VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Vliv opotřebení na řezivost VBD při obrábění speciálních slitin

The Effects of Wear on the Cuttability of Exchangeable Cutting Inserts During Machining Special Alloys

Student: Bc. Tomáš Valla

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Zlámal

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Valla**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: Vliv opotřebení na řezivost VBD při obrábění speciálních slitin

The Effects of Wear on the Cuttability of Exchangeable Cutting Inserts During Machining Special Alloys

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Opotřebení VBD a jeho vliv na řezný proces.
3. Návrh metodiky experimentální činnosti.
4. Stanovení vlivu opotřební VBD při obrábění Alloy 625.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění.* Brno : Akademické nakladatelstvi CERM s.r.o. Brno. 2001, 270 s. ISBN 80–214–1996–2.
[2] VASILKO, K.; NOVÁK-MARCINČIN, J.; HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo.* Prešov : Datapress Prešov. 2003, 424 s. ISBN 80–7099–995–0.
[3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní.* 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978–80–8070–711–8.
[4] HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění.* Brno : CCB, s.r.o. Brno, 1995. 265 s. ISBN 80–85825–10–4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zlámal**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015

Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15.5.2015 .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem, byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15.5.2015

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Tomáš Valla

Adresa trvalého pobytu autora práce: Janová 254, Vsetín, 755 01

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Zlámalovi za jeho čas, trpělivost a ochotu poskytnout mi cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VALLA, T. *Vliv opotřebení na řezivost VBD při obrábění speciálních slitin.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 86 s.

Diplomová práce se zabývá vlivem opotřebení na řezivost vyměnitelných břitových destiček při soustružení materiálu Inconel 625. V teoretické části jsou zmíněny základní pojmy, které s problematikou souvisejí – od obrobitelnosti až po strukturu Ni superslistin. Celkem byly testovány dva druhy vyměnitelných břitových destiček z řezné keramiky a kubického nitridu bóru. Testování bylo prováděno při podélném soustružení na CNC soustruhu DMG Mori Seiki NLX 2500/700, kde se měnily řezné podmínky. V experimentální části jsou uvedeny naměřené výsledky vzniklého opotřebení, parametry drsnosti a řezivost nástroje. Na základě těchto údajů je provedeno vyhodnocení vyměnitelných břitových destiček a je určena vhodnější destička pro obrábění niklové slitiny Inconel 625.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VALLA, T. *The Effects of Wear on the Cuttability of Exchangeable Cutting Inserts During Machining Special Alloys.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2015, 86 p.

This master's thesis is dealing with the effect of wear on the cutting power of inserts for turning Inconel 625. In the theoretical part are mentioned basic concepts that are related to the issue - the machinability to the structure of Ni superslistin. Total were tested two types of inserts of cutting ceramics and cubic boron nitride. Testing was performed at longitudinal turning on a CNC lathe DMG Mori Seiki NLX 2500/700, which changed cutting conditions. In the experimental part are shown measurement results of the resulting wear, roughness parameters and cuttability tool. Based on these data is evaluated inserts and is intended more suitable insert for machining nickel alloys Inconel 625.

Obsah diplomové práce

Obsah

Obsah **7**

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK, SYMBOLŮ A ZKRATEK **10**

Úvod **12**

1. Technologie obrábění **13**

1.1 Obrobitelnost Ni slitin 13

1.2 Řezivost nástroje 15

2. Opotřebení řezných nástrojů **16**

2.1 Mechanismy opotřebení 16

2.2 Klasifikace typů opotřebení 17

2.3 Trvanlivost a životnost nástrojů 22

2.4 Kritéria opotřebení 25

2.5 Měření opotřebení 27

3. Nástrojové materiály **30**

3.1 Rychlořezné nástrojové oceli 31

3.2 Slinuté karbidy 31

3.3 Řezná keramika 32

3.3.1 Uplatnění řezné keramiky 32

3.3.2 Použití řezné keramiky 33

3.3.3 Rozdělení a značení řezné keramiky 34

3.3.4 Obrábění žáruvzdorných slitin 35

3.4 Kubický nitrid bóru 35

3.5 Diamant 37

4. Superslitiny **38**

4.1 Superslitiny na bázi Ni 38

4.2 Chemické složení Ni superslitin 38

4.3 Struktura Ni superslitin 39
4.4 Obrábění Ni superslitin 40
4.5 Materál Inconel....41
4.6 Analýza současného stavu obrábění niklových superslitin 42
4.7 Vlastnosti a použití....42
4.8 Doporučená geometrie nástroje pro soustružení 43
5. Hodnocení integrity obrobeného povrchu 44
5.1 Drsnost obráběného povrchu dle ISO 4287 44
5.1.1 Měření drsnosti povrchu....45
6. Experimentální část 47
6.1 Obráběcí stroj 47
6.2 Obráběný materiál 48
6.3 Volba řezných nástrojů a řezných materiálů 49
6.3.1 Použitá VBD firmy Ssangyong Cement Industrial Co., Ltd. 49
6.3.2 Použitá VBD firmy Seco Tools s.r.o. 50
6.3.3 Použitý nožový držák 51
6.3.4 Volba řezných podmínek....52
6.4 Měřící přístroje použité v experimentu 53
6.4.1 Měření opotřebení....53
6.4.2 Výpočet objemu odebraného materiálu....54
6.4.3 Měření drsnosti povrchu....55
6.4.4 Výpočet výběrového průměru a standardní nejistoty....56
7. Zpracování a srovnání výsledků měření....58
7.1 Zpracování výsledků pro ŘEZNOU KERAMIKU 59
7.2 Zpracování výsledků pro KUBICKÝ NITRID BÓRU 65
7.3 Zpracování výsledků pro ŘK a CBN se zvýšeným posuvem na f=0,4 mm....73
8. Vyhodnocení dosažených výsledků....77
Závěr....82

Seznam použité literatury.....84

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK, SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název	Jednotka
A	tažnost	[%]
a_p	hloubka řezu	[mm]
CBN	kubický nitrid bóru	[-]
C_T	konstanta v Taylorovém vztahu	[-]
C_v	konstanta v Taylorovém vztahu	[-]
D_m	obráběný průměr	[mm]
D,d	průměr destičky	[mm]
f	posuv	[mm]
HB	tvrdost podle Brinella	[-]
KF	vzdálenost výmolu od čela	[mm]
KT	hloubka výmolu na čele	[mm]
KVy	radiální opotřebení špičky	[mm]
l_m	řezná délka	[mm]
m	exponent v Taylorovém vztahu	[-]
M	měření	[-]
MC	primární karbid	[-]
M_6C	sekundární karbid	[-]
M_7C_3	sekundární karbid	[-]
$M_{23}C_6$	sekundární karbid	[-]
n	otáčky vřetena	[min^{-1}]
n	počet měření	[-]
Ra	průměrná aritmetická úchylka	[μm]
Rz	největší výška profilu	[μm]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
$Rp_{0,2}$	mez kluzu	[MPa]
ŘK	řezná keramika	[-]
s,t	tloušťka destičky	[mm]

T	trvanlivost	[min]
t_i	čas soustružení do dosažení VB_B = 0,6 mm	[min]
t_{As}	strojní čas	[min]
u_A	standardní nejistota typu A	[~]
u_B	standardní nejistota typu B	[~]
u_c	standardní nejistota typu C	[~]
V	množství odebraného materiálu	[mm^3]
VB	opotřebení na hřbetě	[mm]
VB_B	opotřebení přímé části ostří (průměrné)	[mm]
VB_{Bmax}	opotřebení maximální	[mm]
VB_C	opotřebení v oblasti špičky nástroje	[mm]
VB_N	opotřebení ve formě vrubu	[mm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
v_c	řezná rychlost	[$m \cdot min^{-1}$]
WC	karbid wolframu	[-]
α	úhel hřbetu	[°]
γ	úhel čela	[°]
γ	strukturní složka, základní tuhý roztok	[-]
γ´	strukturní složka, vytvrzující fáze Ni_3Al, Ni_3Ti, $Ni_3(Al, Ti)$	[-]
γ´´	strukturní složka, vytvrzující fáze Ni_3Nb Al_2O_3	[-]
γ_o	ortogonální úhel čela	[°]
κ_r	úhel břitu nástroje	[°]
λ_s	Úhel sklonu	[°]
$\bar{x}$	výběrový průměr	[mm]
x_i	jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x	[mm]

Úvod

Diplomová práce řeší vliv opotřebení na řezivost vyměnitelných břitových destiček při obrábění niklové slitiny Inconel 625. Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu nejen k relativnímu pohybu nástroj – obrobek a nástroj – tříska, ale také ke kontaktu nástroje s obrobkem a odcházející třískou, čímž dochází k opotřebení nástroje. Testování bylo realizováno přímo ve školních prostorách VŠB TU v Ostravě na CNC obráběcím stroji Mori Seiki NLX 2500/700.

V teoretické části jsou popsány základní pojmy, které s danou problematikou souvisí. Následuje seznámení s nástrojovými materiály, které představuje řezná keramika a kubický nitrid bóru, dále pak s použitým obráběným materiálem - superslitina Inconel 625. Pojem „superslitina“ označuje slitiny speciálně vyvinuté pro práci v podmínkách, které vyžadují vysokou žárupevnost, žáruvzdornost a korozivzdornost. Tyto slitiny si udržují svou vysokou pevnost, rozměrovou stálost a odolnosti vůči korozi i za vysokých teplot.

Pro oba druhy řezných materiálů byly použity stejné řezné podmínky, kde byla měněna pouze řezná rychlost. Po uskutečnění těchto experimentů byl přidán ještě jeden test, kde se zachovaly stejné řezné parametry u obou použitých materiálů, avšak se zvýšeným posuvem.

Na základě takto získaných údajů a výsledků měření bylo provedeno vyhodnocení opotřebení u testovaných vyměnitelných břitových destiček a byl určen vhodnější řezný materiál pro obrábění niklové slitiny Inconel 625. Cílem bylo najít takový řezný materiál, který dosáhne menšího opotřebení na hřbetě a bude vykazovat lepší řezivost a drsnost obrobeného povrchu.

1. Technologie obrábění

Obrábění kovů je technologický proces, při kterém se odebíráním materiálu vytváří požadovaný tvar obráběného předmětu. Při obrábění kovů je řezná hrana velkou silou vtlačována do materiálu obrobku, který je deformován tak silně, až dojde k oddělení ve formě třísky. Výsledkem je opracovaný povrch, který musí splňovat dané požadavky.[7]

Při obrábění korozivzdorných a žárupevných ocelí hovoříme o materiálech, které se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály. Tyto materiály se vyznačují specifickými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi.

Obrábění materiálů patřících do tzv. superslitin, tedy i niklových slitin, je velmi problematické a pro každou jednotlivou operaci obrábění specifické jak z hlediska použitých řezných podmínek, volby obráběcího stroje, tak i z hlediska řezného nástroje.

1.1 Obrobitelnost Ni slitin

Obrobitelnost je v technologii obrábění kovů široce rozšířený výraz. Je to systémová vlastnost, která vyjadřuje, jak efektivní může být obrábění při nízkých nákladech a za daných technologických podmínek. I když je obrobitelnost ovlivněná mnoha faktory – materiál obrobku, řezné nástroje, řezné podmínky, atd. obvykle se hovoří o obrobitelnosti jako o vlastnosti materiálu. [7]

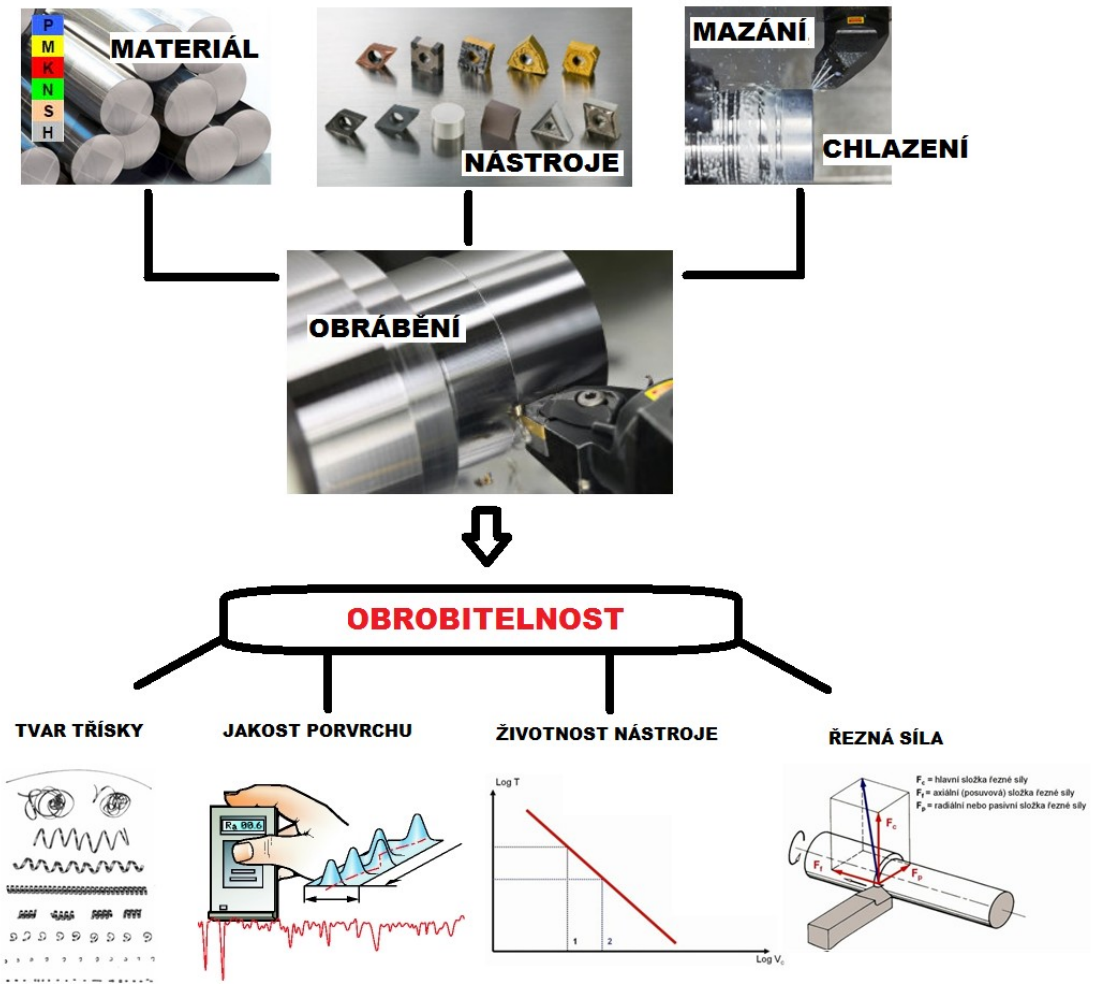
Pro posouzení obrobitelnosti lze využít několika kvantitativních měřítek:

- index obrobitelnosti
- životnost nástroje
- kvalita povrchu
- řezné síly
- výkon
- teplota
- utváření třísky
- aspekty životního prostředí atd.

Obrobitelnost lze kvalifikovat za dobrou při splnění jednoho či více z následujících kritérií:

- obrábění s minimálními energetickými požadavky
- minimální opotřebení nástroje
- minimální řezné síly
- eliminace problémů s utvářením a odvodem třísek
- dobrá kvalita povrchu na obrobené ploše atd.

Konkrétně slitiny na bázi niklu jsou podstatně hůře obrobitelné, než slitiny na bázi železa nebo titanu. Na obrobitelnost má největší vliv hlavní složka těchto slitin, kterou je nikl. Taktéž obsah chrómu je vyšší než u korozivzdorných ocelí. Vhodným tepelným zpracováním lze obrobitelnost zlepšit. Precipitační vytvrzení a další jejich žíhání podstatně zlepšuje jejich obrobitelnost. Jinak řečeno, dobrá obrobitelnost představuje co nejhospodárnější výrobu za daných technologických podmínek. [7, 22]



Obr. 1.1 Parametry charakterizující obrobitelnost [7]

1.2 Řezivost nástroje

Řezivost nástroje lze charakterizovat např. jako vlastnost, která umožňuje nástroji efektivním způsobem odebírat třísku z obráběného materiálu. Tato vlastnost úzce souvisí s fyzikálními a mechanickými vlastnostmi nástroje, zároveň je ovlivněna i dalšími faktory. Mezi tyto faktory patří například metoda obrábění, geometrie nástroje, řezné podmínky, řezné prostředí atd. Není vlastností absolutní, a to zejména v tom smyslu, že závisí i na obráběném materiálu – hlavně na jeho mechanických vlastnostech.

Jednoduchým kritériem hodnocení řezivosti nástroje je $T\text{-}v_c$ závislost, a to i ve svém nejjednodušším tvaru. Z obecného hlediska lze říci, že lepší řezivost má ten nástrojový materiál, který vykazuje v závislosti $T\text{-}v_c$ vyšší hodnotu konstanty C_V a nižší hodnotu exponentu m (viz tabulka 1.1). [1]

Tab. 1.1 Hodnoty exponentu m pro různé nástrojové materiály [1]

Materiál	**Řezná keramika**	Nástrojové oceli	Rychlořezné oceli	Slinuté karbidy
m [-]	**2,5÷1,5 (až 1,2)**	10÷8 (až 6)	8÷5 (až 3)	5÷2,5 (až 2)
α [°]	**68÷56**	84÷83	83÷79	79÷68

2. Opotřebení řezných nástrojů

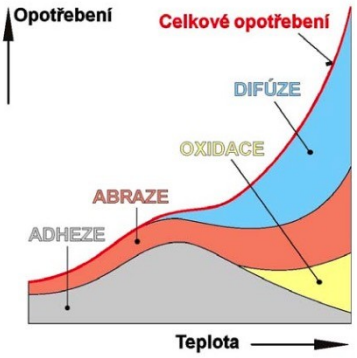
Při obrábění vzniká velké množství tepla, které vzniká na ploše hřbetu a čela nástroje. Tepelná zatížení značně namáhají materiál břitu nástroje a v některých případech vytváří dynamický faktor, a to v okamžiku, kdy jeden břit z materiálu vystupuje a jiný břit do něj naopak vniká. Procesem utváření třísky se průběžně vytváří čistý kovový povrch, při kterém má obráběný materiál sklon k chemickým reakcím nebo k difúzním procesům. Většina obráběných materiálů obsahuje tvrdé částice různého druhu. Tyto částice mnohdy dosahují tvrdosti materiálu břitu nástroje - dochází tak k abrazivnímu efektu.

Kombinací výše uvedených mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů (viz obr.2.2) dochází ke složitému zatěžování břitu nástroje. To se pak projevuje opotřebováním nástroje.

2.1 Mechanismy opotřebení

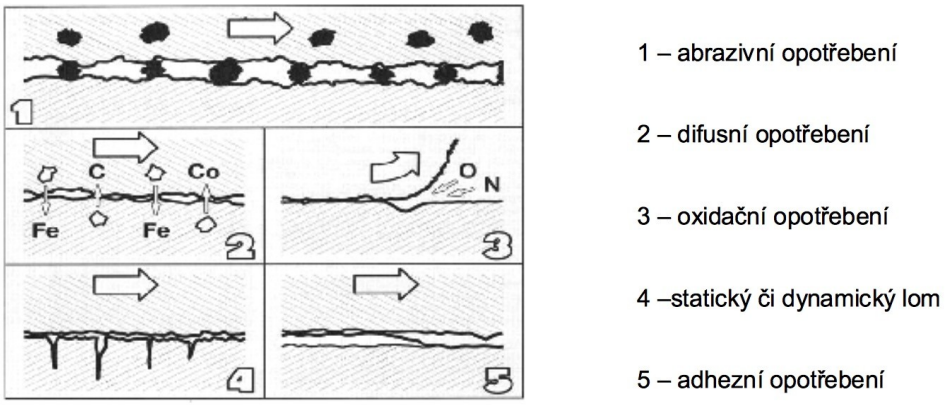
K základním mechanizmům opotřebení patří zejména:

- abraze - brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje
- adheze - vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů
- difúze - migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje
- oxidace - vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí
- plastická deformace - důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase, která se může ve svém nejnepříznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení



Obr. 2.1 Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení[5]

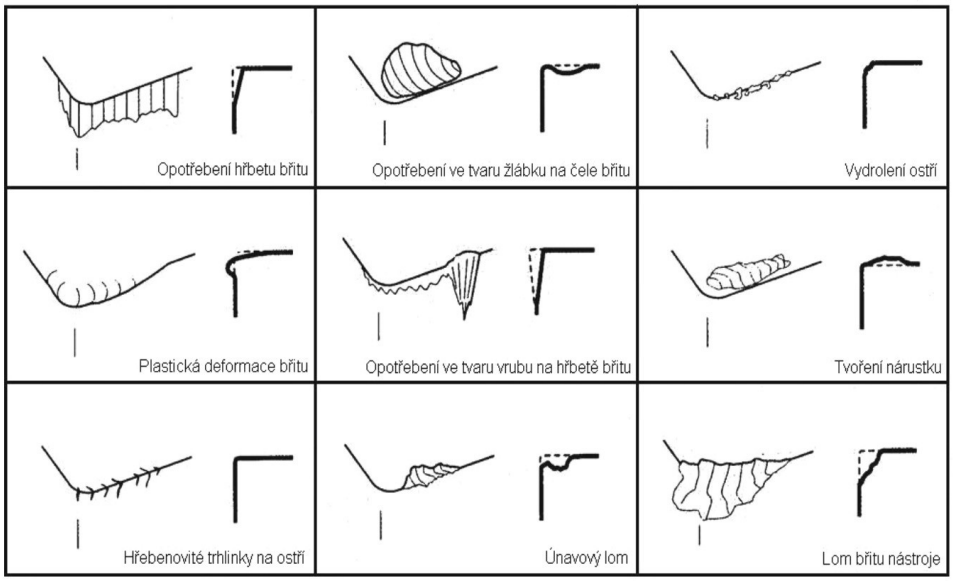
- křehký lom - důsledek vysokého mechanického zatížení. Např: přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu. [1]



Obr. 2.2 Hlavní mechanismy opotřebení břitů nástrojů [1]

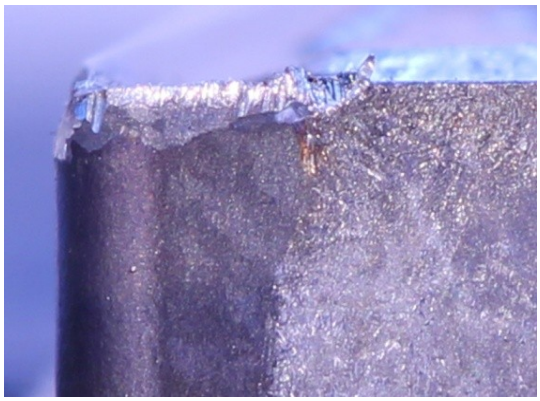
2.2 Klasifikace typů opotřebení

Opotřebení břitové destičky a jeho negativní dopad na výrobní zařízení je podobné, jako když se atletovi opotřebí pár kvalitních běžeckých bot. Podobně jako bota pod váhou běžce, který ji má obutou, musí břitová destička opakovaně vydržet obrovské zatížení, které způsobuje její opotřebení a poškozování. Pokud se tento problém neřeší, opotřebení bot může atletovi způsobovat bolest a opotřebení břitové destičky může vést k nepřesným procesům nebo nízké produktivitě výrobce. Výrobci mohou použité nástroje analyzovat, čímž se zajistí maximální životnost nástroje a mohou předpovídat délku jeho využívání. Včasné přezkoumání a pozorovnání břitových destiček je důležité při určení základní příčiny jejich opotřebení. Pokud tyto důležité kroky nebudou podniknuty, mohou být jednotlivé typy opotřebení zaměněny. Při zkoumání břitových destiček je vhodné používat stereoskop s kvalitní optikou, dobrým osvětlením a minimálně 20ti násobným zvětšením. Dobře se uplatní při rozpoznání těchto osmi nejčastějších typů opotřebení. [2]



