handle.net/10084/88302>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

- [57] KOCIFAJOVÁ, S. *Testy keramických řezných nástrojů Tungaloy na materiálu 13MoCrV6 na simulátoru přerušovaného řezu* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/88309>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [58] MALOTOVÁ, Š. *Vliv technologických parametrů na povrchová napětí při obrábění na simulátoru přerušovaného řezu* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/109417>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
HRC	tvrdost dle Rockwella
KNB	kubický nitrid bóru
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>
VBD	vyměnitelná břitová destička
ZN	záběr nástroje

Symbol	Jednotka	Popis
Ecq	[μm]	<i>form deviation of circle (RMS)</i>
K	[–]	<i>symmetry of cutting edge</i>
Ls	[mm]	dráha nástroje (spirála se stoupáním f)
R, R ₁₋₆	[–]	počet rázů nástroje
S	[mm ²]	velikost obrobené plochy
S α	[μm]	<i>dist. apex to end of clearance roundness</i>
S γ	[μm]	<i>dist. apex to end of rake roundness</i>
VB _c	[mm]	nepravidelné opotřebení na hřbetě
W Δ r	[μm]	<i>edge width</i>
a _p	[mm]	šířka záběru ostří
b γ	[μm]	<i>true negative bevel length w.r.t. tangent-line crossing</i>
f	[mm]	posuv na otáčku
i	[–]	počet průjezdů nástroje
l _r	[mm]	šířka podoblasti
n	[mm]	počet nespojitostí
r _n	[μm]	poloměr ostří
t _{AS,v}	[s]	jednotkový strojní čas po jednom záběru nástroje
v _c	[m/min]	řezný rychlost
α_0	[°]	nástrojový ortogonální úhel hřbetu
β_0	[°]	nástrojový ortogonální úhel břitu
γ_b	[°]	<i>angle of negative bevel</i>
γ_0	[°]	nástrojový ortogonální úhel čela
Δ r	[μm]	<i>min. dist. of edge to apex</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Tabulka naměřených hodnot při měření geometrie břitu KNB.

Příloha 2 Tabulka naměřených hodnot při měření geometrie břitu řezné keramiky.

PŘÍLOHA 1

Tabulka naměřených hodnot při měření geometrie břitu KNB.

Řez č.	r_n [μm]	β_0 [°]	$S\alpha$ [μm]	$S\gamma$ [μm]	K [-]	Δr [μm]	$W\Delta r$ [μm]	Ecq [μm]
1:	46.550	124.111	20.642	26.313	1.275	6.716	24.150	0.426
2:	23.281	124.645	14.044	12.471	0.888	2.904	11.282	0.172
3:	33.734	124.933	16.419	18.627	1.134	4.133	16.210	0.183
4:	34.194	124.925	20.027	14.749	0.736	4.839	17.580	0.417
5:	20.632	125.198	10.473	12.951	1.237	2.448	9.766	0.083
6:	23.100	125.253	9.646	18.281	1.895	3.032	11.466	0.297
7:	26.889	124.831	12.520	16.933	1.353	3.272	12.879	0.232
8:	24.712	125.322	15.051	12.214	0.812	3.018	11.856	0.127
9:	24.182	124.436	11.931	15.487	1.298	2.905	11.512	0.111
10:	33.018	124.764	16.641	17.220	1.035	4.409	16.520	0.578
11:	37.169	124.570	19.546	19.581	1.002	4.774	18.261	0.372
12:	23.643	124.864	13.000	16.593	1.276	2.781	11.145	0.169
13:	22.021	124.940	10.616	12.165	1.146	2.787	10.745	0.258
14:	29.796	124.970	16.358	14.895	0.911	3.736	14.473	0.271
15:	28.779	124.835	14.050	16.625	1.183	3.740	14.218	0.355
16:	25.724	125.003	11.150	15.114	1.356	3.447	12.892	0.301
17:	33.658	124.406	15.875	21.651	1.364	4.457	16.776	0.577
18:	28.068	124.927	16.461	13.959	0.848	3.597	13.775	0.324
19:	31.408	124.295	14.768	19.662	1.331	4.156	15.647	0.238
20:	29.899	124.968	14.460	17.455	1.207	3.826	14.664	0.299
21:	30.406	124.386	13.782	21.738	1.577	3.961	15.038	0.333
22:	26.965	125.043	14.812	13.411	0.905	3.335	13.015	0.451
23:	15.201	125.165	8.928	8.284	0.928	1.658	6.914	0.067
24:	34.966	124.691	21.019	16.747	0.797	4.657	17.473	0.365
25:	16.580	124.051	9.187	8.286	0.902	2.001	7.911	0.129
26:	30.434	124.618	12.825	24.183	1.886	3.794	14.744	0.258
27:	26.983	123.961	10.822	27.139	2.508	3.331	13.013	0.665
28:	29.547	124.497	16.635	14.565	0.876	3.598	14.157	0.292
29:	21.742	125.033	12.617	11.716	0.929	2.606	10.340	0.100
30:	30.280	124.913	13.768	17.880	1.299	3.868	14.838	0.278
31:	24.990	124.957	11.567	18.372	1.588	2.977	11.850	0.135
32:	29.698	124.991	12.303	18.465	1.501	3.806	14.575	0.357
33:	35.188	125.405	17.749	18.135	1.022	4.659	17.536	0.293
34:	34.701	125.073	17.423	18.594	1.067	4.588	17.282	0.225
35:	26.220	125.361	12.112	17.825	1.472	3.282	12.726	0.324
36:	30.696	125.122	14.371	16.669	1.160	3.908	15.019	0.258
37:	14.434	124.999	5.916	13.199	2.231	1.535	6.486	0.102
38:	15.981	124.747	12.114	7.861	0.649	1.766	7.314	0.058
39:	32.713	124.856	16.122	17.842	1.107	4.502	16.600	0.553
40:	23.860	125.024	20.546	10.328	0.503	3.012	11.628	0.363

