

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Sledování elektrického odporu odporové vrstvy inteligentního nástroje

Monitoring Electrical Resistance of Resistor Layer of Intelligent Tools

Student:

Tomáš Dluhoš

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Dluhoš**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Sledování elektrického odporu odporové vrstvy inteligentního nástroje**
Monitoring Electrical Resistance of Resistor Layer of Intelligent Tools

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Zpracování naměřených hodnot.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [2] VASILKO, K.; NOVÁK-MARCINČIN, J.; HAVRILA, M. *Výrobné inženýrstvo*. 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 obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. 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 bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

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

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



V Ostravě dne 18. 5. 2015

.....

Tomáš Dluhoš

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou 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 bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské 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 – bakalářskou 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: 18. 5. 2015



.....
Tomáš Dluhoš

Tomáš Dluhoš

Nová čtvrť 238, 725 28 Ostrava – Lhotka

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

DLUHOŠ, T. *Sledování elektrického odporu odporové vrstvy inteligentního nástroje : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 47 s. Vedoucí práce: Kratochvíl, J.

Tato bakalářská práce se zabývá sledováním elektrického odporu odporové vrstvy VBD z řezné keramiky. V první části práce je zpracovaná teorie z oblasti řezné keramiky, opotřebení nástrojů a elektrického odporu. Ve druhé části je zpracován samotný experiment. Ten byl důkazem toho, že se zvyšujícím se opotřebením roste elektrický odpor. Pokud se elektrický odpor zvýší o několik desítek ohmů, nebo dojde k přerušení odporové vrstvy lze usoudit, že VBD dosáhla hodnoty opotřebení a je potřeba ji vyměnit.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

DLUHOŠ, T. *Monitoring Electrical Resistance of Resistor Layer of Intelligent Tools : Bachelor thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2015, 47 s. Thesis head: Kratochvíl, J.

This bachelor thesis deals with monitoring of electrical resistance of resistive layer VBD from ceramic cutting board. First part of this thesis contains theory from fields such as: ceramic cutting board, tool wear and electrical resistance. Second part contains experiment itself. Experiment confirmed that when we increase wear, electrical resistance also increases. If electrical resistance is increased by several tens of ohms or if connection of resistive layer VBD is interrupted, we can conclude that wear of resistive layer VBD reached highest possible point and needs to be replaced.

Obsah

	strana
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	8
0. Úvod.....	10
1. Řezná keramika.....	11
1.1 Historický vývoj.....	11
1.2 Rozdělení keramiky.....	12
1.3 Výroba řezné keramiky.....	14
1.3.1 Výroba oxidové keramiky.....	15
1.3.2 Výroba nitridové keramiky.....	15
2. Opatření řezných nástrojů.....	16
2.1 Základní mechanismy opotřebení.....	17
2.2 Typy opotřebení.....	18
2.3 Forma a průběh opotřebení.....	22
2.4 Měření opotřebení.....	24
2.4.1 Přímé metody měření.....	25
2.4.2 Nepřímé metody měření.....	26
3. Elektrický odpor.....	30
3.1 Vliv teploty na odpor vodiče.....	30
4. Rozbor experimentu.....	31
4.1 Nástroj.....	31
4.1.1 Držák.....	33
4.2 Stroj.....	33
4.3 Měřicí přístroje.....	34
4.4 Materiál pro experiment.....	35

5. Vyhodnocení experimentu.....	36
6. Závěr.....	45
6.1 Doporučení pro další experimenty.....	46
Seznam použité literatury.....	47

Seznam použitých značek a symbolů

Al	hliník	[-]
a_p	velikost odebírané třísky	[mm]
Al_2O_3	oxid hlinitý	[-]
B	bor	[-]
f	posuv	[mm]
HIP	vysokoteplotní izostatické lisování	[-]
KB	šířka žlábků na čele	[mm]
KL	šířka žlábků k okraji čela	[mm]
KM	vzdálenost ostří ke středu žlábků	[mm]
KT	hloubka otřené plochy na čele	[mm]
l	délka vodiče	[m]
MgO	oxid hořečnatý	[-]
R	odpor vodiče	[Ω]
R_0	odpor vodiče při počáteční teplotě	[Ω]
S	průřez vodiče	[m ²]
Si	křemík	[-]
SiC	karbid křemíku	[-]
Si_3N_4	nitrid křemičitý	[-]
Ti	titan	[-]
TiC	karbid titanu	[-]
VB	šířka otřené plochy na hřbetu	[mm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
v_c	řezná rychlost	[m.min ⁻¹]

VR	radiální opotřeben	[mm]
ZrO ₂	oxid zirkoničitý	[-]
α	teplotní součinitel odporu	[K ⁻¹]
Δt	rozdíl teplot	[K]
ρ	rezistivita látky	[Ω .m]

Úvod

V dnešní době se v strojírenství využívá široký sortiment řezných materiálů. V podnicích zabývajících se obráběním je kladen velký důraz na tyto materiály, protože jejich hlavním cílem je efektivnost a vysoká produktivita. Pro obrábění je nutné používat nástroj, jehož tvrdost je mnohonásobně vyšší než obráběný materiál. Dnes máme širokou škálu řezných materiálů a každý z nich má jistou aplikační specializaci.

Řezná keramika spadá pod řezné materiály, které jsou velmi technologicky vyspělé a vyznačují se vysokou tvrdostí, dobrou chemickou stálostí, vysokou teplotní odolností a poměrně nízkou pořizovací cenou. Při obrábění řeznou keramikou využíváme vyšší řezné rychlosti a nižší posuvové rychlosti. Ideální využití řezné keramiky je obrábění šedé litiny.

Vhodná volba řezného materiálu však nestačí k dosažení ekonomicky výhodného obrábění. Využití plné trvanlivosti nástroje, který je vyrobený jedním z těchto materiálů, je dalším důležitým faktorem k dosažení vysoké produktivity a efektivnosti. V mnoha případech se však plné trvanlivosti nevyužije a k výměně nástroje dochází předčasně z obav horší kvality obrobené plochy. To vede k větším výrobním časům a plýtvání nástrojového materiálu, který je ještě schopný řezu. Pokud se v těchto podnicích nebude plně využívat trvanlivost nástroje, tak těchto cílů nedosáhnou.

Možnost přesně sledovat řezný proces a s ním opotřebení nástroje by vedlo k eliminování těchto předčasných výměn. Tím by došlo ke zkrácení vedlejších časů a ke zmenšení výrobních nákladů. Dnes však existuje mnoho metod, které nám pomáhají sledovat opotřebení řezné hrany nástroje, ale z důvodu složitosti, vysoké ceně či jiných speciálních požadavků nejsou tyto metody plošně rozšířeny. Metoda nanosené odporové vrstvy na VBD má však větší potenciál k většímu rozšíření v praxi a to díky své jednoduchosti. Touto metodou můžeme výrazně ovlivnit produktivitu přesným sledováním opotřebení v závislosti na měnícím se odporu. Při použití této metody bychom byli schopni určit, kdy je třeba destičku vyměnit nebo v jaké fázi opotřebení se nachází, či zda nedošlo k její úplné destrukci. Toto vede ke snížení časů potřebných ke kontrole velikosti opotřebení nebo zbytečné výměně VBD, která je ještě schopná řezu.

1. Řezná keramika

Keramika je obecně charakterizována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Patří zde nejen tradiční keramika (porcelán, cermet, cihly), ale i brousící materiály a řada nových speciálních, konstrukčních, strojírenských keramických látek jako oxidová keramika (Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO), ferity, feroelektrika, nitridy na bázi (Si, B, Al), karbidy na bázi (Si, B) a boridy na bázi (Ti).[5]

Intenzivním vývojem a výzkumem byly v posledních letech zlepšeny některé vlastnosti tak, že bylo umožněno podstatně rozšířit jejich aplikace ve strojírenské výrobě. Jednotlivé vlastnosti keramik lze různě kombinovat a měnit podle potřeby konkrétní aplikace daného materiálu.[5]

Keramické materiály určené pro výrobu řezných nástrojů mají především tyto vlastnosti:

- vysoká tvrdost a odolnost proti plastické deformaci,
- odolnost proti mechanickému namáhání,
- odolnost proti působení vysokých teplot,
- odolnost proti opotřebení,
- dobrá chemická stálost,
- nízká měrná hmotnost,
- nízká cena.

1.1 Historický vývoj

Počáteční úvahy o využití řezné keramiky Al_2O_3 pro výrobu řezného nástroje byly poprvé představeny v Německu v roce 1905. První komerčně dostupný materiál na bázi Al_2O_3 použitý pro řezný nástroj byl vyvinut v období druhé světové války. V roce 1960 byla úspěšně zahájena sériová výroba vyměnitelných břitových destiček z keramiky pro obrábění litin.[5]

Přibližně do konce 50. let dvacátého století byly aplikační možnosti prvních keramických materiálů omezeny na přerušované řezání. Z důvodu málo propracované technologie a nedostatku vhodných obráběcích strojů nebylo možné zhotovit spolehlivý řezný nástroj. Keramický nástroj se začal intenzivněji prosazovat začátkem 60. let, díky intenzivnímu výzkumu.[5]

Keramické materiály na bázi Al_2O_3 byly úspěšně aplikovány až koncem 50. let. Oxid hlinitý má velmi vysokou termomechanickou stabilitu a má vynikající odolnost proti opotřebení při obrábění vysokými rychlostmi. Jeho použití je bohužel omezeno pouze pro jemné soustružení z důvodu špatné odolnosti proti vydrolování ostří.[5]

Počátkem 70. let byla vyvinuta keramika s označením $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$, která se vyrábí metodou vysokoteplotního lisování. Bylo dosaženo lepší odolnosti proti vydrolování ostří a spolehlivosti řezného nástroje. Dále také vzrostla ohybová pevnost a lomová houževnatost. Dnes je tento typ nejrozšířenější řeznou keramikou. V polovině 80. let byl vyvinut kompozit Al_2O_3 vyztužený vlákny SiC. - whiskery, kde došlo k ještě vyšší lomové houževnatosti. Vlákna křemíku velmi příznivě ovlivňují vydrolení a vylomení ostří.[5]

V současnosti jsou na trhu další typy oxidové keramiky. Patří zde $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$, která má využití hlavně při obrábění šedé litiny. Druhý typ označený jako $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiCN}$ je v hodný při obrábění kalených ocelí a litin.[5]

1.2 Rozdělení keramiky

Keramické řezné materiály se rozdělují na tyto základní typy:

- Oxidová keramika: - čistá
 - polosměsná
 - směsná
- Nitridová keramika
- Vyztužená keramika

Oxidová keramika, kde hlavním zdrojem je oxid hlinitý (Al_2O_3), patří mezi nepoužívanější a nejrozšířenější typy. S přísadou oxidu zirkoničitého (ZrO_2) je dosaženo lepších mechanických vlastností. Mezi vlastnosti oxidové keramiky patří vysoká pevnost, tvrdost, odolnost proti korozi a má dobré izolační schopnosti. Dále zde patří dobrá chemická stálost, ale malá odolnost proti tepelným rázům. [6]

Směsná keramika je kombinací oxidové a neoxidové keramiky. Je vyztužena částicemi karbidů nebo karbonitridů (TiC , $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$), a díky tomu je dosaženo lepší houževnatosti a tepelné vodivosti než u oxidové keramiky.[12]

Nitridová keramika vycházející z nitridu křemíku (Si_3N_4) má krystaly podlouhlého tvaru, díky nimž má schopnost samo-vyztužení a dosahuje vysoké houževnatosti. Tepelná vodivost je rovněž velmi příznivá. Vzhledem však k nedostačující chemické stabilitě není vhodná pro obrábění ocelí.[12]

Vyztužená keramika na bázi Al_2O_3 , která je zesílena zejména whiskery karbidu křemíku (SiC), je charakteristická vysokým nárůstem houževnatosti a obrábění při použití řezné kapaliny. Tato keramika je ideální zejména pro obrábění slitin niklu.[12]

Přehled aplikací řezné keramiky v praxi [10]:

