

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské  
metrologie



*Detekce trvanlivosti keramických  
řezných nástrojů, pomocí integrovaných  
odporových vrstev*

*Durability Detection of  
Ceramic Cutting Tools with Integrated  
Resistive Layers*

## **Disertační práce**

Vypracoval: **Ing. Ondřej DUPALA**

Školitel: *prof. Dr. Ing. Josef BRYCHTA*

Školitel specialista: *Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.*

Studijní obor: *2303V002 Strojírenská technologie*

Počet stran: *114*

Ostrava 2016

## Anotace disertační práce:

DUPALA, Ondřej. *Detekce trvanlivosti keramických řezných nástrojů, pomocí integrovaných odporových vrstev*. Ostrava, 2016. 114 s. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava. Školitel: prof. Dr. Ing. Josef BRYCHTA

Předkládaná disertační práce se zabývá metodikou sledování opotřebení vyměnitelných břitových destiček s nanesenou odporovou vrstvou. Odporová vrstva je nanášena na vyměnitelné břitové destičce z nitridické keramiky. Nástroj je vyroben tak, že řezná hrana a k ní přilehlé plochy tvoří uzavřený vodivý obvod. Pomocí speciálního nástrojového držáku a dalších zařízení je měřena a zaznamenávána hodnota elektrického odporu během procesu obrábění. Mezi jednotlivými řezy je také měřena hodnota opotřebení. Opotřebení je měřeno na počítači pomocí specializovaného software a to na základě snímků pořízených mikroskopem. Experimenty probíhaly při podélném soustružení na čtyřech různých polotovarech ze stejného materiálu z litiny s kuličkovým grafitem. Na každém polotovaru pak proběhly tři experimenty za různých řezných podmínek. Doprovodně byla měřena i teplota na špičce nástroje.

Cílem práce je zkoumání závislosti mezi průběhem opotřebení a průběhem elektrického odporu a zmapování doprovodných jevů vztahujících se k této problematice. Praktická část práce obsahuje podrobný popis experimentu spolu s popisem použitých strojů a zařízení. Je zde grafické znázornění naměřených hodnot a jejich rozbor. Závěrečná část pak obsahuje shrnutí výsledků a závěry pro vědu i praxi s následným doporučením pro další výzkum.

Teoretická část práce je zaměřena na rozbor keramických nástrojových materiálů, jejich rozdělení a základní popis. Podrobněji je zde popsána nitridická keramika a samotná výroba nitridu křemíku. V dalších kapitolách jsou popsány druhy a mechanismy opotřebení, metody jeho měření a kritéria opotřebení. Také jsou zde zmíněny metody diagnostiky řezného nástroje. A to především poznatky ze zahraničních publikací zabývajících se diagnostikou řezného nástroj pomocí odporových vrstev při soustružení i frézování.

## Anotation of Dissertation Thesis:

Dupala, Ondřej. *Durability Detection of Ceramic Cutting Tools with Integrated Resistive Layers*. Ostrava, 2010. 114 pages. Dissertation Thesis. VŠB-TU Ostrava.

Supervisor: prof. Dr. Ing. Josef BRYCHTA

The presented dissertation thesis follow up methodology of monitoring the wear of inserts with built - up impedance layer. The Impedance layer is built - up on an exchangeable cutting edge compounded of nitride ceramics. The tool (cutting insert) is designed in a specific way, so each cutting edge creates a close conductive electric circuit. The electric resistance is measured and recorded during the machining process thanks to a special tool holder and other devices. The tool wear is measured after each cut. Measuring is realized on a PC with measuring software and it is based on photos done by a microscope. Experiments were performed at longitudinal turning on four different semi-finished products of the same material of spheroidal graphite cast iron. The 3 experiments with various cutting conditions were done on each semi-finished product. The temperature on the insert tip was measured additionally.

The aim of the work is to investigate the relationship between a tool wear curve and an electric resistance curve. And examining of the accompanying phenomena related to this issue. The practical part of the work contains a detailed description of the experiment together with a description of used machinery and equipment. There is a graphic representation of the measured values and their analysis. The final part summarizes the results and conclusions of science and the practice followed by recommendations for further research.

The theoretical part is focused on the analysis of ceramic tool materials, their partition and basic description. The nitride ceramic production and features are described here. The types and mechanisms of tool wears, measuring methods and criteria for tool wear are described in further chapters. The methods of tool diagnostic are mentioned as well. There is also mentioned knowledge of foreign publications dealing with the diagnosis of a cutting tool using resistive layers in turning and milling.

## Obsah

Anotace disertační práce:.....	2
Anotation of Dissertation Thesis:.....	3
Seznam použitých značek.....	7
1 Úvod .....	10
2 Cíle disertační práce .....	11
3 Řezná keramika .....	12
3.1 Základní rozdělení .....	13
3.2 Popis a historie keramických materiálů .....	14
3.3 Nitridová keramika.....	16
3.4 Výroba nitridu křemíku lisovaný za vysokých teplot (HPSN - hot pressed silicon nitride).....	17
3.5 Výroba nitridu křemíku metodu HIP .....	19
4 Opatření břitů obráběcích nástrojů.....	21
4.1 Základní mechanismy opotřebení.....	21
4.2 Typy opotřebení břitů nástrojů .....	24
4.3 Opotřebení keramických řezných nástrojů .....	30
4.4 Kritéria opotřebení .....	31
5 Metody diagnostiky opotřebení řezných nástrojů .....	35
5.1 Přímé metody .....	35
5.2 Nepřímé metody .....	41
6 Současný stav – metoda nanosené odporové vrstvy .....	42
6.1 Diagnostika řezného nástroje pomocí odporových vrstev při soustružení.....	42
6.2 Diagnostika řezného nástroje pomocí odporových vrstev při frézování .....	43
7 Návrh experimentu.....	46
7.1 Stroj .....	50

7.2	Popis nástroje.....	51
7.3	Popis nástrojového materiálu .....	52
7.4	Nástrojový držák.....	53
7.5	Materiál obrobku.....	54
7.6	Měření elektrického odporu .....	57
7.7	Měření opotřebení .....	59
7.8	Řezné podmínky.....	60
7.9	Měření teploty.....	60
8	Závislost opotřebení na elektrickém odporu .....	62
8.1	Obecná charakteristika experimentů .....	62
8.2	Průběh opotřebení.....	62
8.3	Teplota odporové vrstvy při obrábění .....	67
8.3.1	Stanovení teplotního součinitele elektrického odporu.....	68
8.4	Hodnocení průběhu elektrického odporu.....	71
8.5	Skupina A). Plný materiál .....	71
8.5.1	Experiment A1 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	71
8.5.2	Experiment A2 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	74
8.5.3	Experiment A3 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	76
8.6	Skupina B). Polotovár s jednou podélnou drážkou .....	77
8.6.1	Experiment B1 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	77
8.6.2	Experiment B2 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	78
8.6.3	Experiment B3 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	80
8.7	Skupina C). Polotovár se čtyřmi podélnými drážkami.....	81
8.7.1	Experiment C1 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	81
8.7.2	Experiment C2 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	82
8.7.3	Experiment C3 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	83
8.8	Skupina D). Polotovarem jsou lišty upnuty v přípravku.....	85
8.8.1	Experiment D1 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	85
8.8.2	Experiment D2 - Závislost opotřebení a elektrického odporu.....	87
9	Srovnání experimentů .....	89

9.1	Závislost elektrického odporu na čase pro konkrétní řeznou rychlost .....	89
9.2	Závislost elektrického odporu na čase pro jednotlivé řezné rychlosti v rámci konkrétního polotovaru .....	92
9.3	Opotřebení na čelní ploše .....	95
9.4	Závislost opotřebení na čase pro různé řezné rychlosti.....	96
9.5	Závislost opotřebení na čase pro různé typy polotovarů .....	100
10	Závěr.....	102
10.1	Vědecký přínos.....	104
10.2	Závěry pro praxi.....	105
10.3	Doporučení pro další zkoumání.....	105
11	Conclusion.....	106
11.1	Scientific benefits.....	108
11.2	Conclusions for practice .....	109
11.3	Recommendations for further investigation .....	109
	Literatura .....	110
	Publikační činnost.....	112
	Seznam příloh: .....	114

## Seznam použitých značek

VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
CNC	computer numerical control (počítačově číslicově řízené)	[-]
$a_p$	šířka záběru ostří	[mm]
$f$	posuv	[mm]
$t$	čas	[s]
$v_c$	řezná rychlost	[m·min <sup>-1</sup> ]
$f$	frekvence, kmitočet	[kHz]
$n$	otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$V_m$	výstupní napětí – tělo unášecího trnu	[V]
$V_d$	výstupní napětí – podélné příčné pero	[V]
$V_c$	výstupní napětí – cívka	[V]
$V_f$	výstupní napětí – feritové jádro	[V]
$V_B$	opotřebení na hřbetě nástroje	[mm]
$V_{Bmax}$	maximální opotřebení na hřbetě nástroje	[mm]
$R$	elektrický odpor	[ $\Omega$ ]
CVD	chemické napařování z plynné fáze	[-]
$D_o$	průměr obrobku	[mm]
$E$	modul pružnosti	[GPa]
HB	tvrdost podle Brinella	[-]
$H_E$	intenzita vyzařování reálného tělesa	[W·m <sup>-2</sup> ]
$H_{EO}$	intenzita vyzařování absolutně černého tělesa	[W·m <sup>-2</sup> ]
HIP	vysokoteplotní izostatické lisování	[-]
HSC	vysokorychlostní obrábění	[-]
$I_n$	aktivita nástroje	[min <sup>-1</sup> ]

$i_n$	specifická aktivita nástroje	[min <sup>-1</sup> ]
$I_{tř}$	aktivita třísek	[min <sup>-1</sup> ]
KB	šířka žlábků	[mm]
$K_f$	vzdálenost žlábků od čela	[mm]
KM	střední vzdálenost žlábků	[mm]
KT	hloubka výmolu na čele	[mm]
$L_p$	vzdálenost osy trysky od špičky nástroje	[mm]
$M_1$	hmotnost destičky před otupením	[g]
$M_2$	hmotnost destičky po otupení	[g]
$m_{mat}$	hmotnost opotřebovaného materiálu	[g]
$M_n$	zkoumané množství nástrojového materiálu	[g]
R	elektrický odpor termistoru při teplotě	[Ω]
$R_0$	elektrický odpor termistoru při výchozí teplotě	[Ω]
$R_m$	mez pevnosti	[MPa]
TiC	karbid titanu	[-]
VB	opotřebení na hřbetě	[mm]
$VB_B$	opotřebení přímé části ostří (průměrné)	[mm]
$VB_{Bmax}$	opotřebení na hřbetu nástroje maximální	[mm]
$VB_{BHmax}$	maximální opotřebení na hlavním hřbetu nástroje	[mm]
$VB_C$	opotřebení hřbetu nástroje v oblasti špičky nástroje	[mm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
$VB_N$	opotřebení hřbetu nástroje ve formě vrubu	[mm]
VR	radiální opotřebení špičky	[mm]
$x_m$	vzdálenost nástroje od obrobku	[mm]
$x_p$	vzdálenost trysky od obrobku	[mm]
$\alpha$	teplotní součinitel měrného elektrického odporu	[K <sup>-1</sup> ]



$\alpha_n$	úhel hřbetu	[°]
$\Delta M$	úbytek hmoty	[g]
$\theta$	teplota	[°C]
$\theta_0$	výchozí teplota	[°C]
$\lambda$	vlnová délka	[ $\mu\text{m}$ ]
$K_{IC}$	lomová houževnatost	[MN·m], [Mpa·m <sup>1/2</sup> ]
$\chi_r$	úhel nastavení ostří	[°]
$\lambda$	měrná tepelná vodivost	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	součinitel délkové roztažnosti	[10 <sup>-6</sup> K]
HRA	tvrdost podle Rockwella	[-]
HV	tvrdost podle Vickerse	[-]
$\sigma_0$	pevnost v ohybu	[MPa]
$\rho$	měrná hmotnost	[g·cm <sup>-3</sup> ]

# 1 Úvod

Dnešní náročná moderní doba nás nutí k neustálému snižování výrobních nákladů. Jedním z hlavních odvětví strojírenské výroby je obrábění. Abychom mohli efektivně a úsporně obrábět je pro nás stěžejní 100% využití řezného nástroje, použití moderních CNC strojů nebo bezobslužných obráběcích strojů. Ve všech těchto případech by mohlo být velkým přínosem použití moderních inteligentních řezných nástrojů, s integrovanými destruktivními senzory opotřebení.

V provozech vybavených bezobslužnými automaty se nevyužívá plné trvanlivosti řezného nástroje. Břitová destička se vymění dříve, aby nedošlo ke vzniku horší obrobené plochy než je požadovaná. Z tohoto důvodu se stanovuje nižší trvanlivost nástroje, i když je nástroj schopen stále obrábět s požadovanou kvalitou obrobené plochy. Některá literatura uvádí, že se nástroj využívá pouze ze 70 %. To způsobuje zvyšování vedlejších časů a plýtvání náklady na nástroj.

Pokud by byl řezný nástroj sám schopen dát signál řídicímu systému o své aktuální trvanlivosti nebo o jejím dosažení. Mohli bychom efektivně využívat celé trvanlivosti řezného nástroje. A zároveň předcházet nečekaným snížením trvanlivosti například z důvodu nehomogenního složení obráběného materiálu.

## 2 Cíle disertační práce

Jednou z přímých diagnostických metod řezné hrany je metoda integrovaných odporových vrstev. V praktické část disertační práce je zkoumáno chování odporové vrstvy na sérii experimentů. Cílem je posoudit vypovídající schopnost této metody a posoudit potenciál jejího praktického využití. Metoda bude testována při odlišných řezných podmínkách za účelem širšího zmapování problematiky. Rovněž bude ověřena funkčnost celé měřící sestavy a především zde bude posouzena časová závislost mezi průběhem elektrického odporu a opotřebením.

Teoretická část práce se zaměřuje na obecný popis technologií, metod a pojmů souvisejících s praktickým měření. Je zde popsána řezná keramika, opotřebenění břitu a vybrané metody diagnostiky řezných nástrojů.

### Dílčí cíle disertační práce:

- Popis oblastí a technologií se vztahem ke zkoumané problematice v praktické části práce
- Posouzení současného stavu využití metody odporových vrstev
- Experimentální ověření teoretických předpokladů chování odporové vrstvy
- Posoudit pozitivní a negativní vlivy spjaté s touto technologií
- Posoudit praktické využití této diagnostické metody
- Doporučení pro další zkoumání této problematiky

### 3 Řezná keramika

Jedná se převážně o krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Tato definice zahrnuje veškeré keramické materiály, ať už se bavíme o porcelánu, brousících materiálech, nebo o takzvaných „nových“, speciálních, konstrukčních keramických látkách. Nové keramické látky jsou převážně krystalické na rozdíl od tradiční keramiky, jako porcelán. Vyrábějí se z velmi čistých základních surovin a často také z výchozích chemikálií, jako keramika syntetická. Uvnitř krystalové mřížky jsou atomy vázány pomocí iontových a kovalentních vazeb, převážně však jejich kombinací. Struktura atomové mřížky bývá kubická a hexagonální [6].

Polykrystalické materiály se vyznačují malým rozměrem zrna, většinou pod 1 μm. Mají vysokou tvrdost zatepla a nedochází u nich k chemickým reakcím s materiálem obrobku. Mají dlouhou trvanlivost bříty a to při vysokých řezných rychlostech. Při správném používání můžeme dosáhnout velký objemový úběrů materiálu [1]. V případě volby vhodných řezných podmínek a dodržení určitých zásad, tak bychom potlačili její nevýhody a naopak nechali vyniknout její přednosti.

**Pro efektivní využití řezné keramiky při soustružení je nutné splnit tyto podmínky:**

- vysoká tuhost systému stroj – nástroj – obrobek (kmitání je nežádoucí a zvyšuje opotřebení),
- použití výkonných obráběcích strojů s velkým rozsahem posuvů a otáček případně s jejich plynulou změnou,
- pevné a spolehlivé upnutí – především u větších obrobků vznikají odstředivé síly, které působí proti silám upínacím,
- odstranění kůry obráběného polotovaru (odlitky, výkovky) jiným nástrojem, který lépe odolává abrazivnímu opotřebení,
- sražení náběhových hran na obrobku,
- najíždění a vyjíždění z řezu menšími posuvy,
- výběr vhodného tvaru a velikosti břitové destičky,
- volba vhodného ostří VBD,
- výborný stav obráběcího stroje [6].

### 3.1 Základní rozdělení

- **Oxidická keramika:**
  - **čistá** (čistý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),
  - **polosměsná** ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$ ),
  - **směsná** ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + \text{TiN}$ ).
- **Nitridová keramika** ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$ , sialony),
- **Vyztužená keramika** (oxidická nebo nitridová keramika vyztužená pomocí whiskerů SiC nebo  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

Tab. 3.1 Oblasti využití nástrojů z řezné keramiky [19].

Druh řezné keramiky	Charakteristické použití řezné keramiky	Charakter řezu
$\text{Al}_2\text{O}_3$	obrábění šedé litiny a konstrukčních ocelí nepřerušovaným řezem vysokými rychlostmi za sucha	dokončovací práce
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	obrábění šedé, tvárné a temperované litiny, konstrukčních i zušlechtěných ocelí za sucha	střední a dokončovací operace, částečně přerušovaný řez
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$	obrábění kalených ocelí a těžko obrobitelných materiálů s částečně přerušovaným řezem za sucha i s chlazením, obrábění šedé litiny a tvárných slitin	střední a dokončovací operace, včetně středního a dokončovacího frézování
$\text{Al}_2\text{O}_3 +$ whiskery SiC	obrábění žáruvzdorných a žárupevných materiálů a kalené oceli	hrubovací i dokončovací operace při soustružení i frézování
keramiky na bázi $\text{Si}_3\text{N}_4$	obrábění všech druhů litin, slitin na bázi Ni za sucha i s chlazením	hrubovací i dokončovací operace při soustružení i frézování

Tab. 3.2 Vybrané vlastnosti nástrojových materiálů [9].

Vlastnost	Nástrojový materiál				
	Slinutý karbid WC+Co	Cermet $\text{MO}_2\text{C} + \text{TiCN} + \text{Ni}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$	$\text{Si}_3\text{N}_4$ + přísady
Měrná hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	12,0 ÷ 15,1	5,6 ÷ 7,0	3,8 ÷ 4,0	4,2 ÷ 4,3	3,2 ÷ 3,4
Pevnost v ohybu [MPa]	1000 ÷ 2400	1150 ÷ 1800	600 ÷ 800	600 ÷ 900	600 ÷ 950
Tvrdost [HV]	1900	2000	1600 ÷ 2200	1000 ÷ 2400	1800 ÷ 2000
Tvrdost [HRA]	90 ÷ 92	91 ÷ 93	91 ÷ 94	93 ÷ 95	86 ÷ 95
Modul pružnosti v tahu [GPa]	520 ÷ 660	500	340 ÷ 400	370 ÷ 420	300 ÷ 380
Souč. délkové roztažnosti [ $10^{-6} \text{K}^{-1}$ ]	4,5 ÷ 7,0	7,0 ÷ 7,5	7,0 ÷ 8,5	1,5 ÷ 3,5	
Měrná tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	80	30	20 ÷ 30	20 ÷ 25	30 ÷ 50
Lomová houževnatost [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]	10 ÷ 17	10	4 ÷ 6		5 ÷ 7

### 3.2 Popis a historie keramických materiálů

**Koncem padesátých let dvacátého století** se na trhu objevily první úspěšně aplikované řezné nástroje z čistě oxidické keramiky na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Obsahovaly  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a malé množství (obvykle 1%) slinovacích přísad, např.  $\text{MgO}$ . Pevnost v ohybu se pohybovala v rozsahu 400 až 500 MPa, lomová houževnatost dosahovala hodnot  $K_{\text{IC}} = 3$  až  $4 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ . Oxid hlinitý má nejvyšší termochemickou stabilitu mezi nástrojovými materiály a vykazuje vynikající odolnost proti opotřebení při obrábění vysokými řeznými rychlostmi. [9]

Keramiky typu  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  vyráběné metodou vysokoteplotního lisování byly vyvinuty **začátkem sedmdesátých let** a měly zlepšit odolnost proti vydrolování a spolehlivost keramických řezných nástrojů. Ohybová pevnost vzrostla na 1000 MPa a lomová houževnatost na 4 až  $5 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ , značně byla zvýšena odolnost proti vydrolování ostří. Jde o dnes nejrozšířenější řeznou keramiku, která se významně zasloužila o vstup keramických materiálů na trh řezných nástrojů. Slinovací proces byl postupně změněn z vysokoteplotního lisování na vysokoteplotní izostatické lisování (HIP), aby se snížila cena a zvýšila produktivita. [9]

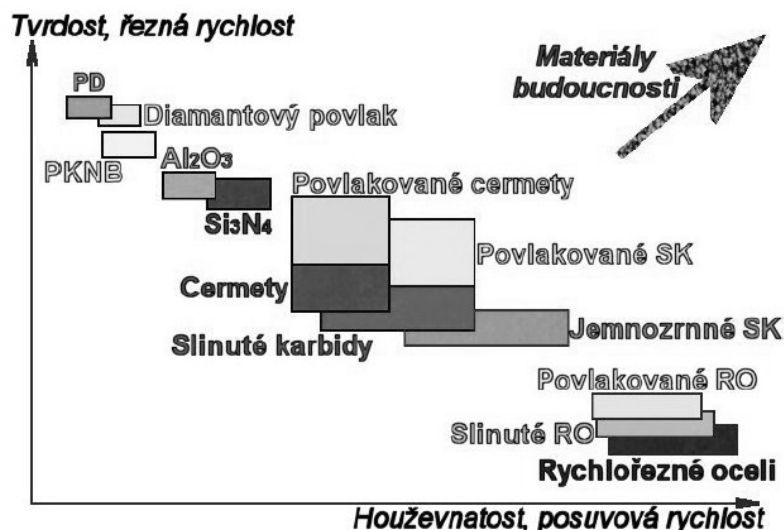
**V polovině osmdesátých let** byly vyvinuty kompozity  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vyztužené vlákny SiC (whiskery), v rozsahu 20 až 30 % objemu. Jejich ohybová pevnost je stejná jako u keramik typu  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ , lomová houževnatost je mnohem vyšší, kolem  $9 \text{ MN m}^{-3/2}$ . Přidáním vláken SiC se značně zvýší odolnost proti vydrolování a vylamování ostří, v důsledku mechanického zpevnění a vyšší odolnosti proti oxidaci. Výsledkem jsou vynikající řezné výkony těchto materiálů při obrábění superslitin, kde nevyztuženým keramickým materiálům hrozí nebezpečí porušení právě v důsledku vydrolování a vylamování ostří. [1]

V současné době jsou pomocí whiskerů SiC nebo  $\text{Si}_3\text{N}_4$  vyztužovány i další typy keramik, např.  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{+TiC}$  nebo  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Whiskery jsou vlákna submikrometrového průměru  $d = 0,5$  až  $1,0 \mu\text{m}$  o délce  $l = (10 \text{ až } 20) d$ . Vzhledem k technologii výroby se pevnost těchto vláken blíží hranici jejich teoretické pevnosti, a proto výrazně zpevňují i materiál, ve kterém jsou rovnoměrně rozptýleny. Vlastnosti keramických materiálů vyztužených pomocí whiskerů jsou ovlivněny zejména poměry na rozhraní matrice - vlákno, velikostí whiskerů a jejich množstvím v matrici. Vazba mezi vlákny a matricí musí být čistě mechanická (matrice "svírá" vlákno), bez

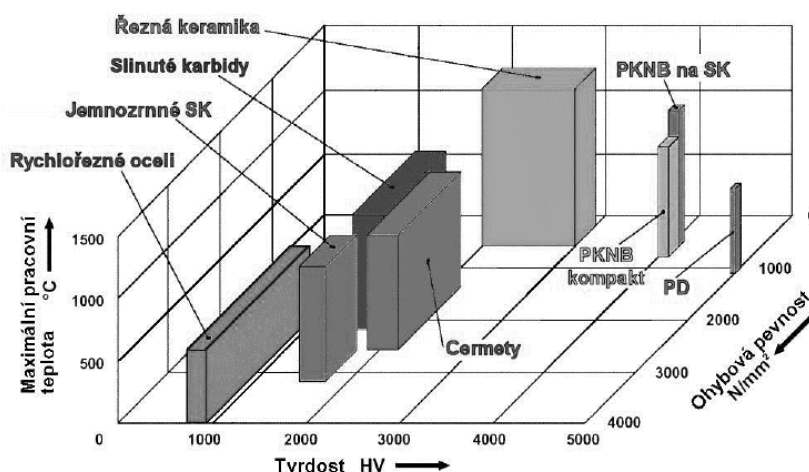
jakékoli chemické reakce, která zhoršuje vlastnosti vláken. Whiskery zlepšují mechanické vlastnosti kompozitu zejména proto, že brání šíření trhlin a to z následujících důvodů:

- při uvolňování vláken, která jsou rovnoběžná s rovinou trhliny, dochází k odklonu směru šíření trhliny,
- vlákna kolmá k rovině trhliny se porušují v rovině trhliny, nebo několik mikrometrů od ní,
- vlákna, která se nacházejí v bezprostřední blízkosti zrn matrice, vytvářejí účinné zpevňovací můstky (pouze v případě, kdy je jejich délka minimálně dvakrát větší, než je rozměr zrn). [1]

Nejnovější trendy v oblasti vývoje řezných keramik patří smíšeným oxidicko - nitridovým keramikám, obvykle ve složení  $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Y}_2\text{O}_3$ . Vzhledem k uvedenému složení jsou tyto materiály též často označovány jako keramiky Sialonové (SiAlON - křemík, hliník, kyslík, dusík). Materiály tohoto typu mají poměrně vysokou houževnatost a své výhodné vlastnosti si zachovávají i při působení vysokých teplot. Ve srovnání s keramikami na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mohou obrábět šedé litiny při dvojnásobných rychlostech posuvu, nehodí se ale pro obrábění ocelí a tvárných litin, kde vykazují poměrně velkou intenzitu opotřebení. Proto jsou jejich současné aplikace omezeny na soustružení a frézování šedých litin, někdy se užívají pro soustružení superslitin. [9] Oblasti použití řezných materiálů a porovnání jejich vybraných vlastností je možno vidět na obr. 3.1 a 3.2.