Obr. 2.3 Klasifikace typů opotřebení [3]

Opotřebení hřbetu břitu patří mezi abrazivní formy opotřebení a projevuje se na hřbetní ploše břitu (viz obr. 2.4). Plochy hřbetu u hlavního ostří, vedlejšího ostří, poloměru špičky a na čelní fasetce jsou před utvářením, během utváření a po utváření třísky zvlášť vystaveny působení materiálu obrobku. Příliš velké opotřebení hřbetu má za následek zhoršení jakosti obrobeného povrchu, nepřesnost rozměrů a narůstání tření, které vzniká změnou geometrie břitu. V praktické části bude vhodné měřit opotřebení vedlejšího hřbetu, jelikož máme kruhovou destičku. [3]



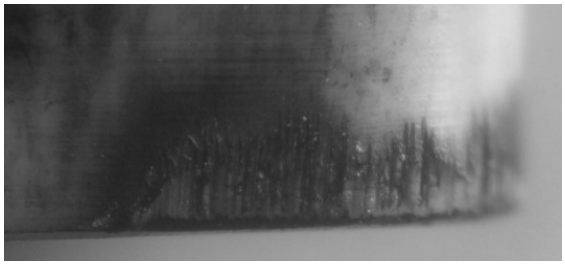
Obr. 2.4 Opotřebení na hřbetu nástroje [4]

Opotřebení ve tvaru žlábku na čele je důsledkem působení mechanismů difúzního opotřebení a abraze. Žlábek vzniká částečně úběrem řezného materiálu nástroje vyvolaného brousícím pochodem, který vzniká působením tvrdých částic obsažených v materiálu, ale zejména difúzí v místě břitu s nejvyšší teplotou. Mimořádně velké

opotřebení v podobě žlábku může změnit geometrii břitu a ovlivnit tak tvar třísky, změnit směr působení řezných sil a zeslabit břit (viz obr. 2.5). [3]

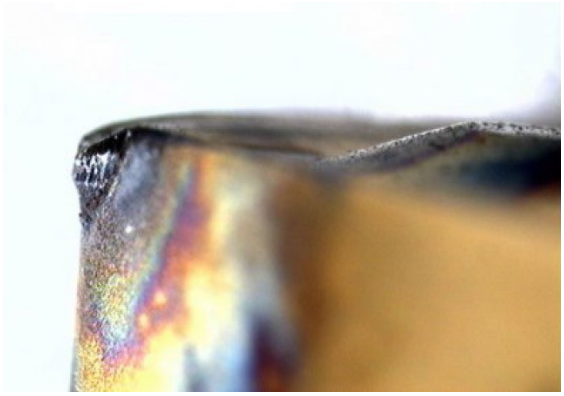
Obr. 2.5 Opotřebení ve tvaru žlábku

Vydrolení ostří je formou opotřebení, při níž se břit místo stejnosměrného opotřebení vydroluje (viz obr. 2.6). Toto opotřebení je způsobeno špičkami zatížení a vede k tomu, že se drobné částečky řezného nástrojového materiálu začnou oddělovat z povrchu břitu. Nejčastější příčinou tohoto typu opotřebení je obrábění přerušovaným řezem. Faktory způsobující tento typ opotřebení mohou být nevhodná volba řezného materiálu, nebo nevhodná volba ostří. [3]



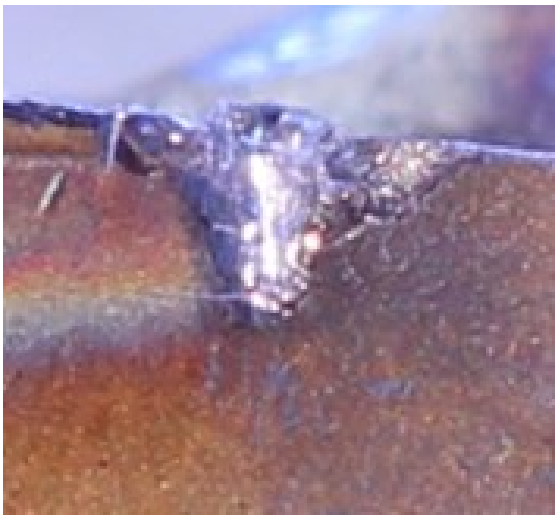
Obr. 2.6 Vydrolení ostří nástroje [3]

Plastická deformace břitu vzniká působením kombinace vysokých teplot a řezných tlaků na břit (viz obr. 2.7). Toto opotřebení lze zmenšit použitím vhodného řezného materiálu s vyšší otěruvzdorností, správného zaoblení ostří a volbou správné geometrie. [3]



Obr. 2.7 Plastická deformace břitu [2]

Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu patří k typickým adhezním opotřebením. Vruby vznikají v místě kontaktu břitu s bokem třísky (viz obr. 2.8). Toto opotřebení se omezuje přesně na to místo, kudy proniká vzduch do oblasti obrábění. Opotřebení ve tvaru vrubu na vedlejším hřbetu břitu má mechanické příčiny. Mimořádně velké opotřebení ve tvaru vrubu ovlivňuje utváření třísky a může vést k lomu destičky. [3]



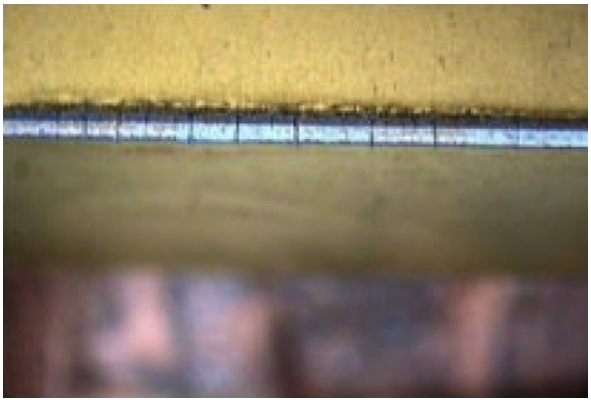
Obr. 2.8 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu [4]

Tvoření nárůstku je v převážné většině případů fenoménem, vztahující se k teplotám a řezným rychlostem. Mimo změny geometrie břitu působí tato forma opotřebení negativně, protože se mohou částice materiálu odlomit (viz obr. 2.9). Afinita břitu k materiálu hraje v tomto případě rozhodující roli.

Negativním důsledkem tvorby nárůstku je zhoršená jakost obrobeného povrchu. Nadměrná tvorba nárůstků může vést až k lomu VBD. [3]

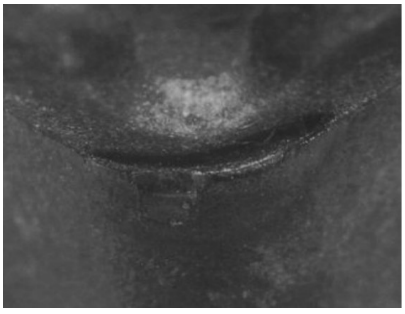
Obr. 2.9 Tvoření nárůstku [2]

Vznik hřebenových trhlinek na ostří je formou únavového opotřebení, které vzniká tepelným šokem. Zvláště změna teplot při frézování často vede k tomuto druhu opotřebení. Trhlinky se tvoří kolmo na ostří. Použití chladících kapalin se nedoporučuje, protože zvyšuje rozdíl teplot při záběru břitu do materiálu obrobku a při výstupu z něj. [3]



Obr. 2.10 Vznik hřebenových trhlinek na ostří [2]

Únavový lom je typickým následkem mimořádně velkých změn velikosti řezných sil. Tento druh lomu vzniká vlivem součtu neustále se měnících různých zatížení, kdy působení jednotlivých zatížení není dostatečně intenzivní, aby mělo za následek lom. Způsob vřezávání nástroje do materiálu obrobku, změna velikosti a směru působení řezné síly, mohou být pro pevnost a houževnatost VBD fatální. Lomové plochy probíhají paralelně s ostřím. [3]



Obr. 2.11 Únavový lom [3]

Lom břitu nástroje je osudným koncem každého břitu (viz obr. 2.12). Totální lom je často velmi nebezpečný a mělo by se mu za každých okolností zabránit. Lom břitu nástroje je nutné v každém případě považovat za konec trvanlivosti. Změny geometrie, oslabení břitu, nárůst teplot a sil mohou vést ke značným škodám. [3]

Obr. 2.12 Lom břitu nástroje [20]

Toto jsou nejdůležitější formy opotřebení. Všechny případy nelze považovat za formu pravého opotřebení, ale je nutné na ně nahlížet jako na příčinu, způsobující rychlý lom destičky, a proto se jí musí bezpodmínečně zabránit.

Pochopení mechanismů opotřebení a analyzování typů opotřebení vedou ke správné volbě řezných nástrojových materiálů, geometrií břitů, podmínek obrábění a rovněž materiálů obrobků. [3]

2.3 Trvanlivost a životnost nástrojů

Trvanlivost řezného nástroje lze definovat jako součet všech čistých časů řezání, od začátku obrábění, až po opotřebení břitu nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria. Kritérium opotřebení a jeho hodnota musí být stanoveny tak, aby vyráběný obrobek měl požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu a to po celou dobu trvanlivosti nástroje.

Trvanlivost nástroje závisí zejména na metodě obrábění - soustružení, frézování, vrtání, atd., vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách -

řezná a posuvová rychlost, šířka záběru ostří, řezné prostředí. Z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv řezná rychlost. Známe ji pod názvem „T-v_c“ závislost – Taylorův vztah a používá se ve tvaru: [5]

$$T = \frac{C_T}{v_c^{\,m}} \qquad (2.1)$$

Kde:

C_T [-] je konstanta,

v_c [m min^{-1}] je řezná rychlost,

m [-] je exponent

- vzhledem k vysoké a nepraktické hodnotě konstanty C_T (10^9 až 10^{13}) se používá ve tvaru:

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} \qquad (2.2)$$

Kde:

C_V je konstanta (protože $C_V = C_T^{1/m}$, je řádová velikost konstanty C_V pouze 10^2– 10^3).

Taylorův vztah v komplexním tvaru: [21]

$$T = \frac{C_T}{v_c^{\,m}.a_p^{\,x}.f^{y}}(\min) \rightarrow v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}.a_p^{\,x_v}.f^{y_v}}(m.\min^{1}) \qquad (2.3)$$

T- trvanlivost nástroje (min)

v_c – řezná rychlost ($m.min^{-1}$)

C_v,C_T – konstanta Taylorova vztahu

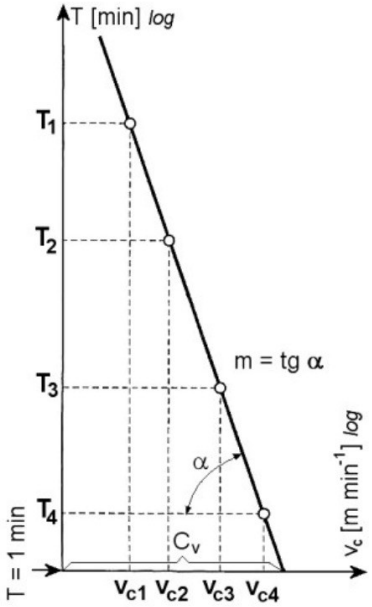
a_p – hloubká záběru (mm)

f – posuv (mm)

m,x,y – exponent Taylorova vztahu

Postup při stanovování T-v_c závislosti pro kombinaci řezný nástroj – obráběný materiál vychází z definice trvanlivosti. Při zachování ostatních řezných podmínek je daný materiál obráběn čtyřmi různými rychlostmi, přičemž se sleduje nárůst opotřebení nástroje. Tento nárůst opotřebení se vynáší do závislosti VB = f(t) v případě sledování opotřebení VB (viz obr. 2.15). Pro časovou závislost (t) rozvoje opotřebení se využívá regresních vztahů. Pokud se dostatečně vhodná matematická funkce nenaleze, pak lze využít metod kubických splinů nebo dalších metod numerické matematiky.

Pro předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria jsou odečteny hodnoty trvanlivosti T_1, T_2, T_3, T_4, které odpovídají zvoleným řezným rychlostem v_{c1}, v_{c2}, v_{c3}, v_{c4}. Tyto body se pak vynáší do grafu s logaritmickými souřadnicemi T a v, kde vytvoří přímku odpovídající zvolené hodnotě VB (viz obr. 2.13). Z tohoto grafu lze vyčíst hodnotu konstanty C_T pro daný materiál obrábění a řezné podmínky f a a_p na ose T pro řeznou rychlost $v_c = 1$ m.min^{-1}, hodnotu konstanty C_V na ose v_c pro trvanlivost T = 1 min, exponent m, který vyjadřuje směrnici přímky. Hodnota exponentu m se mění s vlastnostmi materiálu břitu nástroje. Jeho velikost udává, jaká je citlivost nástrojového materiálu na změnu řezné rychlosti, respektivě teploty řezání, m = tg α. [5]



Obr. 2.13 T-v_c závislost [5]

Životnost nástroje je pak definována jako součet všech jeho trvanlivostí, nebo též jako celková doba funkce nástroje od prvního uvedení do činnosti až do jeho vyřazení. Z tohoto hlediska lze tedy životnost přebrušovaného nástroje vyjádřit vztahem: [5]

$$Z = \sum_{i=1}^{x+1} T_i = (x+1).T \qquad (2.4)$$

Kde:

Ti [min] jsou jednotlivé trvanlivosti,

T [min] je aritmetický průměr hodnot Ti,

x [-] je počet možných ostření nástroje.

Pro nástroj s mechanicky upínanými vyměnitelnými břitovými destičkami se životnost stanoví podle vztahu: [5]

$$Z = \sum_{i=1}^{q} T_i = q \cdot T \tag{2.5}$$

Kde:

Ti [min] jsou trvanlivosti jednotlivých ostří destičky,

T [min] je aritmetický průměr hodnot Ti,

q [-] je počet použitelných ostří nástroje.

2.4 Kritéria opotřebení

Kritéria, kterými je opotřebení kvantifikováno, jsou uvedena na obrázku 2.14

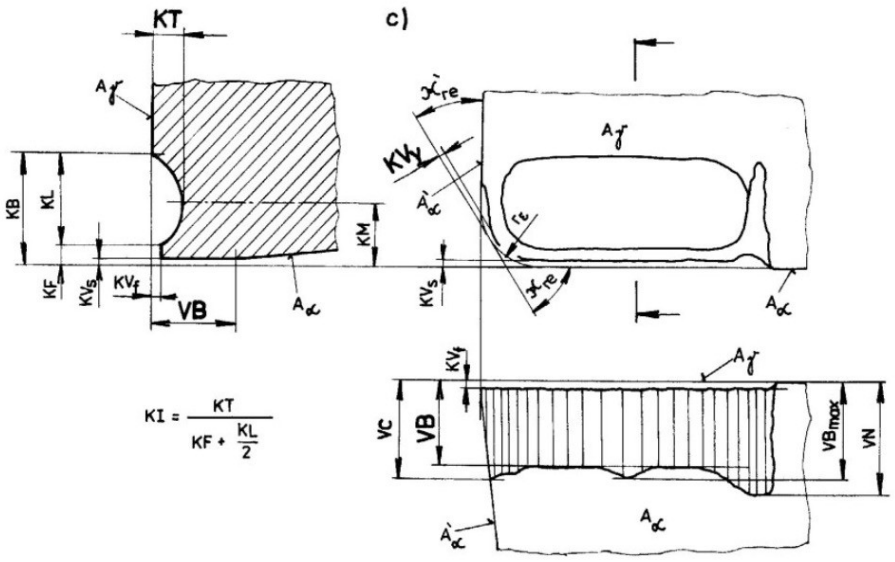
Nejčastěji užívaná kritéria:

VB - šířka fazetky opotřebení na hřbetě

KT - hloubka výmolu na čele

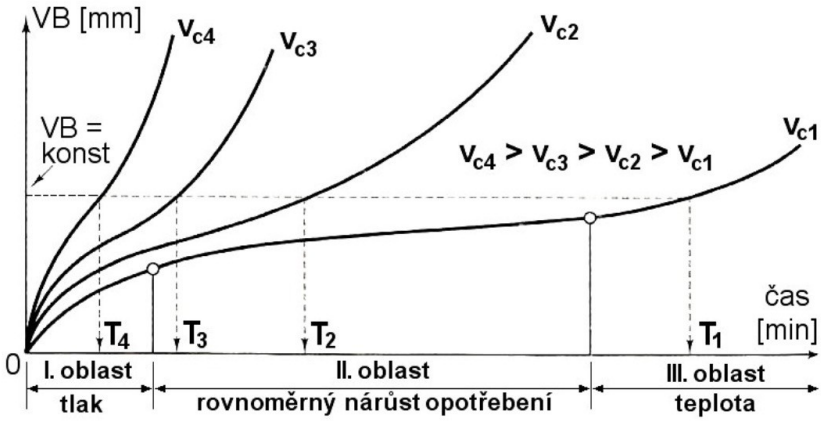
KV_y- radiální opotřebení špičky, jsou zvýrazněna většími písmeny.

Kritérium KVy je významné zejména u dokončovacích operací, protože způsobuje změnu rozměru obrobené plochy. Dle normy ČSN ISO 3685 jsou označovány kritéria opotřebení na hřbetě VB_C, VB_B, VB_{BMAX} a VB_N. [6]



Obr. 2.14 Kritéria opotřebení řezného nástroje dle ČSN ISO 3685 [6]

Doporučené hodnoty kritéria VB leží v rozsahu 0,2÷0,8 mm, jeho charakteristický časový průběh je uveden na obrázku 2.15 (křivka pro nejmenší řeznou rychlost v_{c1}). Poměrně rychlý nárůst hodnoty VB v oblasti I je způsoben velkým měrným tlakem, který působí na styku hlavního hřbetu nástroje s přechodovou plochou obrobku v důsledku velmi malé stykové plochy. V oblasti II hodnota VB rovnoměrně narůstá v důsledku působení základních mechanismů opotřebení, nakumulované tepelné zatížení nástroje znamená výrazné zvýšení intenzity opotřebení v oblasti III. [5]



Obr. 2.15 Časová závislost opotřebení pro různé řezné rychlosti [5]

Pro rychlost V_{c1} platí:

I. oblast – záběh

II. oblast – normální opotřebení

III. oblast – zrychlené opotřebení.

Tyto křivky opotřebení se využívají pro stanovení dílčích účinků kvality břitu, řezných podmínek, řezného prostředí, atd.

2.5 Měření opotřebení

Klasifikace metod pro stanovení opotřebení řezného nástroje:

přímé metody:

- měření vybraného kritéria opotřebení

  VB - pomocí dílenského mikroskopu

  KT - pomocí profiloměru

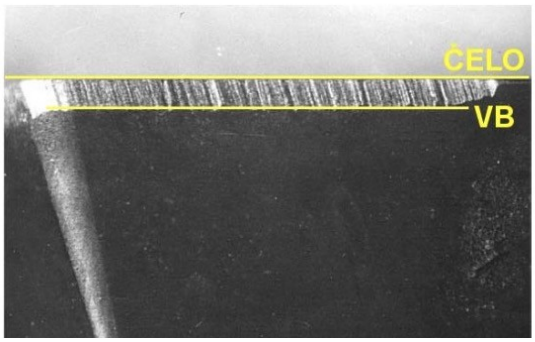
  KV_y - délkovým měřidlem

  diskontinuální metoda - po přerušení nebo skončení činnosti nástroje,

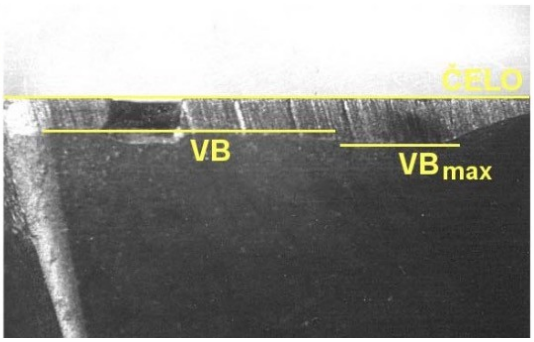
- vážení břitové destičky (diskontinuální metoda)
- optické sledování funkční plochy (diskontinuální metoda)
- elektrické metody – odporové, indukční (kontinuální)
- ultrazvukové metody (kontinuální)
- pneumatické metody (kontinuální)
- radioaktivní metody (kontinuální)
- měření rozměrů obrobku (kontinuální)

nepřímé metody (kontinuální):

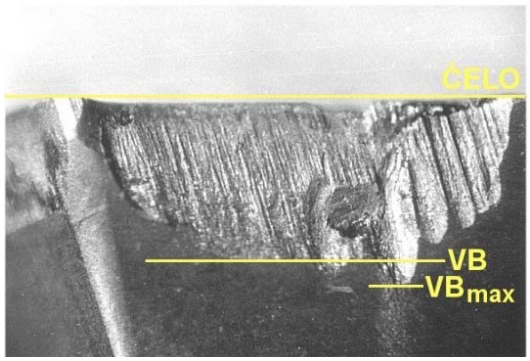
- měření a vyhodnocování jednotlivých složek řezné síly
- měření a vyhodnocování elektrického příkonu obráběcího stroje
- měření kmitání (amplituda kmitů, zrychlení, parametry akustické emise)
- měření teploty řezání
- měření struktury povrchu obrobené plochy (parametry Ra, Ry, apod.)
- sledování druhotných projevů opotřebení - změna tvaru a barvy třísky, atd. (subjektivní metody). [6]



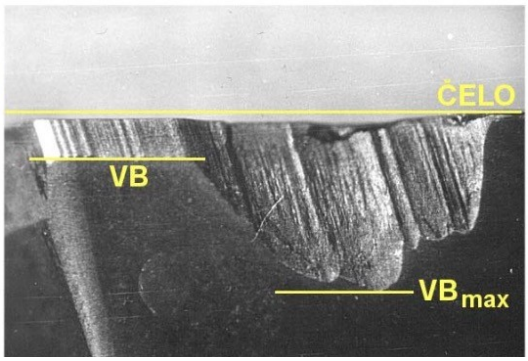
Obr. 2.16 Pravidelná nízká hodnota VB [6]



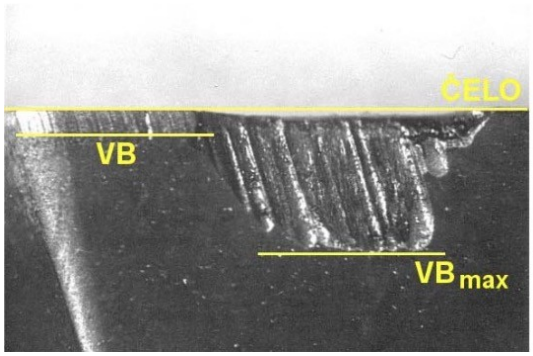
Obr. 2.17 Poměrně pravidelná nízká hodnota VB, vylomené ostří [6]