Tab. 1.1 Přehled aplikací řezných keramik

Druh řezné keramiky	Charakteristické použití	Charakter řezu
Al_2O_3	Obrábění šedé litiny a konstrukční oceli nepřerušovaným řezem za sucha	Dokončovací operace
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	Obrábění šedé litiny, tvárné a kujné litiny vytvrzené na 300HB. Obrábění uhlíkové, legované a nástrojové oceli vytvrzené na 38 HRC za sucha.	Střední a dokončovací operace, částečně přerušovaný řez
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$	Obrábění kalených ocelí a těžkoobrobitelných materiálů s částečně přerušovaným řezem za sucha i s chlazením, obrábění šedé litiny a tvrzených litin.	Střední a dokončovací operace včetně frézování
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ (whiskery)	Obrábění žáruvzdorných a žárupevných slitin a kalené oceli	Hrubovací a dokončovací operace
Si_3N_4	Hrubé soustružení a frézování všech druhů litin v těžkých podmínkách. Soustružení žáruvzdorných slitin na bázi niklu za sucha i s chlazením.	Hrubovací a dokončovací operace
Sialony	Hrubé obrábění superslitin na bázi niklu pro letecké motory a pro použití v agresivním prostředí. Řezy vyžadující vysoký posuv, rychlost nebo hloubku. Litina při vysokých rychlostech.	Hrubovací a dokončovací operace

1.3 Výroba řezné keramiky

Výroba keramických součástí včetně VBD pro řezné nástroje se moc neliší od výroby součástí ze slinutých karbidů nebo cermetů. Keramické výrobky však neobsahují žádný materiál, jehož funkcí by bylo spojení zrn tvrdé fáze do jednolitého tělesa. Díky tomu se celý proces výroby zásadně ztěžuje a jsou kladeny vysoké nároky na výrobní zařízení a dodržení přesného technologického postupu výroby.[4]

Slinovatelnost a mikrostrukturu lze ovlivňovat přidáním přísad, které v průběhu slinování vytvářejí kapalnou fázi. Dosahujeme tím hustějšího uspořádání částic při slinování a rychlejšího zhutnění výrobku.[4]

Obecný postup výroby keramiky:

- příprava práškové směsi,
- mletí,
- míchání,
- tvarování,
- sušení,
- před-slinování,
- slinování,
- tepelné zpracování,
- úprava povrchu. [8]

1.3.1 Výroba oxidové keramiky

Základem pro výrobu tohoto typu keramiky je oxid hlinitý (Al_2O_3). K usnadnění slinování a zabránění růstu zrna se přidává malé množství pomocných látek (oxidy zirkonia, yttria, chromu, titanu, niklu...).[4]

Po mokrém semletí se tato směs vysuší rozprašováním a vytvoří se prášek schopný soudružnosti, který je dále lisován na automatických lisech do požadovaného tvaru. Před lisováním se mohou do směsi přidávat přísady zlepšující tečení prášku snižující tření a rovnoměrněji zaplňující formu. Lisování probíhá nejčastěji na lisech s oboustranným tlakem, tím dochází k dobrému zhutnění polotovaru v celém jeho průřezu. Polotovary lze vyrábět rovněž izostatickým lisováním, vstřikovacím lisováním nebo litím. Často jsou z prášků vytlačovány tyče, které odpovídají tvaru břitových destiček. Pomocí diamantové okružní pilky jsou pak děleny na jednotlivé destičky.[4]

Po vylisování následuje slinování ve speciálních pecích, kde se spojí prášek a vznikne tuhé těleso potřebného tvaru. Dále následuje dle potřeby broušení na konečné rozměry a požadovanou kvalitu povrchu.[4]

1.3.2 Výroba nitridové keramiky

Slinování Si_3N_4 při atmosférickém tlaku je mnohem obtížnější než u oxidových keramik v důsledku nižší samodifuze a teploty rozkladu. Samodifuze zabraňuje dosažení teoretické hustoty materiálu. Vysoké teploty mohou podporovat difuzní proces, ale při velmi vysokých teplotách potřebných pro dostatečnou difuzi dochází k rozkladu materiálu. Pro podpoření slinování a zhutnění se používají různé oxidy kovů.[4]

Při výrobě je nutné přidávat slinovací přísady a používat postup vysokoteplotního lisování nebo vysokoteplotního izostatického lisování (HIP). Slinovací přísady vytvoří spolu s nitridem křemíku při ohřevu tekutou fázi, která podpoří zhutňovací proces. Tato fáze během ochlazování ztuhne a její složení určuje charakteristické vlastnosti finálního výrobku. Je možné vytvarovat výrobek ze směsi Si_3N_4 a přísad a následně jej slinovat nebo vytvarovat ze směsi práškového křemíku a dále nitridovat a slinovat. [5]

2. Opotřebení řezných nástrojů

Opotřebení řezných nástrojů je jedna z nevyhnutelných a nežádoucích stavů při obrábění. Břity nástrojů jsou vystaveny opotřebení ihned při začátku procesu řezání až po jejich úplné otupení, kdy nástroj ztrácí schopnost řezat.

Při obrábění vzniká velké množství tepla, které značně působí na čele a hřbetu nástroje. Velké teplotní zatížení výrazným způsobem namáhá materiál břitu nástroje. Procesem utváření třísky spolu s vysokým tlakem a teplotou se postupně vytváří čistý kovový povrch, při němž má obráběný materiál sklon k chemickým reakcím nebo difuzním procesům.[2]

Z hlediska fyzikální podstaty a průběhu opotřebení rozlišujeme tři základní příčiny opotřebení:

- opotřebení čela a hřbetu nástroje v důsledku postupného otírání funkčních ploch břitu = opotřebení otěrem,
- opotřebení břitu nástroje, které je důsledkem mechanického porušení břitu, které se vyznačuje vydrolením nebo vylomením ostří = křehký lom,
- otupení břitu nástroje vznikající působením plastických deformací povrchových vrstev funkční části břitu = plastický otěr.[1]

2.1 Základní mechanismy opotřebení

Při působení mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů dojde k intenzivnímu namáhání břitu nástroje a dochází k opotřebení. Mezi základní opotřebení řadíme:

- **abraze** neboli brusný otěr, vznikající vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu a mikročástic uvolněných z nástroje,
- **adheze** se vyskytuje hlavně při nízkých teplotách obrábění. Vzniká u materiálu tvořící dlouhou i krátkou třísku. Při tomto druhu opotřebení dochází k vytvoření nárůstku mezi třískou a břitem,
- **difúzní** opotřebení vzniká migrací atomů z materiálu obrobku na řezný materiál a naopak. Tím vznikají nežádoucí chemické sloučeniny v struktuře nástroje,
- **oxidační** opotřebení vzniká za vysokých teplot obrábění a při současném působení okolního vzduchu dochází k oxidaci kovů. Při tomto druhu opotřebení vznikají typické žlábký,
- **plastická deformace**, jejíž příčina je vysoké tepelné a mechanické zatížení kumulované v čase, která se může v nejhorším případě projevit, jako tzv. lavinové opotřebení,
- **křehký lom** je důsledkem vysokého mechanického namáhání např. přerušovaný řez, nehomogenita nebo zatížení velkými řeznými silami.

Adheze a abraze se řadí mezi fyzikální mechanismy opotřebení, kdežto oxidace a difuze mezi chemické. Všechny tyto mechanismy působí v čase plynule a časový okamžik začátku však nemusí být shodný. Plastická deformace a křehký lom jsou naproti tomu mechanismy, které působí náhle a způsobují okamžité ukončení řezného procesu nástroje. [2]

Na hřbetě nástroje působí zejména abrazivní a oxidační opotřebení, čelo je namáháno adhezním, abrazivním, oxidačním a difúzním opotřebením. Zda se nástroj bude více opotřebovávat na čele nebo hřbetu, na to má vliv mnoho faktorů. Řadíme zde např. geometrie řezného nástroje, druh operace (hrubování, hlazení) a řezné podmínky (posuv, otáčky, řezná rychlost, velikost třísky, řezné prostředí). [2]

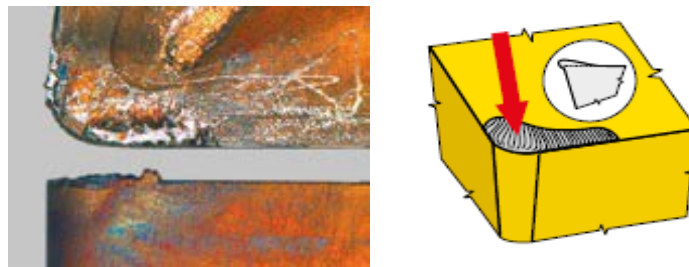
2.2 Typy opotřebení

Opotřebení na hřbetu – jedním z hlavních kritérií charakterizující trvanlivost VBD je otěr hřbetu. Vzniká při styku obráběného materiálu a nástroje v průběhu řezného procesu. Jeho velikost lze snížit použitím otěruvzdornějšího materiálu, snížení řezné rychlosti, zvýšením posuvu a použitím chlazení.[7]



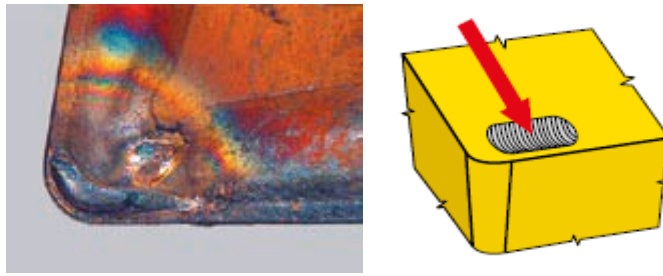
Obr. 3.1 Opotřebení na hřbetu [7]

Tvorba nárůstku – Jde o nalepování obráběného materiálu na břit nástroje. Nárůstek má charakter návaru břitu. Ke křehkému porušení břitu nástroje může dojít při jeho odtrhávání. Při tomto jevu dále dochází ke snížení jakosti obráběné plochy. Předějit tvorbě nárůstku lze zvýšením řezné rychlosti a posuvu nebo využití jiné geometrie nástroje.[7]



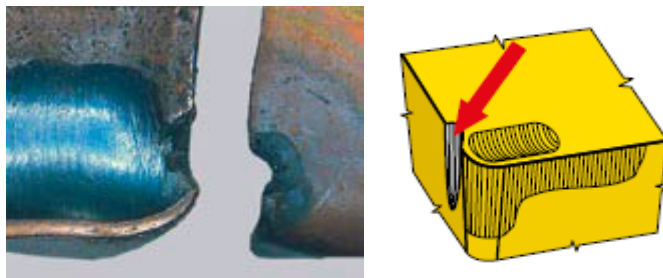
Obr. 3.2 Tvorba nárůstku [7]

Výmol na čele – tento typ opotřebení se nejvíce projevuje u VBD s rovným čelem. U měkčích je výmol širší a mělčí naopak u tvrdých materiálů je výmol úzký a hluboký. Jako opatření proti tomuto typu opotřebení volíme pozitivnější geometrii řezného nástroje, otěruvzdornější materiál, snížení řezné rychlosti a zvětšení intenzity chlazení.[7]



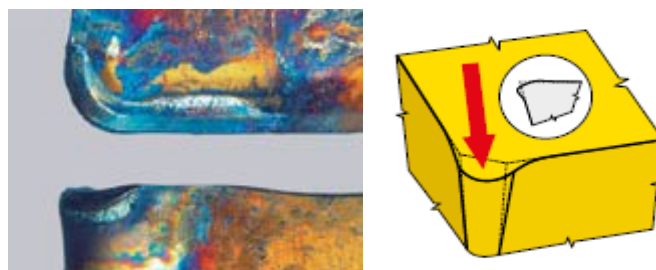
Obr. 3.3 Výmol na čele [7]

Oxidační rýha na vedlejším břitu – je jedním z nejvýznamnějších kritérií určující životnost VBD. Často se s ní setkáme při soustružení. Vznik oxidační rýhy spolu s výmolem na čele zvyšuje drsnost obráběné plochy. Volbou otěruvzdornějšího materiálu VBD, pokud je to možné, tak použití VBD s povlakem Al_2O_3 a snížením řezné rychlosti můžeme omezit vznik tohoto druhu opotřebení.[7]



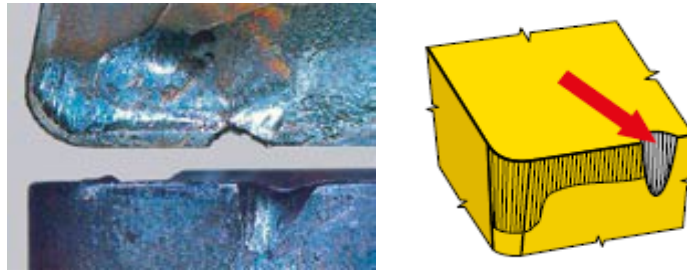
Obr 3.4 Oxidační rýha [7]

Plastická deformace špičky – příčinou vzniku je přetížení břitu z důvodu vysokých řezných teplot. Mezi opatření patří např. snížení řezné rychlosti a posuvu, použití VBD s větším poloměrem zaoblení špičky a s větším úhlem špičky a zvětšení chladicího účinku.[7]