Obr. 3.1 Oblasti použití řezných materiálů [9]



Obr. 3.2 Hodnoty vybraných vlastností řezných materiálů [9]

### 3.3 Nitridová keramika

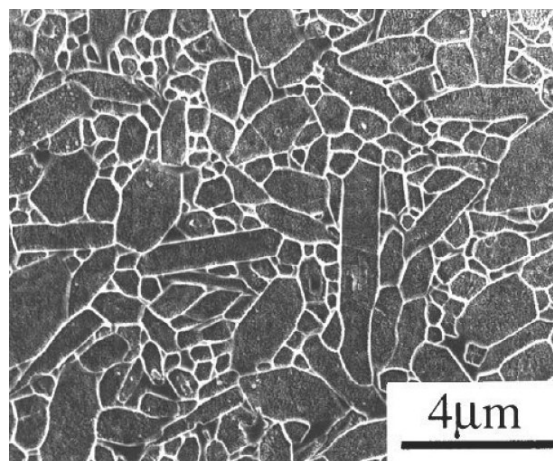
Keramika z nitridu křemíku je dvoufázový materiál, krystaly nitridu křemičitého jsou vázány v pojivu, jehož vlastnosti se odvíjejí od jeho složení (obr. 3.3).

Výroba keramik na bázi nitridu křemíku je při atmosférickém tlaku, v důsledku nižší samo-difuze a teploty rozkladu Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, mnohem obtížnější než u oxidických keramik. Proto je při výrobě nitridové řezné keramiky nutné dopovat výchozí prášek slinovacími přísadami jako jsou kovy, nebo sloučeniny kovů. Dále je nutné aplikovat technologický postup vysokoteplotního lisování nebo vysokoteplotního izostatického



lisování (HIP). Hlavním úskalím při slinování nitridu křemíku je pevná kovalentní vazba mezi atomy křemíku a dusíku. Tato vazba zabraňuje dosažení teoretické hustoty materiálu. Přes všechny uvedené problémy lze však při přesném dodržení technologie výroby získat v nitridové keramice vynikající nástrojový materiál pro soustružení šedých litin řeznými rychlostmi přes  $1000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Vyznačuje se lepším chováním při tepelném šoku a vyšší houževnatostí než keramika na bázi oxidu hlinitého. I když je obrábění šedé litiny relativně jednoduché, jsou zde kladeny vysoké nároky na řezný materiál, protože odebíráme velké množství materiálu při vysokých řezných rychlostech. Proto je nutná vysoká tvrdost zatepla, pevnost, houževnatost, odolnost proti tepelnému šoku a chemická stabilita. Tato keramika si zachovává vysokou tvrdost i při teplotách, které již slinutý karbid nesnáší a navíc je houževnatější než keramika na bázi oxidu hlinitého [1].



Obr. 3.3 Keramika  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [9]

### 3.4 Výroba nitridu křemíku lisovaný za vysokých teplot (HPSN - hot pressed silicon nitride)

Metoda výroby je založena na horkém (žárovém) lisování prášku  $\text{Si}_3\text{N}_4$  se zhutňujícími přísadami. Lisování probíhá při teplotách 1700 až 1900 °C, některá literatura uvádí rozsah 2200 až 2500 °C při tlaku 20 až 50 MPa. Hlavním výrobním zařízením je lisovací forma, většinou v uspořádání píst-válec. Tato forma je ohřívána na slinovací teplotu (nepřímý ohřev formy vnější odporovou pecí, nebo v případě grafitové formy, přímý odporový nebo indukční ohřev). Ve většině případů

je lisovací tlak vyvozován hydraulickým pístem, existují ale i lisy s pákovým přenosem síly (jejich výhodou je jednoduchý způsob udržování konstantního tlaku v průběhu ohřevu, nevýhodou jsou větší nároky na prostor). [18]

Přítomnost přísad aktivuje přenos hmoty objemovou difúzí a difúzí po hranicích zrn, podobně jako u slinutého nitridu křemíku. Vysokoteplotní lisování vyžaduje mnohem menší množství přísad než běžné slinování. Hlavní fází při vysokoteplotním slinování je  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ , čímž lze vysvětlit vysokou hustotu a vysoké hodnoty mechanických vlastností u takto vyrobeného materiálu. [18]

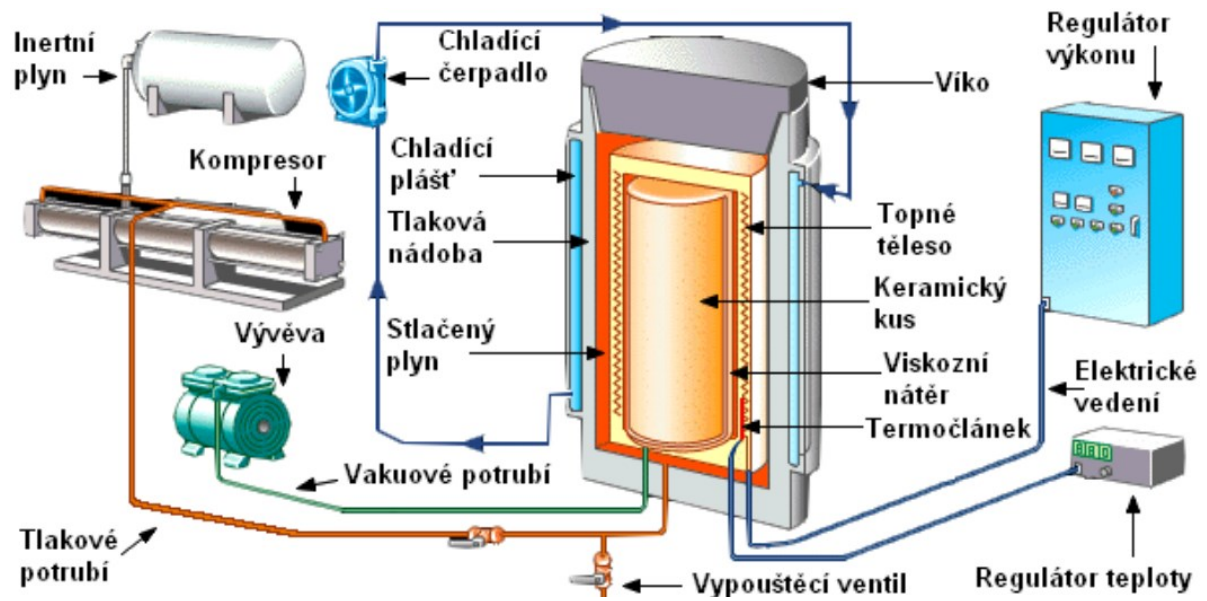
Nevýhodou této metody je především velké tvarové omezení výsledného výrobku. Dalšími omezeními jsou složitost výrobního zařízení a potíže při výrobě více vzorků současně. Ve většině případů je nutné izolovat lisovaný materiál od stěn grafitové formy práškem. Tento prášek je inertní jak ke grafitu, tak k lisovanému materiálu (pro  $\text{Si}_3\text{N}_4$  se používá nitrid boru). Tato izolační vrstva navíc omezuje rozměrovou toleranci hotových výrobků. Nitrid křemíku vyrobený touto metodou vykazuje anizotropii mechanických vlastností ve směrech rovnoběžně a kolmo ke směru lisování, vzhledem k růstu  $\beta$ -zrn ve směru kolmo ke směru lisování. Tyto rozdíly ve vlastnostech dosahují až 20 %. [18]

### 3.5 Výroba nitridu křemíku metodu HIP

Nitrid křemíku je možné vyrábět také technologií vysokoteplotního izostatického lisování (Hot Isostatic Pressing, zkráceně HIP), stejně jako při výrobě slinutých karbidů. Slinované těleso je při vysoké teplotě vystaveno všestrannému tlaku plynu (až 200 MPa), který umožní udržet jeho původní tvar. Jako pracovní plyn je nejčastěji užíván argon, při slinování výrobků z  $\text{Si}_3\text{N}_4$  bez pouzder se s výhodou používá dusík, vzhledem k tomu, že potlačuje tepelný rozklad materiálu. Kompletní výrobní sestava je vidět na obr. 3.4. V průběhu procesu přitom nedochází v materiálu k tvorbě textury. Pracovní tlak je několikanásobně vyšší než u lisování za vysokých tepot. To nám dovoluje vyrábět produkty s menším obsahem přísad, které pak mají výhodnější mikrostrukturu (menší obsah jiných fází, jemnější zrno). Vysoký tlak rovněž napomáhá odstraňování různých mikrostrukturních defektů, což má výrazný kladný vliv na mechanické vlastnosti hotových výrobků. [18]

Výchozí materiály mají strukturu s otevřenými póry. Z toho důvodu musí být před aplikací metody HIP obaleny nepropustným izolačním materiálem a to nejlépe ve vakuu. Tento materiál zabrání přístupu plynu do pórů. Jako obal (pouzdro) se obvykle používá sklo, skelné nebo keramické prášky. Ty jsou za nižší teploty slinuty a poté lze v horkém lisu aplikovat tlak plynu. Slinovaný materiál je od obalu izolován inertní práškovou vrstvou, např. práškem nitridu boru. Obaly bývají většinou vícevrstvé a jejich složení je výrobním tajemstvím daného výrobce. Odstranění obalu je na konci procesu provedeno buď chemickou cestou, nebo pískováním. [18]

Vysokoteplotní izostatické lisování je technologicky nejnáročnější metodou zhutňování keramik, umožňuje ale vyrobit materiál o vysoké pevnosti a s malým rozptylem hodnot mechanických vlastností. [18]



Obr. 3.4 Soustava pro vysokoteplotního izostatického lisování [17]

## 4 Opotřebení břitu obráběcích nástrojů

Po celou dobu řezného procesu dochází k opotřebení břitu řezného nástroje a to až do konce doby jeho trvanlivosti. Trvanlivost nástroje závisí na mnoha faktorech, jako je: stav obrobeného povrchu, přesnost rozměrů, způsob opotřebení břitů nástroje, utváření třísky a stanovená doba trvanlivosti. Rozhodující je zda obrábíme načisto nebo hrubujeme. Při obrábění načisto je pro nás nejdůležitější jakost obrobeného povrchu. Břit vyměnitelné břitové destičky je považován za opotřebený, pokud již nedosahujeme požadované jakosti. U hrubovacích operací se jakosti obrobené plochy nepřikládá taková důležitost a opotřebení nástroje dosahuje podstatně větších hodnot. A to z důvodu co nejrychleji a nejefektivněji vyhrubovat součást, proto se tolerují určité nepřesnosti rozměrů a větší opotřebení nástrojů. V tomto případě je kritériem trvanlivosti schopnosti nástroje zajistit kontrolovaný odchod třísky nebo výskyt takového opotřebení, při kterém by hrozil náhlý lom břitové destičky.

Na volbě vhodného řezného nástroje, nástrojovém materiálu a vhodné geometrii břitu závisí dosažení maximální produktivity při obrábění. Přesto i s vhodným nástrojem nemusíme dosáhnout požadované trvanlivosti. Vibrace vznikající při obrábění, způsobené nedostatečnou tuhostí nástrojového držáku nebo špatným upnutím obrobku, způsobují snížení trvanlivosti břitu [1].

### 4.1 Základní mechanismy opotřebení

- **Mechanické:**
  - abrazivní opotřebení,
  - adhezní opotřebení.
- **Chemické a difuzní:**
  - difuzní opotřebení,
  - oxidační opotřebení.
- **Únavový lom:**
  - dynamický,
  - statický.

### **Abrazivní opotřebení**

Patří mezi velmi rozšířenou formu opotřebení, je většinou způsobeno tvrdými mikročásticemi v obráběném materiálu. Opotřebení způsobuje brusný otěr částic mezi povrchem obrobku a nástroje. Vlivem mechanického zatížení tak vzniká rovinná plocha na hřbetě břitu nástroje. Odolnost břitu proti abrazivnímu opotřebení je dána především jeho tvrdostí. Proto mu nejlépe odolávají řezné materiály s hustou strukturou tvrdých částic, ty ale nemusí odolávat jiným zatížením během řezného procesu [1].

### **Adhezní opotřebení**

Je způsobeno mikrosvary, které vytváří nárůstek na čele nástroje. Vyskytuje se u ocelí - tvořících dlouhou třísku, ale také u materiálů tvořících krátkou třísku, jako je hliník a šedá litina. Díky vysokým tlakům, teplotám, kovově čistým povrchům a chemické příbuznosti materiálů dochází na čele nástroje ke vzniku a následnému porušení mikrosvarových spojů. A to na vrcholcích nerovností čela nástroje a odcházející třísky. Tento jev má dynamický průběh, s narůstajícím počtem takto vytvořených vrstev, které se stávají součástí břitu a zároveň tvoří základ pro vytváření nových nárůstků. Ty pak způsobují poškození břitu vydrolováním nebo jeho vylomením. Tvorba nárůtku závisí především na nástrojovém materiálu a teplotě řezání, se zvyšující se teplotou klesá schopnost tvoření nárůtku. Materiály náchylné ke zpevňování za studena, jako austenitické korozivzdorné oceli jsou opotřebovávány z důvodu vytvrzování povrchu obrobku, což způsobuje velmi rozšířené žlábkové opotřebení [1, 2].

### **Difuzní opotřebení**

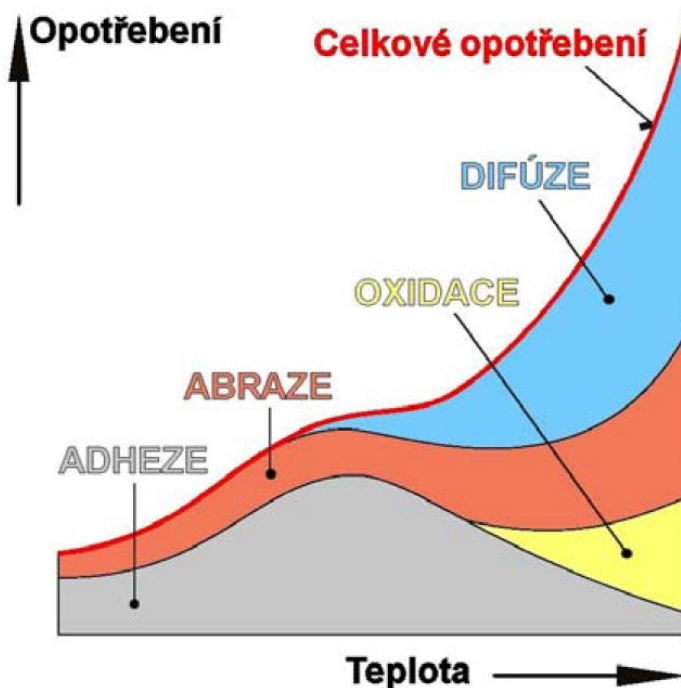
Toto opotřebení vzniká díky chemickým procesům při obrábění a to hlavně kvůli afinitě mezi materiálem řezného nástroje a obrobku. Dochází k nežádoucím přesunům atomů z obráběného materiálu do nástrojového materiálu a naopak. Což má za následek vytváření nežádoucích sloučenin v nástrojovém materiálu a jeho degradaci. Některé nástrojové materiály vůbec nereagují s obrobkem, jiné mají vysoký stupeň afinity [1, 2].

## Oxidační opotřebení

Tento druh opotřebení se v současné výrobě vyskytuje jen zřídka. Kyslík z okolního prostředí způsobuje vznik nežádoucích chemických sloučenin na povrchu nástroje. Oxidová vrstva tvořená wolframem a kobaltem odchází z povrchu nástroje společně s třískou, naproti tomu třeba oxid hlinitý tvoří mnohem tvrdší a pevnější strukturu. Oxidační opotřebení způsobuje tvorbu žlábků v místě, kde končí šířka odebírané třísky a okolní vzduch má přístup do místa řezu [1, 2]. Na obr. 4.1 je vidět oblast výskytu oxidačního opotřebení společně s dalšími typy opotřebení.

## Únavový lom

Způsobuje ho kolísání teplot, nadměrné zatížení řeznými silami například při přerušovaném řezu nebo nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu. Může být způsoben příliš velkou tvrdostí a pevností obráběného materiálu a vysokými posuvy. Nebo na druhé straně značnou tvrdostí materiálu řezného nástroje. Také u příliš měkkého nástrojového materiálu může nastat lom, pokud vlivem vysokých teplot dojde k plastické deformaci břitu a tím pádem ke změně geometrie. Změněná geometrie způsobí nárůst řezné síly a následný lom [1].



Obr. 4.1 Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení [9]

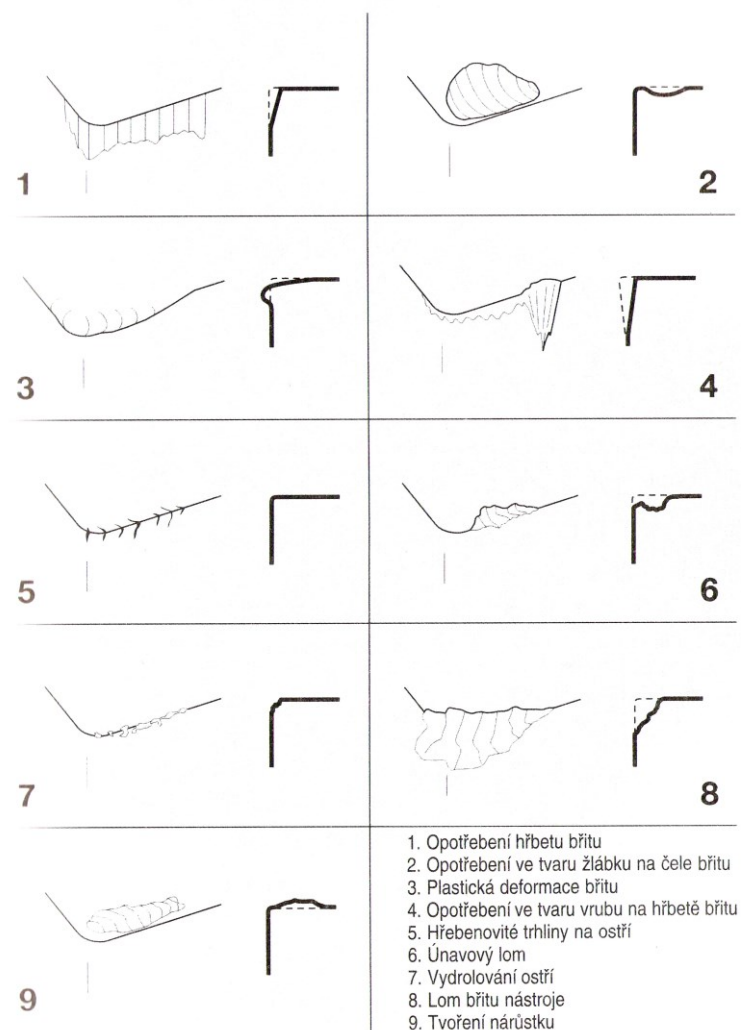
## 4.2 Typy opotřebení břitu nástrojů

Abychom správně zvolili nástrojový materiál a řezné podmínky, musíme vycházet z hlavních kritérií pro obrábění:

- přesnost rozměrů,
- jakost obrobené plochy,
- kontrolovaný odchod třísky.

Pro každý řezný proces existuje vhodný průběh opotřebení, který závisí na volbě vhodného nástroje, řezných podmínkách a dobré jakosti obráběného materiálu, jednotlivé druhy opotřebení jsou na obrázcích 4.2 a 4.3 [1]. Vliv řezných podmínek na průběh opotřebení je znázorněn na obr. 4.5.

### KLASIFIKACE TYPŮ OPOTŘEBENÍ BŘITŮ NÁSTROJŮ



Obr. 4.2 Klasifikace typů opotřebení břitů nástrojů [1].



## 1. Opotřebení hřbetu břitu

Jedná se o běžný druh abrazivního opotřebení. Za ideální stav považujeme stejnoměrně se zvětšující opotřebení hřbetu. Je způsobeno působením materiálu obrobku, který je před utvářením, během utváření a po utváření třísky v kontaktu s plochou hřbetu hlavního a vedlejšího ostří s poloměrem špičky a s čelní fazetkou.

## 2. Opotřebení ve tvaru žlábků na čele břitu

Probíhá na čele nástroje působením abrazivního a difuzního opotřebení. Jednak tvrdé částice obsažené v obráběném materiálu svým brusným účinkem vytváří žlábků na čele nástroje a hlavně difuzní pochody v místě břitu s nejvyšší teplotou. To je v kontaktním místě mezi třískou a materiálem břitu. Tomuto opotřebení se můžeme vyvarovat nástrojem s dobrou tvrdostí zatepla a s nízkou afinitou k materiálu obrobku. Velký žlábků na čele způsobuje oslabení břitu, změnu utváření třísky a směr působení řezných sil [1].

## 3. Plastická deformace břitu

Vysoké řezné rychlosti a posuvy v kombinaci s tvrdými materiály obrobku způsobují vysoké teploty a tlaky v místě řezu a tím následnou plastickou deformaci břitu nástroje. Odolné jsou materiály s vysokou tvrdostí zatepla, které se při tomto kombinovaném zatížení nedeformují. Typickým projevem této deformace je jisté „vyboulení“ břitu, které ještě více zvyšuje teplotu na břitu a mění jeho geometrii. Tomuto opotřebení se lze vyvarovat použitím správného zaoblení a vhodnou geometrií břitu [1].

## 4. Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu

### *Na hlavním hřbetě*

Jeho projevení souvisí hlavně s adhezním opotřebením, může ho však způsobovat i oxidační opotřebení. Vrub vzniká v místě dotyku břitu s bokem odcházející třísky. Vrub se tvoří v místě, kde má okolní vzduch možnost pronikat do oblasti řezného procesu [1].

### **Na vedlejších hřbetě**

Způsobují ho tvrdé částice obsažené v obráběném materiálu. Velké opotřebení ve tvaru vrubu mění podstatu utváření třísky a může způsobit až lom destičky [1].

### **5. Vznik hřebenových trhlinek na ostří**

Dochází ke tvorbě trhlinek kolmo na ostří způsobených únavou materiálu vyvolanou tepelnými šoky. Postupné vylamování částic mezi jednotlivými trhlami může způsobit vylomení břitu nástroje. Zvláště změna teplot při frézování způsobuje tento druh opotřebení. Změna tloušťky odebírané třísky způsobuje změnu teploty. Chlazení se nedoporučuje, protože zvyšuje teplotní rozdíl mezi vstupem a výstupem břitu z obrobku [1].

### **6. Únavový lom**

Vzniká vlivem součtu jednotlivých druhů neustále se měnících zatížení, které by samy o sobě nebyly dost velké na to, aby způsobily lom. Lomové plochy se tvoří souběžně s ostřím [1].