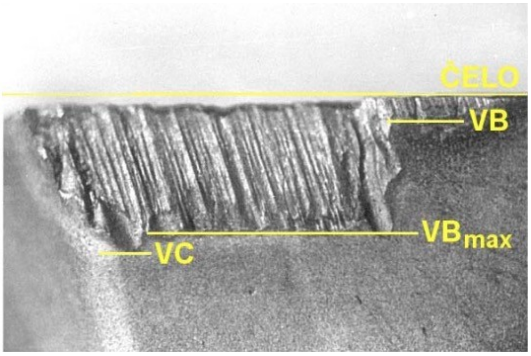
Obr. 2.18 Pravidelná vysoká hodnota VB [6]



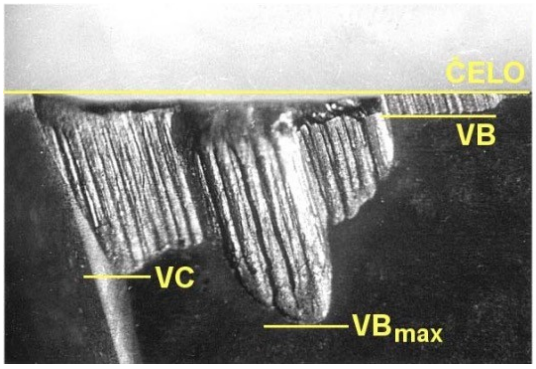
Obr. 2.19 Nízká hodnota VB kombinovaná s vysokou hodnotou VB_{max} [6]



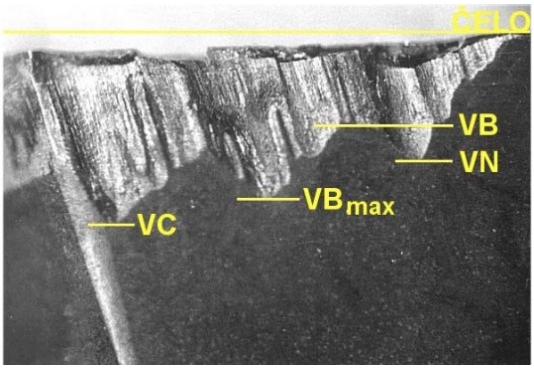
Obr. 2.20 Nízká hodnota VB kombinovaná s vysokou hodnotou VB_{max}[6]



Obr. 2.21 Převládající hodnotaVB_{max} [6]



Obr. 2.22 Převládající hodnoty VC a VB_{max} [6]



Obr. 2.23 Převládající hodnoty VC, VN a VB_{max} [6]

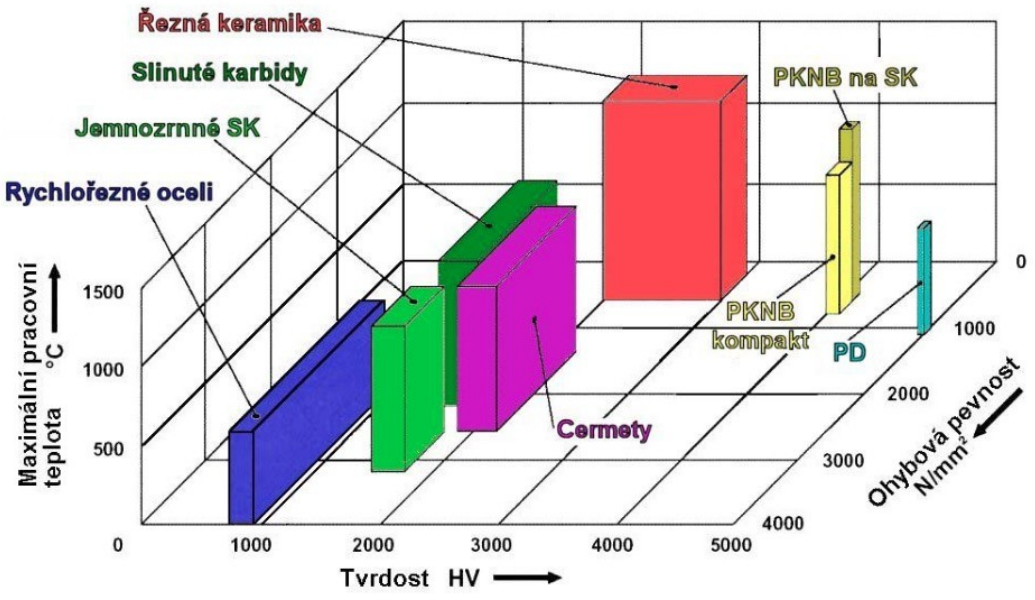
V praxi jsou pro měření opotřebení nástroje nejčastěji používány metody přímého měření základních kritérií opotřebení, zejména VB a KT. Hodnoty VB jsou měřeny pomocí malého dílenského mikroskopu tak, že se nitkový kříž nastaví do základní polohy, na čáru představující čelo nástroje, a poté se přesune do polohy, kde se kryje s měřeným kritériem opotřebení. Naměřené hodnoty jsou vynášeny do závislostí VB=f(čas). [6]

3. Nástrojové materiály

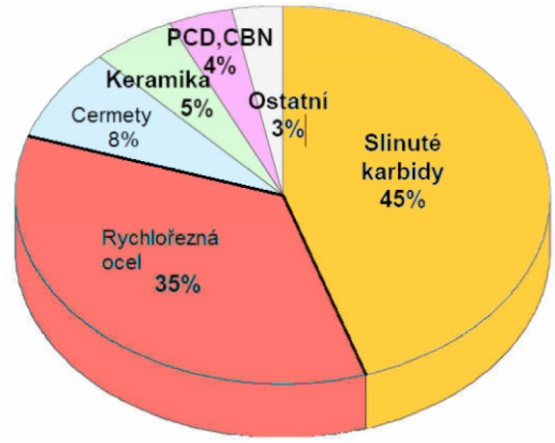
V současné době je k dispozici široký výběr nástrojových materiálů a výzkum v této oblasti přináší stálé nové možnosti. Na materiál nástroje jsou kladeny vysoké požadavky, a tak je výběr vhodného nástrojového materiálu důležitý hlavně z hlediska produktivity obrábění. Jeho volba závisí především na druhu obráběného materiálu, technologii výroby polotovaru, plynulosti řezu, na chlazení a mazání, obráběcím stroji, požadavcích na kvalitu obrobené plochy, ekonomické náročnosti řezného materiálu a nedílnou součástí je ekonomická stránka.

Nejvyužívanějšími typy nástrojových materiálů pro obrábění speciálních slitin jsou rychlořezné oceli, slinuté karbidy, řezná keramika, kubický nitrid bóru a diamant. Každý z těchto materiálů má svá specifika a je tak vhodný pro jiné řezné podmínky a obráběné materiály. Neexistuje univerzální řezný materiál. Do našeho experimentu byly použity VBD z řezné keramiky a kubického nitridu bóru.

Rychlořezné oceli patří do nástrojových ocelí vysokolegovaných. Nástrojové oceli zahrnují taktéž nelegované oceli a oceli legované. Nelegované a legované oceli nejsou tak vhodné pro strojní obrábění kovových materiálů a v praxi se téměř nepoužívají, kde jednoznačně dominují rychlořezné oceli. Z obrázku 3.2 můžeme vidět procentuální zastoupení řezných materiálů ve výrobě.



Obr. 3.1 Hodnoty vybraných vlastností řezných materiálů [5]



Obr. 3.2 Procentuální zastoupení řezných materiálů ve výrobě [8]

3.1 Rychlořezné nástrojové oceli

Jedná se o vysoce legované oceli s ledeburitickou strukturou a obsahem uhlíku nad 0,7 %. Legujícími prvky jsou u těchto ocelí zastoupeny W, Cr, Mo, V a Co. Hlavní charakteristikou je jejich vysoká odolnost proti poklesu tvrdosti za vysokých teplot. Tyto oceli se kalí z vysokých teplot (v rozmezí 1200°C - 1280°C). Kalení probíhá stupňovitým ohřevem, kvůli nízké tepelné vodivosti a díky vysokému obsahu legujících prvků. Po kalení následuje popouštění při teplotách 450°C - 550°C, kdy dojde k poklesu obsahu uhlíku ve zbytkovém austenitu díky precipitaci karbidů. Tím dojde ke zvýšení teploty vzniku martenzitu a austenit se transformuje na martenzit. Dojde tak ke zvýšení tvrdosti. Popouštění je prováděno obvykle 3x, aby bylo dosaženo přeměny co největšího množství austenitu. [10,11]

3.2 Slinuté karbidy

Klasické metalurgické postupy umožňují získání jen omezeného množství tvrdých karbidických částic v houževnaté matrici. Pro zvýšení obsahu karbidů v materiálu je tak nutné použít metody práškové metalurgie. Těmito postupy lze běžně získat 90% karbidických částic v 10% matrice. V současnosti je možné dosáhnout rozměrů částic karbidů menších jak 0,5 μm a výslednému zhutnění na 100%. Slinuté karbidy se dělí do několika skupin dle ČSN ISO 513- P, M, K, N, S, H. Každá skupina je pak svoji vhodností určena k obrábění specifických materiálů.

Skupina P, která obsahuje jak karbid wolframu WC, tak i karbid titanu TiC a pojivo Co, je tak vhodnější pro materiály tvořící dlouhou třísku (např. uhlíkové oceli).

Skupina M obsahuje větší množství různých karbidů. Její použití je universální. V praxi je někdy zaváděn pojem skupina materiálu obrobku. Jedná se o sdružení materiálů obrobků vyvolávající kvalitativně stejný typ zatížení břitu a tudíž vyvolávající i podobný typ opotřebení. Pro dané označení skupiny slinutých karbidů pak odpovídá daná skupina materiálů obrobku.

Skupina K obsahuje slinuté karbidy typu WC-Co. S rostoucí teplotou ztrácí obsažený karbid wolframu svou tvrdost. Při tvorbě dlouhé třísky je delší dobu nástroj v kontaktu s třískou a generuje se tak více tepla třením. Proto je tato skupina slinutých karbidů vhodná pro obrábění materiálů tvořících krátkou drobivou třísku (např. litiny). Karbid titanu TiC ztrácí svou tvrdost za zvyšování teploty pomaleji než karbid wolframu.

Skupina S je určena pro obrábění materiálů zvaných superslitiny. Do této skupiny materiálů patří například slitiny niklu, kobaltu a titanu, které se nazývají právě superslitiny. [10,11]

3.3 Řezná keramika

Moderní definicí je keramika obecně považována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavními složkami jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Pro současnou keramiku je charakteristické, že je vyráběna z poměrně čistých surovin a často z čistých výchozích chemikálií jako keramika syntetická. Vlastnosti jako křehkost, náchylnost k rozbití, apod. se pak přenáší i na technickou keramiku. Mluvíme-li však o řezné keramice, jedná se o technologicky vyspělé výrobky, které jsou určeny pro extrémní podmínky, kde se požaduje např. vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká tepelná stálost, vysoká tvrdost, atd.[1]

3.3.1 Uplatnění řezné keramiky

Řezná keramika patří mezi výkonné řezné materiály. Její nasazení ve strojírenské výrobě vyžaduje, aby mohlo být využito jejich výhodných vlastností v plné míře a nevýhodné co nejvíce potlačit. Mezi hlavní podmínky efektivního využití řezné keramiky patří:

- vysoká tuhost systému stroj – nástroj – obrobek
- použití výkonných obráběcích strojů se širokým rozsahem posuvů a otáček s možností nastavení vysokých řezných rychlostí, plynulá regulace otáček

- výborný stav obráběcího stroje,zabezpečení pevného a spolehlivého upnutí obrobku
- zakrytování pracovní části obráběcího stroje
- výběr vhodného tvaru a velikosti břitové destičky
- správná volba tvaru ostří břitové destičky.

Soustružení

U keramických materiálů hraje velmi důležitou roli otázka chlazení. U většiny druhů keramických vyměnitelných břitových destiček je chlazení chladicí kapalinou výslovně zakázáno. Pro obrábění tvrdých materiálů (kalené oceli, tvrzené litiny) keramickými destičkami je nutné volit poměrně nízké hodnoty hloubky řezu a_p.

Frézování

Zpočátku byly keramické řezné materiály doporučovány výhradně pro obrábění nepřerušovaným řezem, tedy hlavně soustružení. Postupným vývojem a zlepšováním mechanických vlastností dnes většina výrobců řeznou keramiku doporučuje i pro přerušované řezání. Jednou ze základních podmínek pro použití při přerušovaném řezu je vysoká stabilita systému STROJ – NÁSTROJ – OBROBEK a tedy zamezení vzniku vibrací. Toho se dá úspěšně dosáhnout použitím frézovacích hlav osazených vyšším počtem břitů. [1]

3.3.2 Použití řezné keramiky

Intenzivní výzkumnou činností byly výrazně zlepšeny některé vlastnosti keramických materiálů. Charakteristické vlastnosti umožňují používat keramické materiály v těchto oblastech technické praxe:

- tepelné aplikace – odolnost vůči vysokým teplotám, dobrá tepelná vodivost
- mechanické aplikace – vysoká tvrdost, vysoká odolnost proti opotřebení
- elektrotechnika, elektronika, fyzikální a chemické aplikace, medicína, stavebnictví.[1]

3.3.3 Rozdělení a značení řezné keramiky

Pro dělení a značení keramických řezných materiálů neexistuje konkrétní norma. Každý autor si uvádí své rozdělení ŘK. Všeobecně se však přijímá následující dělení:

- na bázi oxidu hlinitého - Al_2O_3

- čistá (oxidická) - 99,5% Al_2O_3

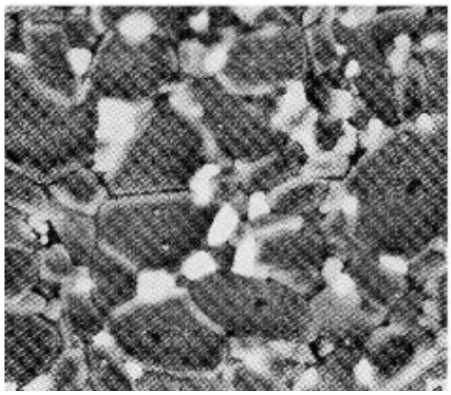
- směsná - $Al_2O_3 + ZrO_2$, $Al_2O_3 + ZrO_2 + CoO$

- vyztužená - $Al_2O_3 + TiC$, $Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC$

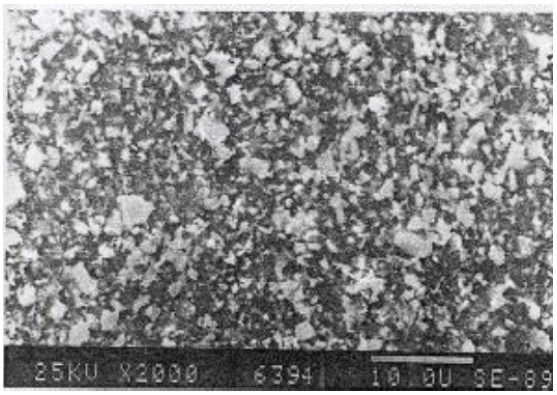
- na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4) - $Si_3N_4 + Y_2O_3$, $Si_3N_4 + TiC$, sialony.

Sialonová keramika- keramiky na bázi nitridu křemíku a oxidu hlinitého, obvykle ve složení Si_3N_4- Al_2O_3-Y_2O_3byly vyvinuty ve Velké Británii a zpočátku jen v zastoupení firem Kennametal a Sandvik Coromant, nyní tento typ keramiky nabízejí všichni známí výrobci nástrojových materiálů. Největší výhodou sialonových keramik je vysoká lomová houževnatost. Ve srovnání s keramikami na bázi Al_2O_3 mohou pracovat při dvojnásobných rychlostech posuvu. Jejich odolnost proti opotřebení je ale poměrně nízká a rychle se opotřebovávají při obrábění ocelí a tvárných litin. Proto jsou jejich současné aplikace omezeny na soustružení a frézování šedých litin, někdy se užívají pro soustružení superslitin. Sialonové materiály jsou obvykle vyráběny studeným lisováním a slinováním a lze je snadno slinovat na plnou hustotu. Mají vynikající odolnost proti teplotním šokům. [25]

Struktura oxidické keramiky Al_2O_3 :

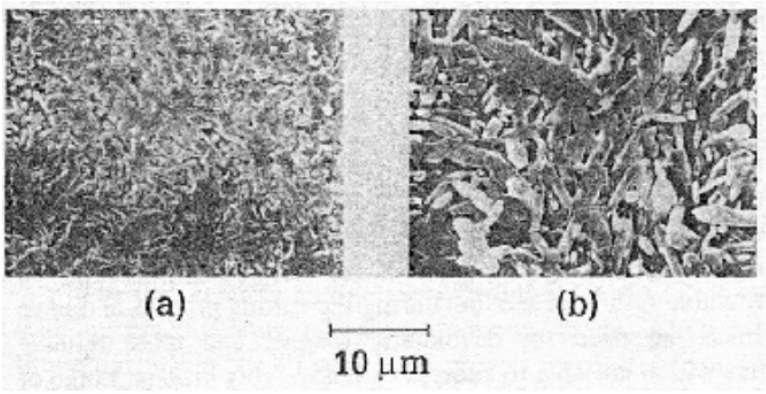


Obr. 3.3 Čistý Al_2O_3[1]



Obr. 3.4 Al_2O_3+ 30% TiC [1]

Struktura nitridické keramiky Si_3N_4:



Obr. 3.5 a) lisováno 90 minut[1] b) lisováno 400 minut [1]

3.3.4 Obrábění žáruvzdorných slitin

Dříve bylo možno obrábět tyto druhy materiálu pouze nepovlakovanými slinutými karbidy. Nyní keramika umožňuje použít při jejich obrábění podstatně vyšších řezných rychlostí s delší životností nástroje. Žáropevné slitiny obsahují nikl, který je velmi pevný při vysokých teplotách a způsobuje zvlášť velké opotřebení na čele ve tvaru žlábku, v takovém případě se doporučuje použít směsnou nebo vyztuženou keramiku.

3.4 Kubický nitrid bóru

Polykrystalický kubický nitrid bóru, CBN, je materiál s mimořádně vysokou tvrdostí za tepla, který lze používat při velmi vysokých řezných rychlostech. Vyznačuje se také velmi dobrou houževnatostí a odolností proti tepelným rázům.[9]

Kubický nitrid bóru se v přírodě nenachází. Je však asi sto let známý nitrid bóru, krystalizující v hexagonální soustavě, podobně jako grafit. Nitrid bóru je chemická sloučenina, která se skládá ze 43,6% bóru a 56,4% dusíku. Nitrid bóru se svými vlastnostmi podobá grafitu.

Přírodní CBN není vhodný pro nástroje s definovanou geometrií břitu, jelikož na rozdíl od hexagonálního křemíku je měkký. Druhým nejtvrdším materiálem se stává až po transformaci na kubickou mřížku, která probíhá za vysokých teplot a tlaků. [23]

Moderní CBN řídy jsou keramické kompozity s obsahem CBN 40-65%. Keramické pojivo zvyšuje odolnost CBN, který je jinak náchylný k opotřebení chemickým otěrem, proti opotřebení. Další skupinou jsou třídy s vysokým obsahem

CBN, s 85% až s téměř 100% CBN. Tyto třídy mohou obsahovat kovové pojivo zvyšující jejich houževnatost.[9]

Nástroje osazené CBN se používají pro obrábění bílé litiny s tvrdostí nad 50 HRC, legované litiny a tvrdých návarů. Při opracování těchto materiálu dosáhneme mnohem vyšší životnosti nástroje než při obrábění slinutými karbidy či řeznou keramikou. Pro své vlastnosti a schopnost dosahovat vysoké jakosti povrchu jsou vhodné jako nástroje nahrazující broušení třískovým obráběním. [24]

Po získání prvních vzorků se zjistilo, že tvrdost kubického nitridu bóru je taková, že jím lze poškodit diamant a jeho práškem je možné brousit přírodní diamant. Hustota obou látek je prakticky stejná a souvisí s počtem atomů v jednotce objemu. Diamant má vyšší počet atomů v jednotce objemu a tím i vyšší hustotu. Běžně vydrží kubický nitrid boru teploty 1500 až 1600°C. Při vyšších teplotách se v přítomnosti vzdušného kyslíku rozkládá na oxidu dusíku a bor. Chemická stálost je u kubického nitridu boru značně lepší než u diamantu. Nerozpouští se v běžných rozpouštědlech ani za vyšších teplot, taktéž v roztavených kovech se nerozpouští a má vyšší hustotu a tepelnou vodivost. Dobrá tepelná odolnost a vysoká chemická stálost velice rozšiřuje oblasti použití kubického nitridu bóru. Všemi těmito vlastnostmi je kubický nitrid boru nenahraditelným materiálem na obrábění ocelí a je vhodnější než diamant - velmi velký je rozdíl ve tvrdosti.