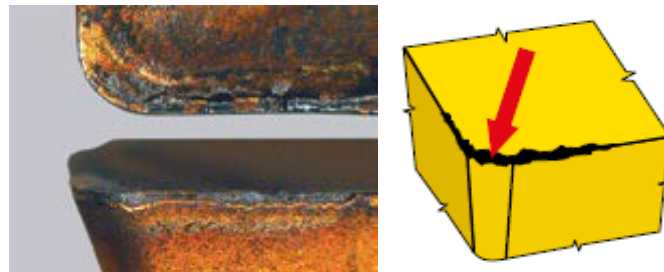
Obr. 3.5 Plastická deformace špičky [7]

Vrubové opotřebení na hlavním břitu – vzniká v oblasti styku břitu nástroje s povrchem obrobku. Příčina je zpevnění povrchových vrstev obrobku a ořepky. Toto opotřebení se vyskytuje zejména u korozivzdorných austenitických ocelí. Proti tomuto typu opotřebení se používá nástroj s menším úhlem nastavení, nerovnoměrné rozdělení třísky, nebo pokud je to možné, tak použití VBD s povlakem Al_2O_3 . [7]



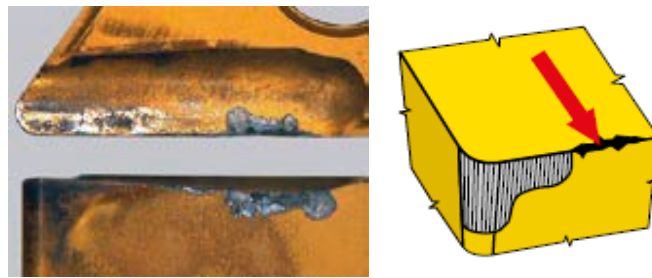
Obr. 3.6 Vrubové opotřebení na hlavním břitu [7]

Křehké porušování řezné hrany – jinak řečeno mikrovyštipování se ve většině případů vyskytuje spolu s jiným opotřebením. Samostatně je obtížně identifikovatelné. Příčinou bývá nízká tuhost soustavy stoj – nástroj – obrobek. Opatření proti vzniku tomuto opotřebení volíme menší posuv při najíždění do řezu, použít jinou řeznou geometrii, použít houževnatější nástroj. [7]



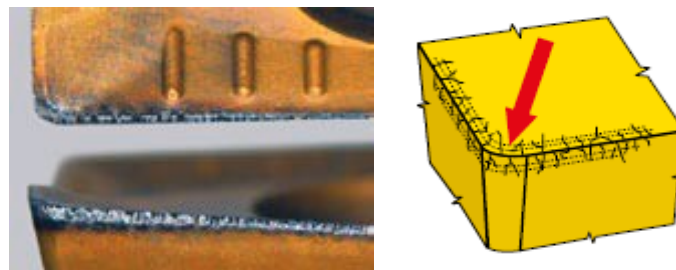
Obr. 3.7 Mikrovyštipování [7]

Porušování řezné hrany (mimo záběr) – vzniká špatným odchodem třísky, která naráží na břit a tím jej mechanicky poškozuje. Především tomuto opotřebení lze změnou posuvu, zvolení jiného utvařeče, použití jiného úhlu nastavení nástroje. [7]



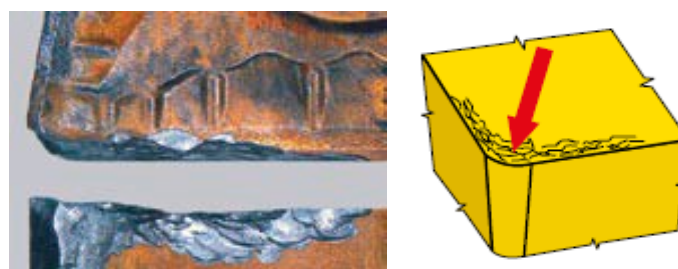
Obr. 3.8 Porušení řezné hrany mimo záběr [7]

Hřebenové trhliny – tento jev je důsledkem dynamického tepelného zatížení při přerušovaném řezu. Zamezit tomuto opotřebení je možno upuštěním od chlazení, snížením řezné rychlosti, použitím houževnatější VBD.[7]



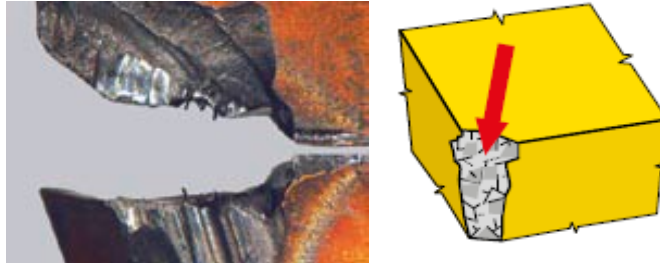
Obr. 3.9 Hřebenové trhliny [7]

Únavové trhliny – vznikají dynamickým zatížením oblasti těsně za břitem. Opatření proti tomuto opotřebení je změnit způsob najíždění a vyjíždění nástroje, změnit záběrové podmínky či použití jiného typu řezné geometrie neboli VBD s jinou úpravou řezné hrany.[7]



Obr. 3.10 Únavové trhliny [7]

Destrukce břítu – Příčiny tohoto jevu jsou nejednoznačné, jsou závislé na materiálu nástroje i obrobku, tuhosti soustavy stroj – nástroj - obrobek a celkových řezných podmínkách. Způsobů jak předejít destrukci břítu je celá řada, patří sem např. méně intenzivní řezné podmínky, použití VBD s větším poloměrem zaoblení špičky, použití jiné řezné geometrie, zmenšení posuvu při najíždění do záběru.[7]



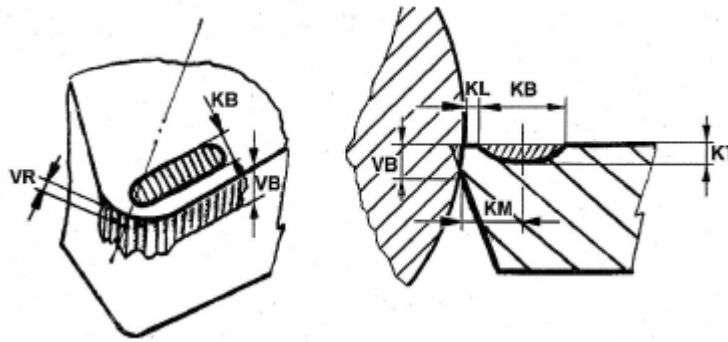
Obr. 3.11 Destrukce břítu [7]

2.3 Forma a průběh opotřebení

Opotřebení břítu řezného nástroje lze určit následujícími délkovými charakteristikami:

- šířka otřené plochy na hřbetu VB,
- hloubka žlábků na čele KT,
- šířka žlábků na čele KB,
- vzdálenost od ostří k okraji žlábků KL,
- vzdálenost od ostří ke středu žlábků KM,
- radiálním opotřebením VR.

Opotřebení dle zmíněných charakteristik závisí na vlastnostech a druhu obráběného materiálu, stavu a tvaru nástroje, řezných podmínkách a v poslední řadě na druhu práce. Obr. 3.12 zobrazuje uvedené délkové charakteristiky opotřebení nástroje.

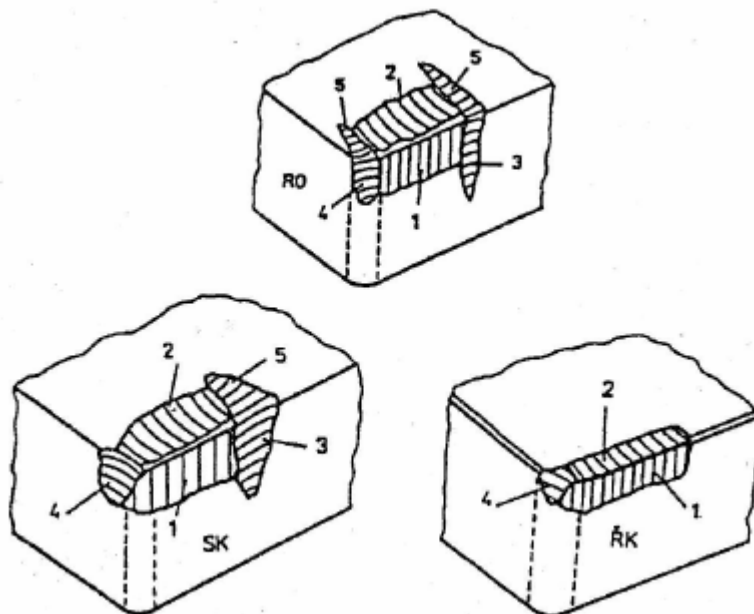


Obr. 3.12 Délkové charakteristiky opotřebení nástroje [1]

Opotřebení hřbetu se projevuje ploškou, která se většinou rozpíná pravidelně na hřbetních plochách.[1]

Opotřebení na čele se projevuje ve formě žlábků. Žlábek se tvoří v určité vzdálenosti od ostří, která se rovná přibližné velikosti posuvu nástroje a rovnoměrně narůstá. Mezi žlábkem se vyskytuje úzká ploška, jejíž velikost KL se během opotřebování břitu zmenšuje. Rozměry žlábků se mění přímo závisle na velikosti úhlu čela a na posuvu.[1]

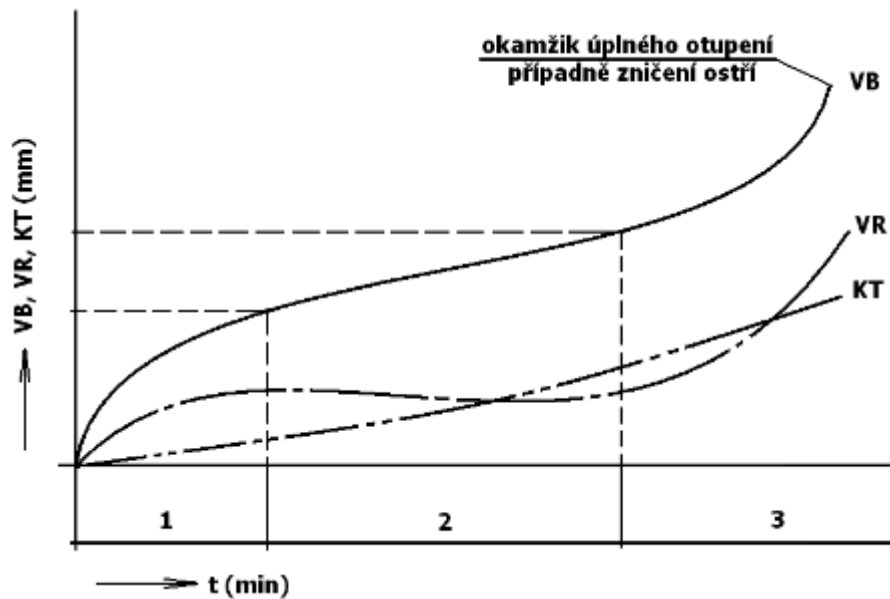
Charakteristické vzhledy břitů nástrojů s projevy procesu opotřebení jsou viditelné na obr. 3.13



Obr. 3.13 Charakteristické vzhledy břitů nástrojů z různých materiálů [1]

1 - fazetka opotřebení na hřbetu nástroje, 2 - výmol na čele, 3 - primární hřbetní rýha, 4 - sekundární hřbetní rýha, 5 - rýha na čele

Průběh opotřebení znázorňují křivky opotřebení. Tyto křivky lze získat grafickým znázorněním závislosti některé z délkových hodnot na době řezání. Na obr. 3.14 lze vidět charakteristické průběhy opotřebení VB, KT a VR na době řezání.



Obr. 3.14 Typické průběhy opotřebení VB,KT,VR na době řezání [2]

Průběh opotřebení je rozdělen do tří pásů:

- 1 – Oblast zrychleného záběhového opotřebení.** Obecně souvisí se záběhem nástroje a je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích nerovnosti nástroje.
- 2 – Oblast lineárního opotřebení.** Dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení a intenzita je konstantní.
- 3 – Oblast zrychleného nadměrného opotřebení.** Je obvykle spojeno s limitní teplotou řezání a poklesem tvrdosti nástroje. Nastává velmi rychle, většinou lavinové opotřebení.[2]

2.4 Měření opotřebení

Měření opotřebení u řezných nástrojů se zpravidla dělí na metodu přímou a nepřímou. U přímých metod měření opotřebení se zjišťují veličiny související s konkrétním stavem měřeného nástroje. Z tohoto důvodu je nutné obrábění přerušit a veličiny naměřit přímo na nástroji. Při měření opotřebení nepřímou metodou se měří veličiny, které doprovází řezný proces, tudíž můžeme opotřebení sledovat při celém procesu obrábění.