41:	20.825	90.964	11.306	10.209	0.903	2.524	9.956	0.092
42:	23.890	124.546	15.822	11.589	0.732	3.179	11.933	0.364
43:	31.281	124.526	25.866	14.189	0.549	4.309	15.881	0.732
44:	24.819	124.202	13.503	13.500	1.000	3.059	11.960	0.124
45:	27.366	124.505	12.807	17.275	1.349	3.502	13.421	0.280
46:	25.326	125.312	9.869	24.970	2.530	3.202	12.351	0.453
47:	24.425	124.416	11.232	14.311	1.274	2.887	11.539	0.227
48:	30.892	124.575	15.643	16.692	1.067	3.943	15.132	0.253
49:	16.660	124.257	7.209	13.063	1.812	1.922	7.782	0.099
50:	24.943	124.523	12.731	13.712	1.077	3.226	12.294	0.258

Název	Hodnota	Jednotka	Popis
r_n	27.959	[μm]	Mean radius of mean edge
β_o	124.884	[$^\circ$]	Wedge angle
$S\alpha$	13.582	[μm]	Dist. apex to end of clearance roundness
$S\gamma$	16.113	[μm]	Dist. apex to end of rake roundness
K	1.186		Symmetry of cutting edge
Δr	3.515	[μm]	Min. dist. of edge to apex
$W\Delta r$	13.599	[μm]	Edge width
Ecq	0.128	[μm]	Form deviation of circle (RMS)

PŘÍLOHA 2

Tabulka naměřených hodnot při měření geometrie břitu řezné keramiky.