V souvislosti se snahou zvyšovat spolehlivost, životnost mechanizmů a strojů se ve strojnictví nevyhnutně začaly používat speciální vysokolegované oceli a slitiny se zvýšenými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, které je možné těžko obrobit i brusnými nástroji. Tady vyniká význam kubického nitridu bóru, který se vyznačuje vysokou tepelnou stálostí v chemicky agresivních prostředích. Kromě toho je chemicky inertní ke konstrukčním kovům. Výroba větších monolitických zrn se ukázala jako ekonomicky neefektivní a řešení se našlo podobně jako u polykrystalického diamantu v použití práškové metalurgie. Od té doby se oblast supertvrdých řezných materiálů rozšířila o nové materiály na bázi polykrystalického kubického nitridu bóru. Nevýhodou tohoto nástrojového materiálu je jeho vysoká cena. V praxi se CBN používá pro obrábění šedých a tvrzených litin, kalených materiálů do 63 HRC, dokončování ozubených kol, pro tvrdé soustružení, atd. [30]

3.5 Diamant

Diamant dosahuje nejvyšší tvrdosti a to od 6000 do 10 000 HV. Jeho vysoká tvrdost je dána kovalentní vazbou každého atomu uhlíku s dalšími čtyřmi ve vrcholech čtyřstěnu. Diamant je využíván jednak ve formě přírodního monokrystalu, tak i uměle vyráběné polykrystalické formě. Diamant není doporučován pro obrábění niklových slitin, ocelí při velkých řezných rychlostech a obecně materiálů s vysokým bodem tavení. Diamant je doporučován pro obrábění slitin hliníku při rychlostech větších jak 500 $m.min^{-1}$, nekovové materiály, umělé hmoty, keramiky a kompozitní materiály s uhlíkovými, aramidovými, kevlarovými nebo skelnými vlákny. [11]

4. Superslitiny

Rozvíjející se průmysl, nové aplikace, progresivní technologie ve strojírenství a s tím zvýšené požadavky na strojní součásti, si vyžádaly vývoj nových materiálů, které by splňovaly tyto potřeby. Pod pojmem „superslitiny“ jsou označovány slitiny speciálně vyvinuté na práci v extrémních podmínkách, které vyžadují u materiálu žárupevnost, žáruvzdornost a korozivzdornosti, a to i za zvýšených teplot. Superslitiny se běžně používají pro tepelně namáhané součásti - nad 750 °C, což je mezní teplota pro využití žáruvzdorných ocelí, při které si udrží svou vysokou pevnost, rozměrovou stálost a odolnost vůči oxidaci a korozním prostředí. [12, 14]

Dle druhu základního materiálu lze superslitiny rozdělit do tří skupin: superslitiny na bázi niklu, kobaltu a na bázi železa. Superslitiny na bázi niklu a kobaltu jsou si velmi podobné hustotou, teplotou tání a oba kovy spojuje základní austenitická struktura s plošně centrovanou kubickou matricí. V současné době se používají zejména superslitiny niklu, u nichž je převládajícím prvkem nikl, který společně s dalšími přísadami tvoří základní matrici γ. Nikl patří do skupiny materiálů, které velmi dobře odolávají atmosférické i vodní korozi a vyznačuje se bílou barvou. [12, 13]

4.1 Superslitiny na bázi Ni

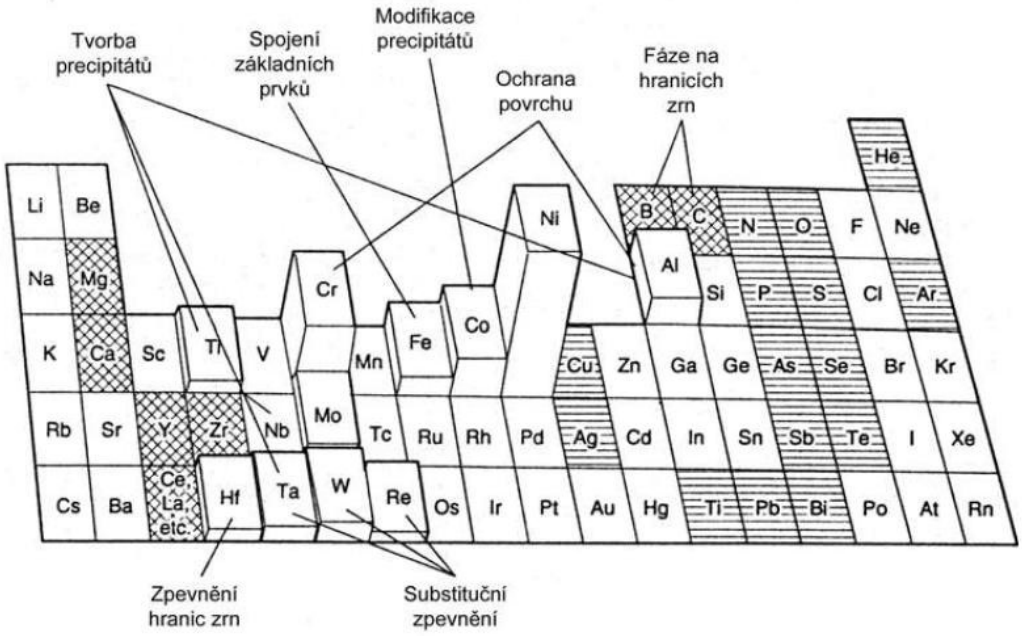
Abychom mohli superslitiny snadno a efektivně obrábět, musíme znát jejich strukturu a jejich specifické vlastnosti s chemickým složením. Superslitiny na bázi niklu jsou vytvrditelné materiály, substitučně nebo precipitačně zpevněné materiály, jejichž vlastnosti jsou přímo závislé na chemickém složení, struktuře a tepelném zpracování. Používají se v extrémních podmínkách pro teplotně a mechanicky namáhané strojní součásti v energetickém, chemickém a nejčastěji leteckém průmyslu. Aby se zde uplatnily, musí splňovat specifické vlastnosti: vysoké pevnostní charakteristiky, výborná odolnost vůči creepu a oxidaci za vysokých teplot. Na základě těchto vlastností se niklové superslitiny dělí na korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné. [12, 13]

4.2 Chemické složení Ni superslitin

Požadované vlastnosti niklových superslitin jako korozivzdornost, žáruvzdornost a žárupevnost, přímo souvisí s jejich chemickým složením. Určuje možnou pevnost materiálu i jeho korozní odolnost vůči agresivním prostředím. Niklové superslitiny jsou

tvořeny hlavně niklem a v kombinaci s dalšími legujícími prvky tvoří základní matrici γ. Nejčastěji se jedná o chrom, kobalt, hliník a další přísadové prvky, jako wolfram, niob či molybden.

Jak už bylo výše zmíněno, slitiny na bázi niklu jsou z chemického hlediska velice komplexní. Přísadové prvky mají různé účinky, které ovlivňují vlastnosti superslitin. Některé vstupují do matrice a zajišťují zde např. zvýšení pevnosti (Mo, Ta, W, Re, Nb), odolnost vůči oxidaci (Cr a Al), žáruvzdornost (Ti), fázovou stabilitu (Ni). Další funkcí přísadových prvků Ti a Al je tvorba vytvrzující fáze γ´. V současné době lze vylepšovat vlastnosti superslitin hlavně kontrolou čistoty a mikrolegováním.[12, 13]

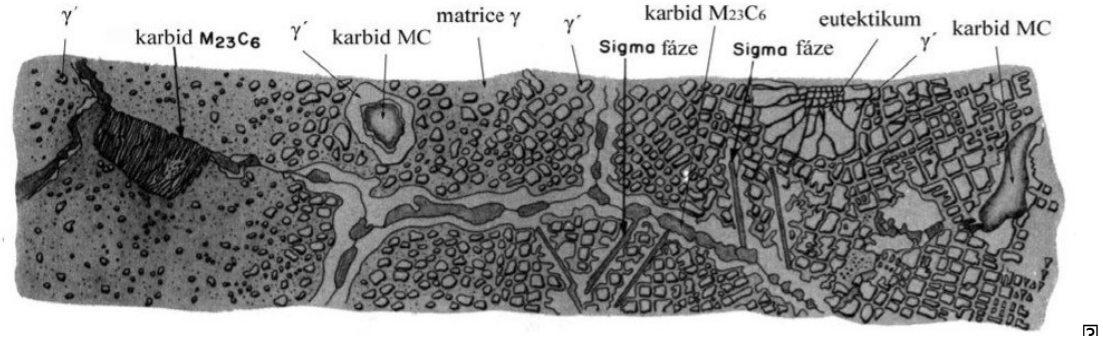


Obr. 4.1 Vliv přísadových prvků na vlastnosti Ni slitin [15]

4.3 Struktura Ni superslitin

Základní strukturu každé niklové slitiny, ať už kované či lité tvoří fáze γ (tuhý roztok Ni, Cr, Co, Mo a dalších prvků). Z předchozí kapitoly vyplynulo, že se ve slitinách na bázi niklu objevuje velké množství rozmanitých fází. Jejich výskyt závisí nejen na chemickém složení, hlavních legujících a přísadových prvcích, tepelném zpracování, ale také na pracovních podmínkách, kterým jsou vystaveny. Fáze γ tvoří matrici, která vyplňuje prostor mezi precipitáty, vykazuje menší mez kluzu, ale větší tvárnost. Mezi sekundární složky niklových superslitin patří vytvrzující fáze γ´, fáze γ´´, vyloučené primární karbidy (MC) a sekundární ($M_{23}C_6$. M_6C, M_7C_3). Fáze γ´ má nejvýznamnější vliv na mechanické vlastnosti niklových superslitin. Bývá označována jako

intermetalická sloučenina s kubickou plošně centrovanou mřížkou, která se vyznačuje vysokou mezí kluzu, ale v porovnání s matricí je křehká. Mezi základní matricí a intermetalickou fází γ´ se vyskytuje koherentní rozhraní (podobené krystalické uspořádání), což za zvýšených teplot (600 – 800 °C) způsobuje zpomalení pohybu dislokací a zpevnění materiálu. Dalším zvyšováním teploty dochází ve struktuře niklových superslitin ke zhrubnutí jednotlivých precipitátů fáze γ'. Čím vyšší teplota je, tím intenzivnější je tento jev. Následkem tohoto jevu dojde k propojování částic vytvrzující fáze γ'. Nakonec dochází k raftové morfologii nebo raftingu (spojení částic fáze γ' do řetízků nebo blokových útvarů s úplnou ztrátou koherence) a snížení meze zpevnění materiálu. [15, 16]



Obr. 4.2 Vývoj mikrostruktury [15]

4.4 Obrábění Ni superslitin

Technologie obrábění za poslední dvě desetiletí zaznamenala mohutný rozvoj, což dokládá její masivní použití v průmyslové praxi. Inovované technologie v kombinaci s jednotlivými metodami obrábění dosáhly do určité míry svého vrcholu. Podstatnou část ve strojírenské výrobě tvoří třískové obrábění, na které navazuje celá řada metod experimentálních analýz. Tyto analýzy slouží nejen k ověřování navrhovaných řešení, ale i k identifikaci významných aspektů řezného procesu. Při řešení experimentálních analýz je důležité identifikovat správně jednotlivé parametry, které ovlivňují řezný proces, především z důvodu dodržení efektivnosti a flexibility procesu obrábění.

Vývoj v oblasti třískového obrábění superslitin má jednoznačně za cíl zvyšování produktivity jejich obrábění. Superslitiny lze vzhledem k jejich specifickým vlastnostem zařadit mezi těžkoobrobitelné materiály. Přestože tyto slitiny nejsou výjimečně tvrdé materiály, tak jejich vysoká pevnost za zvýšených teplot a vysoká houževnatost mají podstatný vliv na jejich obrobitelnost. Obrábění superslitin na bázi niklu je tedy velmi

problematické a to pro každou operaci. Z hlediska obrábění a obrobitelnosti superslitin jsou specifické i požadavky kladené na konkrétní technologie, obráběcí stroje, nástroje a řezné materiály, řezné podmínky. Při obrábění superslitiny se výrazně zvyšuje mechanické a tepelné zatížení břitů obráběcího nástroje i obráběného povrchu. [12, 13, 17]

Dále jsou superslitiny niklu zatřiďovány do pěti skupin obrobitelnosti, protože je mezi nimi určitý rozdíl, který vyvolává jejich způsob zpracování, chemické složení a základní struktura. Obrobitelnost tvářených a litých slitin niklu skupin I. až IV. není rozdílná. Jejich struktura má příznivý vliv na tvorbu třísky, otupení nástroje a kvalita obrobeného povrchu. Odlitky V. skupiny jsou těžkoobrobitelné slitiny s hrubozrnou strukturou a nízkou pevností po hranicích zrn. [18]

Tab. 4.1 Třídy obrobitelnosti Ni superslitin [18]

Třídy obrobitelnosti				
1	2	3	4	5
Slitiny tvářené/lité				**Slitiny lité**
hl. skupiny	**nevytvrditelné**	**vytvrditelné**		**žáropevné**
I.) Ni-Cu	II.) Ni-(Cr)-Mo III.) Ni-Fe-Cr Leg IV.) Ni-Cr-Fe Leg	III.) Ni-Fe-Cr IV.) Ni-Cr-Fe V.) Ni-Cr-Co		(zvláštní složení)

4.5 Materál Inconel

Inconel je registrovaná obchodní značka americké společnosti Special Metals Corporation. Patří do skupiny austeniticko nikl-chromových superslitin. Typické využití Inconelu je pro výrobu prvků odolávajících vysokým teplotám. Do skupiny Inconelů patří tři základní materiály, a to Inconel 600, Inconel 625 a Inconel 718. Z důvodu většího počtu legujících prvků je tabulka rozdělena na dvě části. Do experimentu byl použit materiál Inconel 625.

Tab. 4.2 Chemické složení slitin Inconel 625 [19]

prvek	**Ni**	**Cr**	**Fe**	**Mo**	**Nb**	**Si**	**P**
hm [%]	58%	20-23%	5% max.	8 - 10%	3 - 4%	0,5% max	1,50%
prvek	**Al**	**Mn**	**C**	**Co**	**Ti**	**Si**	
hm [%]	0,4% max	0,5% max	0,1% max	1% max	0,4% max	0,5% max	

4.6 Analýza současného stavu obrábění niklových superslitin

Vývoj v oblasti třískového obrábění niklových superslitin má za cíl zvyšování produktivity. Niklové superslitiny lze vzhledem k jejich specifickým vlastnostem zařadit mezi těžkoobrobitelné materiály. Přestože tyto slitiny nejsou výjimečně tvrdé materiály, tak jejich vysoká pevnost za zvýšených teplot, vysoká houževnatost a nízká tepelná vodivost má podstatný vliv na jejich obrobitelnost. Obrábění superslitin na bázi niklu je tedy velmi problematické, a to pro každou operaci. Z hlediska obrábění a obrobitelnosti superslitin jsou specifické i požadavky na konkrétní technologie, obráběcí stroje, nástroje a řezné materiály, řezné podmínky.

Zhoršená obrobitelnost niklových superslitin si vyžádala vývoj nových obráběcích nástrojů a řezných materiálů, návrh a konstrukci řezné geometrie, experimentální testování a volbu řezných parametrů obrábění, které by umožnili snadné a efektivní obrábění niklových superslitin a obdobných materiálů. [12, 13, 17]

4.7 Vlastnosti a použití

Inconelové slitiny jsou korozivzdorné materiály vhodné pro použití v extrémních podmínkách. Při ohřátí na vysokou teplotu se na povrchu vytvoří stabilní tlustá oxidační vrstva, která chrání povrch slitiny před nepříznivými vlivy. Při vysokých teplotách, kdy hliník a ocel ztrácejí pevnost a nejsou schopné plnit funkci, Inconel dosahuje neměnných vlastností, díky malému množství niobu, který společně s niklem tvoří intermetalickou sloučeninu Ni_3Nb v podobě malých kubických krystalů zabraňujících deformaci při zvýšených teplotách.

Vzhledem k specifickým vlastnostem slitiny Inconel 625, které ovlivňují její obrobitelnost, je důležité správně zvolit obráběcí stroj, nástroj a řezný materiál, řeznou geometrii a podmínky, za kterých se bude daný materiál obrábět. Důležitost především vyplývá z velmi vysoké pevnosti materiálu za zvýšených teplot, houževnatosti, nízké tepelné vodivosti a sklonu ke zpevňování povrchu materiálu v průběhu obrábění. Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů, speciálních slitin a tedy i Inconelu 625 se doporučuje používat stroje s vysokým výkonem a tuhostí konstrukce. [12,13]

4.8 Doporučená geometrie nástroje pro soustružení

Jednobřité soustružnické nástroje musí mít pozitivní geometrii, aby byl materiál odřezáván a ne odhrnován, což by nastalo při použití nástroje s negativní geometrií. Sekundární funkce pozitivní geometrie je odvádění třísek z obrobeného povrchu. Stranový řezný úhel musí být dostatečně velký, aby zajistil potřebnou drsnost povrchu, ale ne příliš velký, aby zajistil adekvátní podporu řezné hraně. Doporučené velikosti jsou uvedeny v tabulce 4.3. Niklové slitiny nemají při vhodné volbě nástrojů problémy s tvorbou vyhovující třísky. Pouze při použití nástrojů z rychlořezných ocelí je doporučeno použití lamače třísky.

Tab. 4.3 Doporučená geometrie nástroje

Úhel	Hrubování	Dokončování
Úhel hřbetu (α)	0°	8°
Úhel čela (ϒ)	6°	8°
Sklon ostří (λ)	6°	8°
Úhel ostří ($Ж_r$)	do 45°	do 45°

5. Hodnocení integrity obrobeného povrchu

Integritou povrchu se zabývá norma ANSI B211.1 1986. Integrita povrchu závisí na výrobních metodách a podmínkách obrábění, které ovlivňují funkčnost povrchové vrstvy. S technickým vývojem stoupají nároky na kvalitu a produktivitu výroby, jsou kladeny vysoké nároky na předepsaný tvar a rozměr. Integrita povrchu je dána vhodným využitím technologických metod na obráběný materiál a má bezprostřední vliv na jakost obráběné plochy.

Integritu povrchu charakterizuje soubor charakteristik, popisující funkční vlastnosti povrchu součásti.

K těmto charakteristikám řadíme [27]:

- Topografie povrchu (geometrické charakteristiky povrchu)
- Strukturní a fyzikálně-chemické změny v povrchové vrstvě
- Stupeň, hloubka a charakter zpevnění
- Smysl, velikost a průběh reziduálních pnutí

Nejdůležitější ukazatele, podle nichž sledujeme kvalitu povrchu [27]:

- Makrogeometrie obrobené plochy
- Mikrogeometrie obrobeného povrchu
- Fyzikálně-mechanické změny v povrchové vrstvě (tvrdost, zpevnění, zbytkové pnutí pod obrobeným povrchem)
- Fyzikálně chemický stav povrchu

5.1 Drsnost obráběného povrchu dle ISO 4287

Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle a které vznikají vadami materiálu, poškozením aj. Podle převládajícího směru nerovností se drsnost posuzuje v příčném nebo podélném směru. Parametry drsností se vyhodnocují

na skutečných profilech, které se získávají jako průsečnice kolmé nebo šikmé roviny se skutečným povrchem.[12]

Měření a hodnocení geometrické struktury povrchu součástí je důležitým faktem v základních experimentálních výzkumech a také v praxi. Obzvláště se to týká drsnosti povrchu, protože má veliký vliv na kvalitu jednotlivých částí strojů. Ve strojírenském průmyslu se klade velký důraz na výrobu povrchů s optimální drsností. Drsnost povrchu je jedním ze základních ukazatelů jakosti technologických procesů, a proto je zde neustálá potřeba jeho měření a hodnocení. [12]

5.1.1 Měření drsnosti povrchu

Tvar mikrogeometrických nerovností obrobených povrchů je velmi rozmanitý. Aby bylo možné kvantitativně hodnotit drsnost povrchů, byla přijata evropská norma ISO 4287. Drsnost povrchu je definována jako část geometrických odchylek s relativně malou vzdáleností nerovností. Tím se odlišuje od makrogeometrie a vlnitosti povrchu. [29]

Mikrogeometrii povrchu můžeme určit přímým měřením profilu různými přístroji.

Rozdělení metod měření:

- Kvalitativní (porovnávací) – porovnání povrchu součásti se vzorky povrchů ethalonů
- Kvantitativní (parametrické) – určení číselných hodnot parametrů povrchu součásti dle příslušné normy.

Způsoby měření drsnosti povrchu [29]**:**

- Kontrola porovnávání s etalony drsnosti
- Měření metodou světelného řezu
- Měření s využitím interference světla
- Měření profilovými drsnoměry

V praxi je pro měření drsnosti povrchu nejčastěji používána metoda přímého měření profilovými drsnoměry. Při použití této metody se přímo odečítají číselné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti. Využívá se pro nejmodernější statické i spektrální hodnocení nerovností povrchu.

Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu jsou následující [29]:

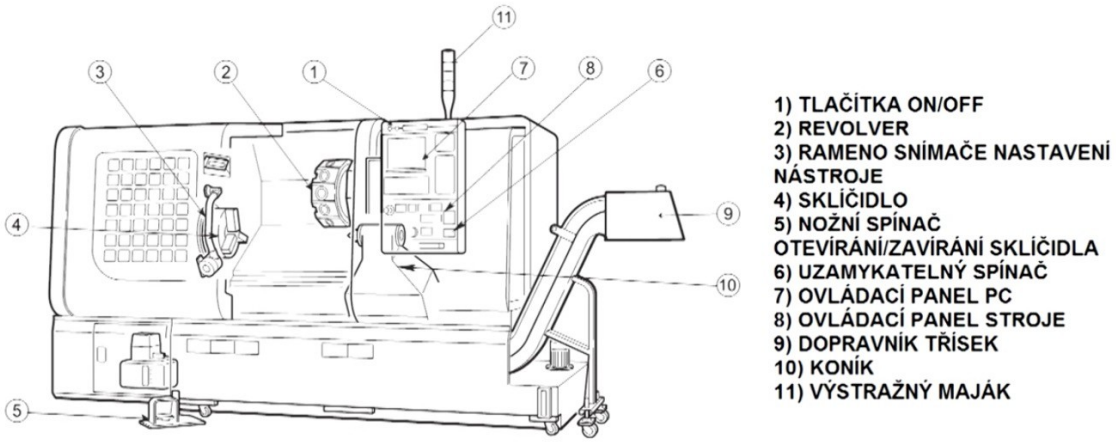
- Průměrná aritmetická úchylka *Ra*
- Největší výška profilu *Rz*
- Průměrná kvadratická úchylka profilu *Rq*
- Celková výška profilu *Rt*
- Nejvyšší výška výstupku profilu *Rp*
- Největší hloubka prohlubně profilu *Rv*.

6. Experimentální část

Cílem experimentu bylo porovnat vliv opotřebení na řezivost VBD při obrábění niklové slitiny Inconel 625. Testování bylo realizováno přímo ve školních prostorách VŠB TU v Ostravě na CNC obráběcím stroji Mori Seiki NLX 2500/700. Celkem byly zkoušeny dva druhy řezných materiálů – řezná keramika a kubický nitrid bóru. Pro oba druhy řezných materiálů byly použité stejné řezné podmínky, kde se měnila pouze řezná rychlost. Po uskutečnění těchto experimentů byl přidán ještě jeden pokus, kdy byly opět řezné podmínky u obou řezných materiálů stejné, avšak byl zvýšen posuv. Řezný materiál, který dosáhne menšího opotřebení na hřbetě a bude mít lepší řezivost s kombinací lepší drsnosti obrobeného povrchu, bude zvolen jako vhodnější řezný materiál, pro soustružení niklové slitiny Inconel 625.

6.1 Obráběcí stroj

Pro obrábění niklových slitin a tím i Inconelu 625 je doporučeno používat nejtužší možný stroj, který máme k dispozici. Jelikož obrábění probíhalo na území naši školy VŠB-TU Ostrava, měli jsme k dispozici pouze jednu variantu a to horizontální soustruh DMG Mori Seiki NLX 2500/700, který zajišťuje maximální stabilitu rychlosti s vysokou mírou přesnosti. Obráběný materiál byl na soustruhu upnut do sklíčidla a zajištěn pomocí koníku.



Obr. 6.1 Popis CNC soustruhu NLX 2500/700

Tab. 6.1 Technické údaje CNC soustruhu

Maximální průměr soustružení	366 mm
Standardní průměr soustružení	271 mm
Maximální délka soustružení	705 mm
Pojezd v ose X	260 mm
Pojezd v ose Z	795 mm
Maximální otáčky vřetena	4000 mm^{-1}
Kapacita nástrojů	12
Rychloposuv v ose X a Z	30000 $mm.min^{-1}$
Rychloposuv koníka	20000 $mm.min^{-1}$
Pojezd koníku	734 mm
Výkon vřetena stroje	18,5/18,5/15 kW
Šířka x hloubka stroje	3994x1980 mm
Hmotnost	5500 kg

6.2 Obráběný materiál

Pro provedení experimentu byl zvolen materiál Inconel alloy 625®. Je to chromniklová slitina, která se vyznačuje vysokou pevností a vynikající odolností zejména proti důlkové, štěrbinové a mezikrystalové korozi. Vysokou pevnost získává díky zpevňujícímu účinku molybdenu a niklu, má vysokou odolnost proti procesu oxidace při vyšších teplotách a není nutné ji kalit až do teploty 1050°C. Další užitečnou vlastností je fakt, že si zachovává vynikající mechanické vlastnosti při extrémně nízkých a extrémně vysokých teplotách a má dobrou odolnost vůči dusičné, fosforečné, sírové a chlorovodíkové kyselině a proti alkáliím. [31, 32]

Tab. 6.2 Mechanické vlastnosti [31]

Měrná hmotnost [$g \cdot cm^{-3}$]	8,44
Rm [MPa]	862
$Rp_{0,2}$[MPa]	448
A [%]	50
Tvrdost [HB]	200

Tab. 6.3 Chemické složení [32]

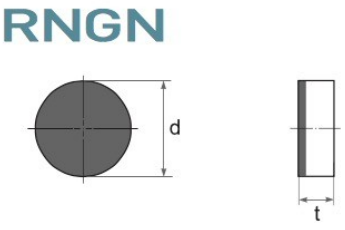
Prvek	hm. %	Prvek	hm. %
Nikl	58 min	Křemík	0,50 max
Chrom	20,0 ÷ 23,0	Fosfor	0,015 max
Železo	5,0 max	Síra	0,015 max
Molybden	8,0 ÷ 10,0	Hliník	0,40 max
Niob (plus Tantal)	3,15 ÷ 4,15	Titan	0,40 max
Uhlík	0,10 max	Kobalt	1,0 max
Mangan	0,50 max		

6.3 Volba řezných nástrojů a řezných materiálů

Pro provedení experimentu byly zvoleny kruhové vyměnitelné břitové destičky od dvou firem. Z firmy Seco Tools s.r.o. byla použita vyměnitelná břitová destička z kubického nitrido bóru s označením RNGN 090300E25,CBN 170. Od firmy Ssangyong Cement Industrial Co., Ltd. byla použita destička z řezné keramiky s označením RNGN 090300 E042,SN 800. Tyto destičky byly upínány do nožového držáku firmy Seco Tools s.r.o. s označením CRSNL 2525M09.