2.4.1 Přímé metody měření

Aplikování přímých metod je obtížnější, protože otupující se plochy jsou nedostupné pro měřicí přístroje. Proto je nutné přerušit obrábění, což ovlivňuje charakter otupení při dalších etapách experimentu. Dále se ve většině případů nástroj snímá z nožového držáku, což přináší změny podmínek obrábění při dalším upnutí a ustavení.[2]

Mezi přímé metody patří:

- metoda váhová,
- metoda radioaktivních izotopů,
- metoda mikrometrická,
- metoda optická,
- metoda nanesené odporové vrstvy,
- metoda pneumatická.

Metoda váhová – jako míra opotřebení je zde úbytek hmotnosti řezného břitu. Tuto metodu nelze použít přímo při obráběcím procesu na obráběcím stroji. Metoda je však poměrně přesná a hmotnostní úbytek určuje míru opotřebení. Problém však může nastat při tvorbě nárůstku, který znemožňuje přesné určení hmotnostního úbytku na nástroji. Použití je výhradně u nástrojů s VBD.[11]

Metoda radioaktivních izotopů – je nejcitlivější a nejpresnější metoda určování váhového úbytku destičky v závislosti na čase. Možnost určení váhových úbytků se pohybuje v rozmezí 10^{-3} mg. Radioaktivním článkem je materiál nástroje. Aktivaci nástroje lze dosáhnout dvěma způsoby: [11]

1. Zavedením radioizotopu již při hutnickém procesu. Poté lze přesně stanovit specifickou aktivitu nástrojového materiálu a změnu aktivity v průběhu času.
2. Ozářením hotového nástroje proudem neutronů v reaktoru. Vznikne tak směs radioizotopových prvků tvořící nástrojový materiál.

Při této metodě je velmi důležité dodržovat přísné bezpečnostní opatření, aby nedošlo k vážnému zdravotnímu ohrožení.

Metoda mikrometrická – u této metody je opotřebenění určeno přímým měřením lineárních rozměrů. Zjišťujeme ji nejčastěji dílenskými mikroskopy s křížovým stolem. Tato metoda však nejde použít přímo v procesu obrábění. Některé metody nám dovolují vyhodnocovat stav opotřebenění on-line. Příkladem je software Impor Basic. Dále je možné využít 3D souřadnicové stroje, které umožní vytvořit skutečný obraz opotřebenění. Tento typ měření je vhodný především na čelo nástroje.[11]

Metoda optická (stínová) – používá se pro měření žlábků. Při umístění ostré hrany na čelo a následné osvětlení paprskem světla pod úhlem 45° pak vzniklá vzdálenost tečny ke stínu je rovná hloubce žlábků KT. Další metoda, která využívá metodu stínů, je metoda měřící opotřebenění čela nástroje. Na čele nástroje je difusorem vytvořena mřížka, která je snímána kamerou, přičemž deformace mřížky souvisí s vytvářením kráteru na čele nástroje. Obraz z kamery vytvoří skutečné trojrozměrné opotřebenění čela nástroje.[11]

Metoda nanesení odporové vrstvy – opotřebenění je měřeno v závislosti na snížení nebo zvýšení elektrického odporu. Nutné je vytvoření odporového obvodu na břítu nástroje. Nevýhodou je ovlivnění snímače odchodem třísky, chladicí kapalinou či změnou teploty.[11]

Metoda pneumatická – je poměrně jednoduchá a konstrukčně jednoduchá. Spočívá v měření úbytku VBD ve směru kolmém k ploše řezu nebo ve směru radiálním.[11]

2.4.2 Nepřímé metody měření

Nepřímé metody měření opotřebenění využívá doprovodné znaky, které působí při řezném procesu. Patří sem: [2]

- vznik lesklého proužku na povrchu obrobku,
- vzrůst složek síly řezání,
- zvýšení výkonu řezání,
- zvýšení teploty řezání,
- vznik chvění nebo nežádoucího doprovodného zvuku,
- změna barvy a tvaru třísky,
- změna rozměrů obrobku,

- zhoršení drsnosti povrchu,
- emise signálů v pásmu ultrazvuku.

Optické metody – se jeví jako slibné, nicméně spolehlivost může při praktickém využití způsobit velké problémy.[14]

Metoda založená na odrazu světla – využívá určité množství světla ve světelném paprsku, které dopadá na ostří nástroje. Charakteristika odraženého světla pak závisí na stavu opotřebením povrchu nástroje. Tuto jednoduchou metodu lze využít pro frézování a broušení.[14]

Metoda zpracování odraženého paprsku založená na optické Fourierově transformaci k měření opotřebením povrchu brusného kotouče. Optický obrazec nese několik informací (šířku odlesku, velikost, plochu a počet poškozených zrn). Stav brusného kotouče lze určit v reálném čase ze střední plochy odlesku poškozených zrn.[14]

Metoda využívající televizní kamery – je určena zejména pro soustružení. Po pracovním cyklu se nástroj přesune do testovací polohy před televizní kameru. Obraz je analyzován pomocí mikroprocesoru a poskytuje informace o poškození či velikosti opotřebením. Nástroj bývá osvětlen ze 4 stran z důvodu zhotovení 3D obrazu. Z odlesků a vržených stínů jsou pak spočteny skutečné velikosti opotřebením.[14]

Měření pomocí síly a krouticího momentu se opírá o fakt, že s rostoucí velikostí opotřebením roste obvykle i řezný odpor. Podstatou měření jednotlivých složek řezné síly a krouticího momentu je měření deformací, ke kterým dochází v soustavě stroj – nástroj – obrobek – přípravek během obrábění. Obě tyto veličiny lze měřit pomocí dynamometrů a krouticí moment též na vřeteníku.[14]

Měření sil pomocí dynamometrů – je pravděpodobně jednou z nejrozšířenějších veličin ve strojírenské výrobě. Pro měření osových sil můžeme použít tenzometry umístěné v krouzcích na ložiskách posuvových šroubů. Metoda je použitelná pro soustružení nebo vrtání umístěním snímacích kroužků do vřeteníku stroje.[14]

Metoda měřící dynamickou složku řezné síly – je zaměřena na spektrální analýzu řezné síly. Hledá se určitá vzdálenost mezi opotřebením nástroje rozmístěním piků nebo amplitud dynamické složky síly řezání.[14]

Měření opotřebením při detekci mezery mezi nástrojem a obrobkem – je založeno na změně vzdálenosti mezi obráběným povrchem a bodem na ostří nebo držáku nástroje.[14]

a) *Metody dotykové* – kde dochází k mechanickému kontaktu s obráběným povrchem.

Pomocí elektrického mikrometru - kdy je mechanický dotyk v kontaktu s obráběným povrchem ze strany ostří nástroje.[14]

Měření využívající vířivé proudy – v tomto případě je mechanický dotyk vyroben z karbidu wolframu.[14]

b) *Metody bezkontaktní*

Pneumatická metoda – využívá pneumatického snímače, který měří vzdálenost mezi tryskou umístěnou pod ostřím a obráběným povrchem. Výhodou je, že stlačený povrch je očištěn od procesní kapaliny.[14]

Metoda ultrazvukového mikrometru – využívá času průchodu ultrazvukového pulsu vyslaného z vysílače, odraženého od obráběného povrchu a registrovaného přijímačem.[14]

Metoda optického mikrometru – paprsek HeNe laseru je zaměřen na obráběný povrch, pod určitým úhlem se odráží a je registrován fotodetektorem. Změna od nastaveného úhlu je proporcionální opotřebením nástroje.[14]

Metoda kapacitní – mezi obrobek a nástroj se vkládá kovová destička. Po zapojení do jednosměrného napětí se vytvoří kondensátor s konstantní kapacitou mezi nástrojem a destičkou a současně, protože nástroj a obrobek jsou vodivě spojeny třískou, kondensátor mezi destičkou a obrobkem. Kapacita se mění v závislosti na změnách rozměrů obrobku.[14]

Měření prostřednictvím vibrací spočívá na korelaci mezi vibracemi obráběcího stroje a opotřebením nástroje.

Metoda využívající akcelerometru – snímač tvoří většinou piezoelektrický akcelerometr snímající vibrace a samobuzené kmity. Nevýhodou je zde ovlivnění monitorovaného stroje okolními vibracemi a hlukem. Pokud změříme vertikální vibrace, lze z amplitudy nalézt limitní opotřebením nástroje. Pokud frekvence rozdělíme do diskrétních pásem, je možné analýzou získat spojitost mezi opotřebením nástroje a spektrem. Z modelování vibrací z akcelerometru lze registrovat signál citlivý na opotřebením umístěním snímače na držák nástroje.[14]

Metoda využívající kyvadlo – opotřebením nástroje je oceňováno útlumem vibrací impulsně generovaných úderem kyvadlového kladívka. Vibrace jsou snímány tenzometry umístěnými na držáku nože. Výhodou je, že zde není závislost na rezných podmínkách.[14]

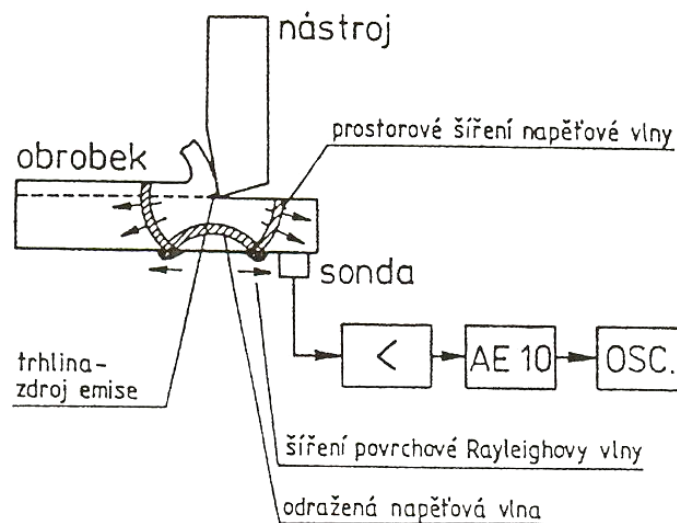
Metoda využívající kolísání otáček vřetene – opotřebení nástroje je identifikováno prostřednictvím oscilace řezné rychlosti nebo otáček vřetene. Umožňuje identifikovat především lom nástroje na základě charakteristických projevů v signále, případně frekvenčním spektrogramu.[14]

Měření zvuku

Metoda pomocí akcelerometru – v blízkosti držáku jsou snímány zvukové vibrace od tření hříbetu nástroje. Získané frekvence jsou rozděleny na vysoké a nízké a jejich poměr vyjadřuje informaci o opotřebení nástroje.[14]

Měření pomocí mikrofону – zvuky jsou sbírány a analyzovány metodou spektrální analýzy. Na spektru se s růstem opotřebení začnou objevovat nárůstky amplitud některých frekvencí.[14]

Měření akustické emise – jsou registrovány a vyhodnocovány ultrazvukové povrchové napěťové vlny, které nesou informaci o procesu probíhajícím v kořeni třísky. Výhodou je jednoduché umístění snímače. Tato metoda má potenciál pro využití ve výrobní praxi.[14]



Obr. 3.15 Schéma experimentálního zařízení na měření akustických emisí [14]

3. Elektrický odpor

Elektrický odpor je fyzikální veličina charakterizující schopnost elektrických vodičů vést elektrický proud. Jednotka elektrického proudu je ohm $[\Omega]$. Příklad k měření elektrického odporu se nazývá ohmmetr.

Elektrický odpor R vodiče je přímo úměrný délce vodiče a nepřímo úměrný obsahu jeho průřezu. Platí vztah [13]:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [\Omega]$$

Kde l je délka kovového vodiče $[m]$, S obsah příčného průřezu $[m^2]$ a konstanta úměrnosti ρ je rezistivita látky, ze které je vodič vyroben $[\Omega m]$.

Rezistivita – je odpor vodiče o průřezu $1m^2$ a délce $1m$ při teplotě $20^{\circ}C$. Rezistivita se pro daný materiál zjišťuje z matematicko-fyzikálních tabulek.

U dlouhých vodičů dochází k velké srážce volných elektronů s atomy kovů – větší odpor vodiče. Naopak čím větší průřez vodiče, tím daným materiálem prochází méně volných elektronů a nastává méně srážek s atomy – menší odpor vodiče.