### **7. Vydrolování ostří**

Nedochází k stejnoměrnému opotřebení břitu, ale k jeho vydrolování. Vydrolování způsobuje špičky zatížení (především u přerušovaného řezu) a následkem toho dochází k oddělování drobných částecek řezného materiálu z břitu nástroje. Odlupování materiálu a vznikající trhliny nám signalizují možný lom břitu [1].

### **8. Lom**

Lom je definitivním koncem každého břitu a měli bychom se mu vždy snažit zabránit, protože změny geometrie, oslabení břitu, nárůst teplot a sil mohou způsobit značné škody na obrobku. Nepříliš houževnatý nástrojový materiál často vede ke vzniku křehkého lomu. Lom břitu nástroje považujeme za ukončení trvanlivosti [1].

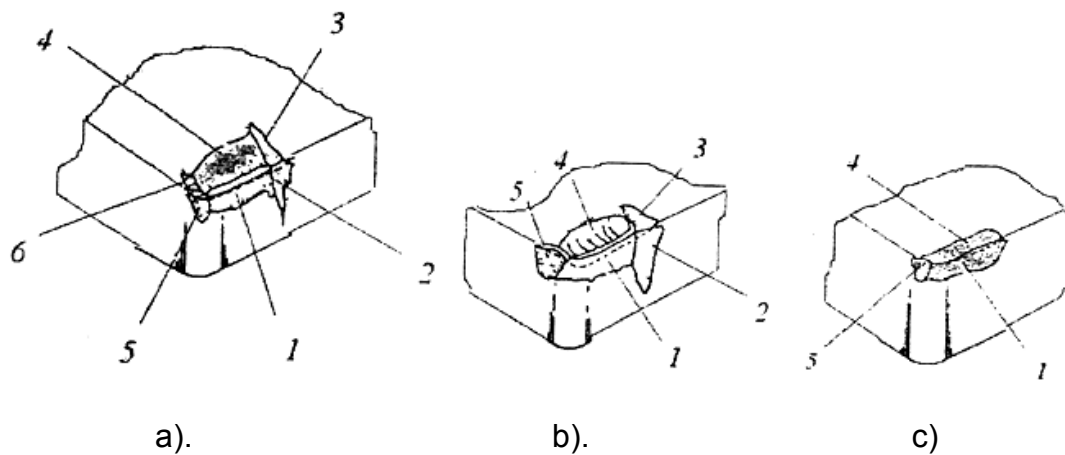
## 9. Tvorba nárůstku

Vytvořený nárůstek způsobuje jednak změnu geometrie břitu a navíc může dojít i k odlomení části břitu společně s nárůstkem, který se vytvořil nanesením (mikrosvary) částíček obráběného materiálu na břit nástroje. Významnou roli zde hraje afinita mezi nástrojovým a obráběným materiálem. Tvorba nárůstku se převážně odvíjí od teploty a řezné rychlosti, nebo také může být způsobena odlupováním vrstev v místě řezu. Moderní způsoby obrábění probíhají v oblastech mimo tvorbu nárůstku. Stejně tak většina moderních řezných materiálů nemá sklon k tvorbě nárůstků. Nárůstek způsobuje zhoršení jakosti obrobené plochy a může vést až k lomu vyměnitelné břitové destičky [2].

Běžné typy opotřebení	
<p>Opotřebení hřbetu</p> 	<p>Plastická deformace</p> 
<p>Opotřebení ve tvaru žlábků</p> 	<p>Tepelné trhliny</p> 
<p>Tvorba nárůstku</p> 	<p>Vylamování břitu/celkový lom</p> 
<p>Opotřebení ve tvaru vrubu</p> 	

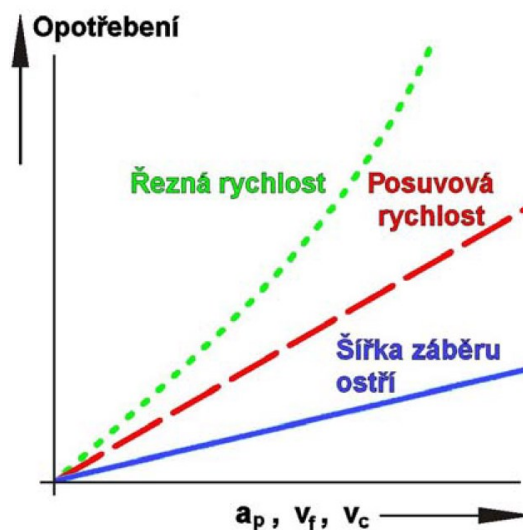
Obr. 4.3 Příklady nejběžnějších projevů opotřebení [1]

Na obrázku 4.1 jsou nákresy typických projevů opotřebení u několika základních druhů řezných materiálů.



Obr. 4.1 Typický projev opotřebení  
a) rychlořezné oceli b) slinutého karbidu c) keramiky []

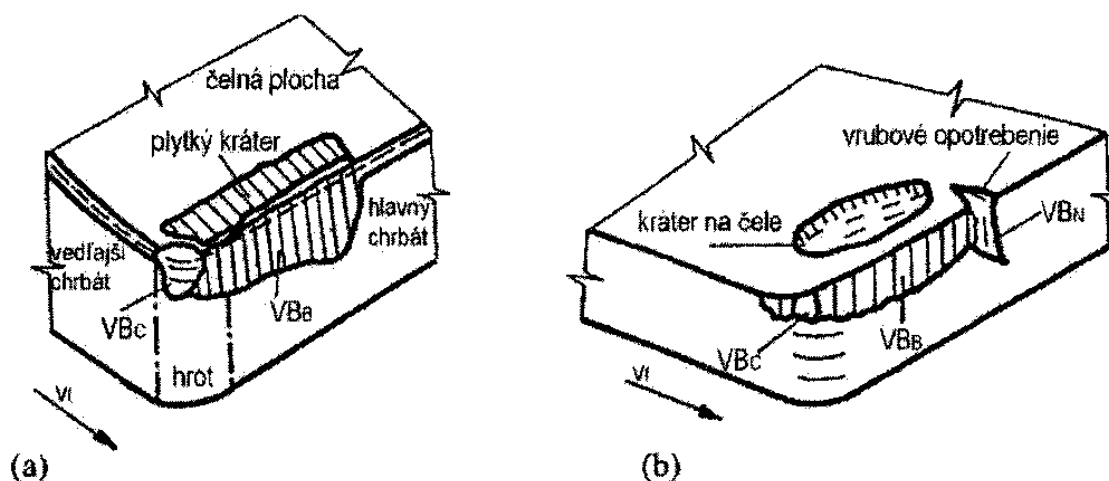
1. fazetka opotřebení na hřbetě,
2. hřbetní (oxidační) rýha,
3. drážka na čele,
4. žlábek na čele,
5. drážka na vedlejším hřbetě,
6. vydrolování ostří.



Obr. 4.5 Klasifikace typů opotřebení břitů nástrojů [9].

### 4.3 Opatření keramických řezných nástrojů

Na opotřebení keramických řezných nástrojů (obr. 4.6) má stěžejní vliv působení vysokého mechanického a tepelného zatížení. Mechanické zatížení se projevuje abrazivním účinkem, kdy dochází k odbrušování a vylamování částic ze hřbetu a čela nástroje. Zvýšené tepelné zatížení způsobuje šíření trhlin na čele nástroje rovnoběžně s řeznou hranou. Koncentrace teploty v místě řezu prudce zvyšuje účinky mechanického opotřebení a urychluje proces chemického opotřebení. Nevýhodou keramických řezných materiálů je statické rozložení pevnostních vlastností z čehož plyne omezená reprodukovatelnost řezného procesu. Tím pádem není možné předpovídat chování řezné keramiky, mimo destrukce (křehký lom) [8].



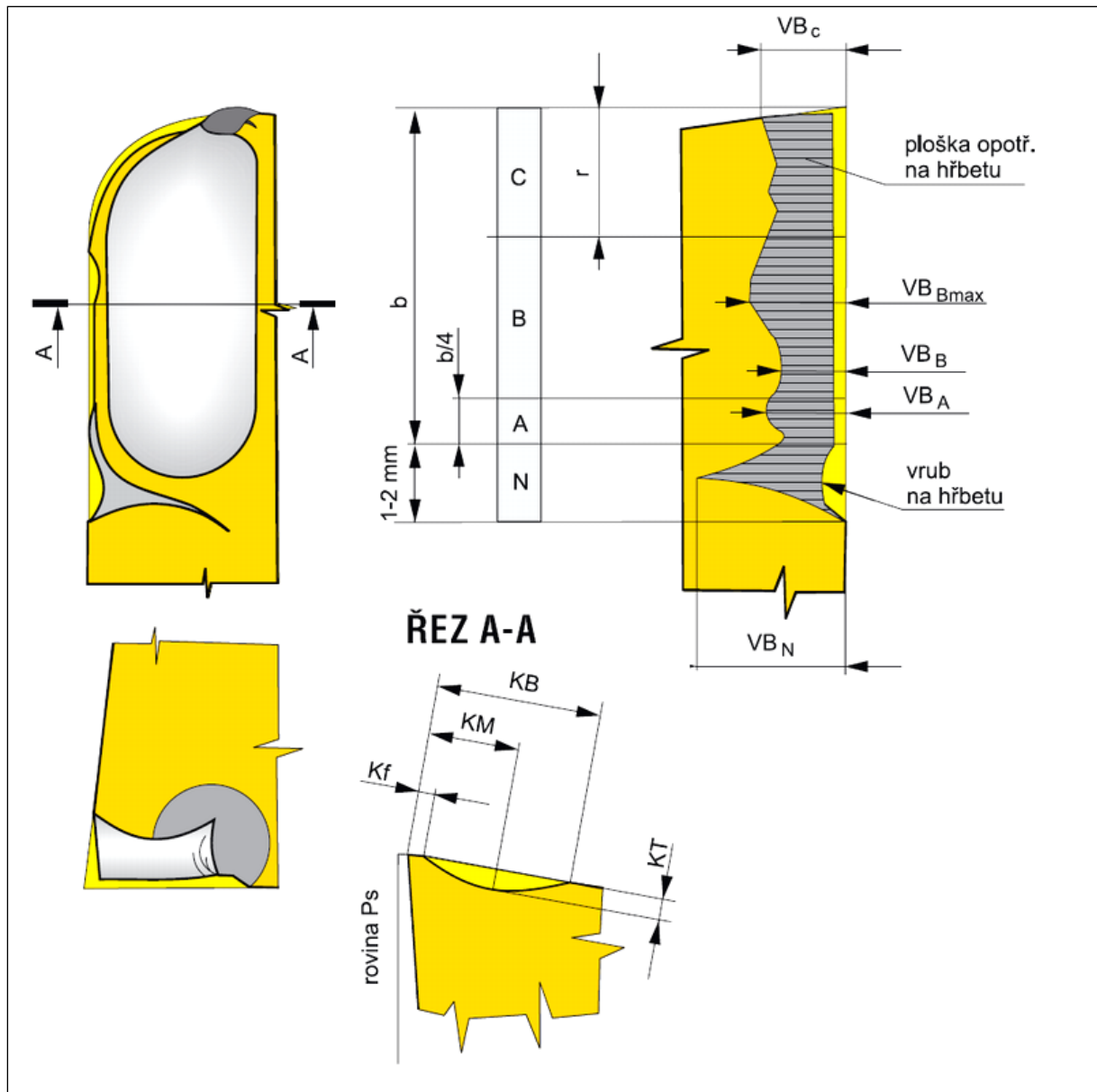
Obr. 4.6 Formy opotřebení keramických řezných nástrojů  
a). oxidová keramika, b). nitridová keramika [8]

#### 4.4 Kritéria opotřebení

Opotřebení řezných nástrojů je definováno všeobecně uznávanými kritérii (obr. 4.7), která stanovuje norma ISO 3685. Mezi nejpodstatnější z nich patří:

- VB - opotřebení na hřbetě,
- KT - hloubka výmolu na čele,
- VR - radiální opotřebení špičky.

Všechny kritéria opotřebení mají velký vliv na celý proces obrábění, zejména však na výsledek. Výsledný obrobený povrch výrobku je nevíce ovlivňován opotřebením na hřbetě nástroje VB. Opotřebení na čele nástroje, konkrétně hloubka výmolu KT značně snižuje pevnost řezného nástroje. Radiální opotřebení špičky má vliv na výsledné rozměry výrobku [10].



Obr. 4.7 Kritéria opotřebení řezného nástroje dle ISO 3685 [10]

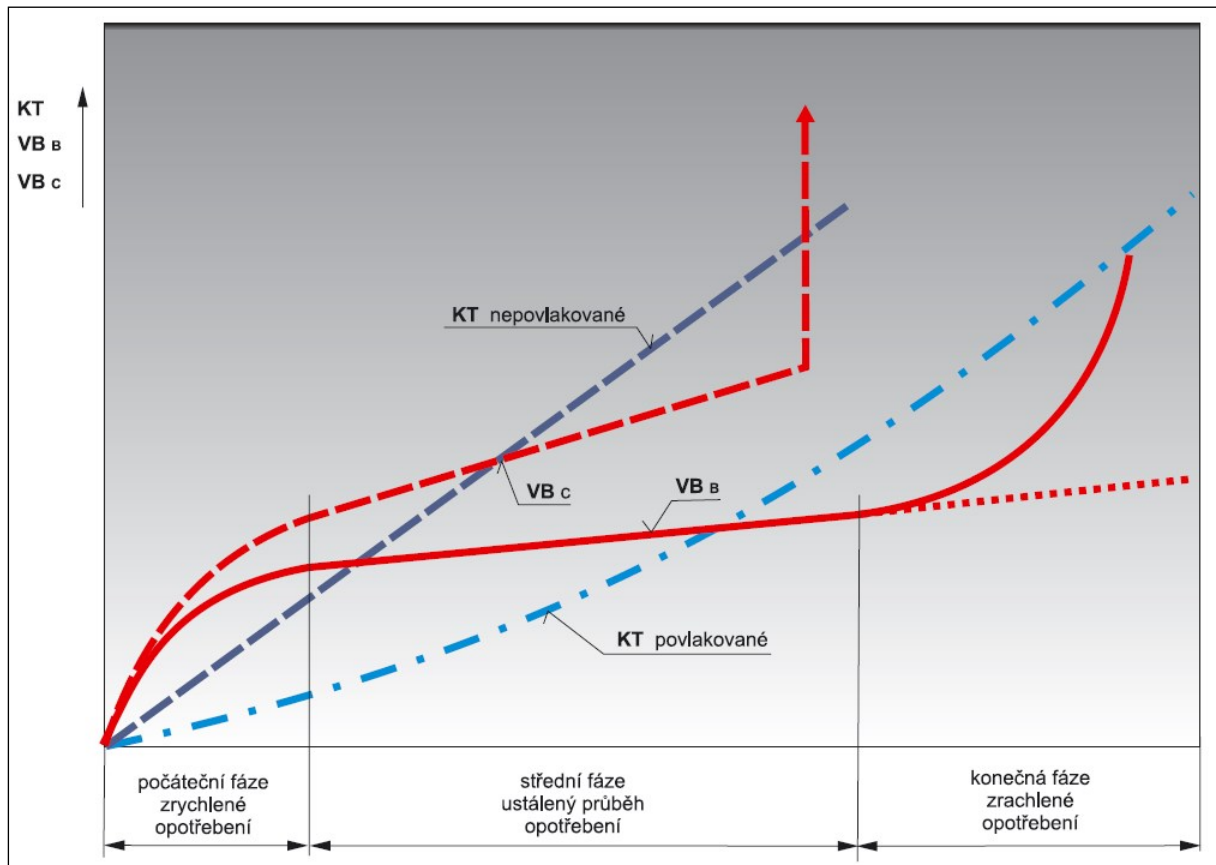
### VB – opotřebení na hřbetě,

- $VB_C$  – opotřebení v oblasti špičky nástroje,
  - $VB_N$  – opotřebení ve formě vrubů,
  - $VB_B$  – opotřebení přímé části ostří (průměrné),
  - $VB_{Bmax}$  – opotřebení maximální,
- 
- KT – hloubka výmolu na čele,
  - Kf – vzdálenost výmolu od čela,



- KM – střední vzdálenost výmolu,
- KB – šířka výmolu.

Průběh teoretické závislosti nejčastějších opotřebení na čase je znázorněn na obrázku 4.8.



Obr. 4.8 Typické průběhy opotřebení VB a KT na době řezání [10]

**Průběh opotřebení břitu nástroje je rozdělen do tří pásem:**

- **Oblast zrychleného záběhového opotřebení.** Obecně souvisí se záběhem nástroje a je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích nerovností nástroje.
- **Oblast lineárního opotřebení.** Dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení a intenzita je konstantní.
- **Oblast zrychleného nadměrného opotřebení.** Je to obvykle spojeno s teplotou řezání. Teplota se zvyšuje díky zvětšujícímu se tření nástroje na hřbetní ploše, které je způsobené větším opotřebením, což vede k ještě

většímu nárůstu teploty a poklesu tvrdosti nástroje, nastává velmi rychle, většinou lavinovité opotřebení.

Na základě typu obrábění (soustružení, frézování, atd.) a požadavků na jakost povrchu (hrubování, dokončování) bývá stanovena kritická (dovolená) hodnota pro daná kritéria opotřebení, některá vybraná jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4.1 Kritérium opotřebení pro některé typy obrábění [6]

Druh nástroje	Způsob práce	$VB_{krit}$ [mm]	Obráběný materiál
Nůž RO ubírací	s chlazením	0,8 - 1	ocel
Nůž SK WC+Co	f = 0,3 mm	0,8 - 1	litina
Válcová frézy	hrubování	0,4 - 0,6	ocel
	na čisto	0,15 - 0,25	ocel
Válcová frézy	hrubování	0,3 - 0,4	ocel
Vrtáky z RO	vrtání	1 - 1,5	ocel
	vrtání	0,9 - 1,2	litina

Hodnota opotřebení na hřbetě nemusí být hlavním kritériem. Převažujícím kritériem může být například hloubka žlábků na čelní ploše nástroje. Zde hrozí, že dojde k propojení hlubokých žlábků s oxidační rýhou, což vede k destrukci nástroje.

## 5 Metody diagnostiky opotřebení řezných nástrojů

Opotřebení řezných nástrojů se může měřit metodami přímými a nepřímými

### 5.1 Přímé metody

Aplikace přímých metod je složitá a při měření se vyskytuje mnoho problémů a to hlavně z důvodu nedostupnosti měřených ploch pro měřicí přístroje. Z toho důvodu je nutné přerušit obrábění, což způsobuje změnu charakteru opotřebení v dalších fázích experimentu. Většinou také dochází k odepínání nástroje z nástrojového držáku, a to vede ke změně obráběcích podmínek při jeho následném upnutí a ustavení [2].

**Mezi přímé metody patří:**

- metoda váhová (hmotnostní),
- metoda radioaktivních izotopů (radioizotopová),
- metoda mikrometrická,
- metoda optická (stínová),
- metoda pneumatická,
- metoda nanesené odporové vrstvy [2].

#### **Metoda váhová**

Váhová metoda vychází z principu, že míra opotřebení odpovídá úbytku hmotnosti řezného nástroje. Jde o nepřímou metodu, tím pádem ji nelze použít přímo během procesu obrábění na obráběcím stroji. Je poměrně přesná a hmotnostní rozdíl určuje intenzitu opotřebení. Nevýhodou je, když se při obrábění vytváří nárůstek. Potom zůstává část břitu ulpěná na destičce a znemožňuje přesné určení hmotnostního úbytku na nástroji. Váhová metoda se výhradně využívá u nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami se zřetelem na malé úbytky hmotnosti při otupování nástroje [2].

$$\Delta M = M_1 - M_2 \quad (5.1)$$

$\Delta M$  – hmotnostní úbytek [g],

$M_1$  – hmotnost destičky před otupením [g],

$M_2$  – hmotnost destičky po otupení [g].

### Metoda radioaktivních izotopů

Nazývá se také radioizotopová, jedná se o nejcitlivější a nejpřesnější metodu určování hmotnostního úbytku destičky v závislosti na čase. Umožňuje určit hmotnostní úbytek, v řádech až  $10^{-3}$  mg [12]. Metoda vychází z předpokladu, že největší část opotřebovaného materiálu nástroje odchází třískou a jen zanedbatelné množství opotřebovaného nástrojového materiálu zůstává na obrobené ploše a neobrobené ploše místa řezu. Pouze nepatrná část materiálu nástroje odchází do ovzduší. Radioaktivním článkem je materiál nástroje. Aktivaci nástroje lze dosáhnout dvěma způsoby [2]:

1. Zavedením radioizotopu již při hutnickém procesu. Potom 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 [2].

Postup měření je následující. Za daných řezných podmínek se odebere stanovené množství třísek aktivním nástrojem. Z obrobené a neobrobené vrstvy plochy řezu se odebere tenká vrstva neaktivním nástrojem. Oba vzorky třísek se vloží do měřicího bloku, který se skládá ze zkumavek a Geiger-Müllerových nebo scintilačních počítáčů [12]. Ty jsou zapojeny na indikační zařízení skládající se ze zdroje vysokého napětí a číslicového reduktoru. Na základě aktivity třísek  $I_T$  (počet impulzů za minutu) je možné stanovit množství nástrojového materiálu, který ulpěl na třísece, ploše řezu a obrobené ploše. Pro stanovení hmotnostního úbytku nástroje je nutné znát specifickou aktivitu  $i_n$  v impulsech za minutu, stanovenou stejným způsobem jako aktivita třísek podle [12].

$$i_n = \frac{I_n}{M_n} \quad (5.2)$$

$i_n$  – specifická aktivita nástroje,

$I_n$  – aktivita nástroje,

$M_n$  – zkoumané množství nástrojového materiálu.

Hmotnost opotřebeného materiálu nástroje se potom stanoví podle [12]:

$$m_{mat} = \frac{I_{tř}}{i_n} \quad (5.3)$$

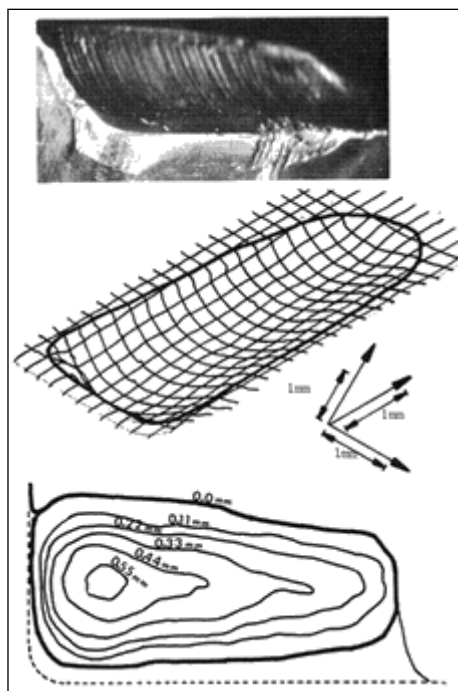
$m_{mat}$  – hmotnost opotřebovaného materiálu,

$I_{tř}$  – aktivita třísek.

Tato metoda s sebou nese riziko zdravotního ohrožení a při práci a manipulaci je nutné dbát přísných bezpečnostních opatření a používat rukavic, manipulátorů a olověných zástěr a desek.

### **Mikrometrická metoda**

Měření kritérií opotřebení v praktické části disertační práce bylo provedeno touto metodou. Metoda je založena na měření délkových rozměrů opotřebení. Pro měření se nejčastěji používá dílenský mikroskop s křížovým stolem viz. kapitola 7.7 v této práci. Hloubku žlábků měříme pomocí číselníkového úchylkoměru, komparátory, a pod. Nevýhodou této metody je ve většině případech, nutnost vyjmutí nástroje a měření opotřebení mimo stroj na mikroskopu.

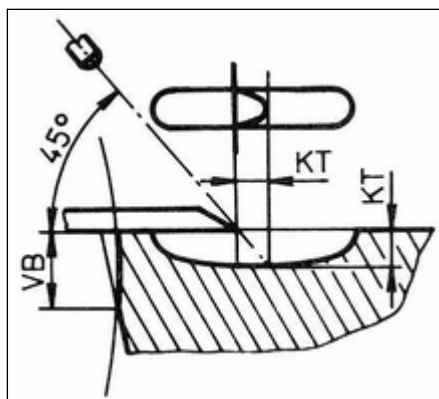


Obr. 5.1 Příklad opotřebení na čele nástroje, profilu kráteru a jeho mapy [13]

Další možností je využít 3D souřadnicové stroje na vytvoření skutečného obrazu opotřebení [13]. Na obr. 5.1 je naznačen princip tohoto měření. Tato metoda umožňuje vytvořit reálný trojrozměrný obraz a je vhodná především pro měření opotřebení na čele nástroje, kde je pro nás směrodatná především hloubka žlábků. Na základě údajů je možné potom vytvořit charakteristickou mapu opotřebení a z ní odečíst parametry opotřebení jako KT, KM a podobně.