6.3.1 Použitá VBD firmy Ssangyong Cement Industrial Co., Ltd.

Ssangyong Cement Industrial Co., Ltd. je součástí holdingu Ssangyong Business Conglomerate založeného v roce 1962. Společnost je zaměřena na výrobu magnetických a keramických materiálů pro průmysl. Keramické materiály produkované společností Ssangyong se používají jak v průmyslových, tak i v domácnostech. Největší zkušenosti má společnost s výrobou keramických vyměnitelných břitových destiček.



Obr. 6.2 Rozměry VBD RNGN 090300 E042 [26]

RNGN 090300 E042, SN 800

Rozměry:

d= 9,52 mm

t= 3,18 mm

Základní charakteristika:

SN800 – keramika na bázi nitridu křemíku s vysokou stabilitou ostří a dobrou vrubovou houževnatostí. Pro vysokorychlostní soustružení a frézování žáruvzdorných materiálů, vhodná především pro hrubovací aplikace. Destička má fazetku, která zpevňuje břit a zabraňuje rychlému opotřebení.

Doporučené řezné podmínky

Doporučené řezné podmínky pro keramickou VBD s označením SN 800 jsou uvedeny v tabulce 6.4.

Tab. 6.4 Řezné podmínky dle ISO 513 [26]

OZNAČENÍ VÝROBCE	OBRÁBĚNÝ MATERIÁL	ŘEZNÁ RYCHLOST v_C [m.min^{-1}]	HLOUBKA ŘEZU a_p [mm]	POSUV NA OTÁČKU f [mm]	DRUH OBRÁBĚNÍ
SN 800	Žáruvzdorné materiály	150 ÷250 150÷450	<5,0 <1,0	0,2÷0,4 0,1÷0,2	hrubování dokončování

6.3.2 Použitá VBD firmy Seco Tools s.r.o.

Seco Tools s.r.o. je společnost známá svým sortimentem nástrojů a destiček pro frézování, soustružení a další oblasti obrábění.

Obr.6.3 VBD CBN 170 [28]

RNGN 090300 E25, CBN 170

Obr. 6.4 Rozměry VBD RNGN 090300 E25 [28]

Rozměry:

D=9,525 mm

s= 3,18 mm

E25= honovaná 25µm

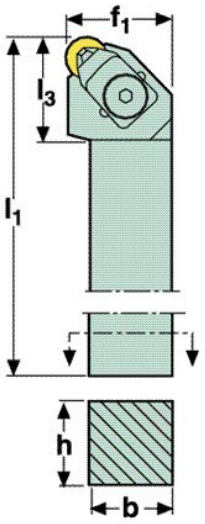
CBN 170 – kubický nitrid bóru, speciálně navržený pro obrábění vysoce legovaných slitin na bázi niklu. Obsahuje jedinečné pojivo whisker, které zvyšuje životnost nástroje, nemá fazetku.

Tab. 6.5 Řezné podmínky

OZNAČENÍ VÝROBCE	**OBRÁBĚNÝ MATERIÁL**	**ŘEZNÁ RYCHLOST v_C [m.min^{-1}]**	**HLOUBKA ŘEZU a_P [mm]**	**DRUH OBRÁBĚNÍ**
CBN 170	Legované slitiny na bázi niklu	300 ÷400	Do 0,5	dokončování

6.3.3 Použitý nožový držák

Nožový držák použitý na upínání břitových destiček měl zápornou geometrii břitu γ_o=-6°, λ_s =-6°. Destičky se upínají do lůžka pomocí pákového mechanizmu. Do nožového držáku typu CRSNL 2525 M09 od firmy Seco se upínají destičky ve tvaru kruhu. Nožový držák je zobrazen na obrázku 6.5.



Rozměry:

h= 25 mm

b= 25 mm

l_1=150 mm

f_1= 32 mm

l_3= 29 mm

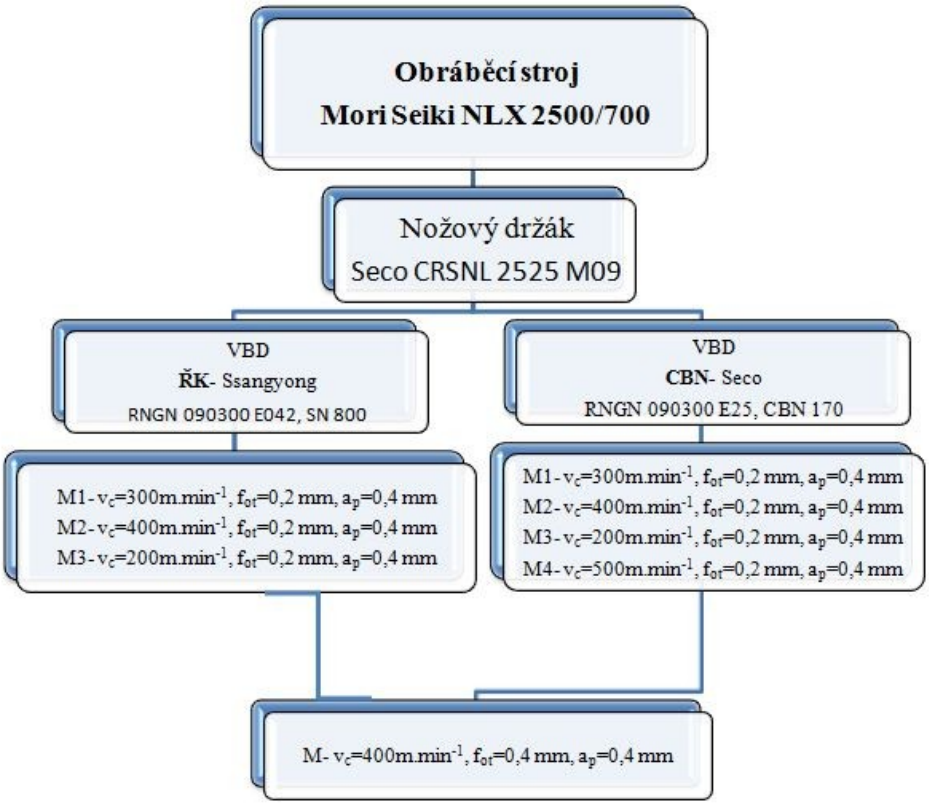
Obr. 6.5 Nožový držák CRSNL 2525 M09 [28]

6.3.4 Volba řezných podmínek

Volba řezných podmínek byla zvolena tak, aby byly pro obě vyměnitelné břitové destičky stejné, přičemž bylo zohledněno doporučení výrobce. Hloubka řezu byla v průběhu celého experimentu konstantní a byla navržena dle druhu operace, jako dokončovací soustružení a dále byla zohledněna podle doporučených hodnot výrobců VBD. Všechny prováděné experimenty měly konstantní hloubku řezu a_p = 0,4 mm. Při volbě hodnoty posuvu f a řezné rychlosti v_c se vycházelo převážně z toho, aby byl materiál co nejrychleji odebrán a také z doporučených hodnot. Z těchto důvodů byla pro provedení experimentů zvolena hodnota posuvu f = 0,2 mm, aby bylo možné co nejlépe porovnat destičky Ssangyong a Seco Tools. Dále byly zvoleny tři základní řezné rychlosti a to v_{c1} = 300 m·min^{-1}, v_{c2}=400 m·min^{-1} a v_{c3}=200 m·min^{-1}. Během experimentu byly doplněny nové řezné podmínky, viz v následujícím schématu experimentu.

Tab. 6.6 Základní použité řezné podmínky

Měření	**v_c [m·min^{-1}]**	**f [mm]**	**a_p [mm]**
M1	300	0,2	0,4
M2	400	0,2	0,4
M3	200	0,2	0,4



Obr. 6.6 Schéma návrhu obrábění

6.4 Měřicí přístroje použité v experimentu

6.4.1 Měření opotřebení

Měření opotřebení hřbetu vyměnitelných břitových destiček bylo realizováno mikrometrickou metodou, při které je velikost opotřebení určována přímým měřením lineárních rozměrů. Na experiment byl použit mikroskop, který je vybavený digitální kamerou a umožňuje několikanásobně zvětšit obraz. Mikroskop bylo možné připojit k počítači, ve kterém se dalo pomocí programu Motic Images Plus 2.0 ML on-line změřit opotřebení vyměnitelné břitové destičky. Pro správné naměření hodnoty opotřebení vyměnitelné břitové destičky bylo třeba provést kalibraci softwaru. Kalibrace se provede pomocí kalibrační měrky, která se vyfotografuje při stejném zvětšení jako měřená vyměnitelná břitová destička. Všechna zmíněná zařízení a program pro měření opotřebení jsou dostupná ve škole přímo v místnosti obráběcího stroje.

Mikroskop

K měření opotřebení byl použit digitální mikroskop Deluxe od firmy Celestron, LLC**.** Na tomto přístroji byly pořízeny snímky opotřebovaných VBD, ze kterých se určovaly hodnoty jednotlivých opotřebení. U tohoto mikroskopu je možné jak focení, tak nahrávání videa.

Obr. 6.7 Digitální mikroskop Deluxe [33]

Tab. 6.7 Technické údaje [33]

Zvětšení: 10x - 40x až150x
LED osvětlení
Připojení i napájení přes USB 2.0 kabel
Kamera: 2 MPx
Kovový stojan
Rozměry: 108 mm x 32 mm
Hmotnost: 113 g

6.4.2 Výpočet objemu odebraného materiálu

Objemem odebraného materiálu se rozumí, kolik milimetrů krychlových materiálu břit vyměnitelné břitové destičky obrobil do dosažení předem dané hodnoty opotřebení na hřbetě nástroje. Tato hodnota byla změřena, respektive vypočítána z času, z aktuální řezné rychlosti, posuvu a hloubky řezu podle vztahů:

Výpočet otáček

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D_m} \tag{6.1}$$

kde: n - otáčky vřetena [min^{-1}]

v_c - použitá řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$]

D_m - aktuální obráběný průměr [mm]

Výpočet času do dosažení zvolené hodnoty VB_B

$$t_i = \frac{l_m}{f_n \cdot n} \tag{6.2}$$

kde: t_i – čas do dosažení zvolené hodnoty VB_B [min]

l_m - řezná délka [mm]

f_n - aktuální posuv na otáčku [mm]

n - otáčky vřetena [min^{-1}]

Objem odebraného materiálu

$$V = v_c \cdot a_p \cdot f_n \cdot t_i \tag{6.3}$$

kde: V - objem odebraného materiálu [mm^3]

v_c - použitá řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$]

a_p - použitá hloubka řezu [mm]

f_n -aktuální posuv na otáčku [mm]

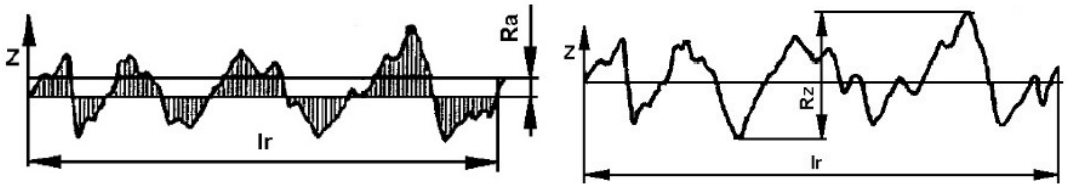
t_i – čas do dosažení zvolené hodnoty VB_B [min]

6.4.3 Měření drsnosti povrchu

Pro vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu byly zvoleny dva parametry, a to Ra a Rz:

Ra [μm] - průměrná aritmetická úchylka profilu - aritmetický průměr absolutních hodnot v rozsahu základní délky,

Rz [μm] - největší výška profilu - součet výšky největšího výstupku a hloubky největší prohlubně v rozsahu základní délky.



Obr. 6.8 Použité parametry drsnosti Ra a Rz [34]

Drsnoměr

Drsnost povrchu byla měřena pomocí drsnoměru Surftest SJ-210 od firmy Mitutoyo, který má funkci automatické dynamické kalibrace, snímač s vysokým rozlišením, velký rozsah měření a výměnnou posuvovou jednotku pro měření v těsných prostorech. Drsnoměr SJ-210 umožňuje hodnocení struktury povrchu, vlnitosti povrchu a mnoha dalších parametrů dle různých národních i mezinárodních norem. Naměřené hodnoty se na displeji zobrazují digitálně nebo graficky.

Princip měření tímto přístrojem spočívá v tom, že dotykový hrot snímací jednotky zaznamenává drobné nepravidelnosti povrchu měřeného výrobku. Drsnost povrchu se stanoví na základě vertikálního posunu dotykového hrotu způsobeného přejížděním hrotu po nepravidelnostech povrchu.

Obr. 6.9 Drsnoměr Surftest SJ - 210 [35]

Tab. 6.8 Technické údaje [35]

Zdvih (rozsah osy Z)	[µm]	350
Posuv (rozsah osy X)	[mm]	12,5
Rychlost najetí (měření)	[mm·s^{-1}]	0,25; 0,5
Rychlost zpětného posuvu	[mm·s^{-1}]	0,8
Poloměr snímacího hrotu	[µm]	2
Měřící síla	[mN]	0,75

6.4.4 Výpočet výběrového průměru a standardní nejistoty:

Výběrový průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (6.4)$$

kde: $\bar{x}$ - výběrový průměr

x_i - jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x

n - počet měření

Standardní nejistota typu A:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{6.5}$$

kde: u_A – standardní nejistota typu A

$\bar{x}$ - výběrový průměr

x_i – jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x

n – počet měření

Standardní nejistota typu B:

$$u_B = \frac{U}{k_r} \tag{6.6}$$

kde: U – rozšíření nejistota

u_B – standardní nejistota typu B

k_r – koeficient

Standardní nejistota typu C:

$$u_c = \sqrt{u_A{}^2 + u_B{}^2} \tag{6.7}$$

kde: u_A – standardní nejistota typu A

u_B – standardní nejistota typu B

u_c – standardní nejistota typu C

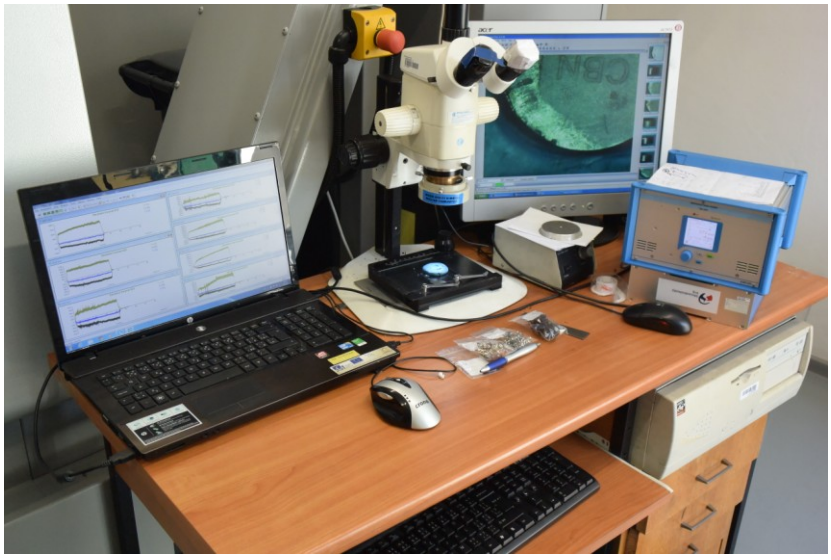
7. Zpracování a srovnání výsledků měření

Měření opotřebení vyměnitelných břitových destiček bylo prováděno v době, když bylo přerušeno obrábění. Každá řezná délka byla 100 mm. Z polotovaru bylo pro každou destičku odebráno vždy tolik úběrů materialu, kolik byla schopná VBD vydržet do úplného opotřebení, nebo do výrazně většího opotřebení, než byla zvolená hodnota opotřebení na hřbetě VB_B=0,6 mm. Za situace, kdy by destička zvádla ještě pár přejezdů, ale už by byla za zvolenou hranicí opotřebení, byly zapsány a změřeny dosavadní výsledky – z důvodu omezeného množství polotovarů. Opotřebení na čele vykazovalo nízkých/nevýrazných hodnot, díky malé hloubce řezu a_p=0,4 mm. K většímu opotřebení docházelo na hřbetu, proto bylo zvoleno jako kritérium.

Velikost opotřebení břitu destičky a drsnost obrobeného povrchu byly srovnávány vždy podle posledního přejezdu u daných řezných podmínek, a to z důvodu adekvátního porovnání mezi jednotlivými destičkami.

Drsnost povrchu byla měřena v podélném směru vždy ve třech místech na obráběném válci (po 120°). Měření drsnosti bylo provedeno současně s měřením opotřebení hřbetu jednotlivých břitů na obráběcím stroji. Z 10ti naměřených hodnot byl vypočítán výběrový průměr.

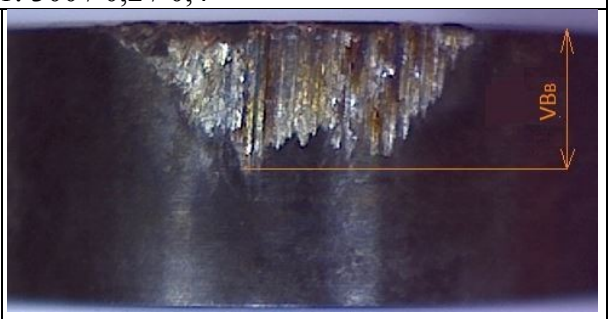
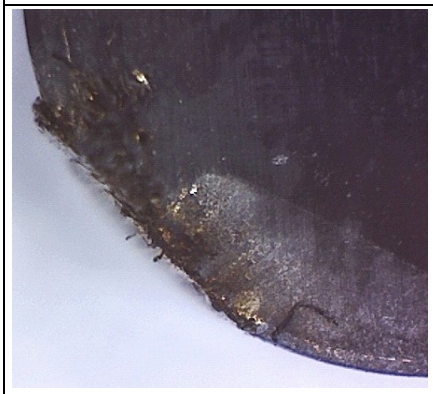
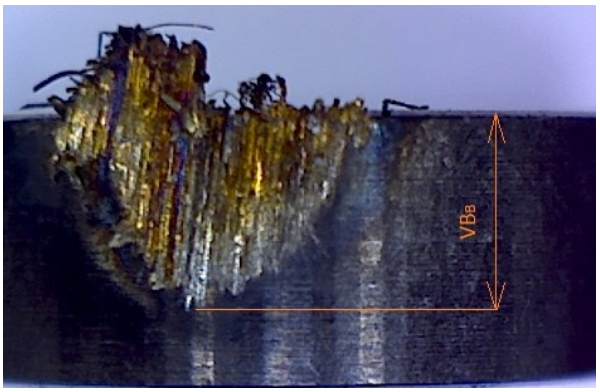
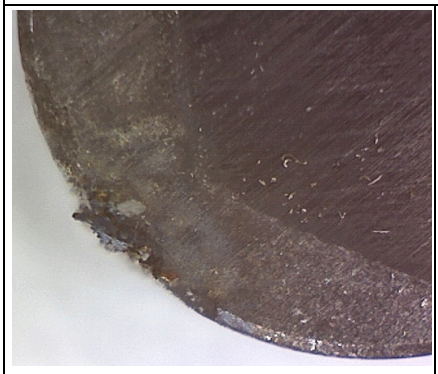
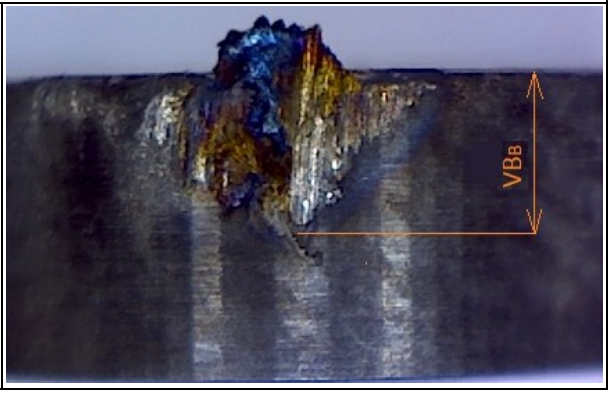
Jelikož byl experiment proveden se dvěmi různými VBD dle zvolených řezných podmínek, není v této části diplomové práce uvedena veškerá fotografická dokumentace týkající se opotřebení břitových destiček. Kompletní podklady jsou uloženy na přiloženém CD.



Obr. 7.1 Laboratorní pracoviště na VŠB – TU Ostrava

7.1 Zpracování výsledků pro ŘEZNOU KERAMIKU

Tab. 7.1 Opotřebení destiček z ŘK při různých řezných podmínkách

<table>
<tr><th colspan="4">Řezná keramika</th></tr>
<tr><th colspan="3">Foto čelo</th><th>Foto hřbet</th></tr>
<tr><th colspan="4">Řezné podmínky: v_c / f / a_p [m.min^{-1}] / [mm] / [mm]</th></tr>
<tr><td>i</td><td>KF</td><td>t_{As}</td><td>VB_B</td></tr>
<tr><td>3</td><td>0,377</td><td>2,17</td><td>2,294</td></tr>
<tr><td colspan="4">M1: 300 / 0,2 / 0,4</td></tr>
<tr><td colspan="3"> </td><td> 
</td></tr>
<tr><td>i</td><td>KF</td><td>t_{As}</td><td>VB_B</td></tr>
<tr><td>2</td><td>0,883</td><td>1,22</td><td>2,229</td></tr>
<tr><td colspan="4">M2: 400 / 0,2 / 0,4</td></tr>
<tr><td colspan="3">  </td><td> 
</td></tr>
<tr><td>i</td><td>KF</td><td>t_{As}</td><td>VB_B</td></tr>
<tr><td>3</td><td>0,370</td><td>2,94</td><td>1,870</td></tr>
<tr><td colspan="4">M3: 200 / 0,2 / 0,4</td></tr>
<tr><td colspan="3">  </td><td> 
</td></tr>
</table>

V tabulce 7.1 je dokumentováno opotřebení hřbetu a čela břitu VBD z řezné keramiky třemi řeznými podmínkami a je uveden vždy poslední naměřený přejezd a vzniklé opotřebení.

Velikosti opotřebení odpovídají hodnotám uvedeným v tabulce 7.3 Naměřené hodnoty. Stejné fotografie opotřebení i pro zbývající měření v experimentu jsou uloženy na vloženém CD.