3.1 Vliv teploty na odpor vodiče

Závislost odporu R na teplotě vyjadřujeme vztahem [13]:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t)$$

R je odpor vodiče $[\Omega]$

R_0 je odpor vodiče při teplotě $0^{\circ}C$ $[\Omega]$

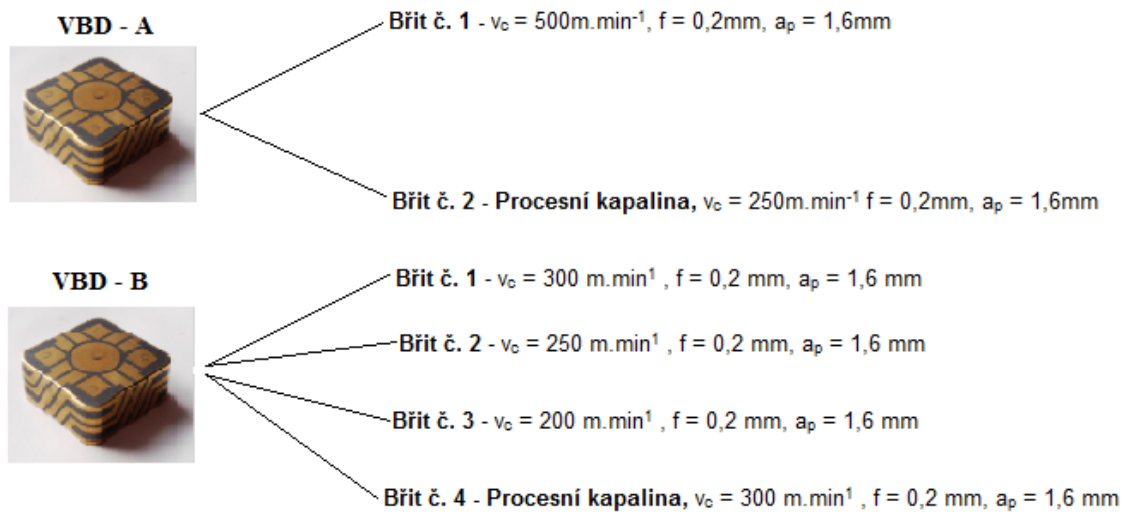
α teplotní součinitel odporu $[K^{-1}]$

Δt je rozdíl teplot $[K]$

Měrný odpor kovů se stoupající teplotou roste přibližně rovnoměrně $\alpha > 0$. U látek jako je například uhlík nebo elektrolyt mají, teplotní součinitel $\alpha < 0$ a měrný odpor s vzrůstající teplotou klesá.

4. Rozbor experimentu

Experiment probíhal na CNC soustruhu značky DMG/MORI SEIKI NLX 2500/700 obr. 4.5, který byl nově pořízen a nachází se v areálu VŠB-TUO. Jako materiál byla použita nerezová ocel **X120Mn12** (17 618)viz. Kapitola 4.4. Na tomto druhu oceli docházelo k velmi rychlému a značnému opotřebení nástroje. Z tohoto důvodu bylo nutné použít nižší řezné rychlosti.



Obr. 4.1 Rozdělení použitých břitů při experimentu

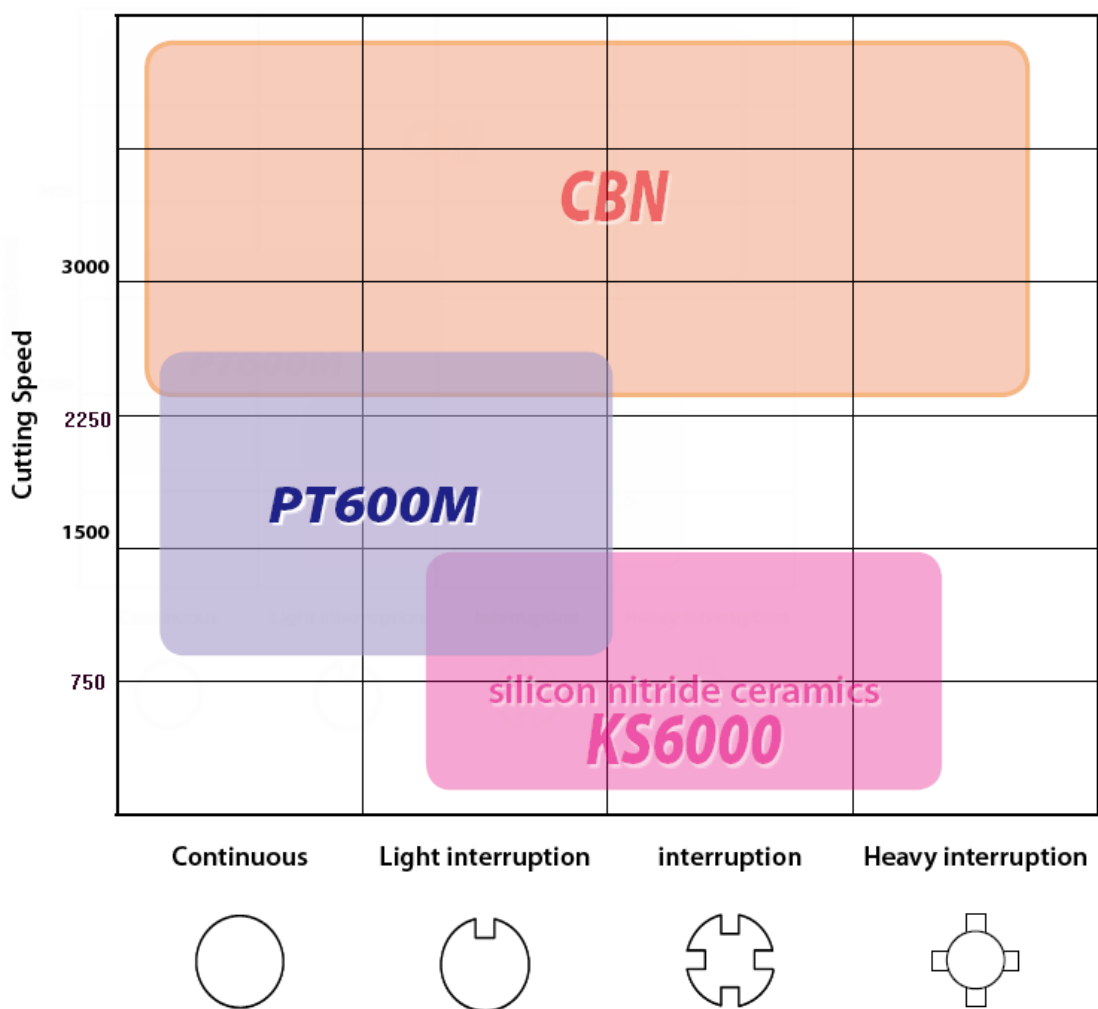
4.1 Nástroj

Na celý experiment byly použity VBD firmy Kyocera. Tyto destičky jsou vyrobené z řezné keramiky označované KS6000 na níž je nanosená odporová vrstva. Díky inteligentnímu nanesení odporové vrstvy je možno použít všech 8 břitů. Všechny břity byly na VBD očíslovány pro lepší orientaci.



Obr. 4.2 VBD Kyocera KS6000

Nitridová keramika je vhodná zejména pro obrábění všech druhů litin. Doporučené řezné podmínky a oblast použití dle výrobce lze vidět na obr. 4.3. Tyto podmínky jsou stanoveny právě pro obrábění litiny.



Obr. 4.3 Doporučený pracovní rozsah nástrojového materiálu [8]

V rámci experimentu jsme testovali VBD na nerezové oceli a proto byla počáteční rychlost zvolená na hodnotě $500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

4.1.1 Držák

Upnutí destičky bylo provedeno do držáku XCSRNR2525M-1204SEN obr. 4.4, který je speciálně upraven a je schopen vést elektrický signál tělem nože. Tento držák byl dále připojen k datalogeru ALMEO 2590-4S obr. 4.7, který je schopen měřit elektrický odpor v rozsahu 0-500 [Ω].



Obr. 4.4 Držák VBD

4.2 Stroj

Vysoce výkonný a moderní CNC soustruh značky MORI SEIKI NLX 2500/700 obr. 4.5, který je plně dostačující pro daný experiment.



Obr. 4.5 Použitý stroj NLX 2500/700

Pracovní rozsah stroje [3] :

Oběžný průměr nad ložem:	590mm
Oběžný průměr na supportem	360mm
Pojezd v ose X	260mm
Pojezd v ose Z	795mm
Maximální otáčky vřetena	3500min ⁻¹
Maximální průměr na otočení	460mm
Maximální délka na otočení	728mm
Výkon motoru	18,5 kW

4.3 Měřicí přístroje

Měření opotřebení bylo prováděno pomocí mikroskopu s digitálním kamerovým snímačem, označovaným jako INTRACO Micro Obr. 4.6. Díky tomu byla měřena míra a velikost opotřebení na VBD.



Obr. 4.6 Mikroskop INTRACO Micro

Elektrický odpor byl zaznamenáván pomocí datalogeru ALMEMO 2590-4S Obr. 4.7, který dokáže zaznamenávat data po 10 setinách sekundy pomocí programu ALMEMO AMR Control 5.13, která byla ukládána s příponou txt. a následně kopírována do programu Microsoft EXCEL. V tomto programu byla následně všechna data zpracována a vyhotovené všechny potřebné grafy.



Obr. 4.7 dataloger ALMEMO 2590-4S

4.4 Materiál pro experiment

Pro experiment byl zvolen materiál dle ČSN 10 027-1 **X120Mn12** (17 618).

Ocel manganová, odolná proti opotřebení. Svařitelnost obtížná, obrobitelnost obtížná. Vhodná na součásti vystavené velkému otěru při současném tlaku a rázu: nože, svorníky, pouzdra, vodítka, válce mlýnů na kámen, uhlí, koks, mlýny na cement.

Tab. 4.1 Chemické složení materiálu

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)
1,1-1,3	12-13	0,3-0,5	max. 0,1	max. 0,04	max. 1,5

Tab. 4.2 Mechanické vlastnosti materiálu

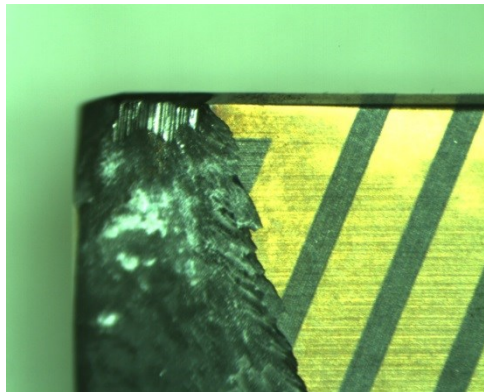
Rm (Mpa)	Re (Mpa)
1130	390

5. Vyhodnocení experimentu

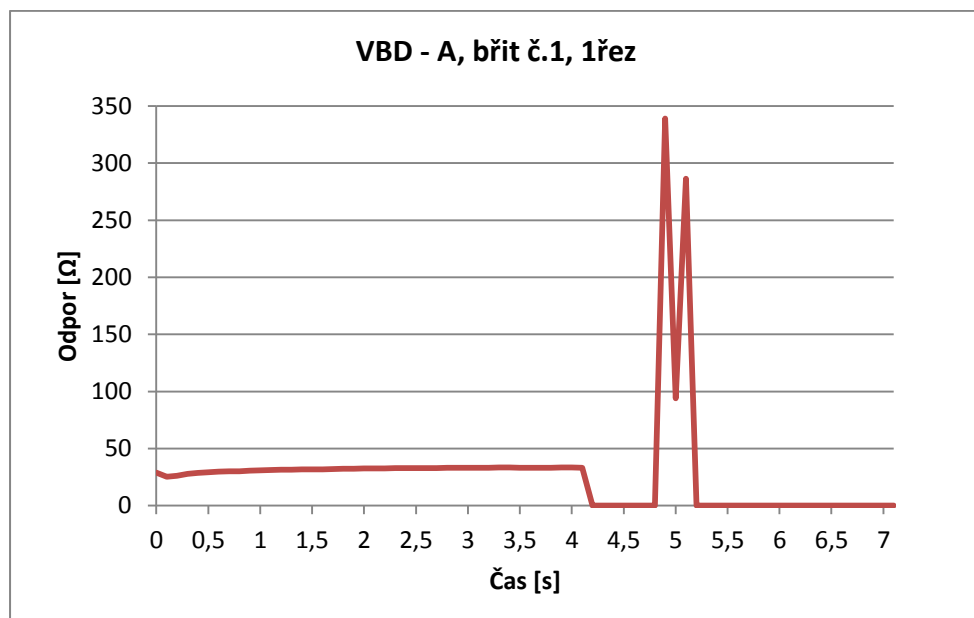
Na testovaném materiálu docházelo velmi rychle k opotřebení VBD a ve většině případů až k její úplné destrukci. Při první řezu došlo na břitu č. 1 u VBD označované jako VBD-A k úplnému zničení břitu již po pár sekundách. Z tohoto důvodu bylo nutné při dalších řezech řeznou rychlost snižovat, a díky tomu bylo možné důkladněji sledovat chování VBD a pozorovat vyvíjející se hodnoty elektrického odporu a velikost opotřebení. Kritická hodnota opotřebení změřená pomocí mikroskopu INTRACO Micro obr. 4.6, má hodnotu $VB_{KRIT}=0,54$ mm Tato hodnota udává velikost odporové vrstvy. Při použití procesní kapaliny bylo dosaženo příznivějších výsledků při použití stejných řezných podmínek. VBD snesla díky procesní kapalině téměř 1,5x větší počet řezů, než došlo k otupení břitu. Celkem byly použity dvě VBD a na všech použitých břítech jsme dosáhli pouze jednou optimálního opotřebení. U všech ostatních měření došlo k lomu břitu.