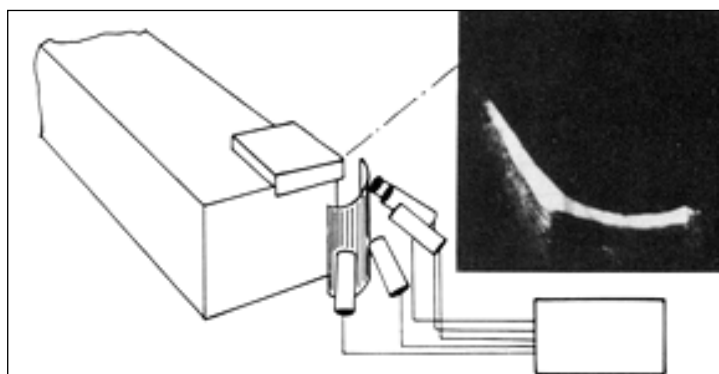
### Optická (stínová) metoda

Používá se především k měření žlábků na čele nástroje. Umístíme-li ostrou hranu na čelo a osvětlíme ji paprskem světla pod úhlem  $45^\circ$ , pak vzdálenost tečny ke stínu je rovna hloubce žlábků KT (obr. 5.2) [14].



Obr. 5.2 Schéma měření stínovou metodou [14]

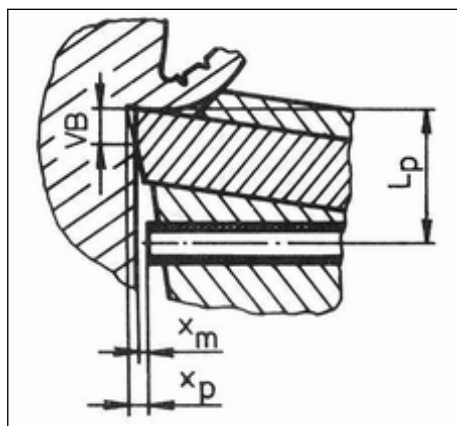
Další metodou, jež využívá na měření opotřebení vytváření stínů, je metoda založená na měření opotřebení na čele nástroje. Na čele nástroje je difusorem (obr. 5.3) vytvořena charakteristická mřížka, která je snímána prostřednictvím kamery, přičemž deformace mřížky souvisí s vytvářením kráteru na čele nástroje. Na základě obrazu z kamery je možné vytvořit skutečný trojrozměrný obraz opotřebení čela nástroje.



Obr. 5.3 Způsob osvětlení čela nástroje [15]

### Pneumatická metoda

je poměrně spolehlivá a konstrukčně jednoduchá. Měření úbytku vyměnitelné břitové destičky ve směru kolmém k ploše řezu nebo ve směru radiálním. Princip měření je na obr. 5.4.



Obr. 5.4 Princip měření pneumatickou metodou [14]

Geometrické poměry lze odvodit s uvažováním vlivu drsnosti na velikost měřené hodnoty opotřebení pro nůž s úhlem nastavení  $\kappa_r = 90^\circ$  [14]:

$$VB = VB_o + K_m \cdot VB_o^{0,81}$$

$$VB_o = \left( x_p - \frac{L_p \cdot f}{\pi \cdot D_o} - x_m \right) \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_n} \quad (4.4)$$

$K_m$  – konstanta daná konstrukcí měřidla (určuje se empiricky),

$x_p$  – vzdálenost trysky od obrobku obr. [mm],

$x_m$  – vzdálenost nástroje od trysky obr. [mm],

$L_p$  – vzdálenost osy trysky od špičky nástroje [mm],

$f$  – posuv [mm],

$D_o$  – průměr obrobku [mm],

$\alpha_n$  – úhel hřbetu [°].

Hodnota  $x_m$  se určuje pro tlak vzduchu změřený z cejchovní křivky daného měřidla.



## Metoda nanesené odporové vrstvy

Touto metodou měření opotřebení se bude zabývat tato práce. Opotřebení nástroje je zde měřeno zvýšením nebo snížením hodnoty elektrického odporu nanesené odporové vrstvy. Jde o vytvoření elektrického obvodu spolu s nanesenou vrstvou na hřbetě nebo čele nástroje, případně jejich kombinací. Nevýhodou této metody je ovlivnění odporové vrstvy odcházející třískou, změnou teploty a případně procesní kapalinou [2].

## 5.2 Nepřímé metody

Nepřímé metody opotřebení vycházejí z doprovodných jevů vznikajících při obrábění. Provádí se během řezného procesu, jsou však pouze přibližné [21, 22].

### Mezi nepřímé metody patří:

- vznik lesklého proužku na povrchu obrobku,
- nárůst složek řezné síly,
- 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 [2, 21].

## 6 Současný stav – metoda nanesené odporové vrstvy

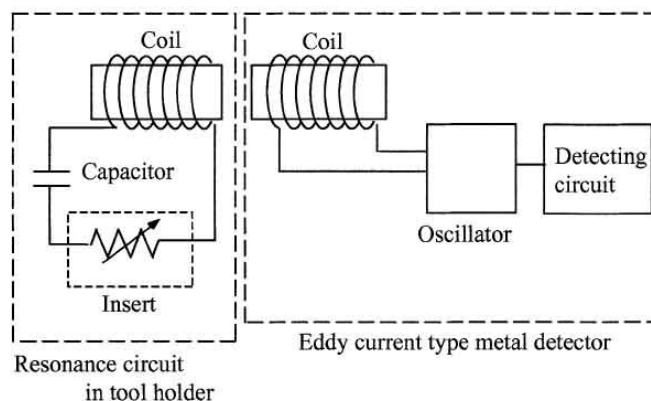
V současné době existuje mnoho metod diagnostiky řezné hrany, avšak žádná z nich se významněji nerozšířila. Jednak z důvodu složitého vyhodnocování, vysoké ceně či díky náročným požadavkům na danou metodu. Jednou z nich je metoda diagnostiky řezného nástroje pomocí integrovaných (destruktivních) odporových vrstev.

Tato metoda není dosud velmi popsána, zmínku o ní nacházíme v odborných člancích především z Japonska, kde byla prováděna diagnostika řezného nástroje pomocí nanesené odporové vrstvy při soustružení a frézování. Zmíněná metoda je zde upřednostňována před určováním životnosti nástroje akustickou emisí, pomocí sledování síly řezání a dalšími metodami. Stručné shrnutí z odborných článků je uvedeno níže.

### 6.1 Diagnostika řezného nástroje pomocí odporových vrstev při soustružení

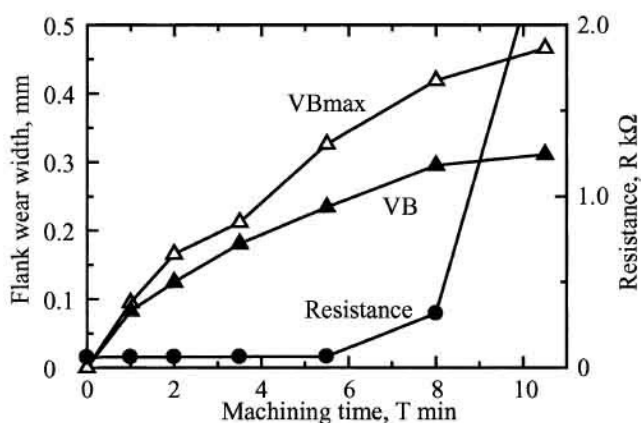
Při tomto experimentu byl použit velmi podobný nástroj jako v kapitole 7.2, jednalo se opět o keramickou destičku s nanesenou odporovou vrstvou v oblasti řezné hrany. V důsledku opotřebování řezné hrany docházelo i k opotřebením nanesené odporové vrstvy (filmu) a tím ke změně hodnot měřeného elektrického odporu. Hodnota elektrického odporu byla na nástroji snímána pomocí elektromagnetické indukce, tak aby mohl být nástroj použit na obráběcím stroji s automatickou výměnou nástroje. Na obrázku 6.1 je vidět detekční schéma pro soustružení. Cívka a kondenzátor byly zapojeny do série s destičkou, aby vytvořily rezonanční obvod v nástrojovém držáku.

Obrázek 6.2 ukazuje průběh elektrického odporu při soustružení litiny, jsou zde také zobrazeny křivky průběhu opotřebení. Hodnoty řezné rychlosti, posuv na otáčku a hloubky řezu byly:  $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,2 \text{ mm}$  a  $a_p = 1,0 \text{ mm}$ . Odpor vrstvy byl téměř stabilní po dobu 7 minut, zatímco šířka opotřebení na hřbetě rostla s narůstajícím časem obrábění. Po 8 minutách obrábění se odpor náhle zvýšil. Rychlý nárůst odporu přišel s porušením odporového filmu v důsledku maximálního opotřebení na hřbetě nástroje, na čelní ploše nedošlo k porušení.



Obr. 6.1 Schéma zapojení detekčního systému [4]

**Kde:** *resonance circuit in tool holder* – rezonanční obvod v nástrojovém držáku, *eddy current type metal detector* – detektor vířivých proudů v kovech, *coil* – cívka, *capacitor* – kondenzátor, *insert* – destička, *oscilátor* – oscilátor, *detecting circuit* – detekční okruh.



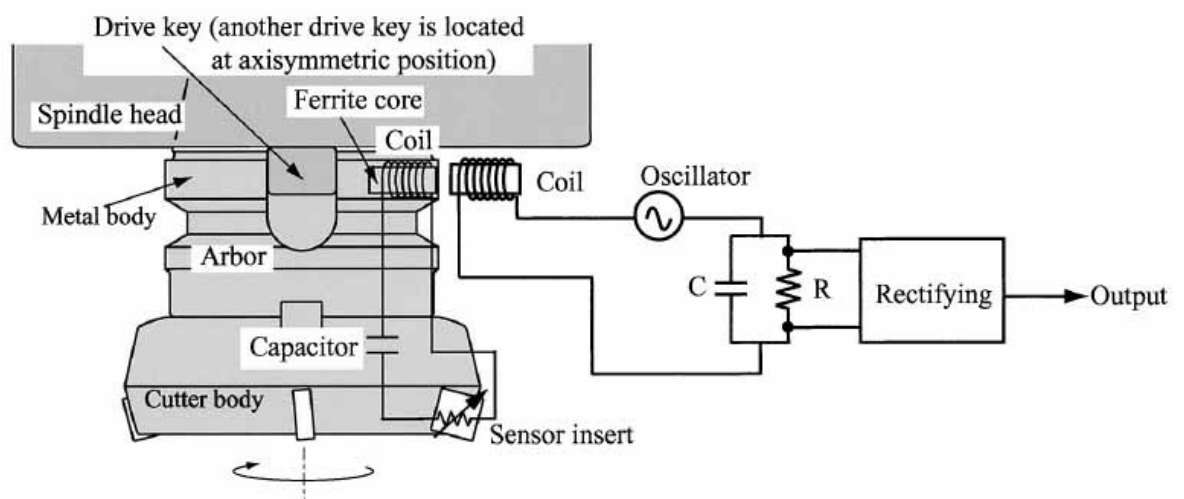
Obr. 6.2 Časová závislost el. odporu vrstvy a opotřebení při soustružení [4]

**Kde:** *flank wear width* – šířka opotřebení na hřbetě nástroje, *resistance* – elektrický odpor, *machining time* – čas obrábění.

## 6.2 Diagnostika řezného nástroje pomocí odporových vrstev při frézování

Na obrázku 6.3 je vidět schematický pohled na detekční systém pro frézování. Cívka a kondenzátor byly zapojeny s destruktivními senzory, integrovanými v destičce ve frézovacím trnu, stejným způsobem, jako při soustružení. Cívka umístěná ve frézovacím upínacím trnu má feritové jádro.

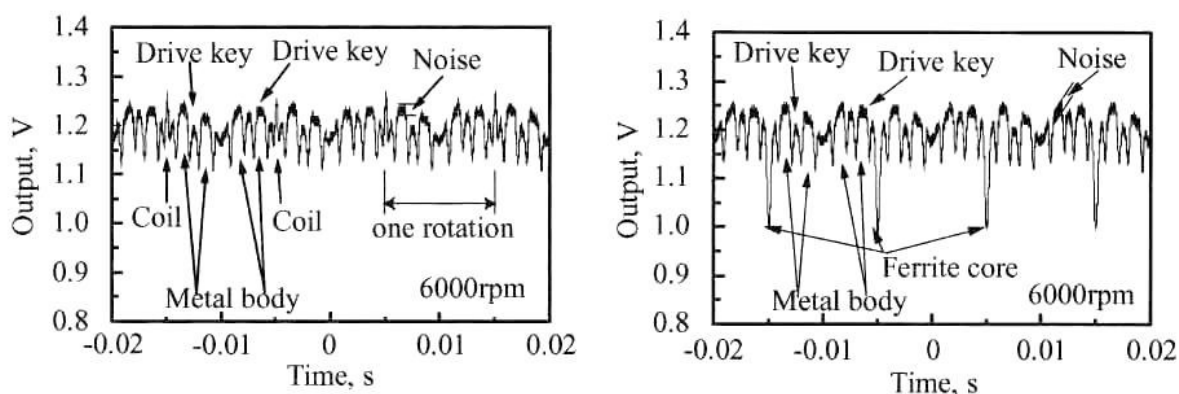
Detekční jednotka byla zkonstruovaná z oscilátoru, cívky, usměrňovacího obvodu a paralelního okruhu odporu s kondenzátorem. Pokud není odporový film na destičce poškozený, tak kovové tělo trnu, kámen čelního unašeče nástroje a cívka postupně mijí detekční cívku – z důvodu rotace vřetena. Indukčnost cívky závisí na materiálu, který je čelem k detekční cívce, protože se mění magnetický tok přes cívku, proto se impedance cívky liší podle materiálu, který je čelem k detekční cívce v průběhu rotace vřetena. Když je film na destičce porušen, tak je rezonanční obvod ve frézovacím trnu otevřený a žádný proud cívkou neprotéká, jinými slovy se cívka v trnu přemění ve feritové jádro, pokud je destička poškozená. V důsledku toho kovové tělo frézovacího trnu, podélné příčné pero a feritové jádro neustále míjejí detekční cívku. Impedance detekční cívky se výrazně liší, když je čelem k detekční cívce feritové jádro od impedance dalších částí, tím pádem lze lehce určit poškození nástroje [4].



Obr. 6.3 Schéma zapojení detekčního systému pro frézování [4]

**Kde:** *drive key* – podélné příčné pero (kámen čelního unašeče), *spindle head* – vřetenová hlava, *coil* – cívka, *ferrite core* – feritové jádro, *oscilátor* – oscilátor, *cutter body* – frézovací hlava, *sensor insert* – destička s integrovaným senzorem, *capacitor* – kondenzátor, *metal body* – kovové tělo upínacího trnu, *arbor* – unášecí trn, *rectifying* – usměrnění signálu, *output* – výstup.

Obrázek 6.4 zobrazuje výstup pro poškozený a nepoškozený nástroj. Rezonanční kmitočet obvodu byl nastaven na  $f = 390$  kHz, frekvence oscilátoru byla  $f = 410$  kHz a otáčky vřetene byly  $n = 6000$  min<sup>-1</sup>. Průběh signálu se různě lišil podle komponentů směřujících čelem k detekční cívce. Když byla destička neporušená, výstupní signál měl vrcholy v čase, kdy cívka směřovala čelem k detekční cívce. Na druhou stranu pokud byla destička poškozená, výstupní signál vykazoval prohlubně a to v čase když byla detekční cívka čelem k feritovému jádru.



Obr. 6.4 Výstupní signál detekčního systému pro neporušený a porušený odporový film při rotaci vřetena [4]

**Kde:** Ferrite core - feritové jádro, coil – cívka, drive key - podélné příčné pero, noise - šum signálu, output - výstupní napětí, metal body - kovové tělo upínacího trnu, one rotation - jedna otáčka, time - čas

## 7 Návrh experimentu

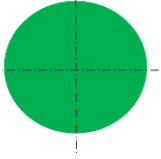

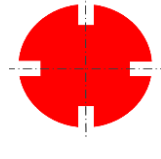
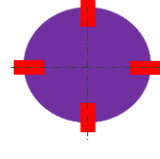
Experiment se zabývá diagnostikou řezného nástroje pomocí integrovaných odporových vrstev při podélném soustružení. Zjednodušeně lze říci, že je na břitové destičce nanesená odporová vrstva, která se při obrábění a postupném opotřebování zmenšuje až dochází k jejímu úplnému přerušení. Odpor této vrstvy je měřen a zaznamenáván v čase. Cílem je najít závislost mezi hodnotami elektrického odporu a průběhem opotřebení, případně jeho dosažením. Technologie nanesené odporové vrstvy samotného nástroje a měření odporu jsou podrobně popsány v následujících kapitolách.

Na základě předešlých testů bylo rozhodnuto použít hůře obrobitelný materiál a to litinu s kuličkovým grafitem (EN-GJS-700). Důvodem je zostření podmínek experimentu za účelem rychlejšího dosažení opotřebení, které je pro tento daný experiment žádoucí. Z diplomových prací, které zkoumaly problematiku odporových vrstev je známo, že po úplném přerušení obvodu je elektrický odpor neměřitelný, pouze tehdy pokud není nástroj v řezu. Po najetí zpět do řezu často dochází při doteku s obráběným materiálem opět k uzavření obvodu a elektrický odpor je znovu měřitelný, což bylo experimentálně ověřeno. Z tohoto důvodu se nabízelo ověřit chování odporové vrstvy i při obrábění přerušovaným řezem. Dle specifikace výrobce je možné použít nástrojový materiál i pro přerušovaný řez.

**Testování probíhalo na čtyřech druzích polotovarů (tab. 7.1), na jejich základě dělíme experimenty do následujících skupin:**

- A). **Plný materiál** - nepřerušovaný řez
- B). **1 x přerušení** - polotovar s jednou podélnou drážkou, lehce přerušovaný řez
- C). **4 x přerušení** - polotovar se čtyřmi podélnými drážkami – přerušovaný řez
- D). **Lišty** - obrábění na speciálním přípravku pro simulaci těžkého přerušovaného řezu, kde upínáme čtyři lišty (obr. 7.4)

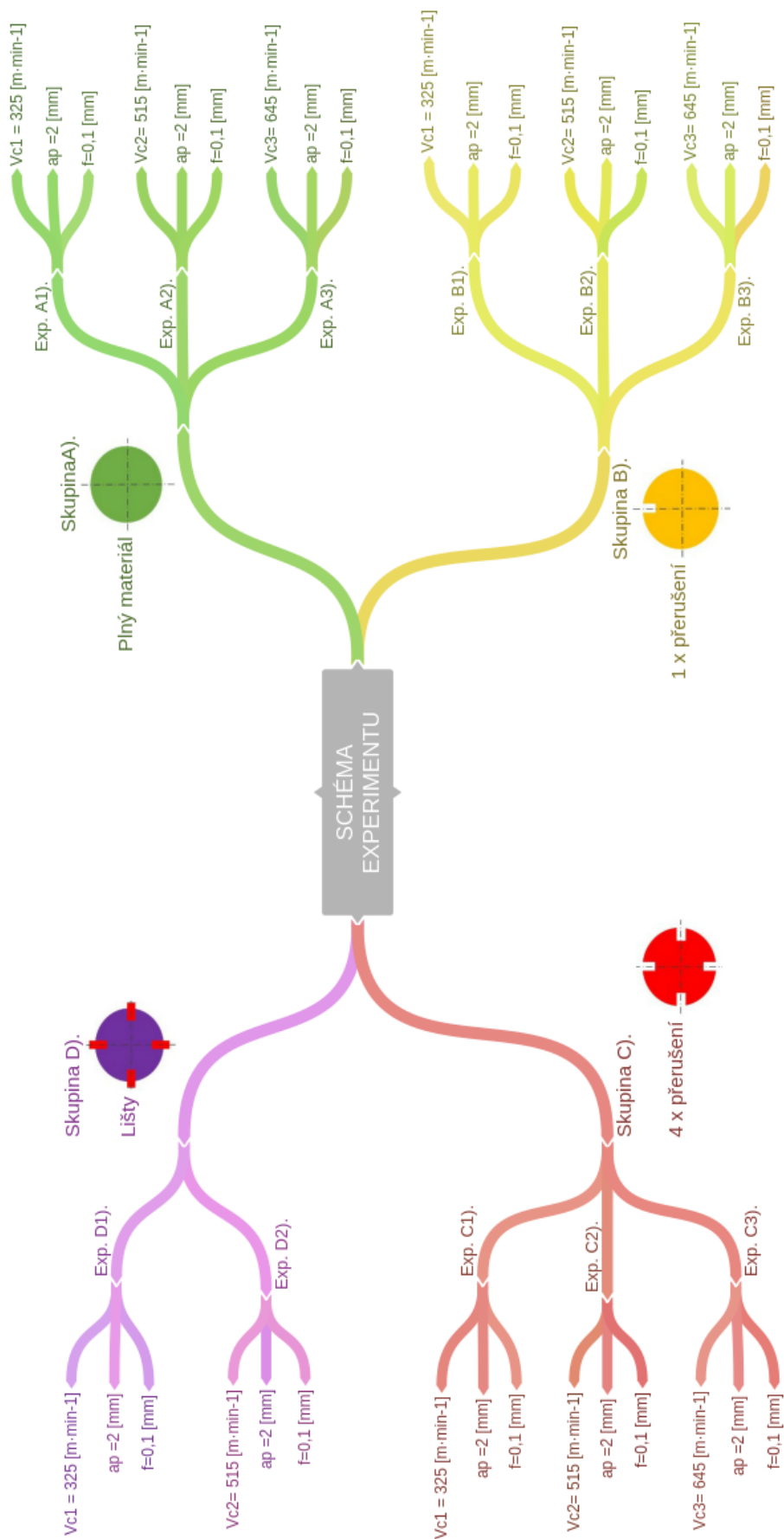
Tab. 7.1 Polotovary pro jednotlivé skupiny experimentů

Polotovary pro experimenty				
Skupina	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Polotovar	Plný materiál	1 x přerušení	4 x přerušení	4 x lišta
Řez	Nepřerušovaný	Lehce přerušovaný	Přerušovaný	Těžké přerušení
Obráběný průměr D [mm]	270 mm	270 mm	270 mm	270 mm
Obráběná délka polotovaru	295 mm	295 mm	295 mm	500 mm
Šířku drážky	-	4 mm	4 mm	-
Šířka lišty	-	-	-	48 mm

Na každém polotovaru (tab. 7.1) probíhaly testy pro tři různé rezné rychlosti  $v_c = 325, 515$  a  $645 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ty byly zvoleny s ohledem na omezení použitého stroje. Z důvodu bezpečnosti a značného chvění byly u přípravku pro simulaci těžkého přerušení (přípravek s upnutými lištami) použity pouze první dvě rezné rychlosti. **Hodnoty hloubky řezu a posuvu byly po celý experiment konstantní, tedy  $a_p = 2 \text{ mm}$  a  $f = 0,1 \text{ mm}$ .** Schéma experimentu je uvedeno na obrázku 7.1.