Tab. 7.2 Hodnoty opotřebení za zvolenou kritickou hodnotou VB_B=0,6 mm

Materiál VBD	**Přejezd**	**VB_B [mm]**		
		M1	**M2**	**M3**
ŘK	**1.**	**0,697**	**0,964**	0,460
	2.	1,289	2,229	**1,130**
	3.	2,294		1,870

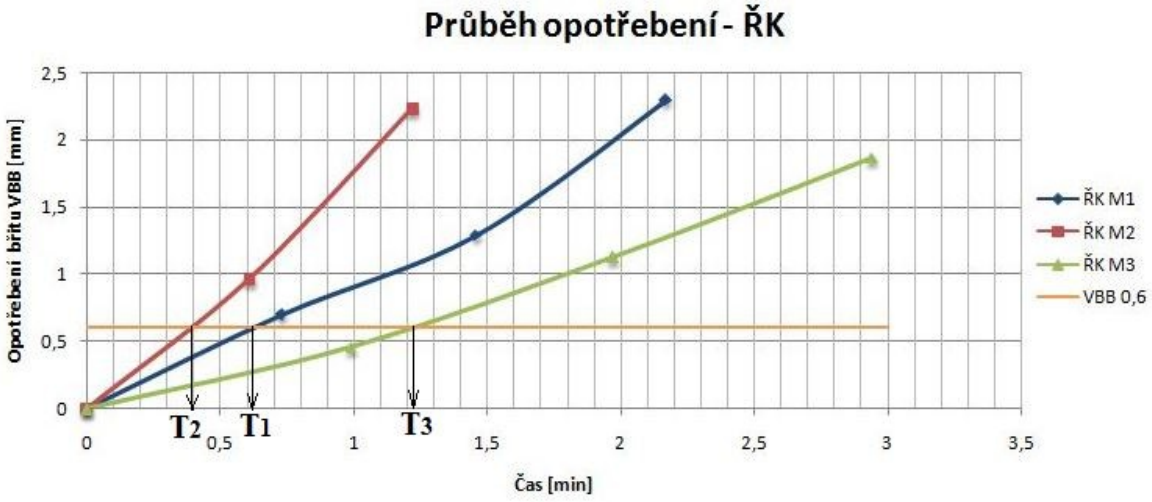
Z tabulky 7.2 vyplývá, že již při prvním přejezdu s řeznými podmínkami M1 byla překročena zvolená kritická hodnota opotřebení na hřbetě VB_B = 0,6 mm – naměřeno 0,697 mm.

Ten samý případ nastal s řeznými parametry M2, kdy byla opět kritická hodnota překročena již při prvním přejezdu – naměřeno 0,964 mm.

Dle řezných podmínek M3 byla kritická hodnota překročena, po druhém přejezdu bylo naměřeno 1,130 mm.

Z důvodu rychlého opotřebení VBD z řezné keramiky a odpovídajícího srovnání s VBD z kubického nitridu bóru (CBN) bude porovnávána vždy velikost opotřebení a parametry drsnosti z poslední naměřené hodnoty.

Na základě měření opotřebení břitu byla vytvořena závislost na čase – T-v_c závislost – viz obrázek 7.2. Z grafu je patrný průběh opotřebení VBD tak, jak popisuje literatura. Břit se nejprve otupuje rychleji, ve druhé fázi nástroj obrábí bez výrazného zvýšení opotřebení až do momentu, kdy nastane třetí fáze, a to zrychlené opotřebení nástroje a ztráta možnosti dalšího obrábění.



Obr. 7.2 Závislost opotřebení hřbetu na čase

Z grafu 7.2 byla určena trvanlivost nástroje až do dosažení zvolené kritické hodnoty opotřebení na hřbetě VB_B = 0,6 mm pro jednotlivé řezné podmínky testované VBD. Na základě trvanlivosti byl podle vzorce 6.3 vypočítán objem odebraného materialu zobrazen na grafu 7.3. Z tabulky 7.3 byly stanoveny hodnoty drsnosti Ra a Rz pro jednotlivé řezné podmínky - vždy u posledního přejezdu.

Hodnoty trvanlivosti odečtené z grafu:

M1 … T_1=0,62 min

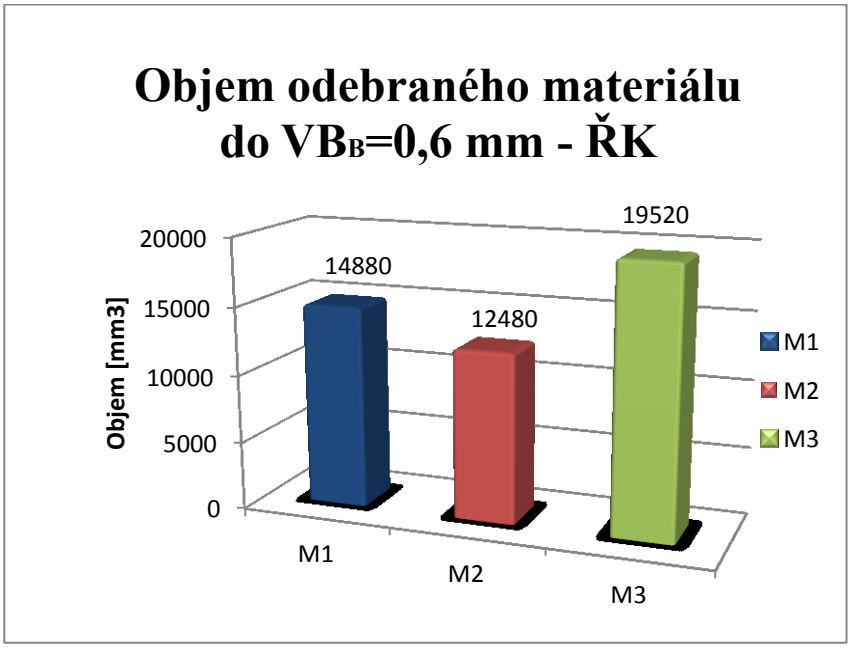
M2 … T_2=0,39 min

M3 … T_3=1,22 min

Pro vyměnitelnou břitovou destičku z ŘK byly zvoleneny řezné podmínky:

- M1: řezná rychlost v_c = 300 m·min^{-1} a posuv f = 0,2 mm, hloubka řezu a_p=0,4 mm - destička dokázala soustružit do zvoleného opotřebení VB_B=0,6 mm po dobu 0,62 min.
- M2: řezná rychlost v_c = 400 m·min^{-1} a posuv f = 0,2 mm, hloubka řezu a_p=0,4 mm vydržela v řezu 0,39 min.
- M3: řezná rychlost v_c = 200 m·min^{-1} a posuv f = 0,2 mm, hloubka řezu a_p=0,4 mm vydržela v řezu podstatně delší dobu a to 1,22 min.

Na níže uvedeném grafu 7.3 jsou uvedeny dosažené hodnoty objemu odebraného materiálu dle jednotlivých řezných podmínek vyměnitelné břitové destičky do dosažení zvolené hodnoty opotřebení na hřbetě VB_B = 0,6 mm.



Obr. 7.3 Srovnání objemů odebraného materiálu dle jednotlivých řezných podmínek

Z grafu je patrné, že nejvíce materiálu do opotřebení VB_B = 0,6 mm se odebralo s řeznými podmínkami M3. Celkový odebraný objem byl 19520 mm^3 materiálu. Druhý největší odebraný objem materiálu byl s řeznými podmínkami M1, a to 14880 mm^3. Dle řezných podmínek M2 se odebralo 12480 mm^3 materiálu.

Obr. 7.4 Vzniklá tříska za řezných podmínek:

v_c = 200 $m \cdot min^{-1}$, f = 0,2 mm, a_p=0,4 mm

po 3. přejezdu

Obr. 7.5 Vzniklá tříska za řezných podmínek:

v_c = 400 $m \cdot min^{-1}$, f = 0,2 mm, a_p=0,4 mm

po 1. přejezdu

Tab. 7.3 Naměřené hodnoty - ŘK

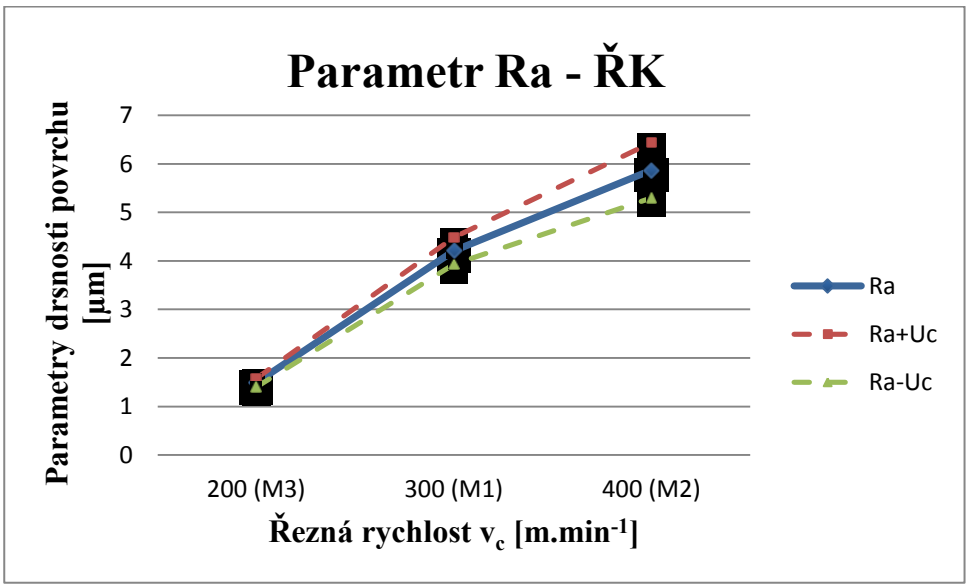
	Materiál		**v_c [m·min^{-1}]**		**f [mm]**		**a_p [mm]**		
	ŘEZNÁ KERAMIKA		**300/400/200**		**0,2**		**0,4**		
	Měření 1			**Měření 2**			**Měření 3**		
i	VB_B [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	VB_B [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	VB_B [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,697	0,69	4,32	0,964	2,82	18,53	0,460	1,04	5,63
		1,95	10,23		3,65	20,90		2,238	10,90
		5,23	19,99		3,59	19,66		1,985	11,40
$\bar{x}$		**2,46**	**11,29**		**3,47**	**18,53**		**1,76**	**9,42**
2	1,289	0,89	5,87	2,229	4,53	26,18	1,130	0,77	5,2
		4,15	19,24		4,63	21,62		1,70	11,10
		6,81	36,53		4,88	27,85		2,16	13,30
$\bar{x}$		**3,16**	**17,47**		**5,87**	**27,66**		**1,41**	**9,88**
3	2,294	4,56	26,94				1,870	1,37	6,93
		4,51	17,39					1,38	7,09
		4,76	22,65					1,95	10,59
$\bar{x}$		**4,21**	**21,17**					**1,49**	**8,56**

V tabulce 7.3 je vypočítán výběrový průměr drsnosti Ra i Rz, měřen po každém přejedu z 10ti hodnot. Pro lepší přehlednost jsou uvedeny jen 3 hodnoty (třetí, šestá a devátá hodnota).

Tab. 7.4 Parametr drsnosti Ra s nejistotou měření u_c

Parametr drsnosti ± u_c	
Měření	**$R_a \pm u_c$**
1	4,21± 0,28
2	5,87±0,57
3	1,49±0,09

V grafu 7.6 jsou uvedeny hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu Ra s nejistotou měření vždy u posledního přejezdu, dosažené při soustružení materiálu Inconel 625 při zvolených řezných podmínkách.



Obr. 7.6 Srovnání parametru drsnosti Ra

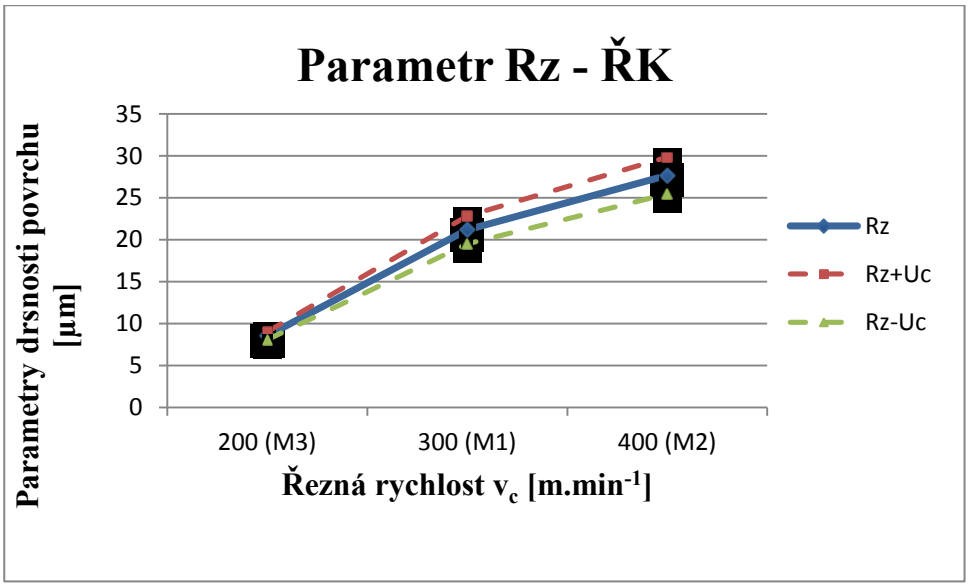
Nejlepší dosažená průměrná aritmetická úchylka profilu Ra = 1,49 µm byla s řeznými podmínkami M3. Při řezných podmínkách M1 se dosáhlo druhé nejlepší drsnosti Ra = 4,21 µm a dle řezných podmínek M2 se dosáhlo nejhorší hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu Ra = 5,87 µm.

V následujícím grafu 7.7, jsou uvedeny výběrové průměry největších výšek profilu Rz s nejistotou měření naměřených opět u posledního přejezdu.

Z výsledků meření uvedeném v tabulce 7.5 je zřejmé, že nejnižší hodnoty Rz = 8,56 µm se dosáhlo opět s řeznými podmínkami M3. Druhé nejnižší hodnoty bylo dosaženo s řeznými podmínkami M1 Rz = 21,17 µm. Jako nejhorší výsledek měření vyšlo obrábění s řeznými podmínkami M2, kde se dosáhlo drnosti Rz = 27,66 µm.

Tab. 7.5 Parametr drsnosti Rz s nejistotou měření u_c

Parametr drsnosti ± u_c	
Měření	**R_z ± u_c**
1	21,17± 1,67
2	27,66±2,20
3	8,56±0,48



Obr. 7.7 Srovnání parametru drsnosti Rz

7.2 Zpracování výsledků pro KUBICKÝ NITRID BÓRU

Při obrábění Inconelu 625 kubickým nitridem bóru byly použity stejné řezné podmínky jako u řezné keramiky (M1, M2, M3), ale pro rozšíření experimentu se přidala řezná podmínka M4:

M1: v_c = 300 m·min^{-1}, f = 0,2 mm, a_p=0,4 mm

M2: v_c = 400 m·min^{-1}, f = 0,2 mm, a_p=0,4 mm

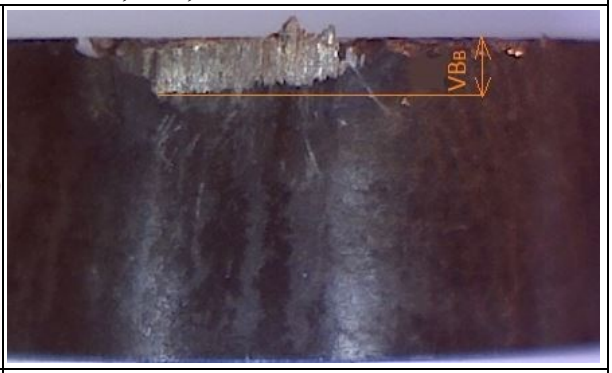
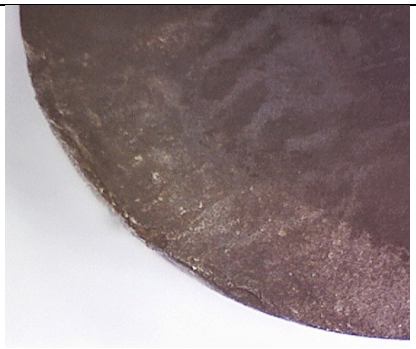
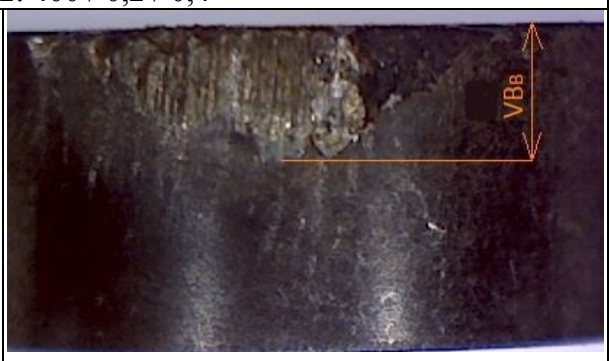
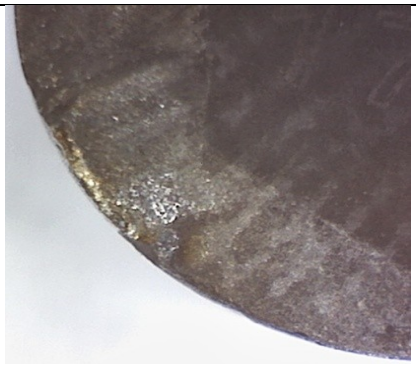
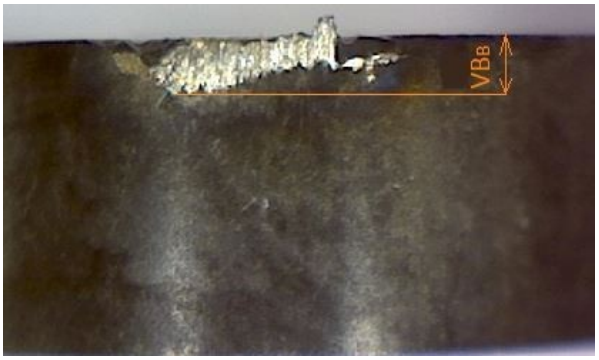
M3: v_c = 200 m·min^{-1}, f = 0,2 mm, a_p=0,4 mm

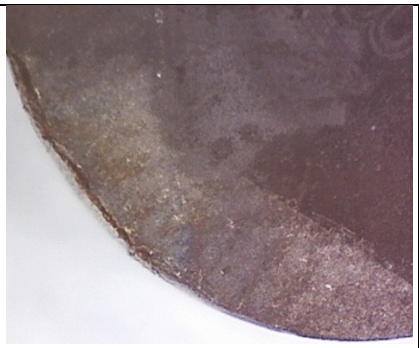
přidaná:

M4: v_c= 500 m.min^{-1}, f=0,2 mm, a_p=0,4 mm.

Zde došlo k navýšení řezné rychlosti z důvodu pomalejšího opotřebení VBD z kubického nitridu bóru oproti řezné keramice.

Tab. 7.6 Opotřebení destiček z CBN při různých řezných podmínkách

Kubický nitrid bóru			
Foto čelo			**Foto hřbet**
Řezné podmínky: v_c / f / a_p [m.min^{-1}] / [mm] / [mm]			
i	KF	t_{As}	VB_B
4	0,266	2,85	0,673
M1: 300 / 0,2 / 0,4			
			
i	KF	t_{As}	VB_B
4	0,336	2,39	1,289
M2: 400 / 0,2 / 0,4			
			
i	KF	t_{As}	VB_B
5	0,670	5,00	0,710
M3: 200 / 0,2 / 0,4			
			

i	KF	t_{As}	VB_B
4	0,295	1,87	1,548
M4: 500 / 0,2 / 0,4			
			

V tabulce 7.6 je dokumentováno opotřebení hřbetu a čela břitu VBD z kubického nitridu bóru čtyřmi řeznými podmínkami a je uveden vždy poslední naměřený přejezd a vzniklé opotřebení.

Velikosti opotřebení odpovídají hodnotám uvedeným v tabulce 7.8 Naměřené hodnoty. Stejné fotografie opotřebení i pro zbývající měření v experimentu jsou uloženy na vloženém CD.

Tab. 7.7 Hodnoty opotřebení za zvolenou kritickou hodnotou VB_B=0,6 mm

Materiál VBD	**Přejezd**	**VB_B [mm]**			
		M1	**M2**	**M3**	**M4**
CBN	**1.**	0,292	0,405	0,170	0,567
	2.	0,324	**0,989**	0,320	**0,713**
	3.	0,502	1,045	0,410	0,844
	4.	**0,673**	1,289	0,500	1,548
	5.			**0,710**	

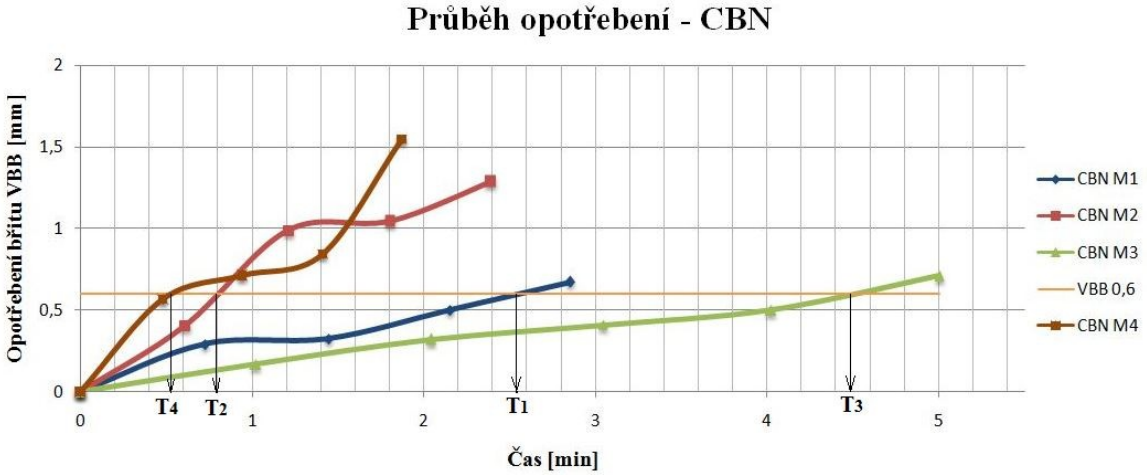
Z tabulky 7.7 vyplývá, že až při posledním čtvrtém přejezdu s řeznými podmínkami M1 byla překročena zvolená kritická hodnota opotřebení na hřbetě VB_B = 0,6 mm – naměřeno 0,673 mm.

S řeznými podmínkami M2 byla kritická hodnota překročena po druhém přejezdu – naměřeno 0,989 mm.

Dle řezných podmínek M3 byla kritická hodnota překročena až po pátém přejezdu – naměřeno 0,710 mm.

Nejhůře dopadlo měření opotřebení s řeznými podmínkami M4, kde byla překročena hodnota VB_B = 0,6 mm při druhém přejezdu – 0,713 mm. Z tabulky je patrné, že již po prvním přejezdu nebyla hodnota naměřeného opotřebení daleko od kritické hodnoty. Celkově je třeba si uvědomit, že dle řezných podmínek M4, kde se zvýšila řezná rychlost na 500 $m.min^{-1}$ sloužila spíš informativně vzhledem k menšímu opotřebení VBD z CBN oproti VBD z ŘK, ovšem do výsledných zhodnocení nebude zařazena.