Břítová destička - A

Na první VBD označované jako VBD-A bylo využito břitu č. 1 a břitu č. 2. Při prvním řezu břitu č. 1 došlo z důvodu velké řezné rychlosti k destrukci břitu již po pár sekundách v řezu obr. 5.1. Přerušení odporové vrstvy a prudký vzestup až o 300 Ohm a následný rychlý pokles lze vidět na obr. 5.2. Příčinou zde mohla být přechodová plocha mezi nástrojem a obrobkem, která mohla na chvíli přerušenu odporovou vrstvu znova spojit. Břit č. 1 již dále nebyl schopný řezu.



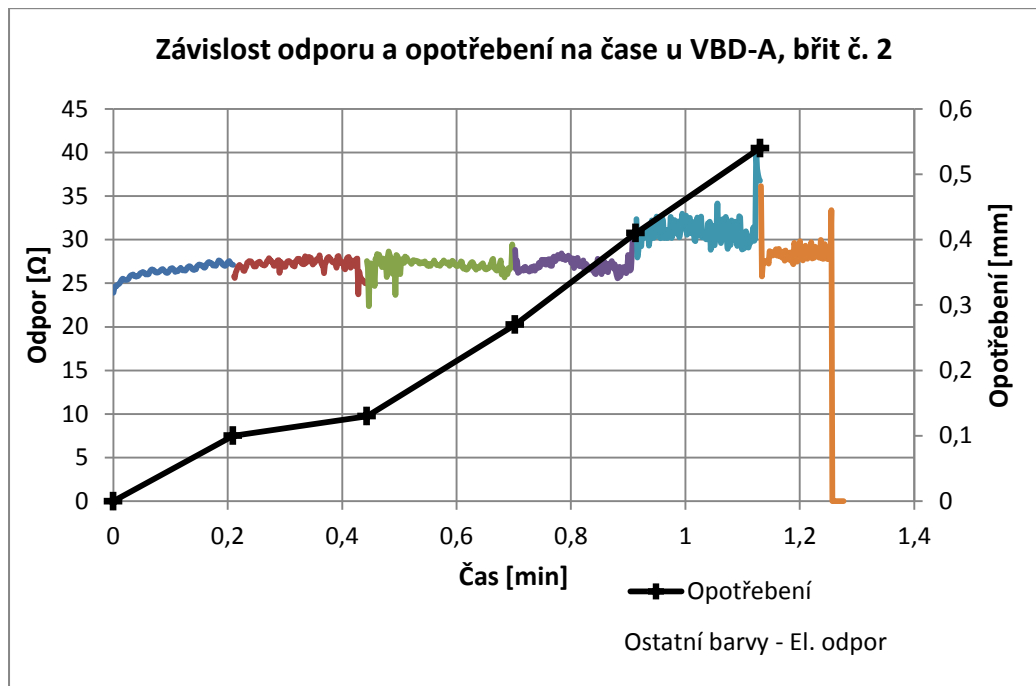
Obr. 5.1 Lom břitu č. 1 u VBD-A



Obr. 5.2 Závislost odporu na čase při řezu ($v_c = 500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm}$, $a_p = 1,6 \text{ mm}$)

U břitu č. 2 byla použita procesní kapalina a řezná rychlost byla poloviční ($v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$). Nástroj vydržel 6 řezů, poté však rovněž došlo k lomu. Celkový čas nástroje v řezu byl 1,28 min. a obrobená plocha byla celkem 0,31 m. Na obr. 5.3 lze vidět průběh

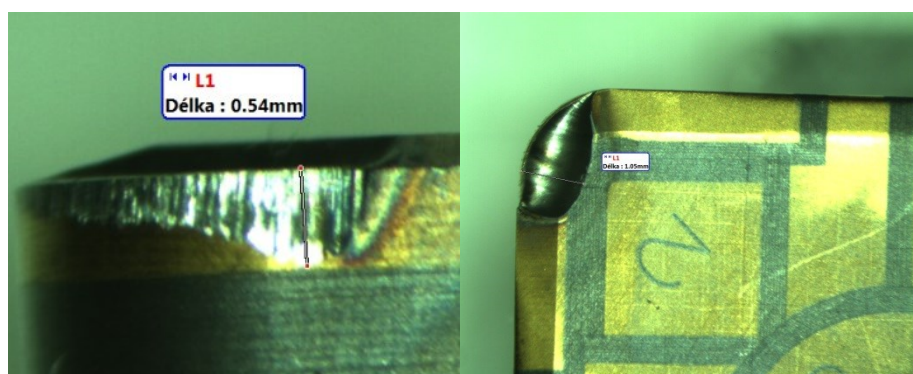
elektrického odporu jednotlivých řezů v závislosti na čase a křivku opotřebení. Opotřebení se začalo od třetího řezu prudce zvyšovat a v posledním řezu došlo k lomu břítu.



Obr. 5.3 Závislost odporu a opotřebení při jednotlivých řezech na čase u VBD-A, břit č. 2

$$(v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad f = 0,2 \text{ mm}, \quad a_p = 1,6 \text{ mm})$$

Na obr. 5.4 vlevo lze vidět opotřebení na hřbetu nástroje $VB=0,54$ mm. Na obr. 5.4 vpravo lze vidět poměrně velký žlábek na čele $KB=1,05$ mm. Snímek byl vytvořen po pátém řezu. Hodnota opotřebení na čele dosáhla kritické hodnoty. K přerušení odporové vrstvy však ještě nedošlo, a proto byl břit použit ještě v šestém řezu.



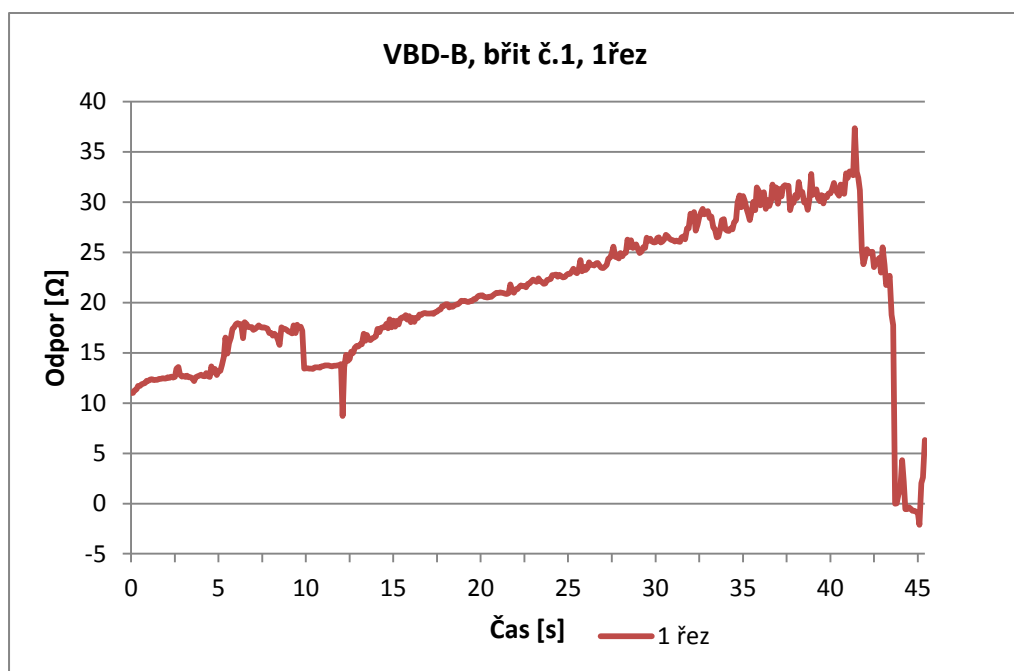
Obr. 5.4 Snímky opotřebení po pátém řezu u VBD-A břítu č. 2

Velký žlábek na čele nástroje signalizuje blížící se lom břítu. V šestém řezu pak nastal lom.

Břítová destička - B

U břítové destičky typu B bylo použito pro daný experiment celkem čtyř břitů. U třech z nich došlo k lomu. U břitu č. 7 pak byla rovněž použita procesní kapalina.

U břitu č. 1 byla řezná rychlost $v_c=300\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Nástroj byl v řezu celkem 1,01 min. Břitem č. 1 byly provedeny dva řezy. Nástroj urazil dráhu 0,171 m. Na obr. 5.5 je vidět, jak elektrický odpor přibližně lineárně roste a po zhruba 42 sekundách řezu nastane prudký pokles až do minusových hodnot odporu a opětovného vzestupu do kladných hodnot. Tento jev mohl být důsledkem přerušení nebo částečného narušení odporové vrstvy.

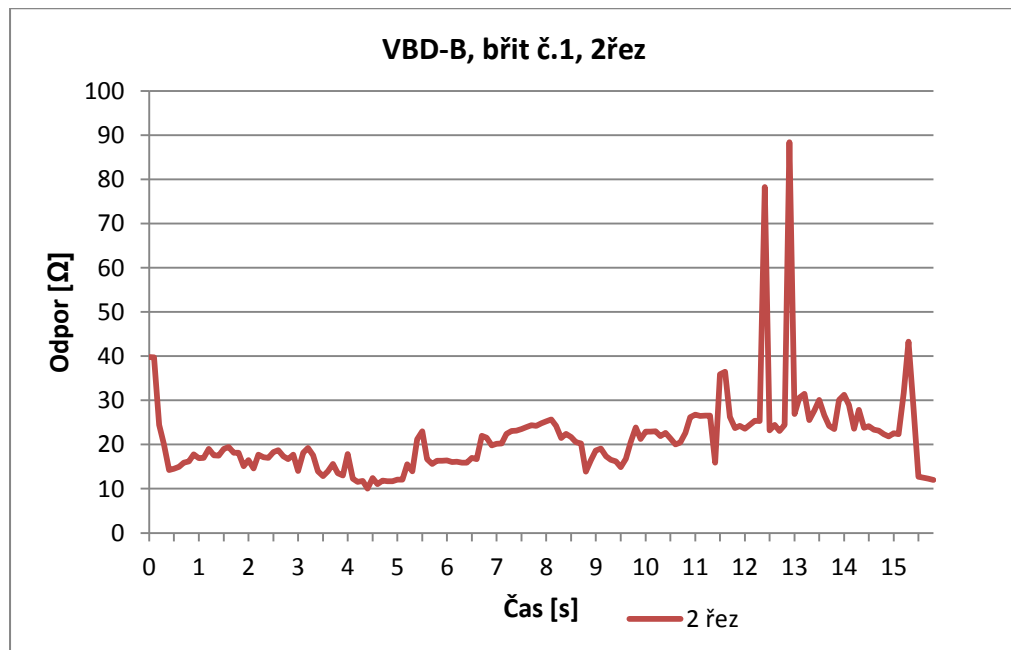


Obr. 5.5 Závislost el. odporu na čase u VBD-B, břit č. 1, 1 řez

$$(v_c = 300 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}, f = 0,2 \text{ mm}, a_p = 1,6 \text{ mm})$$

Tento stav je zajímavý a je nutné ho testovat na jiných materiálech, protože tento jev nebyl v předchozích výzkumech zaznamenán.