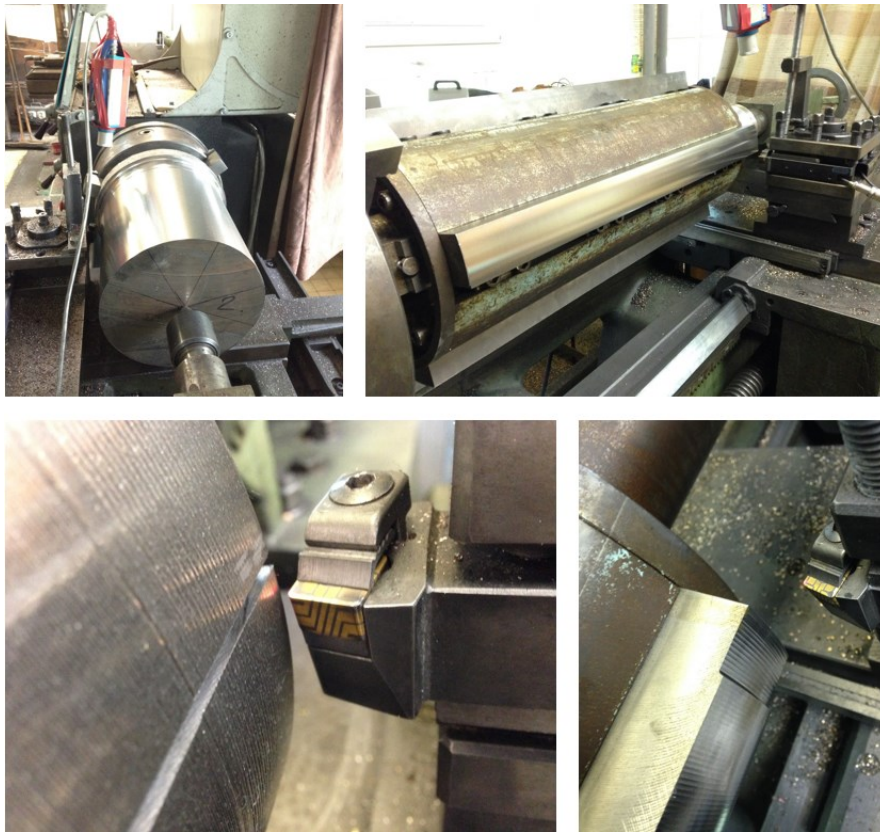
V rámci žádného experimentu (obr. 7.1, 7.2) nebylo dosaženo kompletního přerušení elektrického obvodu na jednom břitu, tedy přerušení odporové vrstvy (dosažení kritéria opotřebení) na hlavním nebo vedlejším hřbetě a také na čele nástroje a proto nebyla zaznamenána nepřítomnost elektrického odporu.

Pro veškeré experimenty bylo společným jmenovatelem opotřebení na hlavním hřbetu nástroje. Po jeho dosažení byla snaha dosáhnout i opotřebení na čele nástroje. To nebylo možné, protože vždy před jeho dosažením došlo k destrukci nástroje. Proto se v těchto experimentech dále nepokračovalo a jako srovnávací kritérium bylo zvoleno maximální opotřebení na hlavním hřbetě nástroje tedy jeho maximální velikost  $VB_{BHmax}$  [mm].



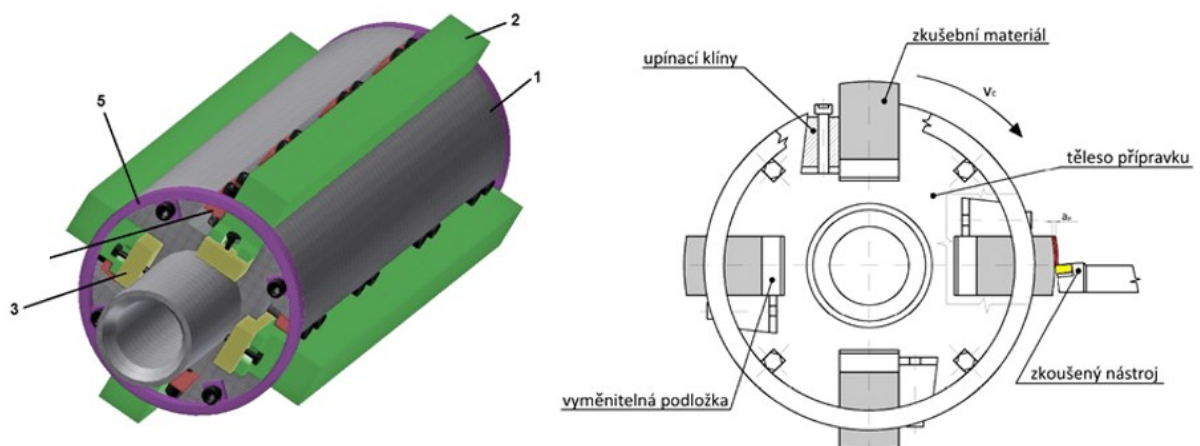
Obr. 7.1 Schema experimentu





Obr. 7.2 Jednotlivé experimenty

Na obrázku (obr. 7.3) je znázorněn přípravek pro simulaci přerušovaného řezu, z hlediska mechanických i teplotních rázů by mělo jít o nejnáročnější experiment. Přípravek ve stavu s upnutými lištami má průměr  $D = 270$  mm a obráběná délka je 500 mm. Šířka upnuté lišty je 48 mm.



Obr. 7.3 Přípravek pro simulaci těžkého přerušovaného řezu [20]

## 7.1 Stroj

Všechna měření v rámci experimentu byla provedena na univerzálním hrotovém soustruhu MAŠSTROJ TROJAN C11 MV (obr. 7.4). Stroj byl osazen regulací otáček motoru, tak aby bylo dosaženo konstantní řezné rychlosti v rozmezí +/- 5 % - dle údaje výrobce systému regulace otáček.



Obr. 7.4 Obráběcí stroj

Tab. 7.2 Pracovní rozsah stroje

Pracovní rozsah stroje:	
Vzdálenost hrotů	1100 mm
Oběžný průměr nad ložem	500 mm
Oběžný průměr nad suportem	290 mm
Průměr sklíčidla	Ø 250/315 mm
Zdvih příčného suportu	270 mm
Zdvih podélného suportu	950 mm
Výkon hlavního motoru S1	15 kW

## 7.2 Popis nástroje

Nástrojem je speciální vyměnitelná břitová destička (obr. 7.5) s nanesenou odporovou vrstvou a s integrovanými senzory opotřebení vyvinutá firmou Kyocera. Je vyrobena z řezné keramiky KS6000 a potažená vrstvou nitridu titanu (TiN) o tloušťce 0,3  $\mu\text{m}$ , [5].

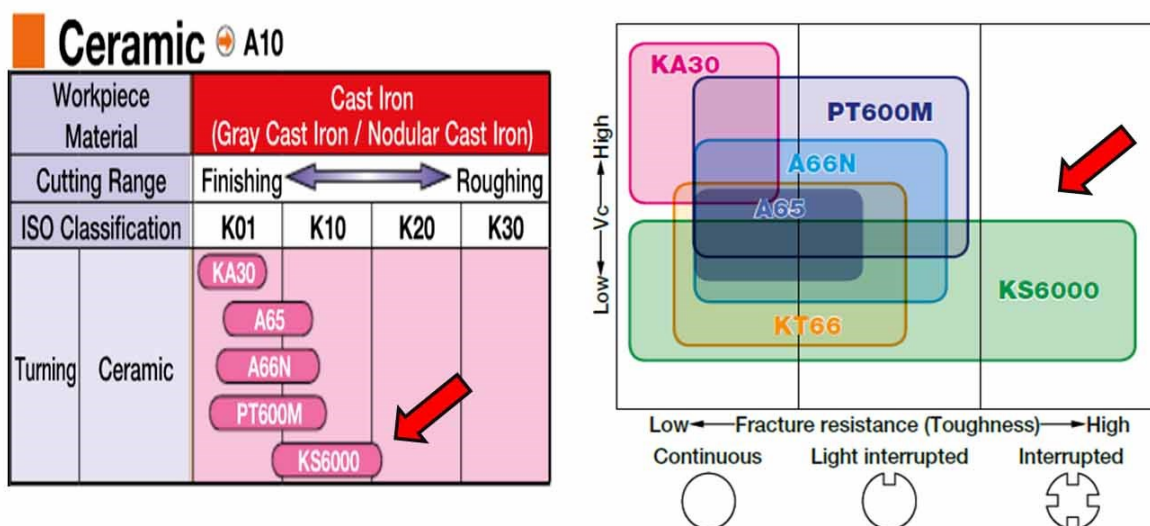
Nevodivý keramický materiál VBD je potažen elektricky vodivou vrstvou, ta je na určitých místech zřejmě laserem odstraněna za účelem vytvoření samostatného elektrického obvodu. Díky této úpravě nám vznikne samostatný pás odporové vrstvy na hřbetní ploše nástroje rovnoběžný s řeznou hranou a také na čelní ploše nástroje. Šířka tohoto pásu odporové vrstvy (neodstraněného povlaku nástroje) je zároveň i kritériem opotřebení a určuje nám trvanlivost nástroje. Destička je vytvořena tak, že každý její roh tvoří vlastní uzavřený obvod. Uzavřený obvod je složen z odporových vrstev na hlavním a vedleším hřbetě nástroje a na čele nástroje. Tudíž můžeme použít všech osm rohů břitové destičky. Obvod každého rohu má vždy dvě snímací elektrody na protější čelní ploše VBD. Z těchto elektrod je snímán signál pomocí speciálního nástrojového držáku se zabudovanými kontakty (obr. 7.7).



Obr. 7.5 VBD z řezné keramiky KS6000 s nanesenou odporovou vrstvou

### 7.3 Popis nástrojového materiálu

Řezná destička je vyrobena z keramiky KS6000 na bázi nitridu křemíku  $Si_3N_4$ . Tento materiál má relativně vysokou odolnost proti mechanickému opotřebení břítu. Je vhodná zejména pro dokončovací a hrubovací práce na šedé litině s hrubou licí kúrou (viz. obr. 7.6), dovoluje obrábění s chlazením nebo i bez chlazení. Dobře snáší obrábění přerušovaným řezem a teplotní rázy. Doporučuje se pro obrábění žárovevných slitin na bázi niklu. Udrží si vysoký stupeň tvrdosti při teplotách, které by slinuty karbid nesnesl.













Obr. 7.6 Vhodnost použití řezné keramiky KS6000 [7]

## 7.4 Nástrojový držák

Experiment byl prováděn pomocí speciálního nástrojového držáku (obr. 7.7) s označením XCSRNR2525M-1207SEN, který je vybaven odpruženými kontakty pro snímání signálu na VBD. Obsahuje rovněž konektor pro připojení vyhodnocovacího zařízení. Úhel nastavení kompletního nástroje (držák s upnutou břitovou destičkou) je  $\kappa_r = 75^\circ$ . Jedná se o pravý nožový držák v negativním provedení s průřezem 25 x 25 mm s délkou 150 mm, slouží pro břitové destičky s délkou hrany 12 mm a tloušťkou 7 mm. Identifikace nástrojového držáku je znázorněna na obrázku 7.9. Poloměr zaoblení špičky vyměnitelné břitové destičky  $R = 1,5$  mm.



Obr. 7.7 Nástrojový držák se snímacími kontakty

Druh držáku	Způsob upnutí	Tvar destičky	Tvar nože	Úhel hřbetu
X speciální	C 	S 	R  75°	N  $\alpha_n=0^\circ$
Směr řezu	Výška držáku	Šířka držáku	Délka držáku	-
R 	 25	 25	 M 150	
Velikost hrany	Tloušťka destičky	Tvar destičky	Úhel hřbetu	provedení
12	7	S 	E	N 

Obr. 7.8 Identifikace nástrojového držáku [10]

## 7.5 Materiál obrobku

Materiálem obrobku u obou polotovarů je litina s kuličkovým grafitem (dříve označována také jako tvárná litina) GGG 70. Je to slitina ve které se uhlík vyskytuje především v částicích kuličkového grafitu. V porovnání s litinou s lupínkovým grafitem má tato litina výrazně lepší mechanické vlastnosti.

Veškerý obráběný materiál byl na zakázku odlit z jedné výrobní dávky a to ve dvou typech polotovarů (obr. 7.9).

**Polotovary:**

- 1) První polotovar tvořila kulatina o vnějším průměru  $\varnothing D = 270$  mm a délce  $l = 300$  mm (obr. 7.9). Tento materiál byl použit pro první tři skupiny experimentu.

**Podélné soustružení:**

- A). plného materiálu,
  - B). polotovar s jednou podélnou drážkou šířky 4 mm - 1x přerušení,
  - C). polotovar se čtyřmi podélnými drážkami šířky 4 mm - 4 x přerušení.
- 2) Zde byly polotovarem lišty, které se upínají do přípravku pro simulaci přerušovaného řezu. Sestava přípravku s lištami má  $\varnothing D = 270$  mm a délce  $l = 500$  mm, šířka vyčnívajících - obráběných lišt byla  $b = 48$  mm.

**Podélné soustružení:**

- D). na přípravku se čtyřmi lištami.

Na základě průměru přípravku s lištami byl zvolen průměr polotovarů z kulatiny. Veškeré polotovary pro jednotlivé experimenty jsou znázorněny v tab. 7.1.



Obr. 7.9 Obráběné polotovary

Tab. 7.3 Označení obráběného materiálu

Označení litiny (ČSN EN 1563)		Ekvivalentní materiály		
Podle pevnosti v tahu		Česko	Německo	DIN 1691
značkou	číselně	ČSN	DIN 1691	ASTM A48
EN-GJS-700-2	EN-JS1070 5.3300	42 2307	GGG-70	Gr. 100-70-03

Tab. 7.4 Chemické složení obráběného materiálu

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Mg [%]	Cu [%]
3,4 ÷ 3,85	2,3 ÷ 3,1	0,1 ÷ 0,3	≤ 0,05	≤ 0,1	0,045 ÷ 0,065	≤ 0,8

Tab. 7.5 Mechanické vlastnosti obráběného materiálu

<b>Mez pevnosti Rm [MPa]</b>	650 ÷ 700
<b>Tvrdość HB max</b>	240 ÷ 290
<b>Modul pružnosti E [GPa]</b>	169

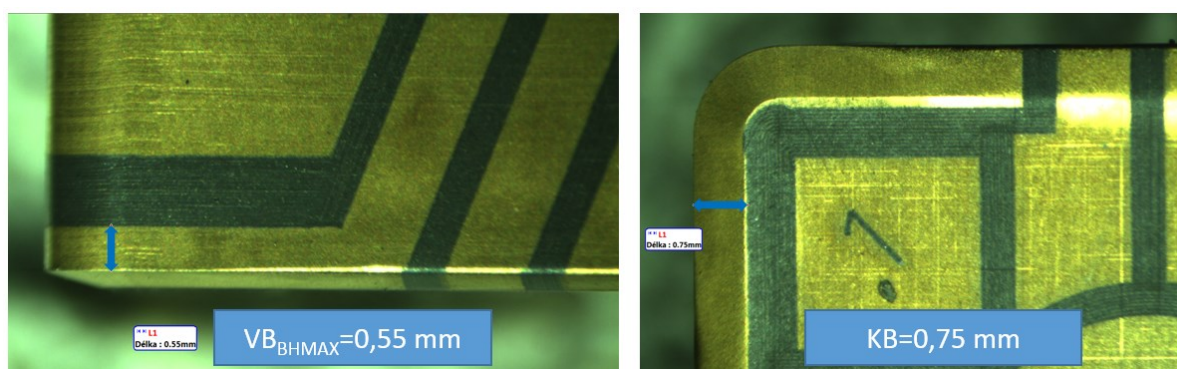


## 7.6 Měření elektrického odporu

Princip experimentu spočívá ve sledování velikosti odporu nástroje, jak je zjednodušeně naznačeno na obrázku (obr. 7.11). Břitová destička je upnuta ve speciálním nástrojovém držáku s kontakty pro snímání elektrického odporu a společně s připojeným datalogrem, sloužícím k měření hodnot elektrického odporu, tvoří uzavřený okruh. Elektrický proud je veden skrze tuto odporovou vrstvu (povlak). V průběhu obrábění dochází k nárůstu opotřebení tohoto povlaku, zmenšuje se jeho plocha a tím pádem roste odpor obvodu. Pokud dojde k úplnému přerušení odporového filmu, měla by být hodnota odporu nekonečná a tudíž neměřitelná. K datalogeru je ještě připojen pyrometr sloužící pro doplňkové měření teploty na břitu nástroje a počítač pro záznam a zpracování naměřených hodnot (obr. 7.12) [4].

Šířky jednotlivých pásů odporové vrstvy na hřbetě a čele nástroje odpovídají velikosti kritéria opotřebení. Pro experiment byla použita destička s následujícími parametry (obr. 7.10), které byly změřeny pomocí mikroskopu:

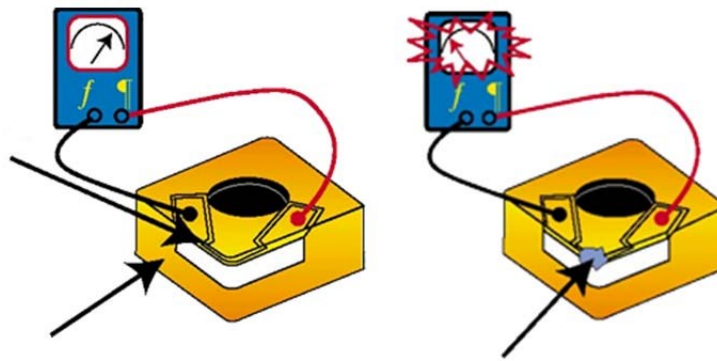
- kritérium opotřebení na hlavním ( $VB_{BHmax}$ ) a vedlejším hřbetě nástroje, tedy šířka odporového pásu na hřbetní ploše destičky má hodnotu **0,55 mm**,
- kritériu opotřebení na čele nástroje (KB) tedy šířka odporového pásu na čelní ploše destičky má hodnotu **0,75 mm**.



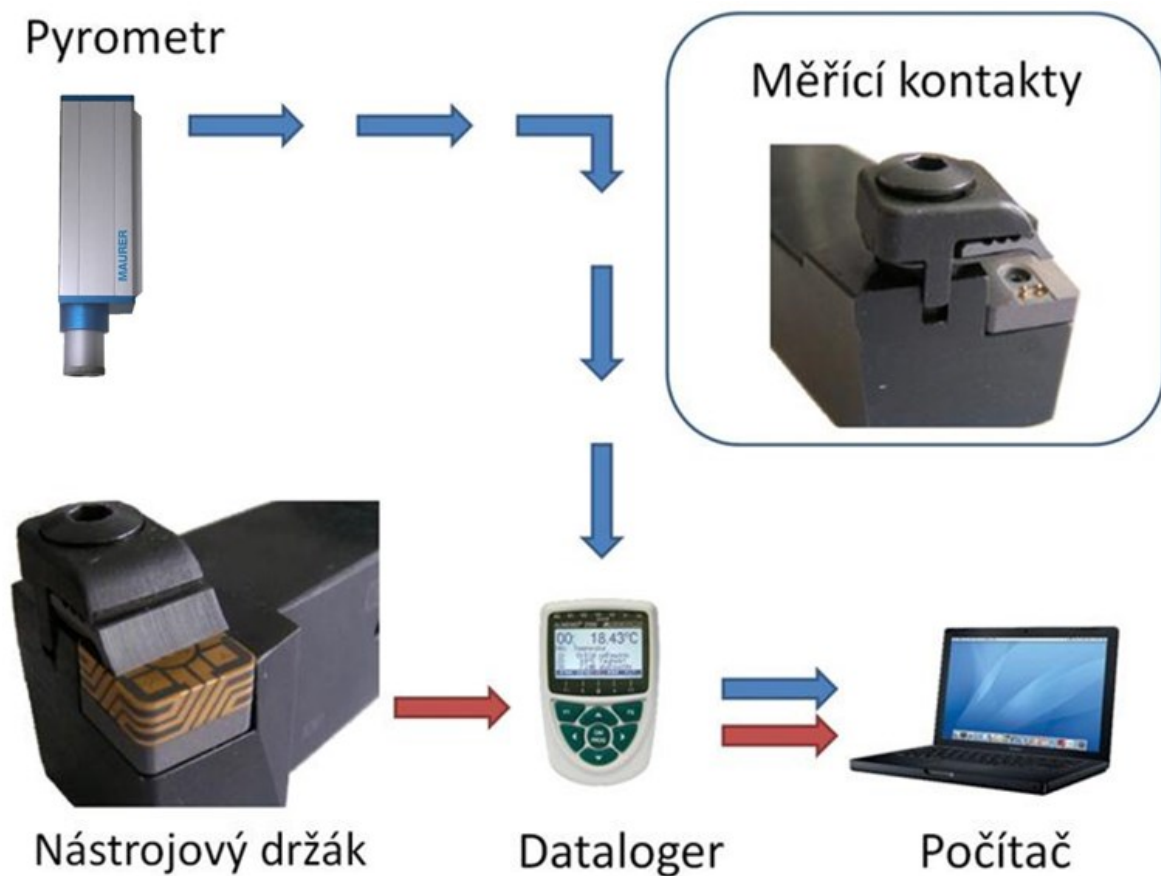
Obr. 7.10 Kritéria opotřebení = šířky odporových vrstev

### Z fyziky víme, že elektrický odpor závisí na:

- délce vodiče - čím delší je vodič, tím větší je elektrický odpor,
- průřezu vodiče - čím širší je vodič, tím menší je elektrický odpor,
- materiálu vodiče,
- teplotě vodiče s rostoucí teplotou roste i elektrický odpor.



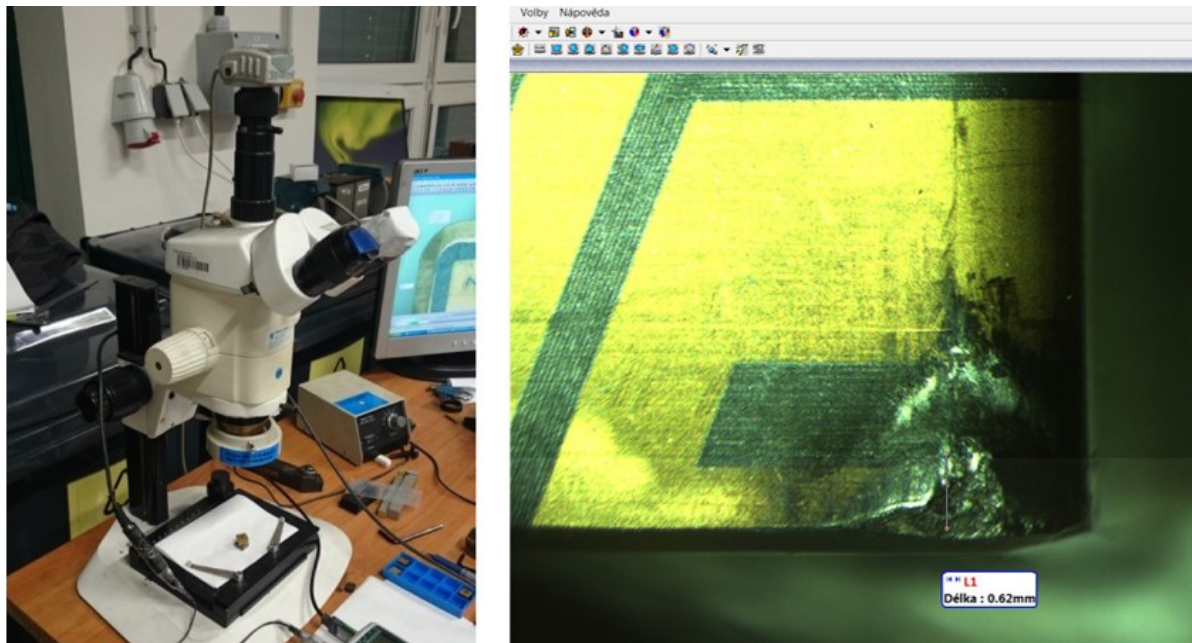
Obr. 7.11 Princip metody [5]



Obr. 7.12 Schéma experimentu

## 7.7 Měření opotřebení

Opotřebení VBD bude měřeno dílenským mikroskopem Intracomicro vybaveným digitální kamerou pro zvětšení a uložení snímaného obrazu do počítače, kde se pomocí softwaru Motic Images plus 2.0 ML změří hodnota opotřebení (obr. 7.13). Mikroskop je vždy pro dané zvětšení kalibrován pomocí kalibrační měřky. Veškerá vstupní data budou vhodně statisticky zpracována.
















Obr. 7.13 Měření opotřebení

## 7.8 Řezné podmínky

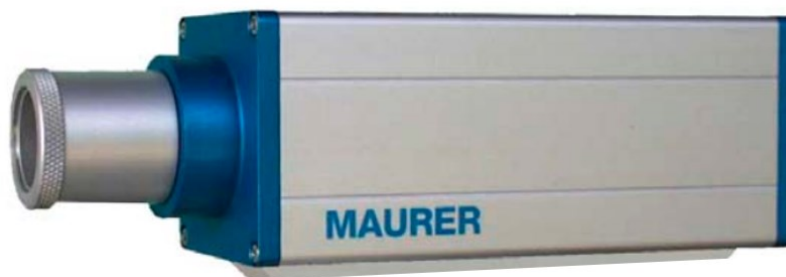
V následující tabulce jsou znázorněny použité řezné podmínky pro jednotlivé experimenty.