Řez č.	r_n [μm]	b_y [μm]	γ_b [°]	α_o [°]	β_o [°]	γ_o [°]	$S\alpha$ [μm]	S_y [μm]	K [-]	Δr [μm]	$W\Delta r$ [μm]	Ecq [μm]
1:	8.563	148.865	25.319	0.536	90.090	-0.626	3.827	8.253	2.156	1.645	5.070	0.047
2:	8.418	148.928	25.312	0.535	90.093	-0.628	3.829	9.676	2.527	1.613	4.977	0.051
3:	8.441	149.122	25.296	0.538	90.087	-0.625	3.582	8.503	2.374	1.629	5.007	0.073
4:	7.369	149.234	25.271	0.543	90.087	-0.630	2.978	8.203	2.754	1.417	4.366	0.042
5:	7.262	149.288	25.273	0.535	90.099	-0.635	2.670	10.080	3.776	1.403	4.310	0.046
6:	6.802	149.359	25.296	0.538	90.097	-0.635	2.449	10.151	4.144	1.313	4.036	0.045
7:	6.513	149.473	25.304	0.547	90.089	-0.636	2.511	10.161	4.046	1.250	3.854	0.046
8:	6.928	149.578	25.286	0.548	90.095	-0.643	3.344	6.840	2.045	1.323	4.091	0.047
9:	7.277	149.555	25.313	0.547	90.099	-0.646	3.476	6.799	1.956	1.388	4.295	0.049
10:	7.241	149.507	25.322	0.536	90.111	-0.648	3.570	6.794	1.903	1.374	4.264	0.044
11:	7.284	149.442	25.372	0.541	90.095	-0.636	3.576	6.771	1.894	1.385	4.293	0.042
12:	7.637	149.376	25.397	0.540	90.086	-0.626	3.674	6.786	1.847	1.461	4.514	0.047
13:	7.563	149.325	25.422	0.540	90.084	-0.625	3.833	6.777	1.768	1.440	4.460	0.047
14:	8.171	149.330	25.404	0.536	90.085	-0.621	4.066	6.669	1.640	1.567	4.835	0.051
15:	8.113	149.332	25.391	0.538	90.094	-0.632	4.141	6.551	1.582	1.552	4.795	0.044
16:	7.960	149.295	25.374	0.533	90.105	-0.637	4.071	6.577	1.616	1.521	4.701	0.043
17:	7.580	149.265	25.399	0.539	90.101	-0.640	3.992	6.576	1.647	1.446	4.474	0.033
18:	7.615	149.283	25.392	0.537	90.098	-0.635	3.760	7.098	1.888	1.457	4.500	0.038
19:	7.300	149.401	25.376	0.539	90.087	-0.626	3.770	6.840	1.814	1.390	4.304	0.029
20:	7.281	149.529	25.346	0.537	90.089	-0.626	3.754	6.642	1.770	1.382	4.287	0.032
21:	7.064	149.644	25.327	0.537	90.078	-0.615	3.624	6.591	1.819	1.330	4.144	0.035
22:	7.266	149.707	25.327	0.540	90.063	-0.603	3.545	6.109	1.723	1.366	4.259	0.038
23:	7.270	149.660	25.374	0.543	90.061	-0.604	3.526	6.094	1.728	1.361	4.254	0.045
24:	7.189	149.696	25.387	0.542	90.053	-0.595	3.538	6.101	1.725	1.338	4.195	0.041
25:	7.529	149.776	25.414	0.543	90.049	-0.592	3.559	6.114	1.718	1.403	4.395	0.041
26:	7.997	149.846	25.410	0.540	90.042	-0.582	3.581	7.358	2.055	1.493	4.674	0.046
27:	8.047	149.877	25.414	0.542	90.030	-0.572	3.613	8.796	2.435	1.498	4.696	0.043
28:	7.947	149.804	25.409	0.536	90.040	-0.576	3.463	9.406	2.716	1.486	4.647	0.048
29:	7.906	149.741	25.422	0.535	90.046	-0.580	3.409	9.612	2.820	1.487	4.636	0.047
30:	7.779	149.695	25.441	0.531	90.065	-0.596	3.272	8.884	2.715	1.469	4.570	0.050
31:	7.374	149.670	25.431	0.528	90.078	-0.606	3.533	6.096	1.725	1.395	4.335	0.052
32:	7.298	149.652	25.410	0.527	90.081	-0.609	3.372	7.850	2.328	1.383	4.294	0.053
33:	6.883	149.596	25.430	0.531	90.079	-0.610	3.208	6.295	1.962	1.308	4.055	0.046
34:	6.687	149.628	25.416	0.535	90.078	-0.613	3.196	6.022	1.884	1.272	3.942	0.045
35:	6.697	149.699	25.421	0.536	90.065	-0.600	3.056	5.882	1.925	1.277	3.951	0.049
36:	6.458	149.722	25.433	0.537	90.081	-0.618	3.196	5.385	1.685	1.231	3.810	0.043
37:	7.175	149.575	25.458	0.542	90.128	-0.670	3.225	5.861	1.817	1.377	4.246	0.053
38:	7.246	149.835	25.447	0.549	90.102	-0.651	3.660	5.177	1.415	1.386	4.282	0.050
39:	7.267	149.775	25.448	0.556	90.124	-0.680	4.086	5.610	1.373	1.386	4.288	0.032
40:	8.075	149.842	25.458	0.561	90.120	-0.682	5.356	4.208	0.786	1.550	4.779	0.027

41:	7.277	149.884	25.459	0.564	90.126	-0.690	5.323	4.048	0.760	1.388	4.295	0.014
42:	7.996	149.992	25.442	0.561	90.129	-0.690	5.166	4.365	0.845	1.538	4.736	0.022
43:	8.097	150.009	25.447	0.561	90.131	-0.691	4.676	5.483	1.172	1.565	4.808	0.025
44:	7.252	150.022	25.480	0.564	90.125	-0.689	4.299	5.416	1.260	1.393	4.293	0.029
45:	7.376	150.065	25.472	0.564	90.114	-0.679	3.556	5.784	1.626	1.427	4.382	0.037
46:	6.896	150.245	25.464	0.566	90.094	-0.660	3.267	5.670	1.735	1.333	4.094	0.037
47:	5.844	150.317	25.449	0.559	90.087	-0.646	2.834	5.702	2.012	1.122	3.459	0.037
48:	5.665	150.426	25.418	0.557	90.077	-0.634	2.445	5.700	2.331	1.090	3.356	0.041
49:	5.337	150.434	25.421	0.557	90.073	-0.630	2.191	5.770	2.633	1.028	3.164	0.039
50:	5.491	150.515	25.407	0.555	90.076	-0.632	2.359	5.861	2.485	1.054	3.250	0.051

Název	Hodnota	jednotka	Popis
r_n	7.258	[μm]	Mean radius of mean edge
b_y	149.642	[μm]	True negative bevel length w.r.t. tangent-line crossing
γ_b	25.399	[$^\circ$]	Angle of negative bevel
α_o	0.547	[$^\circ$]	Clearance angle
β_o	90.088	[$^\circ$]	Wedge angle
γ_o	-0.635	[$^\circ$]	Rake angle
S_α	3.532	[μm]	Dist. apex to end of clearance roundness
S_γ	6.092	[μm]	Dist. apex to end of rake roundness
K	1.725	[-]	Symmetry of cutting edge
Δr	1.377	[μm]	Min. dist. of edge to apex
$W\Delta r$	4.273	[μm]	Edge width
$E_{c\phi}$	0.041	[μm]	Form deviation of circle (RMS)