Na základě měření opotřebení břitu byla vytvořena závislost na čase – T-v_c závislost – viz obrázek 7.8. Z grafu je patrný průběh opotřebení VBD tak, jak popisuje literatura. Břit se nejprve otupuje rychleji, ve druhé fázi nástroj obrábí bez výrazného zvýšení opotřebení až do momentu, kdy nastane třetí fáze, a to zrychlené opotřebení nástroje a ztráta možnosti dalšího obrábění.



Obr. 7.8 Závislost opotřebení hřbetu na čase

Pomocí grafu 7.8 byla určena trvanlivost nástroje až do dosažení zvolené kritické hodnoty opotřebení na hřbetě VB_B = 0,6 mm pro jednotlivé řezné podmínky testované VBD na základě trvanlivosti byl podle vzorce 6.3 vypočítán objem odebraného materiálu zobrazen na grafu 7.9. Z tabulky 7.8 byly stanoveny hodnoty drsnosti Ra a Rz pro jednotlivé řezné podmínky - vždy u posledního přejezdu.

Hodnoty trvanlivostí odečtené z grafu:

M1 … T_1=2,53 min

M2 … T_2=0,78 min

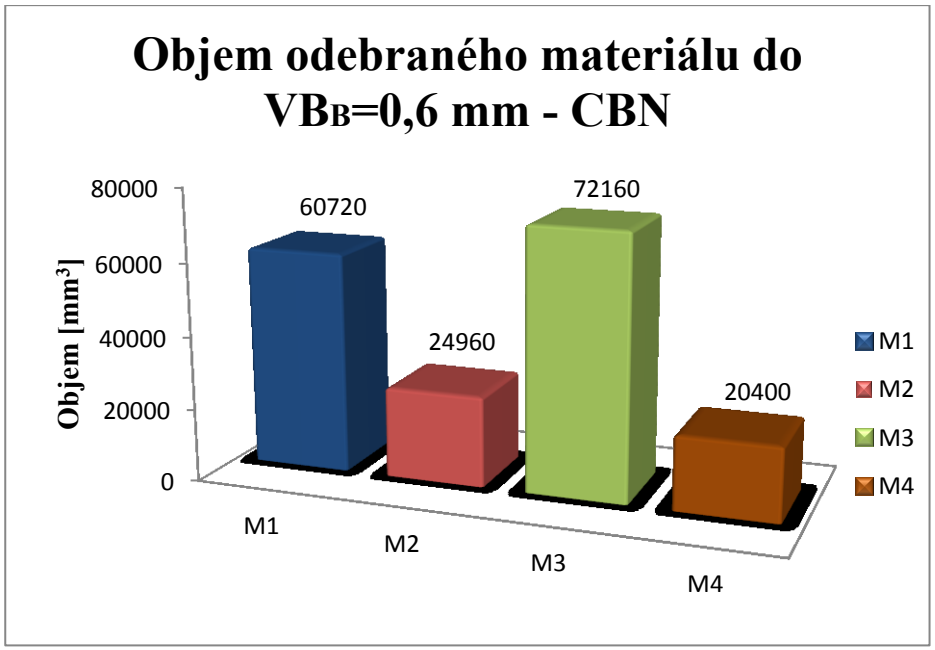
M3 … T_3=4,51 min

M4 … T_4=0,51 min

Pro vyměnitelnou břitovou destičku z CBN byly zvoleneny stejné řezné podmínky jako byly u ŘK, akorát přibyla M4, kde se zvýšila v_c :

- M1: řezná rychlost v_c = 300 m·min^{-1} a posuv f = 0,2 mm, hloubka řezu a_p=0,4 mm - destička dokázala soustružit do zvoleného opotřebení VB_B= 0,6 mm po dobu 2,53 min.
- M2: řezná rychlost v_c = 400 m·min^{-1} a posuv f = 0,2 mm, hloubka řezu a_p=0,4 mm vydržela v řezu 0,78 min.
- M3: řezná rychlost v_c = 200 m·min^{-1} a posuv f = 0,2 mm, hloubka řezu a_p=0,4 mm vydržela v řezu podstatně delší dobu a to 4,51 min.
- M4: řezná rychlost v_c = 500 m·min^{-1} a posuv f = 0,2 mm, hloubka řezu a_p=0,4 mm vydržela v řezu 0,51 min.

Na níže uvedeném grafu 7.9 jsou uvedeny dosažené hodnoty objemu odebraného materiálu dle jednotlivých řezných podmínek vyměnitelné břitové destičky do dosažení zvolené hodnoty opotřebení na hřbetě VB_B = 0,6 mm.



Obr. 7.9 Srovnání objemů odebraného materiálu dle jednotlivých řezných podmínek

Z grafu 7.9 je patrné, že nejvíce materiálu do opotřebení VB_B = 0,6 mm se odebralo s řeznými podmínkami M3. Celkový odebraný objem byl 72160 mm^3 materiálu. Druhý největší odebraný objem materiálu byl s řeznými podmínkami M1, a to 60720

mm^3. Dle řezných podmínek M2 se odebralo 24960 mm^3 materiálu a s řeznými podmínkami M4 se odebralo 20400 mm^3 materiálu.

Obr. 7.10 Vzniklá tříska dle řezných podmínek:

v_c = 200 m·min^{-1}, f = 0,2 mm, a_p=0,4 mm

po 2. přejezdu

Obr. 7.11 Vzniklá tříska dle řezných podmínek:

v_c = 400 m·min^{-1}, f = 0,2 mm, a_p=0,4 mm

po 1. přejezdu

Tab. 7.8 Naměřené hodnoty - CBN

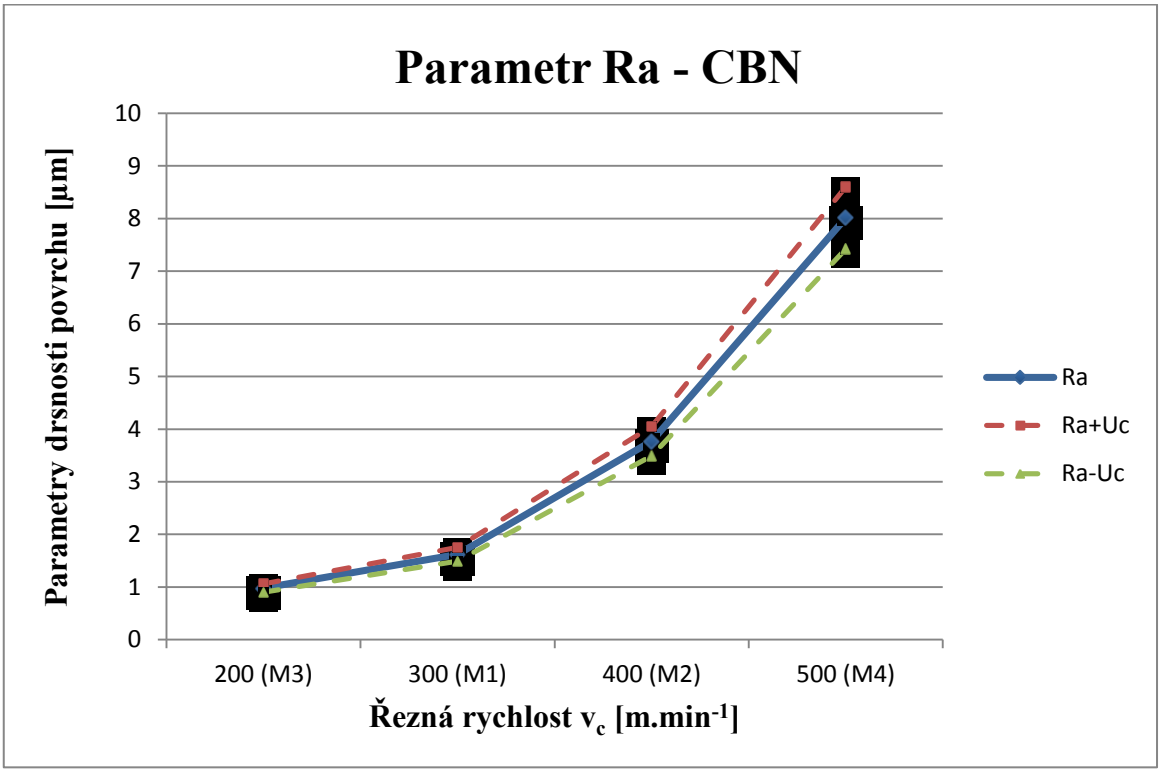
	Materiál	v_c[m·min^{-1}]	f [mm]	a_p[mm]								
	Kubický nitrid bóru	300/400/200/500	0,2	0,4								
	Měření 1			Měření 2			Měření 3			Měření 4		
i	VB_B [mm]	Ra [µm]	Rz [µm]	VB_B [mm]	Ra [µm]	Rz [µm]	VB_B [mm]	Ra [µm]	Rz [µm]	VB_B [mm]	Ra [µm]	Rz [µm]
1	0,292	0,60	3,70	0,405	1,21	8,43	0,170	0,55	3,94	0,567	0,82	5,58
		0,69	4,58		1,04	7,89		0,53	3,85		1,65	9,39
		0,97	4,95		1,48	6,98		0,61	4,13		2,84	15,25
$\bar{x}$		**0,68**	**4,36**		**1,19**	**7,17**		**0,53**	**3,61**		**1,68**	**9,87**
2	0,324	0,82	4,41	0,989	2,29	11,30	0,320	1,25	6,78	0,713	2,40	8,70
		0,91	5,15		9,31	39,65		1,18	6,89		1,48	12,80
		0,87	6,46		7,70	28,65		1,37	6,95		7,32	26,69
$\bar{x}$		**0,91**	**5,55**		**5,26**	**24,51**		**1,27**	**6,62**		**3,92**	**15,62**
3	0,502	0,67	4,88	1,045	9,31	34,75	0,410	1,98	8,75	0,844	5,42	17,82
		0,83	6,22		10,94	51,01		2,32	9,92		5,63	23,36
		0,97	6,97		11,33	40,66		2,16	9,85		8,66	26,79
$\bar{x}$		**0,90**	**6,27**		**8,94**	**35,38**		**2,22**	**9,82**		**5,72**	**20,98**
4	0,673	1,02	8,89	1,289	4,89	20,26	0,500	1,51	8,87	1,548	6,49	27,72
		1,88	11,19		3,46	19,98		1,45	9,55		7,11	27,92
		1,99	11,58		3,06	15,59		1,48	9,32		9,59	33,69
$\bar{x}$		**1,62**	**10,20**		**3,77**	**17,26**		**1,51**	**9,27**		**8,01**	**31,09**
5							0,710	0,70	5,02			
								1,28	8,07			
								0,86	6,84			
$\bar{x}$								**0,98**	**6,32**			

V tabulce 7.8 je vypočítán výběrový průměr drsnosti Ra i Rz, měřen po každém přejedu z 10ti hodnot. Pro lepší přehlednost jsou uvedeny jen 3 hodnoty (třetí, šestá a devátá hodnota).

Tab. 7.9 Parametr drsnosti Ra s nejistotou měření u_c

Parametr drsnosti ± u_c	
Měření	**R_a ± u_c**
1	1,62± 0,13
2	3,77±0,28
3	0,98±0,08
4	8,01±0,59

Na grafu 7.12 jsou uvedeny hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu Ra s nejistotou měření vždy u posledního přejezdu, dosažené při soustružení materiálu Inconel 625 při zvolených řezných podmínkách.



Obr. 7.12 Srovnání parametrů drsnosti Ra

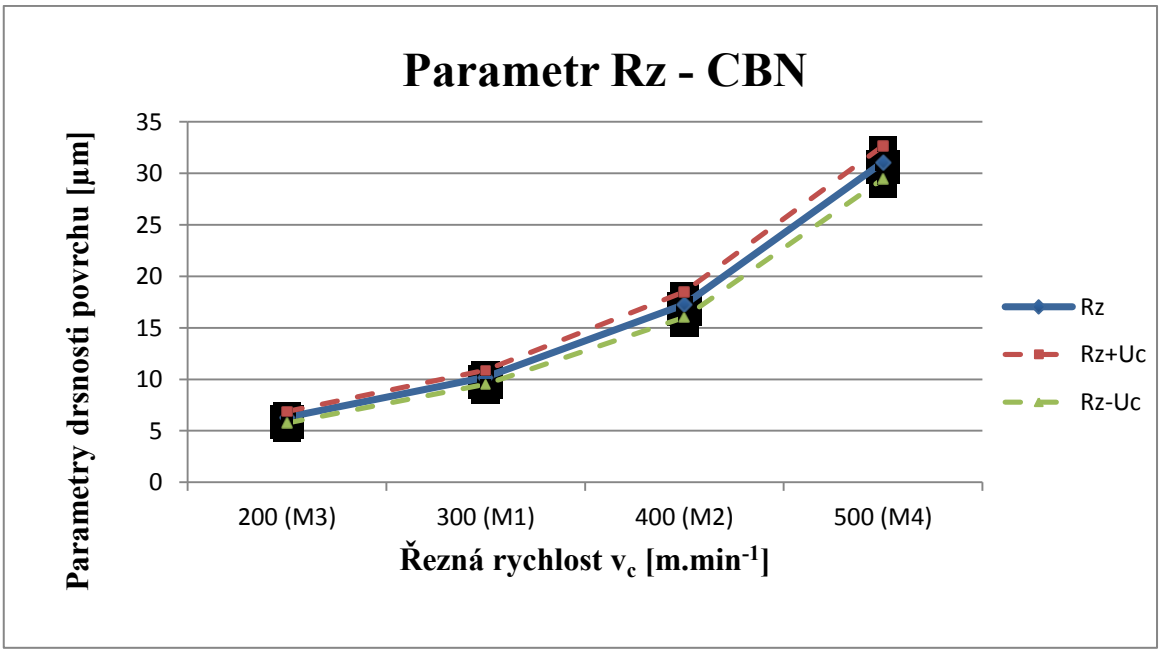
Nejlepší dosažená průměrná aritmetická úchylka profilu Ra = 0,98 µm byla za řeznými podmínkami M3. S řeznými podmínkami M1 bylo dosaženo druhé nejlepší drsnosti Ra = 1,62 µm, dle řezných podmínek M2 se dosáhlo průměrné aritmetické úchylky profilu Ra = 3,77 µm a dle řezných podmínek M4 se dosáhlo nejhorší hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu Ra = 8,01 µm.

Na následujícím grafu 7.13 jsou uvedeny výběrové průměry největších výšek profilu Rz naměřených opět u posledního přejezdu.

Z výsledků meření uvedené v tabulce 7.10 je zřejmé, že nejnižší hodnoty největší výšky profilu Rz = 6,32 µm se dosáhlo opět s řeznými podmínkami M3. Druhé nejnižší hodnoty se dosáhlo s řeznými podmínkami M1 Rz = 10,20 µm. Podle řezných podmínek M2 se dosáhlo hodnoty 17,26 µm. Jako nejhorší výsledek měření vyšlo obrábění s řeznými podmínkami M4, kde se dosáhlo Rz = 31,09 µm.

Tab. 7.10 Parametr drsnosti Rz s nejistotou měření u_c

Parametr drsnosti ± u_c	
Měření	**$R_z \pm u_c$ [µm]**
1	10,20± 0,68
2	17,26±1,24
3	6,32±0,55
4	31,09±1,60



Obr. 7.13 Srovnání parametrů drsnosti Rz

7.3 Zpracování výsledků pro ŘK a CBN se zvýšeným posuvem na f=0,4 mm

V experimetu byl proveden test se zvýšeným posuvem:

M1(ŘK), M2(CBN): řezná rychlost v_c = 400 m·min^{-1} a posuv f = 0,4 mm, hloubka řezu a_p=0,4 mm.

Tyto podmínky byly stejné u obou testovaných VBD. Ve všech předchozích měřeních byl posuv na hodnotě f=0,2 mm.

Tab. 7.11 Naměřené hodnoty – ŘK, CBN

	materiál		**v_c [m·min^{-1}]**		**f [mm], a_p [mm]**	
	ŘEZNÁ KERAMIKA, KUBICKÝ NITRID BÓRU		**400**		**0,4 / 0,4**	
	Měření 1 Řezná keramika			**Měření 2 Kubický nitrid bóru**		
i	VB_B [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	VB_B [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,559	4,20	26,24	0,551	2,43	15,56
		7,76	35,82		2,82	15,80
		8,06	40,49		4,37	17,57
$\bar{x}$		**6,38**	**33,04**		**3,03**	**15,91**
2	1,094	7,42	35,31	0,608	4,12	18,75
		9,37	63,75		3,39	19,91
		9,69	62,87		4,06	20,85
$\bar{x}$		**8,70**	**52,90**		**3,93**	**19,79**
3				0,665	2,84	16,82
					3,39	18,23
					4,07	25,07
$\bar{x}$					**3,38**	**19,12**
4				0,681	3,36	15,94
					5,91	26,80
					7,81	30,03
$\bar{x}$					**5,37**	**23,29**

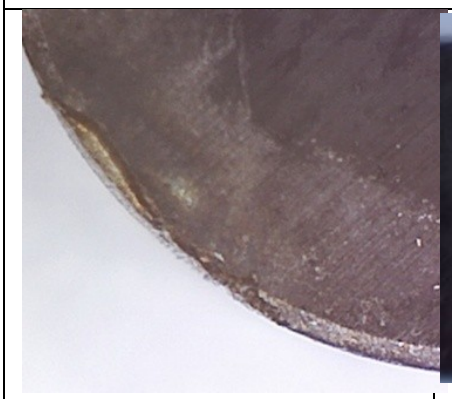
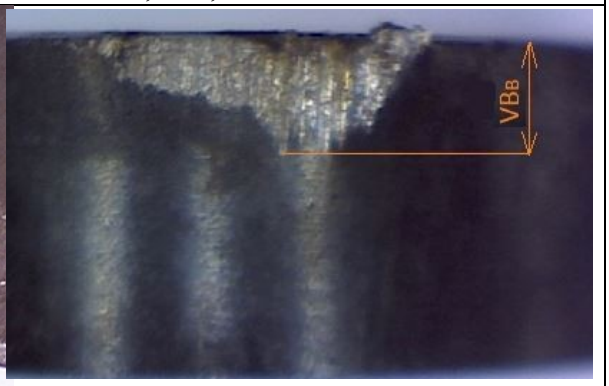
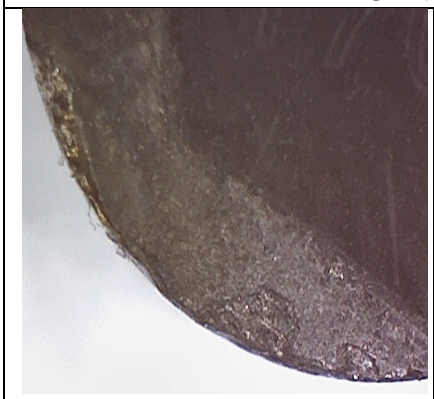
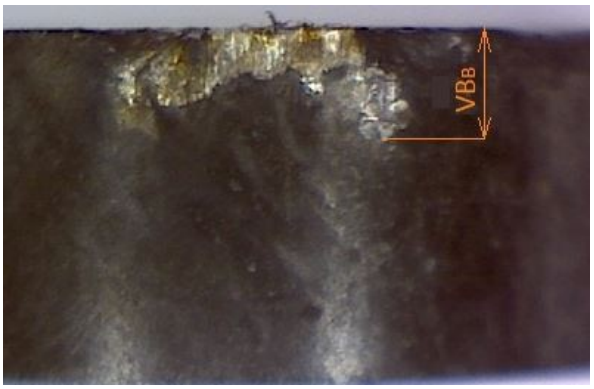
Už při prvním pohledu je zřejmé, že hodnoty drsnosti u řezné keramiky jsou oproti předchozím hodnotám o dost zvýšené.

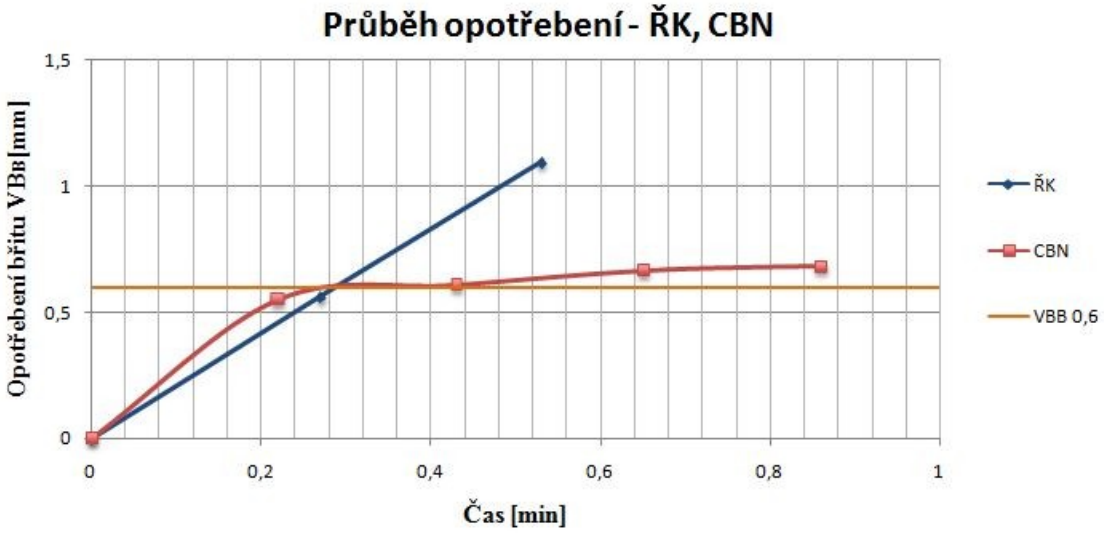
V tabulce 7.12 je porovnání parametrů drsnosti u ŘK a CBN s předchozími nejhoršími naměřenými hodnotami, které byly u ŘK s řeznými podmínkami M2 – v_c=400 m.min^{-1}, f=0,2 mm, a_p=0,4 mm a nynějšími hodnotami, které byly obě naměřeny po druhém přejezdu. U CBN je stejné srovnání s předchozím nejhorším výsledkem naměřených parametrů drsnosti, kde tomu bylo taky u řezných podmínek M2. Horšího povrchu se naměřilo akorát s řeznými parametry M4, kde byla zvýšena řezná rychlost pouze u VBD z CBN, ale z důvodu adekvátnosti jsou posuzovány srovnatelné řezné parametry u obou materiálů.

Tab. 7.12 Parametry drsnosti u ŘK, CBN –předchozí nejhorší/nynější naměřené

Parametr drsnosti	Materiál VBD	Předchozí hodnoty [µm]	Nynější hodnoty [µm]	Materiál VBD	Předchozí hodnoty [µm]	Nynější hodnoty [µm]
Ra	ŘK	5,87	8,70	CBN	3,77	5,37
Rz		27,66	52,90		17,26	23,29

Tab. 7.13 Opotřebení destiček z ŘK a CBN při stejných řezných podmínkách

Řezná keramika, kubický nitrid bóru - navýšení posuvu f=0,4 mm			
Foto čelo			**Foto hřbet**
Řezné podmínky: v_c / f / a_p [m.min^{-1}] / [mm] / [mm]			
i	KF	t_{As}	VB_B
2	0,209	0,53	1,094
ŘK M1: 400 / 0,4 / 0,4			
			
i	KF	t_{As}	VB_B
4	0,794	0,86	0,681
CBN M2: 400 / 0,4 / 0,4			
			



Obr. 7.14 Závislost opotřebení hřbetu na čase

VBD z řezné keramiky vydržela do úplného opotřebení jen dva přejezdy. Už při prvním přejezdu byla na hranici zvolené kritické hodnoty opotřebení na hřbetě VB_B=0,6 mm s hodnotou VB_B=0,559 mm. Vysoké jsou i hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu Ra=8,70 μm a největší výšky profilu Rz=52,90 μm.