Tab. 7.6 Použité řezné podmínky

Skupina	Experiment	Řezná rychlost $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Polotovar	Hloubka řezu $a_p$ [mm]	Posuv na otáčku $f$ [mm]	Skupina	Experiment	Řezná rychlost $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Polotovar	Hloubka řezu $a_p$ [mm]	Posuv na otáčku $f$ [mm]
A	1	325		2	0,1	C	1	325		2	0,1
	2	515		2	0,1		2	515		2	0,1
	3	645		2	0,1		3	645		2	0,1
B	1	325		2	0,1	D	1	325		2	0,1
	2	515		2	0,1		2	515		2	0,1
	3	645		2	0,1		3	645			

## 7.9 Měření teploty

Teplota na čelní ploše břitové destičky byla měřena pomocí infrapyrometr MAURER – KTR 1085- 1, který byl umístěn pomocí držáku na nožovém suportu obráběcího stroje.



Obr. 7.14 Infrapyrometr maurer - KTR 1085-1 [16]

Tab. 7.7 Specifikace pyrometru [16]

Technická specifikace Infrapyrometr Mauer typ: KTRD 1085-1	
Charakteristika zaměřovače:	zaměřující infračervený paprsek
Rozsah měřených teplot:	MR1: 550 - 1800°C (1022 - 3272°F)
Spektrální rozsah:	0,85 - 1,1 μm
Čas odezvy:	<10 ms.
Nepřesnost měření:	0,5 % z měřené hodnoty v °C ± 1°C (ε=1, Tu=23°C, T <sub>95</sub> = 1s)
Reprodukovatelnost:	0,1 % z měřené hodnoty v °C ± 1°C (ε=1, Tu=23°C, T <sub>95</sub> = 1s)
Emisní factor ε:	100 - 10 % nastavitelné u jednotky nebo přes rozhraní
Analogový výstup:	0 - 20 mA nebo 4 - 20 mA, zátěž max. 500R
Rozlišení:	<0,1% analogový výstup, <0,1°C na rozhraní
Výstupní mez:	24 V DC / max. 100 mA
Rozhraní:	RS 232 ± 50 V izolované
Objektiv:	pro adaptaci k měřeným aplikacím je k dispozici rozšířená volba objektivů
Pracovní teplota:	pyrometr 0 - 50°C (32 - 122°F), optický systém do 150°C (302°F)
Skladovací teplota:	-10°C - +70°C (14 - 158°F).
Teplotní citlivost:	0,05 % / °C
Vlhkostní tolerance:	35 - 85 % relativní vlhkosti (bez kondenzace)
Pracovní napětí:	24 V DC ± 10 % or 18 V AC ± 10 % < 160 mA
Propojení jednotky:	12-pin konektor
Rozměry V / Š / D:	54 x 54 x 147 mm (2,13 x 2,13 x 5,79 inch) / ALU-obal
Hmotnost:	0,6 kg (1,32 lbs)
Ohnisková vzdálenost	C = 229 mm
Optické prodloužení	A = 13 mm
Rozměr cíle	M = 1,5 mm
Měřicí vzdálenost mezi krytem a cílem	B = 285 mm
Měřicí optika	bezbarvá f 60 ø22,4 mm

## 8 Závislost opotřebenění na elektrickém odporu

### 8.1 Obecná charakteristika experimentů

Jak bylo uvedeno v kapitole č. 7, v rámci žádného experimentu nebylo dosaženo úplného přerušení elektrického obvodu na jednom břitu, tedy úplné přerušení odporové vrstvy (dosažení kritéria opotřebenění) na hlavním nebo vedlejším hřbetě a také na čele nástroje. Nedošlo tedy k přerušení elektrického obvodu, který je tvořen odporovou vrstvou, a proto nebyla zaznamenána nepřítomnost elektrického odporu.

U všech experimentů byl sledován také průběh opotřebenění na čele nástroje a to šířka výmolu na čelní ploše KB. V rámci žádného experimentu se nepodařilo překročit kritérium opotřebenění KB = 0,75 mm. Vždy dříve došlo k lomu břitu a tím ke znehodnocení celé destičky (narušení odporové vrstvy i u okolních břítů). Proto se v těchto experimentech dále nepokračovalo. Samotný průběh výmolu na čelní ploše KB je popsán v kapitole 8.5. V rámci této disertační práce se jedná o doplňkové měření.

Pro veškeré experimenty bylo společným jmenovatelem opotřebenění na hlavním hřbetu nástroje, které bylo dosaženo u všech experimentů s výjimkou experimentu při nejvyšší rezné rychlosti na přípravku s lištami. Zde docházelo ke značnému chvění stroje a přípravku, a proto bylo rozhodnuto tento test vynechat. Na základě uvedených skutečností bylo jako srovnávací kritérium zvoleno maximální opotřebenění na hlavním hřbetě nástroje tedy jeho maximální velikost  $V_{BHmax}$  [mm].

### 8.2 Průběh opotřebenění

Při všech experimentech dochází k žádoucímu opotřebenění nástroje (obr. 8.2). Jednotlivé průběhy opotřebenění se blíží typickému průběhu opotřebenění, jaký známe z teorie obrábění, tedy prudký nárůst opotřebenění během krátkého času v první oblasti, poté následuje oblast lineárního opotřebenění a nakonec oblast zrychleného nadměrného opotřebenění.

Vycházíme-li z teoretického chování odporové vrstvy, je předpokladem, že rostoucí opotřebenění způsobuje požadované snižování objemu nástroje s nanesenou

odporovou vrstvou, jež vede k nárůst měřených hodnot elektrického odporu - zmenšení průřezu vodiče.

Chování elektrického odporu bylo do značné míry ovlivněno tvorbou určité naprášené vrstvy, která postupně přecházela v úkaz svým tvarem podobný adhezivnímu nárůstku (obr. 8.3). Daný úkaz budeme pro potřeby této práce nazývat **nárůstkem**, i když jeho tvorba probíhá za jiných podmínek než běžné obráběcí nárůstky a také se jinak chová.

Nejčastěji se nárůstek projevuje na ploše hlavního hřbetu (obr. 8.1, 8.5) a na špičce nástroje, ale i na vedlejším hřbetu. V oblasti čela nástroje hovoříme pouze o jakém si naprášení materiálu (obr. 8.4). Tyto jevy téměř neovlivňují proces obrábění a průběh opotřebení nástroje a to z důvodu nízké adheze k povlaku nástroje. Chování nárůstků je navíc velmi nestabilní, do určitého stupně růstu odolávají otěru při obrábění. Někdy však odpadají při vyjetí z řezu mezi jednotlivými měřeními a také v průběhu obrábění nebo při následném najetí do materiálu.

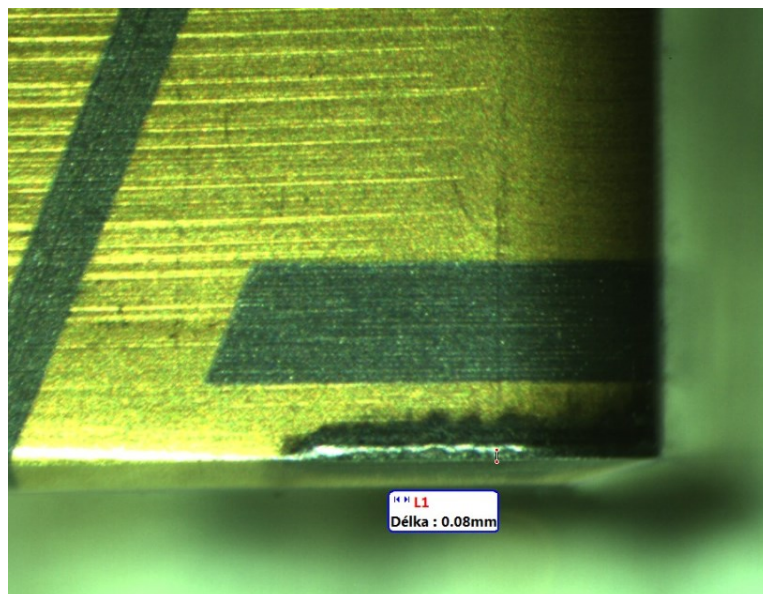
Všechny uvedené adhezivní úkazy (nárůstky, naprášené vrstvy) negativně ovlivňují a zkreslují chování odporové vrstvy. Z fyziky je známo, že elektrický odpor klesá s rostoucím průřezem vodiče a naopak se zmenšujícím se průřezem odpor roste. Nárůstky způsobují snižování měřených hodnot elektrického odporu, protože zvětšují objem vodivé odporové vrstvy. Odpadávání a tvorba nárůstku byl jev, který se projevoval u většiny experimentů. Toto chování bylo do značné míry nahodilé a negativně ovlivňovalo sledování průběhu elektrického odporu. Tyto úkazy způsobovaly jak lokální extrémy v průběhu grafu, tak i jednorázové skokové navýšení a následný průběh elektrického odporu od této hodnoty. Po odlomení nárůstku často docházelo k růstu dalšího na jeho základech, který byl mnohem více nestabilní.

Odborná literatura zabývající se elektrickým odporem rovněž uvádí, že tvar nárůstku, tedy vodiče nám mění hodnotu elektrického odporu. Zkoumání a určování vlivu tohoto jevu je velmi složité z důvodu komplikovaného kontinuálního sledování průběhu nárůstku na všech plochách a následné posouzení jeho vlivu v porovnání s ostatními aspekty, jež ovlivňují hodnotu odporu (obr. 8.6).

Vzájemné srovnání jednotlivých průběhů elektrického odporu je v rámci konkrétní řezné rychlosti nebo v rámci konkrétního polotovaru je uvedeno v kapitole 9.1 a 9.2.

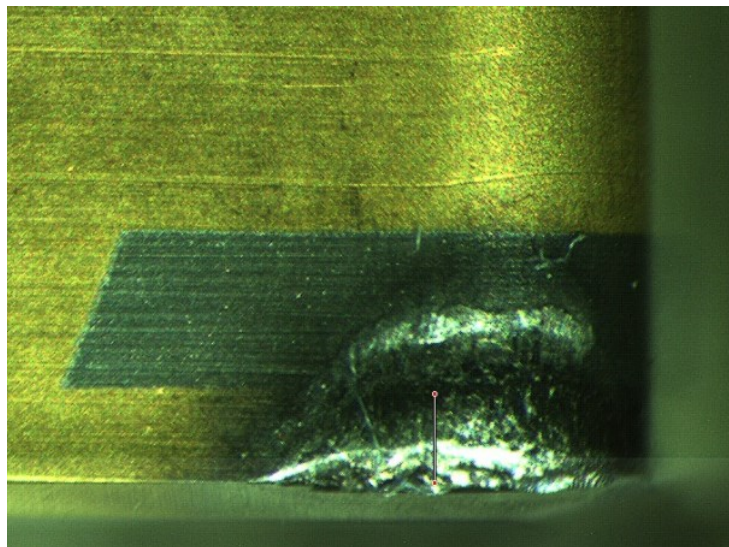
Kapitola 9.5 se věnuje grafům znázorňující porovnání jednotlivých průběhů opotřebení pro dané řezné rychlosti a to vždy v rámci jednoho polotovaru. Z těchto grafů plyne potvrzení, že rozhodující vliv na opotřebení má hodnota řezné rychlosti.

Rovněž byly porovnány průběhy opotřebení mezi jednotlivými polotovary tentokrát vždy v rámci jedné ze tří řezných rychlostí. Grafy nalezneme v kapitole 9.4 a plynou z nich rozdílné výsledky. Lze zde například pozorovat, že pro danou řeznou rychlosti má experiment na polotovaru s přerušením nebo na přípravku s lištami delší průběh (pozdější dosažení kritéria opotřebení) než plném materiálu. Z pohledu disertační práce se jedná pouze o doplňková rozšiřující měření.

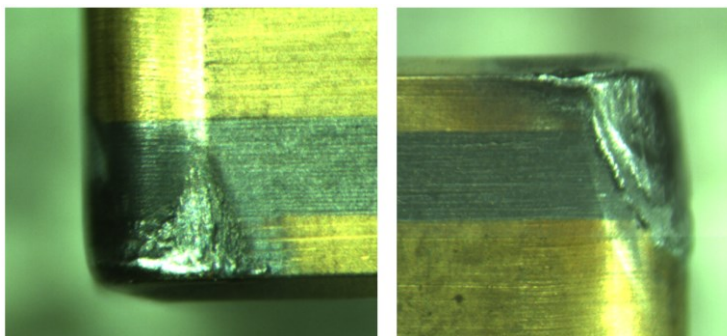


Obr. 8.1 Opotřebení a naprášená vrstva na hlavním hřbetě nástroje, experiment č. 2 na přípravku pro simulaci přerušovaného řezu - řez. č. 4

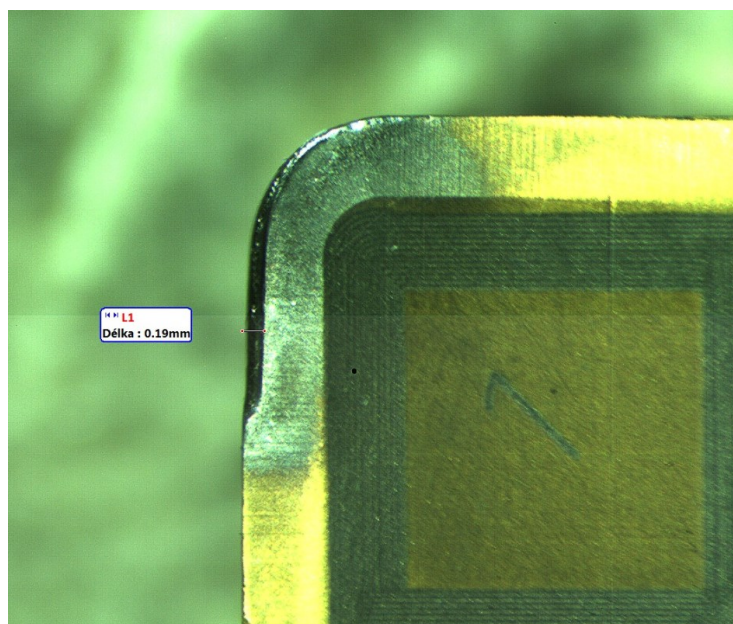




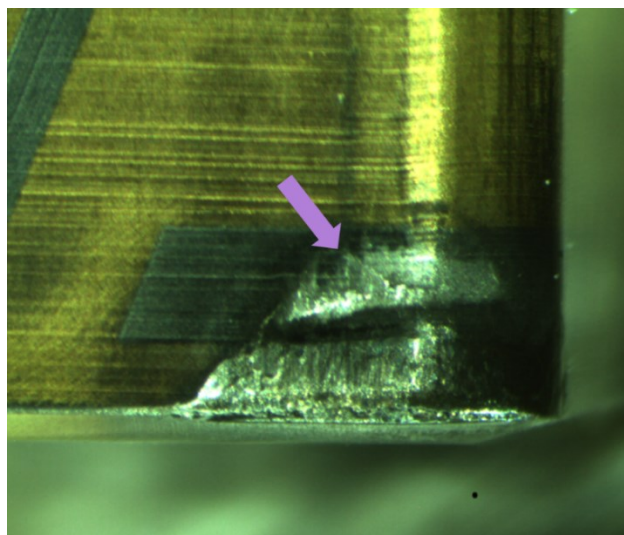
Obr. 8.2 Opatření na hlavním hřbetě nástroje



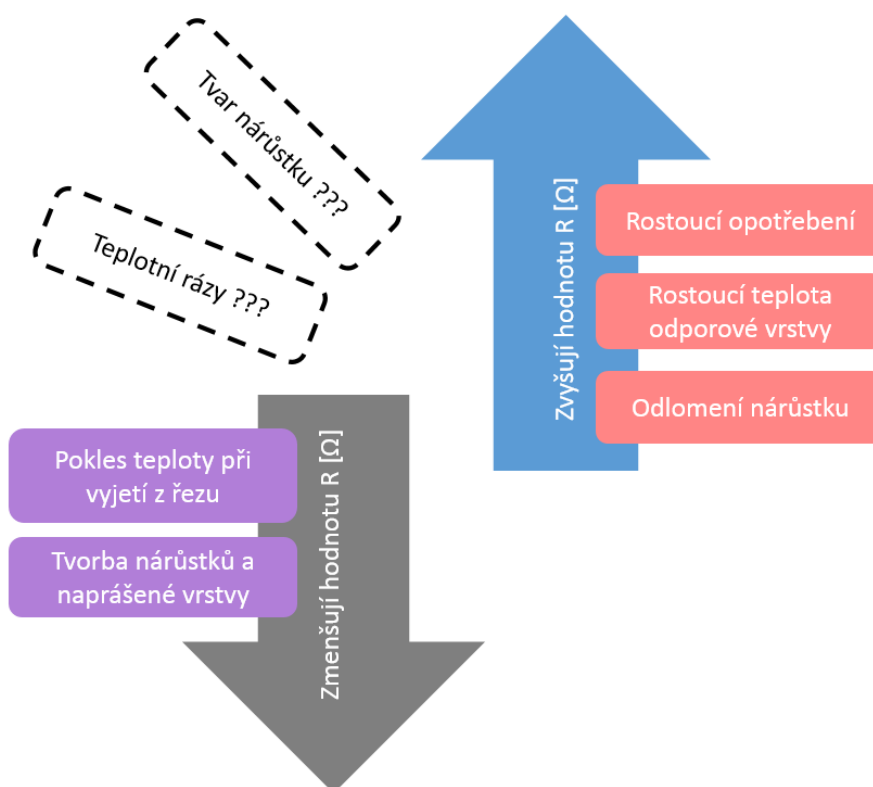
Obr. 8.3 Příklady nárůstu na vyměnitelné břitové destičce



Obr. 8.4 Opatření a naprášená vrstva na čele nástroje



Obr. 8.5 Adhezivní nárůstky přímo na odporové vrstvě



Obr. 8.6 Jevy ovlivňující hodnotu el. odporu v průběhu experimentu

### 8.3 Teplota odporové vrstvy při obrábění

Jako součást experimentu byla doprovodně měřena také teplota pyrometrem MAUER - KTR 1085-1. Pyrometr byl vybrán z důvodu dostupnosti na katedře, avšak jeho nevýhodou pro experiment byl jeho měřicí rozsah, tedy 550 až 1800 °C.

Teplota v místě řezu a především teplota odporové vrstvy na samotném nástroji nám rovněž ovlivňuje elektrický odpor. Zde naopak elektrický odpor s rostoucí teplotou rovněž roste a s klesající teplotou klesá. Z toho plyne, že nám teplota sice zkresluje hodnotu elektrického odporu, ale v pozitivním smyslu. Odpor totiž roste, což je pro nás žádoucí z pohledu jeho teoretického průběhu v rámci experimentu a z hlediska hledání závislosti mezi průběhem opotřebení a průběhem odporu.

**Co se týká chování odporové vrstvy z pohledu teploty, vycházíme z disertační práce pana Ing. Jiřího Kratochvíla Ph.D., v jehož práci byla měřena teplota na totožném nástroji.**

Chování elektrického odporu vysvětluje rovnice závislosti elektrického odporu na teplotě.

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta\theta) \quad (7.1)$$

kde:

R elektrický odpor [ $\Omega$ ],

$\alpha$  teplotní součinitel elektrického odporu [ $K^{-1}$ ],

$\Delta\theta$  teplotní rozdíl [ $K$ ],

$R_0$  počáteční odpor [ $\Omega$ ].

Do výše uvedené rovnice potřebujeme dosadit teplotní součinitel odporové vrstvy. Protože neznáme přesné složení materiálu povlaku, je nutné zjistit tento součinitel z přidruženého experimentu.

### 8.3.1 Stanovení teplotního součinitele elektrického odporu

Teplotní součinitel elektrického odporu (nebo také teplotní součinitel rezistivity) je fyzikální veličina vyjadřující závislost elektrického odporu (rezistivity) vodiče (polovodiče) na teplotě.

Odpor elektrických vodičů s rostoucí teplotou stoupá, teplotní součinitel elektrického odporu má kladnou hodnotu.

Symbol veličiny:  $\alpha$  (příp.  $\alpha R$ ) [K<sup>-1</sup>]

$$\text{Výpočet: } \alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta \theta} \quad (7.2)$$

Kde:

$R_0$  počáteční odpor [ $\Omega$ ],

$\Delta R$  rozdíl odporů při rozdílu teplot  $\Delta \theta$

$\Delta \theta$  rozdíl teplot

Stanovení teplotního součinitele bylo provedeno experimentálně a to tak, že byla zahřívána odporová vrstva v oblasti špičky nástroje. Pomocí kontaktního teploměru byla snímána teplota v této oblasti. Destička byla upnuta v nástrojovém držáku, pomocí datalogeru byly zaznamenávány hodnoty elektrického odporu. Série měření se zopakovala třikrát. Veškerá naměřená data byla statisticky zpracována. Výsledkem je hodnota součinitele elektrického odporu odporové vrstvy:

$$\alpha = (0,463 \cdot 10^{-3} \pm 0,029 \cdot 10^{-3}) K^{-1} \quad [3]$$

Při vyjádření teplotního rozdílu z rovnice 7.2 vznikne rovnice:

$$\Delta \theta = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot \alpha} \quad (7.3)$$

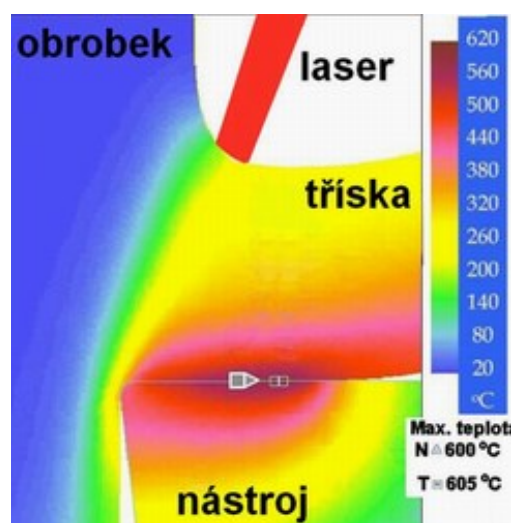
a z ní rovnice na výpočet teploty:

$$\theta = \left( \frac{R - R_0}{R_0 \cdot \alpha} \right) + \theta_0 \quad (7.4)$$

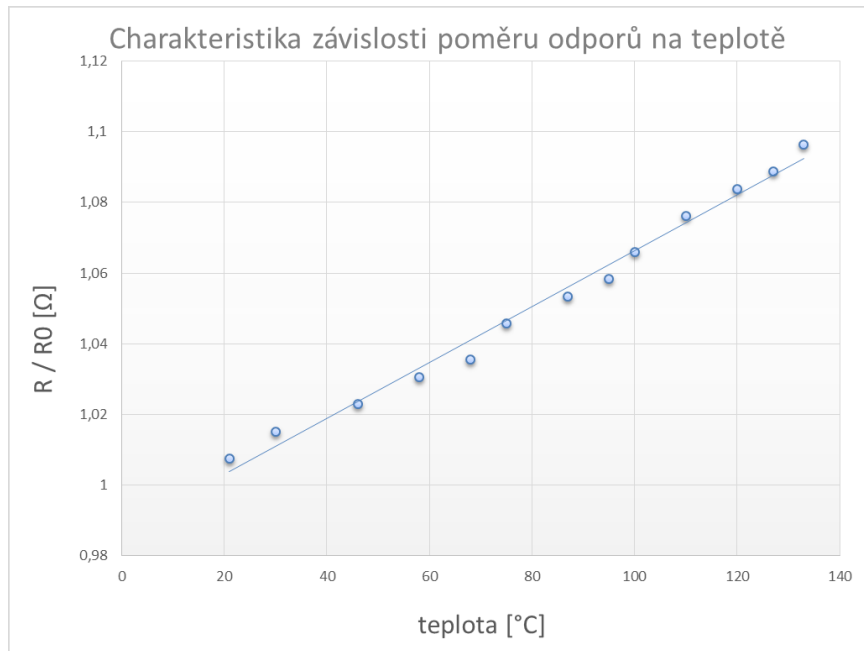
Po dosazení zjištěného součinitele tepelného odporu a hodnot odporu zvoleného řezu činí vypočtená hodnota:

$$\theta = \left( \frac{63,68 - 82,97}{63,68 \cdot 0,463 \cdot 10^3} \right) + 22 = 675,8 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad [3] \quad (7.5)$$

Při srovnání vypočítané hodnoty teploty 675,8 °C a hodnoty naměřené pyrometrem pro tento řez 607 °C, si můžeme udělat hrubou představu o tom, v jakých intencích se projevovala teplota během experimentu. Během některých experimentů byl totiž zaznamenán drobný nárůst teploty, což znamená, že teplota vzrostla do oblasti měřitelné pyrometrem. Bohužel nemáme dostatek vypovídajících dat o jejím průběhu, z kterých by se dal usuzovat vliv na odporovou vrstvu. Pyrometr snímá teplotu na břitu nástroje, který je ale překryt právě odebíraným materiálem a proto je měřena teplota v oblasti střížné roviny, jak je znázorněno na obecném schématu (obr. 8.7) teplotního pole. Při obrábění litiny vzniká elementární tříska a měřící paprsek je přerušovaně krytý, přesto je měřená teplota pouze orientační. Charakteristika závislosti poměru odporů na teplotě je znázorněna na obrázku 8.8.