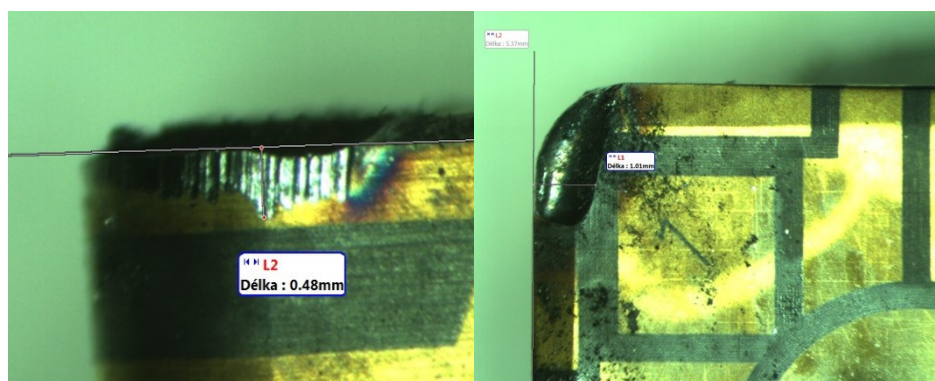
Při druhém řezu byl elektrický odpor nadále měřen a hodnoty odporu byly velmi kolísavé, nevykazovaly však úplné přerušení odporové vrstvy obr. 5.6. Prudké vychýlení hodnot až o 60 Ohm viditelné na obr. 5.6 může být známkou lomu břitu. Ovšem až po vyjetí nástroje z řezu a jeho následném očištění bylo zjištěno, že k lomu břitu opravdu došlo. Z toho plyne, že přerušení odporové vrstvy nebo dosažení optimálního opotřebení je vhodnější zjišťovat, až po vyjetí nástroje z řezu a jeho očištění.



Obr. 5.6 Závislost el. odporu na čase u VBD-B, břit č. 1, 2 řez

$$(v_c = 300 \text{ m.min}^{-1}, f = 0,2 \text{ mm}, a_p = 1,6 \text{ mm})$$

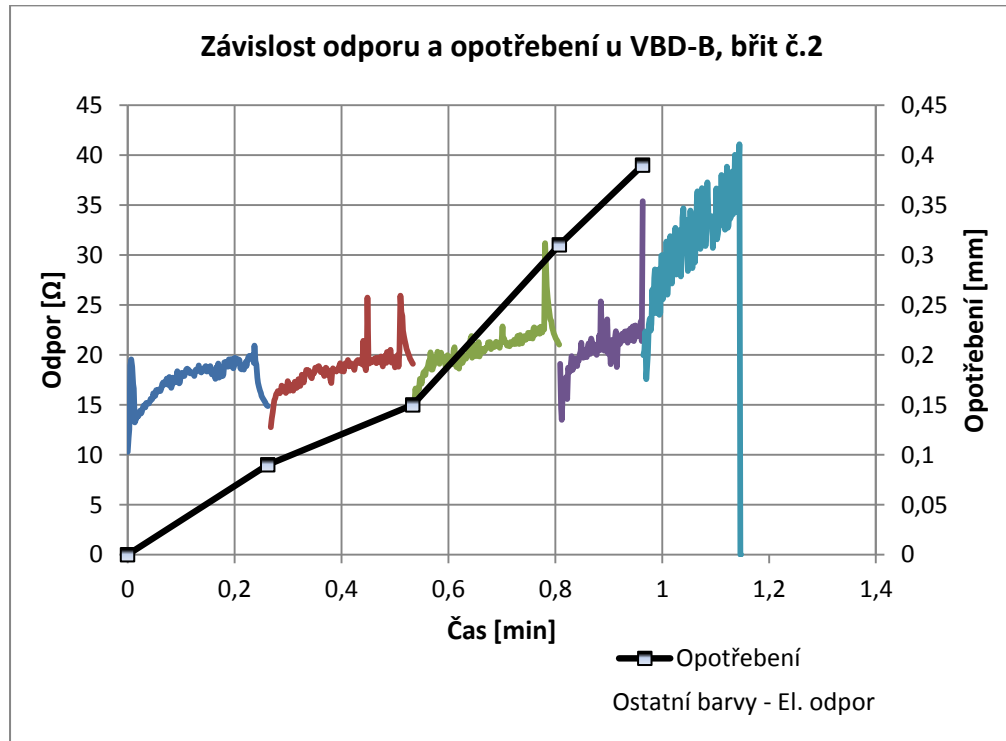
Na obr. 5.7 lze vidět vlevo výrazné abrazivní opotřebení na hřbetu nástroje po prvním řezu s hodnotou $VB=0,48 \text{ mm}$ a velikost opotřebení na čele vpravo, kde byla hodnota $KB=1,01 \text{ mm}$. Abrazivní opotřebení vznikalo na všech testovaných břitech a je důsledkem brusného otěru, vznikajícího vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu a mikročástic uvolněných z nástroje.



Obr. 5.7 Snímky opotřebení po prvním řezu u VBD-B břitu č. 1

Z obrázku je patrné, že na čele nástroje již po prvním řezu došlo k částečnému poškození odporové vrstvy. Tato skutečnost může mít vliv na velmi kolísající hodnoty elektrického odporu, viditelné na obr. 5.5 a 5.6.

Na břítu č. 2 se provedlo celkem 5 řezů. Nástroj urazil dráhu 0,23 m a v řezu setrval 1,14 min. V posledním řezu, začal elektrický odpor prudčeji růst, až došlo k přerušení odporové vrstvy a nastal lom břítu. Na obr. 5.8 je vidět závislost elektrického odporu a opotřebení na čase.

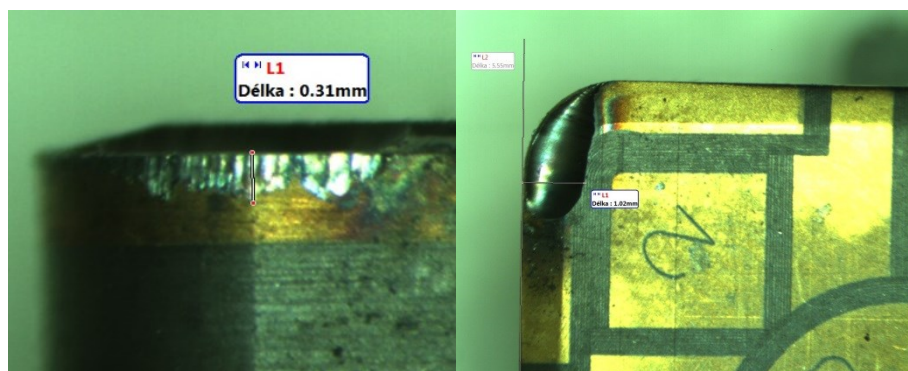


Obr. 5.8 Závislost odporu a opotřebení při jednotlivých řezech na čase u VBD-B, břit č. 2

$$(v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}, f = 0,2 \text{ mm}, a_p = 1,6 \text{ mm})$$

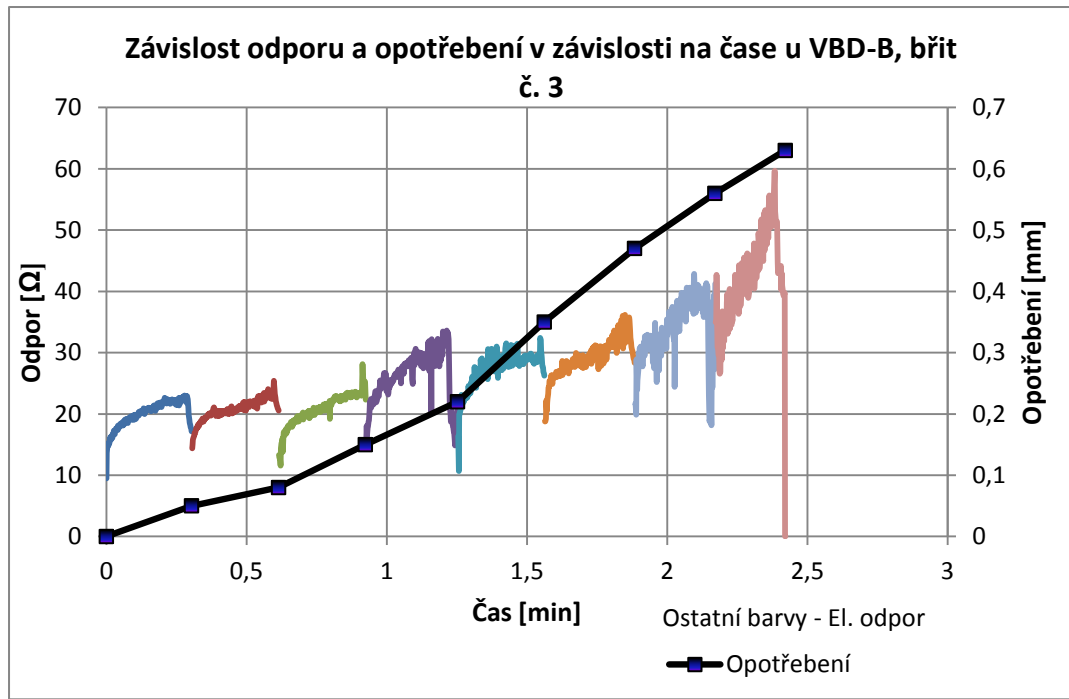
Z obrázku lze také pozorovat výkmity elektrického odporu, které vznikaly vyjžděním nástroje z materiálu. Tyto výkmity se s rostoucím opotřebením zvětšovaly. V čtvrtém řezu pak překračovaly hranici 35 Ohm.

Na obr. 5.9 vlevo je vidět míra opotřebení na hřbetu $VB=0,31 \text{ mm}$. Na obr. vpravo lze vidět opotřebení na čele ve formě žlábků $KB=1,02 \text{ mm}$



Obr. 5.9 Snímky opotřebení po třetím řezu u VBD-B břítu č. 2

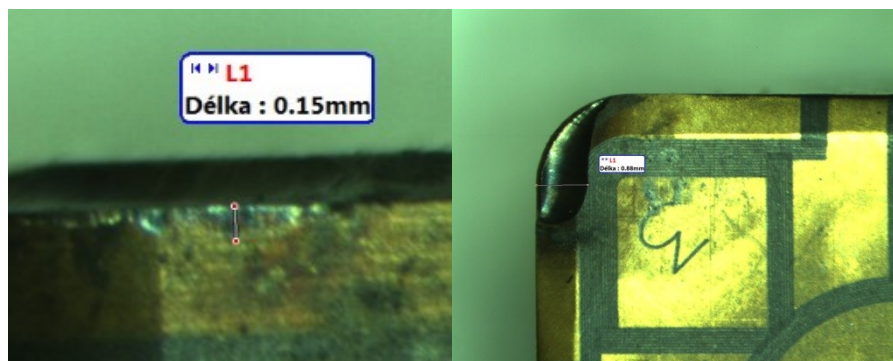
Destrukce břitu nastala pouze v případě obrábění břitem číslo 3. Zde se taky provedlo nejvíce řezů, celkem 8 a to díky nejnižší použité řezné rychlosti $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$. Nástroj setrval v řezu 2,42 min. Celková dráha nástroje, byla 0,39 m. Na obr. 5.10 jsou vyobrazeny průběhy elektrických odporů jednotlivých řezů a křivka opotřebení v závislosti na čase.