Kubický nitrid bóru se opotřebovával pomaleji, sice už po druhém přejezdu byl za hranicí zvolené kritické hodnoty opotřebení, avšak při dalších přejezdech se opotřebovával minimálně. Celkem se udělaly čtyři přejezdy s konečnou hodnotou VB_B=0,681 mm. Z pohledu parametrů drsnosti Ra a Rz došlo i zde k výraznému zhoršení povrchu.

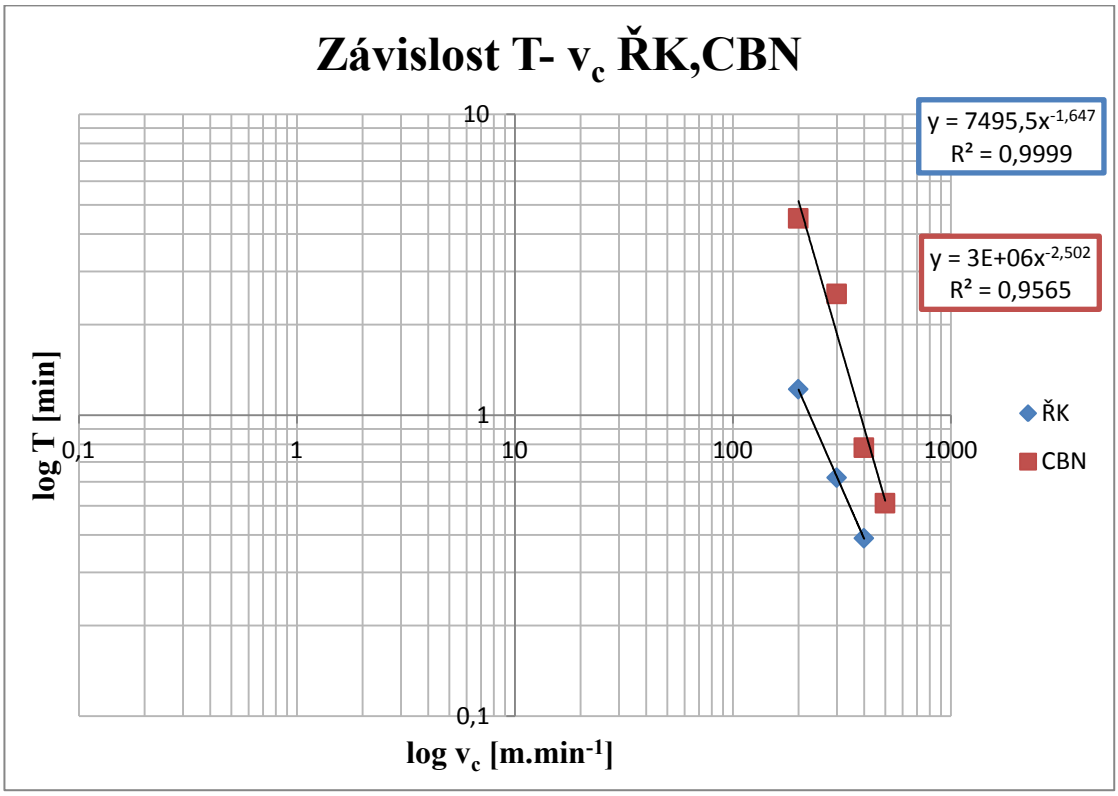
Z těchto důvodu, hlavně u řezné keramiky se došlo k závěru, že zvýšování posuvu při obrábění Inconelu 625 nemá smysl.

8. Vyhodnocení dosažených výsledků

Celkové vyhodnocení bylo provedeno na základě dosažených výsledků opotřebení jednotlivých VBD dle stanovených řezných podmínek a následném určení řezivosti.

Stanovená kritická hodnota opotřebení na hřbetě byla VB_B=0,6 mm. Z důvodu rychlého opotřebení řezné keramiky, kdy byla za kritickou hodnotou vesměs hned po prvním přejezdu, bude porovnáváno opotřebení vždy po posledním naměřeném přejezdu.

Dalším podstatným kritériem bylo zhodnocení parametrů drsnosti Ra a Rz, jelikož se při testování destiček jednalo o dokončovací soustružení, kde je důležitá drsnost obrobeného povrchu.



Obr. 8.1 Závislost T-v_c u ŘK, CBN

Z výše uvedé T-v_c závislosti na grafu 8.1 se určí konstanty C_V, C_T a exponent m pro hodnocení řezivosti nástroje pro řeznou keramiku a kubický nitrid bóru.

Z obrázku 2.13 na str. 24 vypočítáme exponent m a dle vzorce 2.2 vypočítáme C_v pro **řeznou keramiku**:

m= tg α C_T=7495 [-] $c_v = c_T^{1/m}$

m= tg 55º13´ $c_v = 7495^{1/1,64}$

$c_v = 230,50[-]$

m=1,64 [-]

Dle tabulky 1.1 odpovídá hodnota exponentu m pro řeznou keramiku.

Tab. 8.1 Výsledné konstanty C_V, C_T a exponent m pro ŘK

m	C_T	C_V
1,64	7495	230,50

Z obrázku 2.13 na str. 24 vypočítáme exponent m a dle vzorce 2.2 vypočítáme C_v pro **kubický nitrid bóru**:

m= tg α C_T=3000000 [-] $c_v = c_T^{1/m}$

m= tg 68º11´ $c_v = 3000000^{1/2,50}$

$c_v = 389,81[-]$

m=2,50 [-]

Tab. 8.2 Výsledné konstanty C_V, C_T a exponent m pro CBN

m	C_T	C_V
2,50	3000000	389,81

Tab. 8.3 Srovnání koeficientů C_T, C_V a m pro jednotlivé VBD

Materiál VBD	**C_T**	**C_V**	**m**
ŘK	7495	230,50	1,64
CBN	3000000	389,81	2,50

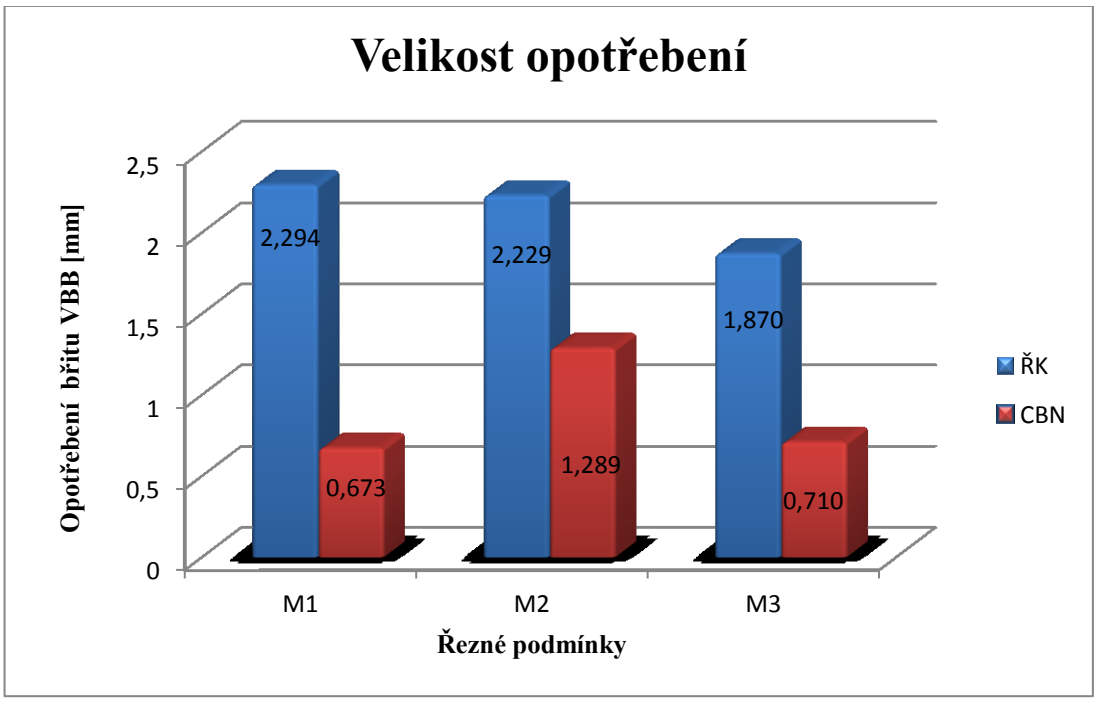
Pomocí hodnot z tabulky 8.3 a grafu 8.1 lze zjistit, že vyměnitelné břitové destičky z kubického nitridu bóru mají lepší řezivost při obrábění Inconelu 625 než vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky. Z obecného hlediska můžeme říct, že lepší řezivost má ten materiál, který vykazuje v závislosti T-v_c vyšší hodnotu konstanty C_V a nižší hodnotu exponentu m. V našem případě je sice exponent m u řezné keramiky

nižší, než u kubického nitridu bóru, nicméně u konstanty C_V už je hodnota podstatně vyšší u kubického nitridu bóru.

Celkově lepší využití VBD z kubického nitridu bóru pro obrábění niklové slitiny Inconel 625 dokazují i dosavadní výsledky měření, kde řezná keramika značně zaostávala. Jediným světlým místem, který má do plusu řezná keramika, je ekonomická stránka. VBD z kubického nitridu bóru přijde na 2769 Kč/ks, zatímco VBD z řezné keramiky vyjde na 178 Kč/ks.

Tab. 8.4 Srovnání opotřebení u jednotlivých VBD

Řezné podmínky	Materiál VBD	Přejezd	Opotřebení VB_B [mm]	Materiál VBD	Přejezd	Opotřebení VB_B [mm]
M1	**ŘK**	3.	2,294	**CBN**	4.	0,673
M2		2.	2,229		4.	1,289
M3		3.	1,870		5.	0,710



Obr. 8.2 Výsledné naměřené hodnoty opotřebení u ŘK a CBN

Pomocí hodnot z tabulky 8.4 a grafu 8.2 lze zjistit, že vyměnitelné břitové destičky z kubického nitridu bóru se opotřebovávaly podstatně pomaleji než vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky při obrábění Inconelu 625.

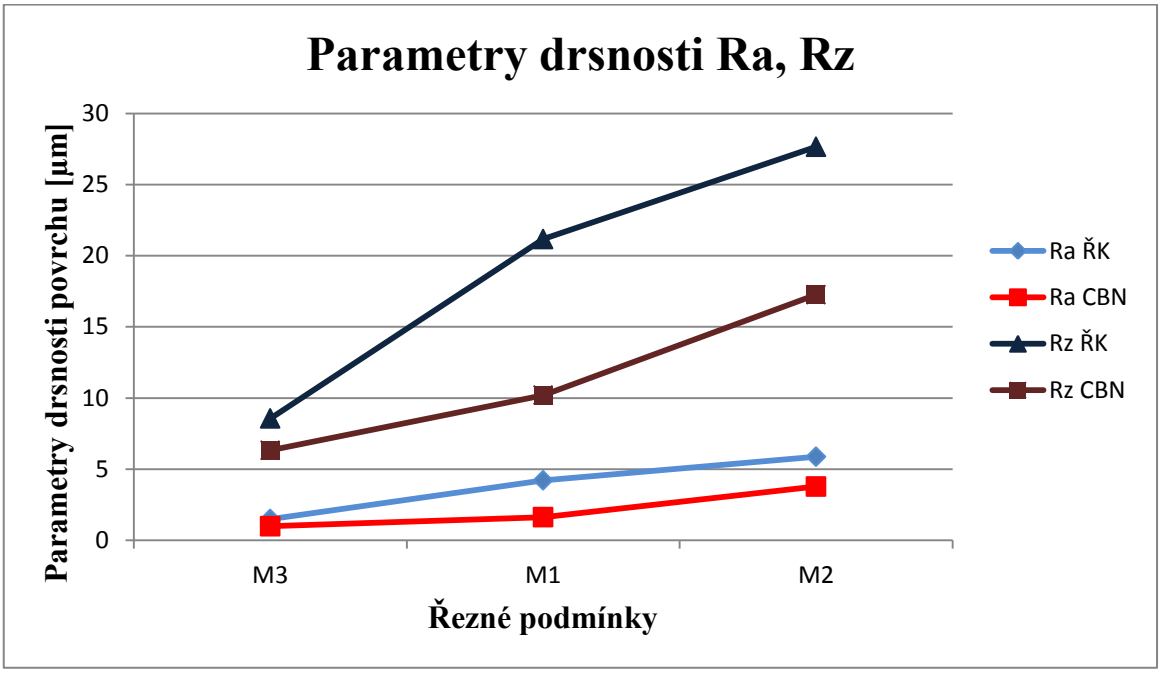
Důležité je brát v potaz i fakt, že při stejných řezných podmínkách bylo opotřebení u ŘK s řeznými podmínkami M1 VBB=2,294 mm při třetím přejezdu a opotřebení u CBN při čtvrtém přejezdu jen VBB=0,673 mm, což je o 71% méně než u ŘK.

Srovnání řezných podmínek M2, kde se u ŘK naměřila hodnota VBB= 2,229 mm již při druhém přejezdu a u CBN byla hodnota opotřebení při čtvrtém přejezdu VBB=1,289 mm, což je o 42% méně.

Druhým největším rozdílem bylo porovnání s řeznými podmínkami M3. U ŘK byla hodnota VBB=1,870 mm při třetím přejezdu, kdežto u CBN byla po pátém přejezdu naměřena hodnota VBB=0,710 mm, což je o 62% méně.

Tab. 8.5 Výsledné parametry drsnosti u jednotlivých VBD

Řezné podmínky	Materiál VBD	Přejezd	Ra [µm]	Rz [µm]	Materiál VBD	Přejezd	Ra [µm]	Rz [µm]
M1	**ŘK**	3.	4,21	21,17	**CBN**	4.	1,62	10,20
M2		2.	5,87	27,66		4.	3,77	17,26
M3		3.	1,49	8,56		5.	0,98	6,32



Obr. 8.3 Parametry drsnoti Ra, Rz u jednotlivých VBD

Z výsledných hodnot z tabulky 8.5 a grafu 8.3 lze jednoznačně určit, že vyměnitelné břitové destičky z kubického nitridu bóru měly o dost lepší výsledné parametry drsnosti průměrné aritmetické úchylky profilu Ra a parametry největší výšky profilu než vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky při obrábění Inconelu 625.

I zde jdou opět vidět propastné rozdíly u řezné keramiky při stejných řezných podmínkách, menším počtu přejezdu a velkých rozdílech v parametrech Ra i Rz oproti kubickému nitridu bóru.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo zvolit takový řezný materiál, který dosáhne menšího opotřebení na hřbetě a bude vykazovat lepší řezivost a drsnost obrobeného povrchu při obrábění niklové slitiny Inconel 625. Tato slitina patří mezi těžkoobrobitelné materiály díky vyšší tažnosti, značnějším tendencím k deformačnímu zpevnění a nižší tepelné vodivosti než tomu je u ocelí.

Testovány byly dva řezné materiály - řezná keramika od firmy Ssangyong Cement Industrial Co., Ltd. a kubický nitrid bóru od firmy Seco Tools s.r.o. Celkově byly zvoleny tři základní řezné podmínky, ke kterým se u kubického nitridu bóru přidala čtvrtá. Do experimentu přibyl ještě jeden pokus se zvýšeným posuvem za konstantních řezných podmínek u obou řezných materiálů. Výsledky měření byly zpracovány do tabulek a grafů. Celý experiment byl prováděn na CNC obráběcím stroji Mori Seiki NLX 2500/700. Snímky opotřebení se zaznamenávaly pomocí digitálního mikroskopu Deluxe od firmy Celestron, LLC a samotné měření opotřebení bylo uskutečněno pomocí programu Motic Images Plus 2.0 ML. Drsnost povrchu byla měřena pomocí drsnoměru Surftest SJ-210 od firmy Mitutoyo, který má funkci automatické dynamické kalibrace, snímač s vysokým rozlišením a velký rozsah měření.

Výsledky testů a měření potvrdily jednoznačnou převahu výhod řezného materiálu z **kubického nitridu bóru** při obrábění slitiny Inconel 625 a to hlavně z důvodu menšího opotřebení na hřbetě, s tím souvisejícím větším objemem odebraného materiálu, lepší životností, parametry drsností Ra i Rz a to ve všech třech srovnávacích řezných podmínkách. Při zvýšeném posuvu se ukázalo, že ani tato cesta není nejlepší volbou, sice opotřebení u VBD z kubického nitridu bóru nebylo na výrazně horší hodnotě než tomu bylo u základních řezných podmínek, nicméně řezná keramika vydržela jen dva přejezdy do úplného opotřebení a už při prvním přejezdu byla na hranici zvolené kritické hodnoty opotřebení na hřbetě VB_B=0,6 mm s hodnotou VB_B=0,559 mm, což bylo problémem i u základních řezných parametrů. Vysoké byly i hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu Ra a největší výšky profilu Rz u obou testovaných materiálů. Z těchto důvodů, hlavně u řezné keramiky se došlo k závěru, že zvyšování posuvu při obrábění Inconelu 625 nemá smysl.

Po provedeném vyhodnocení výsledků testů a měření však nelze opomenout ekonomickou stránku, tzn. pořizovací cenu řezného materiálu, kdy VBD z kubického

nitridu bóru je z tohoto pohledu 15,5krát dražší než VBD z řezné keramiky a je třeba zvážit, do jakého typu výroby by měl být daný materiál použit. Z hlediska využití řezných parametrů, výkonu, posuvu, opotřebení a drsnosti se nabízí nasazení řezné keramiky pro kusovou a malosériovou vyrobu a při využití vyšších řezných parametrů VBD z kubického nitridu bóru pro středně až velkosériovou výrobu.

Seznam použité literatury

[1] Technologie II. ČEP, Robert. [online]. [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf

[2] GRAHAM, Don. 2014. *Rozpoznání a vyřešení osmi nejčastějších typů opotřebení břitových destiček*. Brno, 6 s.

[3] Experimentální metody v obrábění: Opotřebení. ČEP, Robert. [online]. [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf

[4] PETRŮ Jana, Jan SCHIFFNER, Tomáš ZLÁMAL a Robert ČEP. *Průběh opotřebování řezného nástroje při obrábění slitiny Alloy 718*.

[5] Technologie I: Technologie obrábění. HUMÁR, Anton. [online]. Brno, 2003 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf

[6] EXPERIMENTÁLNÍ METODY: Opotřebení. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Libor PÍŠKA a JANÍČEK. [online]. Brno, říjen 2003 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf

[7] DE VOS, Patrick. 2012. *Obrábění nerezových ocelí: Příručka pro technology*: 19.

[8] HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Brno: MM Publishing Praha, 2008, 235s. ISBN 978-80-254-2250-5.

[9] Materiály: Polykrystalický kubický nitrid bóru. SANDVIK COROMANT. [online]. [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_cubic_boron_nitride/pages/default.aspx

[10] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno:

Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.

[11] FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. první

vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inţenýrství:

Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

[12] NESLUŠAN, Miroslav; CZÁN, Andrej. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001, 193 s. ISBN 80-7100-933-4.

[13] DARECKÝ, J. *Superzliatiny niklu a ich obrábanie.* Žilina : Žilinská univerzita v Žilině / EDIS, 2001. 189 s. ISBN 80-7100-785-4.

[14] Specialmetals.com [online]. c2009 [cit. 2013-04-20]. *Machinig Special Metals Corporation Products.* Dostupné z WWW: <http://www.specialmetals.com/documents/machining.pdf>.

[15] DONACHIE, M. J., DONACHIE, S.J. *Superalloys – A Technical Guide*, second edition. ASM International, 2002, ISBN 0-087170-749-7.

[16] DURAND-CHARRE, M. *The Microstructure of Superalloys*. Gordon & Breach science publisher, Amsterdam, 1997.

[17] MAUROTTO, A., and all. *Comparing machinability of Ti-15-3-3-3 and Ni-625 alloys in UAT*. [online]. [cit. 2013-04-20]. 5th CIRP conference on High Performance Cutting 2012. Dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com>.

[18] MRKVICA, M. *Obrábění nástroji s geometricky definovaným břitem,* 1. díl, Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1993, 197 s., ISBN 80-7078-213-7.

[19] *Inconel* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Inconel

[20] AB SANDVIK COROMANT-SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění – kniha pro praktiky. Přel.M.Kudela. 1.vyd. Praha : Scientia, s.r.o. 1997. 857s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.

[21] Teorie obrábění: OPOTŘEBENÍ A TRVANLIVOST NÁSTROJE . *Taylorův vztah* [online]. [cit. 2015-03-16].

[22] K. KOUŘIL. *Příručka Pramet 2002*. Šumperk, 2002.

[23] ČEP, Robert. *Vliv řezných podmínek na přesnost výroby při obrábění 3D ploch : Diplomová práce. Ostrava: VŠB – TUO Fakulta strojní., 2000, 52s.*

[24] KOUŘIL, Karel. Nástroje a vyměnitelné břitové destičky osazené polykrystalickými supertvrdými materiály. *PRAMET 96 – Progresivní řezné nástroje.* Ostrava: VŠB TUO, 1996. s 42-46.

[25] *MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE: Sialonová keramika* [online]. 2006. HUMÁR, Anton. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
KENNAMETAL INC., LATROBE. USA. 2007. A07-33(58)B7.

[26] SSANGYONG CEMENT INDUSTRIAL LTD. Ceramic insert. [online]. [cit. 9. dubna 2010]. Korea. 2007. Dostupné na World Wide Web: <http://www.cerabit.com/Product/Product_Info.asp?Pro_Kind_Code=10>.

[27] BILÍK, O.: *Obrábění II.* Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-228-5

[28] *Secomax™ CBN170: Specially designed for machining nickel based superalloys* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.secotools.com/CBN170

[29] TICHÁ, Š. *Strojírenská technologie: část 1*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. 112 s. ISBN 80-248-06711.

[30] NESTUPA, Z. Supertvrdé materiály. Ostrava: ČVTS, 1989, 145s.

[31] BIBUS. *Niklové slitiny.* [online], [cit. 2013-03-15]. Dostupné na WWW: < http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/Niklove_slitiny.pdf>

[32] The Special Metals Corporation group of companies. *Machinig Special Metals Corporation Products* [online]. [cit. 2013-03-16]. Dostupné z WWW: < http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20625.pdf>

[33] ExaSoft Holding a.s. *Celestron ruční digitální Mikroskop II (44302-A).*[online], [cit. 2013-03-20]. Dostupné na WWW: < http://www.exasoft.cz/celestron-rucni-digitalni-mikroskop-ii-44302-a-_d67153.html>

[34] TICHÁ, Š. *Strojírenská technologie: část 1*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. 112 s. ISBN 80-248-06711.

[35] Unimetra s.r.o. *Drsnoměry a vzorkovnice drsnosti.* [online], [cit. 2013-03-20]. Dostupné na WWW: < http://www.unimetra.cz/soubory_zbozi/80_1.pdf>