Obr. 8.7 Obecné teplotní pole [9]



Obr. 8.8 Charakteristika závislosti poměru odporů na teplotě [3]

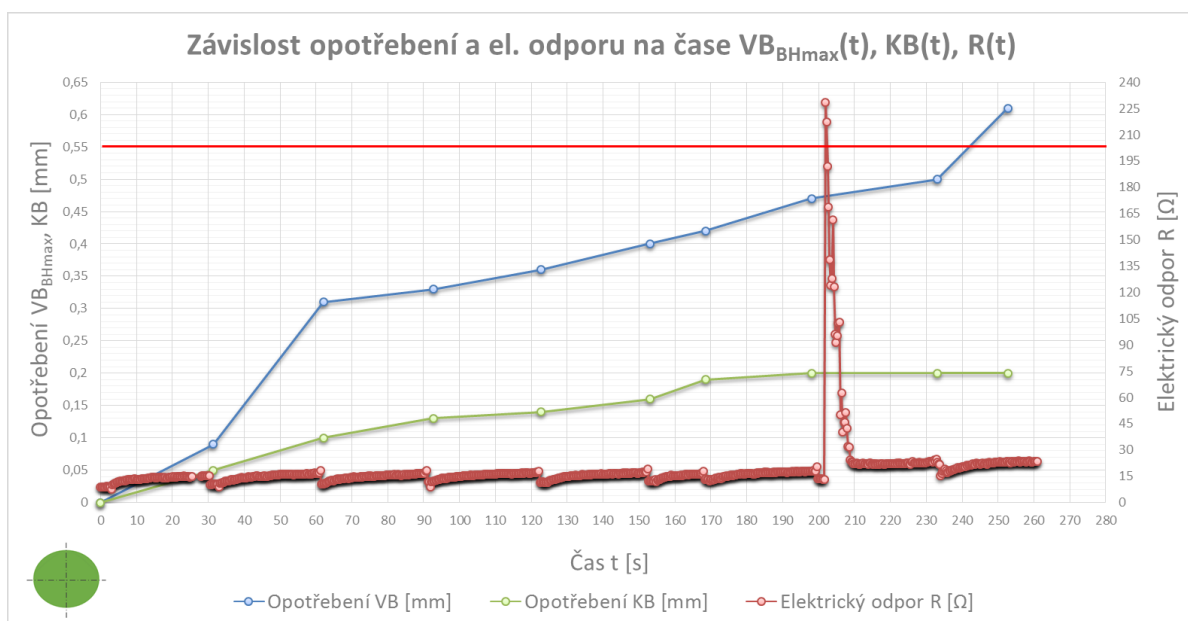
## 8.4 Hodnocení průběhu elektrického odporu

Není zcela jednoznačné do jaké míry, jaká složka převažuje (teplota, tvorba nárůstku, opotřebení odporové vrstvy) při sledování chování elektrického odporu. Hodnocení vyházel z grafu naměřených hodnot z aktuálního stavu a vývoje experimentu, ale také ze snímků chování nárůstku a jeho stavem mezi jednotlivými řezy. U grafů se objevuje drobné časové přesazení vůči hodnotě opotřebení pro daný řez. To je způsobeno pozdějším zastavením měření elektrického odporu. Odpor byl měřen i několik vteřin po vyjetí z řezu, tak abychom měli kompletní představu o jeho chování.

## 8.5 Skupina A). Plný materiál

V rámci této skupiny probíhaly experimenty na polotovaru z plného materiálu, šlo o obrábění nepřerušovaným řezem.

### 8.5.1 Experiment A1 - Závislost opotřebení a elektrického odporu



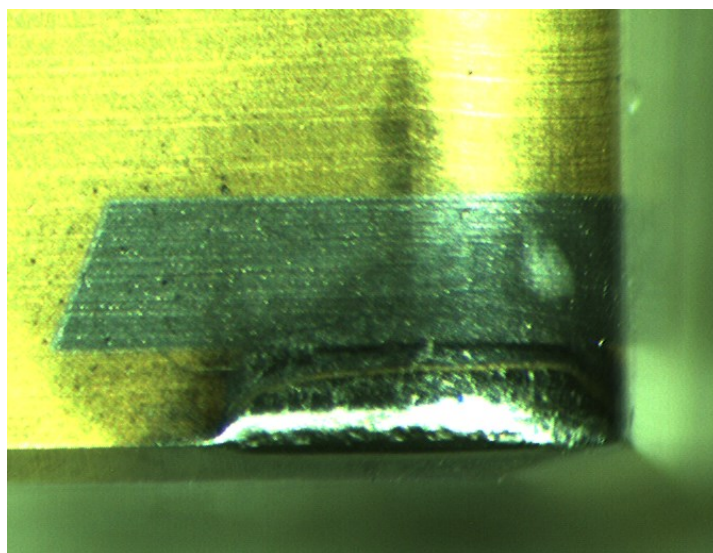
Obr. 8.9 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$   
 $(v_c = 325 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}; f = 0,1 \text{ mm}; a_p = 2 \text{ mm})$

Při uvedeném experimentu (obr 8.9) dochází k žádoucímu opotřebení nástroje. Průběh opotřebení (obr. 8.10 a 8.11) na hlavním hřbetě nástroje je běžný, jak jej známe z teorie obrábění, tedy prudký nárůst v krátkém čase v první třetině a

poté mírný růst během delšího časového úseku. Hodnoty elektrického odporu lehce oscilují mezi hodnotami 10 až 16  $\Omega$ . Drobné anomálie jsou způsobeny vyjetím z řezu a následným začátkem dalšího řezu (např. čas 30 s). Tento jev se opakuje spolu s dalšími řezy a je zřejmě způsoben chladnutím nástroje po vyjetí z řezu.

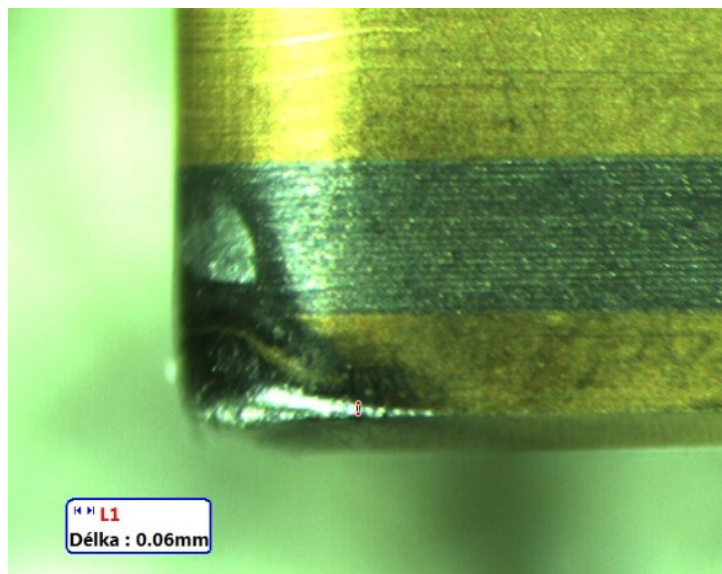
V čase 201 s dochází ke značnému výkmitu elektrického odporu a následnému postupnému snižování až se hodnota elektrického odporu ustálí. Tato velká odchylka je způsobena odlomením hřbetního nárůstku. V důsledku toho dochází ke skokovému snížení průřezu vodivé (odporové) vrstvy a tudíž i k nárůstu hodnoty elektrického odporu. Z grafu není patrná závislost mezi průběhem opotřebení a průběhem elektrického odporu. Opotřebení na čelní ploše (obr. 8.12) má běžný průběh bez výraznějšího nárůstu v první třetině experimentu.

Nástroj byl v řezu po dobu 252,8 s a v řezu urazil délku 162,7 mm, než se podařilo překročit dovolené kritérium opotřebení na hlavním hřbetě nástroje v čase 242 s.

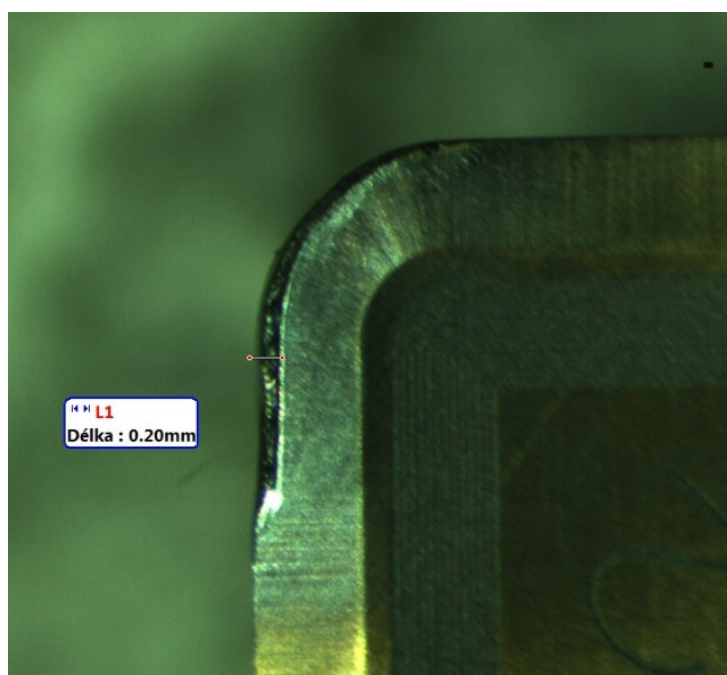


Obr. 8.10 Opotřebení a naprášená vrstva na  $VB_{BH}$  – řez. č. 4



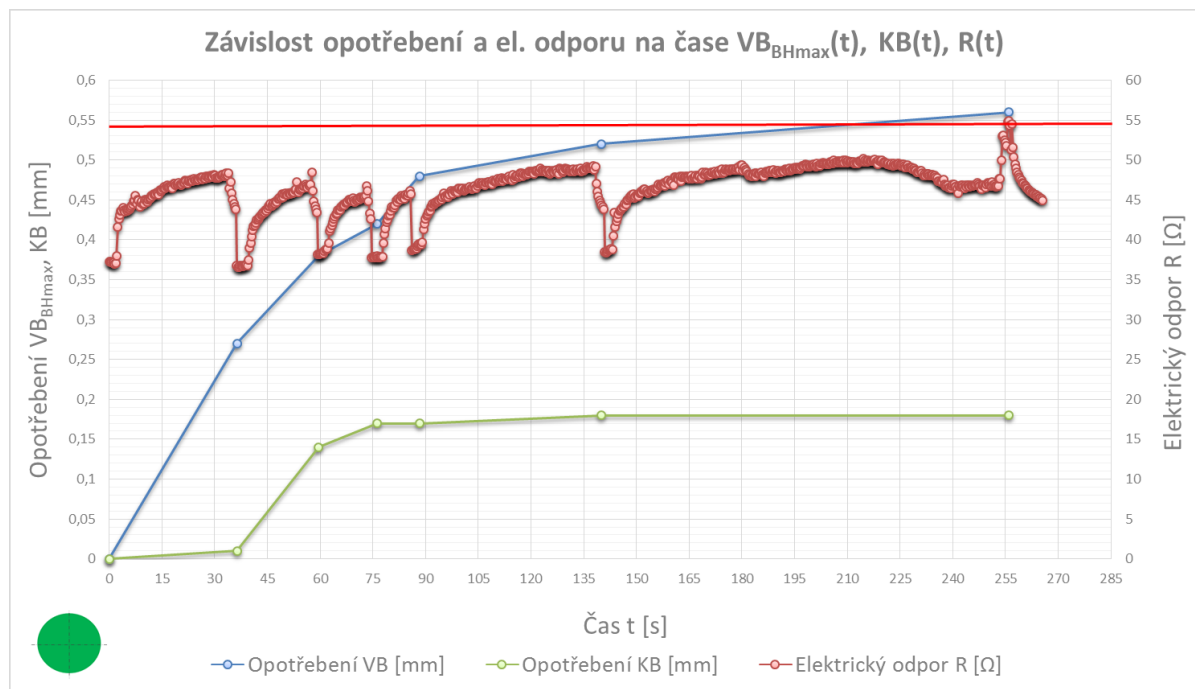


Obr. 8.11 Opatřebení a naprášená vrstva na  $VB_{BV}$  – řez. č. 6



Obr. 8.12 Opatřebení a naprášená vrstva na  $KB$  – řez. č. 9

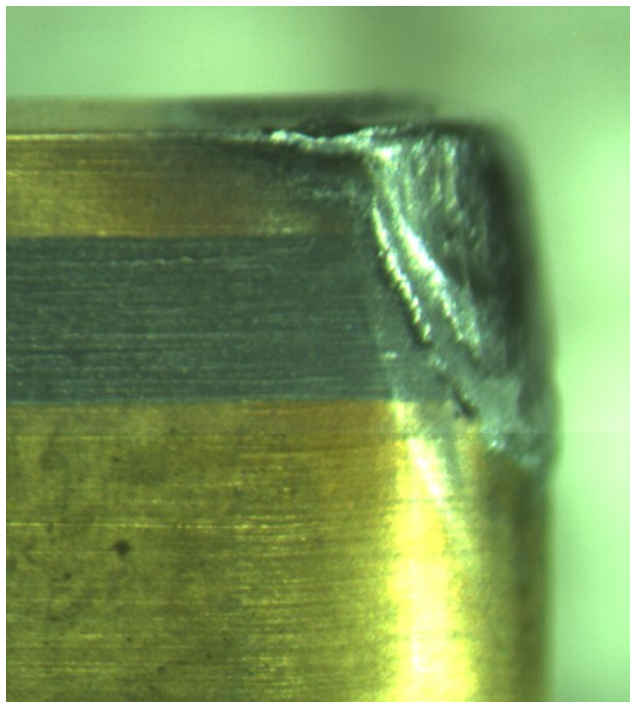
## 8.5.2 Experiment A2 - Závislost opotřebení a elektrického odporu



Obr. 8.13 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$   
 ( $v_c = 515 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f = 0,1 \text{ mm}$ ;  $ap = 2 \text{ mm}$ )

Opotřebení na hřbetě nástroje má běžný průběh (obr. 8.13). Průběh elektrického odporu je podobný pro jednotlivé řezy. Na konci řezu je vždy patrný pokles odporu způsobený chladnutím nástroje po vyjetí z řezu. Vzrůstající průběh odporu na počátku každého řezu je přisuzován zahříváním odporové vrstvy společně s jejím opotřebováním. Opačný účinek na odporovou vrstvu mají nárůstky, které zde ovšem nejsou tak zřejmé jako u jiných experimentů (obr. 8.14). K drobnému nárůstu odporu dochází na konci posledního řezu, kde převáží opotřebení odporové vrstvy spolu s nárůstem teploty. Mezi průběhem elektrického odporu a průběhem opotřebení není očividná závislost, která by naznačovala rostoucí opotřebení nástroje. Opotřebení na čelní ploše má pomalý nárůst u prvního řezu, ale další průběh je již běžný.

Nástroj byl v řezu po dobu 248 s a v řezu urazil délku 247 mm, než se podařilo překročit dovolené kritérium opotřebení na hlavním hřbetě nástroje v čase 225 s. Při snaze dosáhnout kritéria opotřebení také na čelní ploše došlo k destrukci nástroje (obr. 8.15).

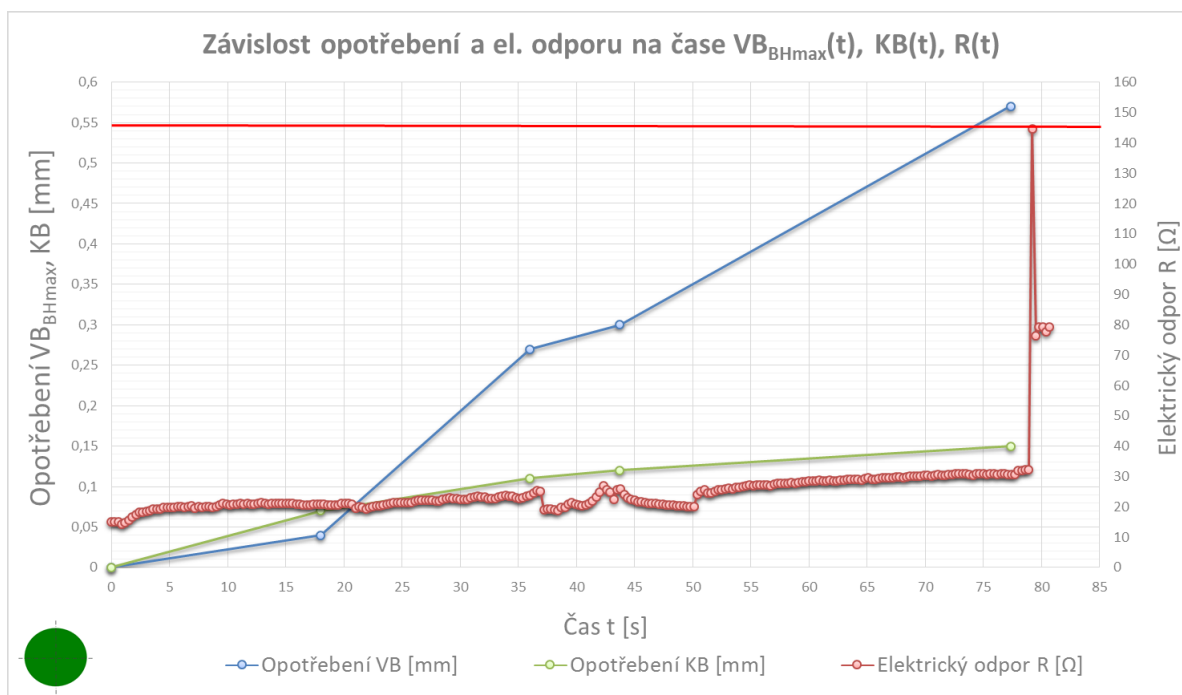


Obr. 8.14 Nárůstek v oblasti rádiusu nástroje – řez. č. 6



Obr. 8.15 Destrukce nástroje – řez. č. 8

### 8.5.3 Experiment A3 - Závislost opotřebení a elektrického odporu



Obr. 8.16 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$   
 ( $v_c = 645 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f = 0,1 \text{ mm}$ ;  $a_p = 2 \text{ mm}$ )

Křivka opotřebení na hřbetě nástroje (obr. 8.16) má zpočátku pozvolný náběh, který přechází v takřka lineární nárůst. Většinu času elektrický odpor lehce osciluje mezi hodnotami 15 až 24  $\Omega$ . Drobné anomálie jsou způsobeny vyjetím z řezu a následným začátkem dalšího řezu (např. časech 36 a 43 s). Mohou být zapříčiněny poklesem teploty odporové vrstvy. V čase 79 s nastává velký výkmit elektrického odporu, který je způsoben odlomením hřbetního nárůstku. V důsledku toho dochází ke skokovému zmenšení průřezu vodiče (vodivé odporové vrstvy). Další průběh elektrického odporu je nestabilní z důvodu tvorby a odlamování mikro nárůstků na podloží původního hřbetního nárůstku a také v oblasti špičky nástroje. Tato anomálie nastává až po do dosažení kritéria opotřebení na hřbetě nástroje. Opotřebení na čelní ploše má téměř lineární průběh.

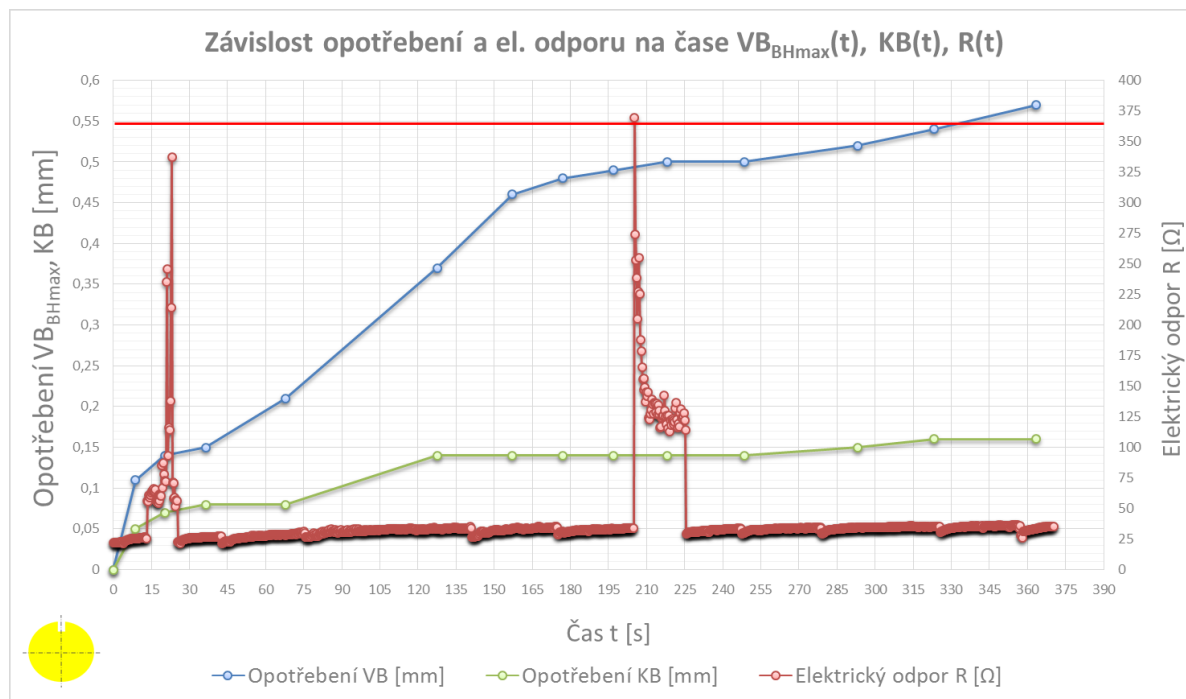
Z grafu není patrná závislost mezi elektrickým odporem a opotřebením.

Nástroj byl v řezu po dobu 77 s a v řezu urazil délku 99 mm, než se podařilo překročit dovolené kritérium opotřebení v čase 74 s.

## 8.6 Skupina B). Polotovar s jednou podélnou drážkou

Veškeré experimenty v rámci této skupiny probíhaly na polotovaru s jednou podélnou drážkou, šlo o obrábění lehce přerušovaným řezem.

### 8.6.1 Experiment B1 - Závislost opotřebení a elektrického odporu

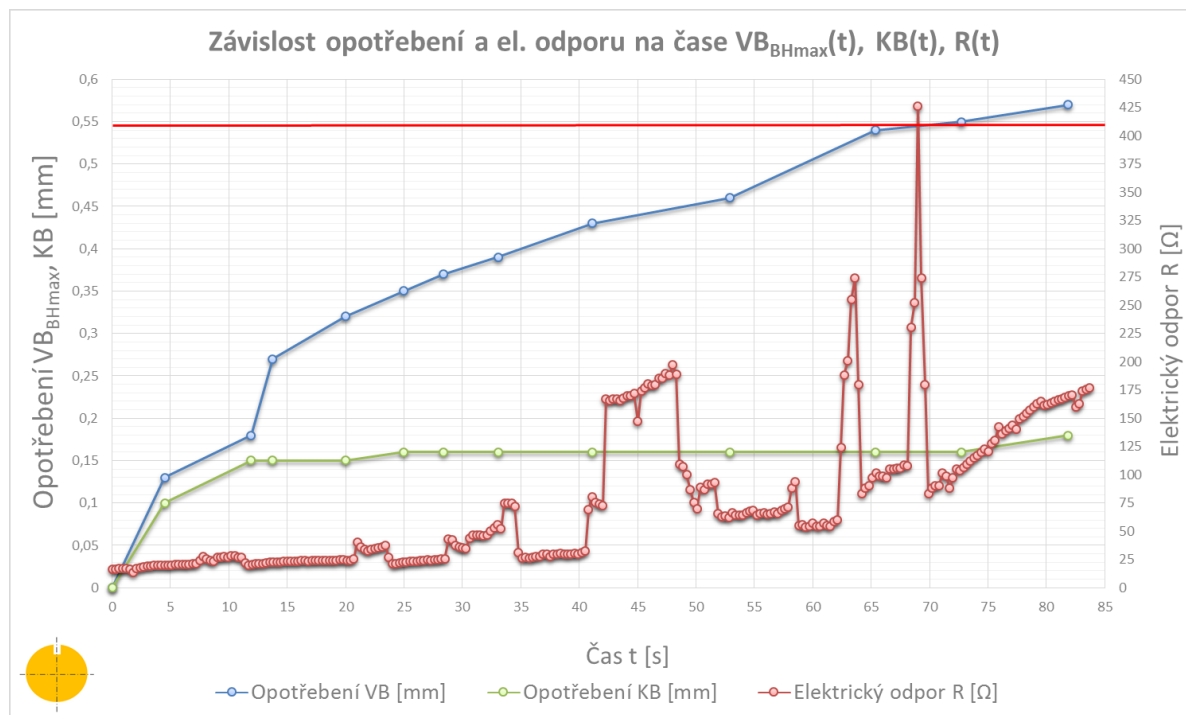


Obr. 8.17 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$   
( $v_c = 325 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f = 0,1 \text{ mm}$ ;  $ap = 2 \text{ mm}$ )

Křivka opotřebení na hřbetě nástroje má opět běžný průběh (obr. 8.17). Elektrický odpor se pohybuje v průběhu experimentu v rozmezí 23 až 30  $\Omega$ , až na dvě výjimky. První prudký nárůst nastává hned v první fázi experimentu a to v čase 21 s, kdy dochází k odlomení hřbetního nárůstku. Tato situace se znovu a nepravidelně opakuje až po několika řezech v čase 205 s. Několikanásobně delší doba tvorby dalšího hřbetního nárůstku může být ovlivněna rovněž různorodou strukturou obráběného polotovaru. Průběh elektrického odporu je po většinu času konstantní a není zde patrná žádná vzájemná závislost s průběhem opotřebení. Opotřebení na čelní ploše má po nárůstu u prvních pěti řezů téměř konstantní průběh.