Obr. 5.10 Závislost odporu a opotřebení při jednotlivých řezech na čase u VBD-B, břit č. 3

$$(v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}, f = 0,2 \text{ mm}, a_p = 1,6 \text{ mm})$$

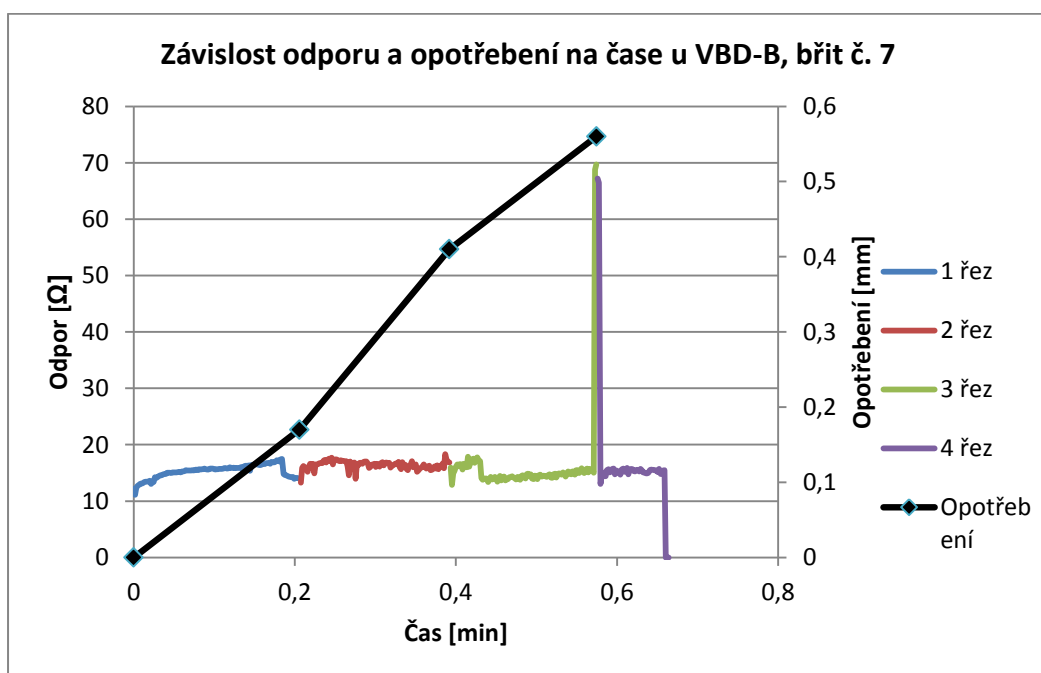
Na obr. 5.11 vlevo je vidět velikost opotřebení na hřbetu nástroje $VB = 0,15 \text{ mm}$. Na obrázku vpravo jde vidět opotřebení na čele v podobě typického žlábků $KB = 0,88 \text{ mm}$. Snímek byl vytvořen po třetím řezu.



Obr. 5.11 Snímky opotřebení po třetím řezu u VBD-B břitu č. 3

Poslední břit použitý v experimentu byl testován opět spolu s procesní kapalinou jako u VBD-A při řezné rychlosti $v_c = 300 \text{ m.min}^{-1}$. Tato řezná rychlost byla použita již v řezu břitu č. 1 na VBD-B. U břitu č. 1 ale nebyla použita procesní kapalina a nástroj vydržel pouze dva řezy a poté došlo k lomu břitu. Při stejných řezných podmínkách došlo u břitu č. 7 k lomu až ve čtvrtém řezu díky procesní kapalině, která má příznivější vliv na rychlost opotřebení břitu.

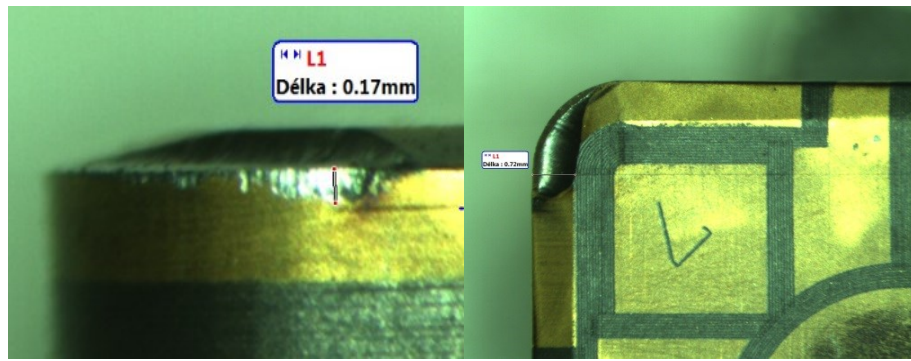
Na obr. 5.12 je možné vidět vyvíjející se elektrický odpor a opotřebení v závislosti na čase. U třetího řezu je vidět velká výchylka hodnoty elektrického odporu, přibližně až o 60 Ohm. Tento jev byl již pozorován na obr. 5.8. Tyto stavy mohou nastávat při vyjíždění nástroje z řezu a také mohou signalizovat blížící se přerušování odporové vrstvy.



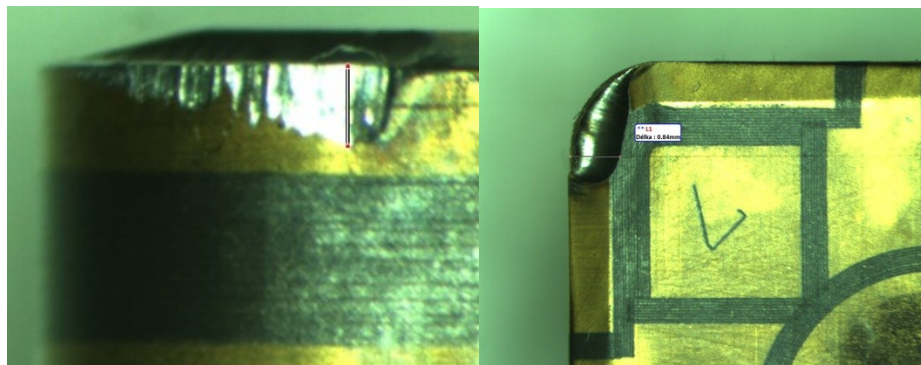
Obr. 5.12 Závislost odporu a opotřebení při jednotlivých řezech na čase u VBD-B, břit č. 7

$$(v_c = 300 \text{ m.min}^{-1}, f = 0,2 \text{ mm}, a_p = 1,6 \text{ mm})$$

Nástroj obrobil délku 0,2 m a v řezu se pohyboval 0,66 min. Na obr. 5.13 lze vidět opotřebení na hřbetu $VB = 0,17 \text{ mm}$ vlevo a opotřebení na čele vpravo $KB = 0,72 \text{ mm}$. Tyto hodnoty byly naměřeny po prvním řezu. Po druhém řezu byly hodnoty opotřebení na hřbetu nástroje přibližně 2,5x větší. Na čele nástroje pak takový velký rozdíl nebyl. Na obr. 5.14 je vidět míra opotřebení nástroje po druhém řezu. Po druhém řezu byly hodnoty $VB = 0,41 \text{ mm}$ a $KB = 0,84 \text{ mm}$.



Obr. 5.13 Snímky opotřebení po prvním řezu u VBD-B bříty č. 7



Obr. 5.14 Snímky opotřebení po druhém řezu u VBD-B bříty č. 7

Na obr. 5.13 a 5.14 jde opět vidět abrazivní opotřebení na hřbetu nástroje a poměrně velké žláby na čele, které jsou důkazem blížícího se lomu bříty.

6. Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo sledovat chování odporové vrstvy, která je nanesena na VBD z nitridové keramiky. Kombinace obráběného materiálu a materiálu nástroje nebyla příliš vhodná, avšak pro rozšíření znalostí chování odporové vrstvy byl tento materiál pro daný experiment použit. Díky tomuto materiálu hodnoty opotřebení velmi rychle dosahovaly kritické hodnoty opotřebení ($VB_{KRIT}=0,54$ mm). Z důvodu značného opotřebení a časté destrukci břítu, byly na daný experiment použité dvě VBD (A, B). Ve dvou případech byla využita procesní kapalina a bylo zjištěno, že má příznivější vliv na rychlost opotřebení a hodnoty elektrického odporu byly rovnoměrnější než při obrábění na sucho.

U VBD-A byly použity dva břítu. U obou použitých břitů došlo k lomu. V prvním případě nastal lom během několika sekund hned při prvním řezu z důvodu řezné rychlosti, která byla pro daný nástroj s ohledem na typ obráběného materiálu příliš vysoká ($v_c = 500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm}$, $a_p = 1,6 \text{ mm}$). U dalšího břítu bylo provedeno šest řezů a byla použita procesní kapalina, která má příznivý vliv na rychlost opotřebení. V pátém řezu se dosáhlo kritické hodnoty opotřebení. V šestém řezu pak došlo k lomu břítu. Elektrický odpor se postupně zvětšoval spolu s opotřebením, až došlo k přerušení odporové vrstvy. Břit obrobil dráhu 0,31 m a v řezu setrval 1,28 min. Řezné podmínky byly stanoveny na hodnotu $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm}$, $a_p = 1,6 \text{ mm}$.

Na VBD-B bylo využito čtyř břitů, z nichž u jednoho také procesní kapalina. U prvního břítu byly řezné podmínky $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm}$, $a_p = 1,6 \text{ mm}$. Nástroj byl v řezu po dobu 1,01 min a provedly se dva řezy. U tohoto břítu došlo opět k destrukci břítu. V prvním řezu elektrický odpor rostl a poté došlo k výchylce až o 38 ohm do minusových hodnot elektrického odporu. V druhém řezu pak byly hodnoty elektrického odporu velmi kolísavé. Důvodem je částečné přerušení odporové vrstvy na čele nástroje. U břítu č. 2 se provedlo celkem 5 řezů. Obrobená dráha měla délku 0,23 m a čas 1,14 min. Řezné podmínky byly $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm}$, $a_p = 1,6 \text{ mm}$. Elektrický odpor se postupně zvětšoval spolu s opotřebením nástroje. Od druhého řezu bylo možné pozorovat velké výkmity elektrického odporu při vyjíždění nástroje z materiálu. Tyto výkmity se zvětšovaly spolu s opotřebením. V pátém řezu došlo k přerušení odporové vrstvy a lomu břítu. Nejvíce řezů se provedlo na břítu č. 3. Řezné podmínky zde byli nejnižší $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm}$, $a_p = 1,6 \text{ mm}$. Celkem se provedlo osm řezů. Elektrický odpor pomalu rostl spolu s opotřebením. V osmém řezu pak došlo k prudkému nárůstu hodnot elektrického odporu a přerušení odporové vrstvy. Poslední břit č. 7 byl použit spolu s procesní kapalinou za stejných řezných podmínek jako u břítu č. 1 na VBD-B. Bylo dokázáno, že procesní

kapalina má příznivý vliv na vývoj opotřebení a hodnoty elektrického odporu. V třetím řezu však došlo k vychýlení hodnoty elektrického odporu, až o 60 Ohm při vyjetí nástroje z řezu, což může signalizovat blížící se přerušení odporové vrstvy. V čtvrtém řezu pak došlo opět k lomu břítu.

Z naměřených hodnot při experimentu lze potvrdit, že VBD s nanesenou odporovou vrstvou je vhodným nástrojem k zjištění optimálního kritéria opotřebení.

6.1 Doporučení pro další experimenty

Zkoumání chování odporové vrstvy nanesené na VBD je velmi rozsáhlé téma. Proto lze doporučit tuto problematiku pro další experimenty.

Doporučení:

- Bližší zkoumání vlivu procesní kapaliny na hodnoty elektrického odporu,
- Testování VBD s odporovou vrstvou na jiných materiálech

Seznam použité literatury

- [1] BILÍK, Oldřich. *Obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001, 130 s. ISBN 80-7078-811-9.
- [2] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007, 119 s. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [3] DMGMORI. www.dmgmori.com. [online].[citováno 14. duben 2015] Dostupné z:
<http://cz.dmgmori.com/blob/166060/4eb958bb7943ee08bf2975f8a6a803e8/pt0uk1501-nlx2500nd-pdf-data.pdf>
- [4] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [5] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, 1995, 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
- [6] JONŠTA, Zdeněk. *Technické materiály II* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, [citováno 8. února 2015]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TM2/Technicke%20materialy%20II.pdf>
- [7] *Katalog soustružení Pramet*. Šumperk: Pramet Tools,s.r.o., 2014. 397 s
- [8] KRATOCHVÍL, Jiří. *Metodika sledování opotřebení keramických nástrojů pomocí odporových vrstev během řezu*. Ostrava, 2010. 118s. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava. Školitel: doc. Ing. Vladimír VRBA, CSc.
- [9] Kyocera. www.kyocera.com. [online].[citováno 10. března 2015]. Dostupné z: http://www.kyoceraprecisiontools.com/indexable/pdf/ceramics_brochure.pdf
- [10] MAŤEJKA, J.; ČESÁNEK, J.; KRÍŽ, A. Vývojové trendy v oblasti řezné keramiky. *Vrstvy a povlaky 2005*. Trenčín: DIGITAL GRAPHIC, 2005. 133- 136 s. ISBN 80-969310-1-6.
- [11] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*, Vydavateľstvo ŽU EDIS Žilina: Žilina 2007. 343s. ISBN 978-80-8070-7011-8

[12] Sandvik. www.sandvik.coromant.com [online].[citováno 10. března 2015]. Dostupné z:http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/ceramics/pages/default.aspx

[13] SVOBODA, Emanuel. Přehled středoškolské fyziky. 2. přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 1996, 497 s. ISBN 80-7196-006-3.

[14] ŽIŽKA, J.: Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje. Liberec: TU Liberec, 2003. 106 s. ISBN 80-7083-687-1