Nástroj byl v řezu po dobu 363 s a v řezu urazil délku 253 mm, než se podařilo překročit dovolené kritérium opotřebení na hlavním hřbetě nástroje v čase 337 s.

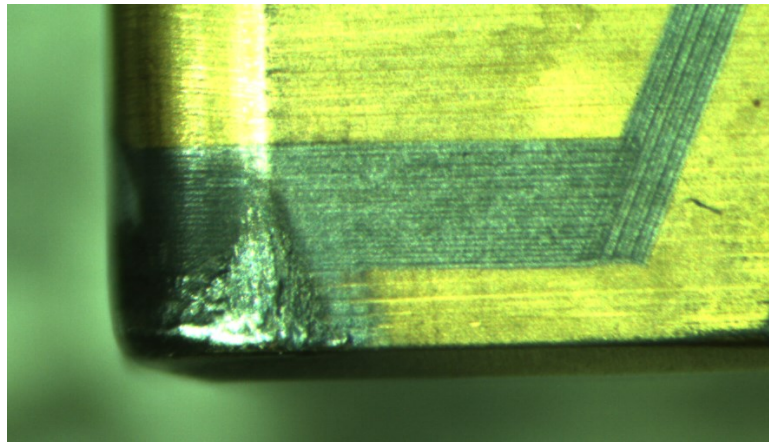
### 8.6.2 Experiment B2 - Závislost opotřebení a elektrického odporu



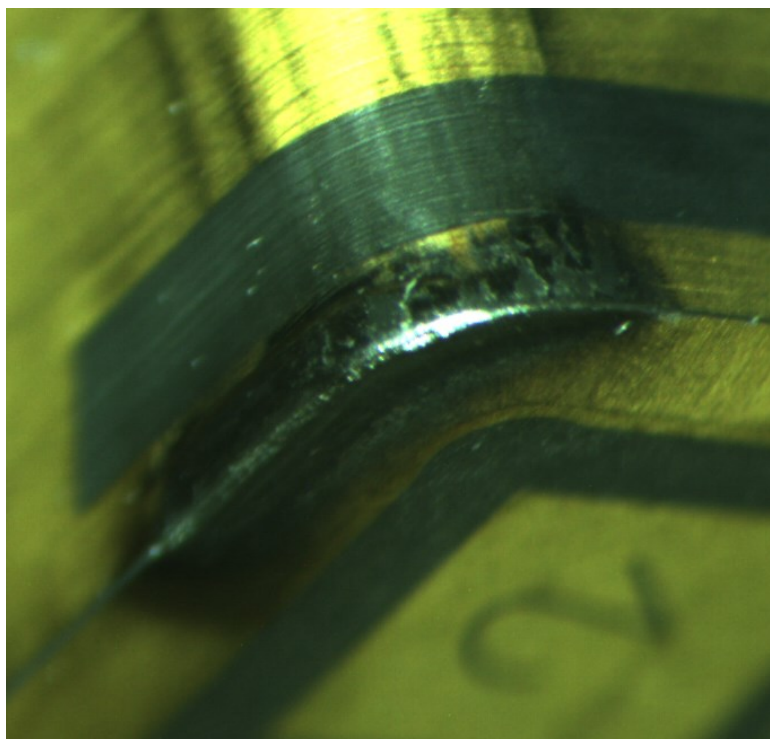
Obr. 8.18 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$   
 $(v_c = 515 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}; f = 0,1 \text{ mm}; a_p = 2 \text{ mm})$

Graf znázorňující opotřebení na hřbetě nástroje má běžný průběh (obr. 8.18). Průběh elektrického odporu můžeme rozdělit na dvě oblasti. V první oblasti, tedy po dobu prvních 28 s, je průběh elektrického odporu téměř konstantní s drobnými odchylkami, které doprovázejí vyjetí nástroje z jednotlivých řezů. Ve druhé oblasti má průběh elektrického odporu převážně nestabilní průběh, který přechází v takřka lineární charakter. Jak je patrné z grafu, tak tato oblast je ovlivněna tvorbou a následným odlamováním hřbetních nárůstků (obr. 8.19 a 8.20), které stále opakovaně rostou a následně odpadají. Průběh elektrického odporu nekoresponduje s průběhem opotřebení a ani dostatečně nenaznačuje jeho chování. U prvních dvou řezů je průběh opotřebení na čelní ploše rostoucí, poté přechází do téměř konstantního charakteru.

Nástroj byl v řezu po dobu 82 s a v řezu urazil délku 111 mm, než se podařilo překročit dovolené kritérium opotřebení na hlavním hřbetě nástroje v čase 72 s.

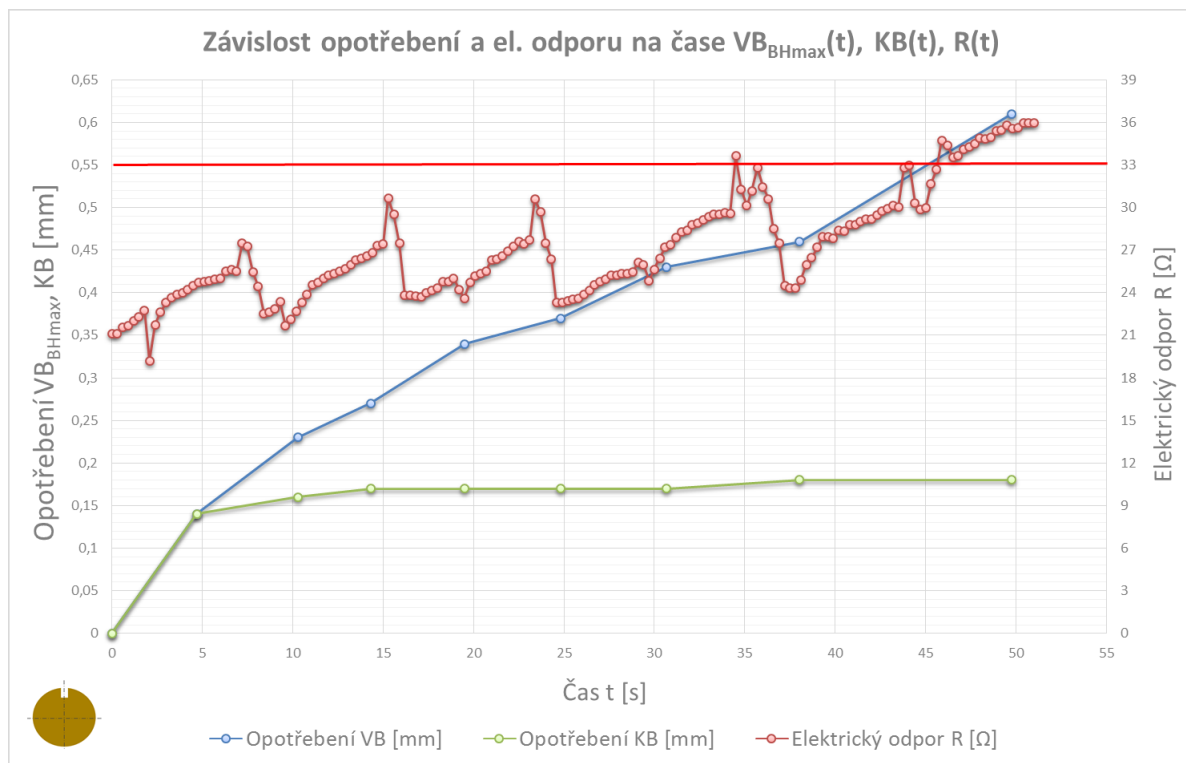


Obr. 8.19 Tvorba nárůstku na VB<sub>v</sub> – řez. č. 5



Obr. 8.20 Odlamování nárůstků v oblasti zaoblení špičky – řez. č. 8

### 8.6.3 Experiment B3 - Závislost opotřebení a elektrického odporu



Obr. 8.21 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$   
 ( $v_c = 645 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f = 0,1 \text{ mm}$ ;  $a_p = 2 \text{ mm}$ )

Křivka znázorňující opotřebení na hřbetě nástroje (obr. 8.21) má rostoucí průběh. Elektrický odpor má u každého řezu po většinu času vzrůstající tendenci. Chování elektrického odporu na konci řezu je ovlivněno chladnutím odporové vrstvy po přerušení obrábění. Průběh elektrického odporu nám nedává žádnou informaci o průběhu opotřebení. Počínaje druhým řezem má průběh opotřebení na čele nástroje opět téměř konstantní charakteristiku.

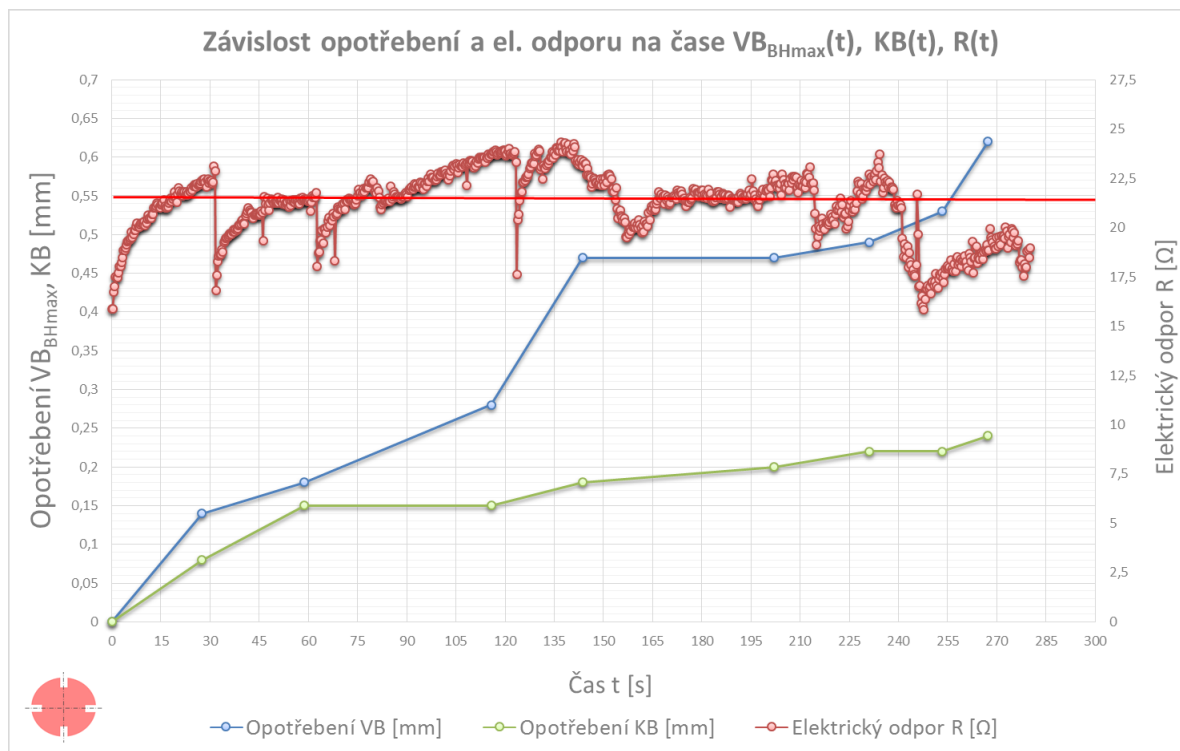
Nástroj byl v řezu po dobu 50 s a v řezu urazil délku 68 mm, než se podařilo překročit dovolené kritérium opotřebení na hlavním hřbetě nástroje v čase 45 s.



## 8.7 Skupina C). Polotovar se čtyřmi podélnými drážkami

Veškeré experimenty v rámci této skupiny probíhaly na polotovaru se čtyřmi podélnými drážkami, šlo o obrábění přerušovaným řezem.

### 8.7.1 Experiment C1 - Závislost opotřebení a elektrického odporu



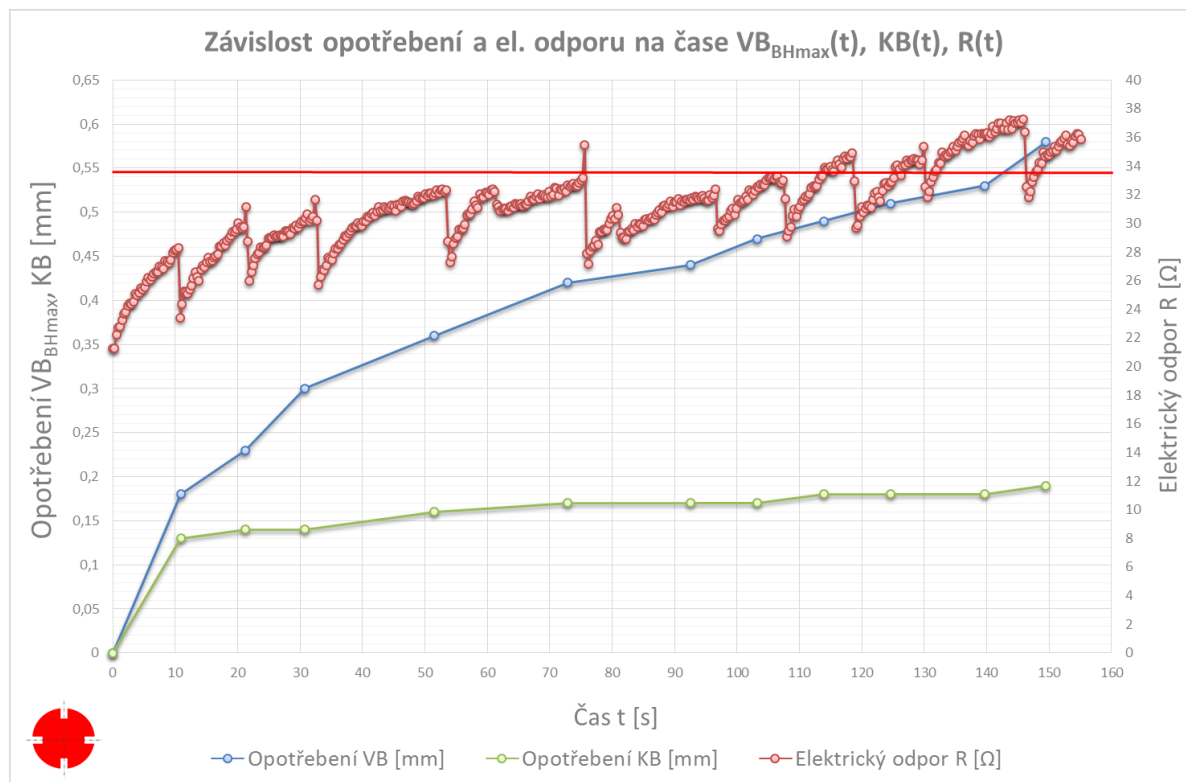
Obr. 8.22 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$

$$(v_c = 325 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}; f = 0,1 \text{ mm}; a_p = 2 \text{ mm})$$

Průběh opotřebení na hřbetě nástroje je běžný (obr. 8.22). První tři řezy má průběh elektrického odporu podobnou charakteristiku tedy postupný nárůst až po maximální hodnotu před vyjetím nástroje z řezu, kdy dochází k poklesu odporu z důvodu poklesu teploty odporové vrstvy. Další průběh odporu je ještě méně jednoznačný z důvodu tvorby nestálých nárůstků. U čtvrtého řezu dochází dokonce k postupnému poklesu křivky, což může být způsobeno pozvolným růstem nárůstků, který má v tomto úseku převažující vliv. Opotřebení na čelní ploše nástroje má běžný průběh. Projevuje se zde i vliv teploty na průběh elektrického odporu, v průběhu řezu roste odpor s teplotou a po vyjetí nástroje z řezu klesá odpor i teplota.

Nástroj byl v řezu po dobu 267 s a v řezu urazil délku 192 mm, než se podařilo překročit dovolené kritérium opotřebení na hlavním hřbetě nástroje v čase 257 s.

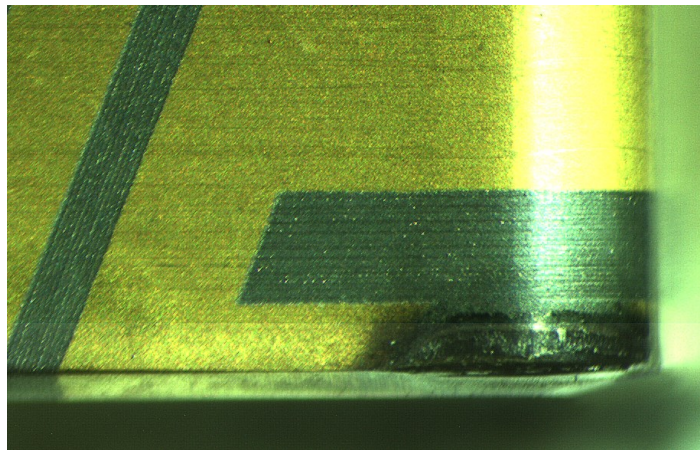
### 8.7.2 Experiment C2 - Závislost opotřebení a elektrického odporu



Obr. 8.23 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$   
 $(v_c = 515 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}; f = 0,1 \text{ mm}; a_p = 2 \text{ mm})$

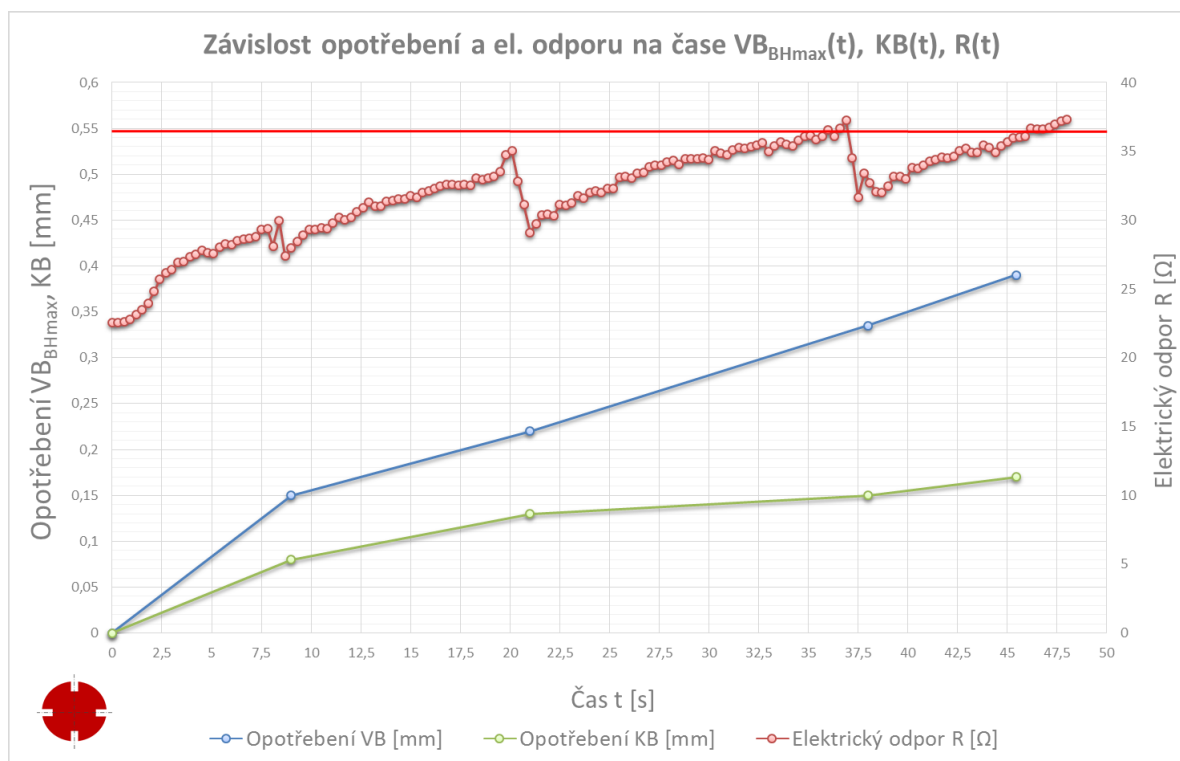
Křivka opotřebení na hřbetě nástroje má jako v předešlých případech běžný průběh (obr. 8.23). Elektrický odpor má velmi podobný průběh pro všech jedenáct řezů s opakující se charakteristikou a to pozvolný růst odporu až po vyjetí z řezu, kde nastává prudší pokles. Růst odporu v průběhu řezu přisuzujeme především rostoucí teplotě odporové vrstvy a nepatrně rostoucímu opotřebení. Na konci každého řezu je patrný vliv poklesu teploty na elektrický odpor. Dochází zde také ke tvorbě a odlamování nárůstků, ale v mnohem menší míře. Nacházíme tady znatelnou nepatrnou naprášenou vrstvu materiálu na hlavním hřbetě nástroje (obr. 8.24). Průběh opotřebení na čele nástroje je počínaje druhým řezem téměř konstantní.

Nástroj byl v řezu po dobu 150 s a v řezu urazil délku 168 mm, než se podařilo překročit dovolené kritérium opotřebení na hlavní hřbetě nástroje v čase 143 s.



Obr. 8.24 Běžný průběh opotřebení na  $VB_H$  – řez. č. 3

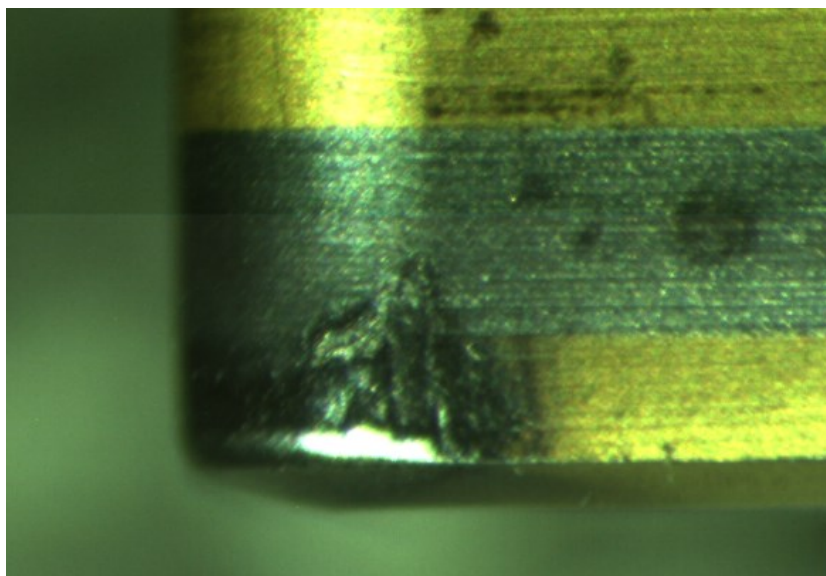
### 8.7.3 Experiment C3 - Závislost opotřebení a elektrického odporu



Obr. 8.25 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$   
 $(v_c = 645 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}; f = 0,1 \text{ mm}; a_p = 2 \text{ mm})$

Graf průběhu opotřebení na hřbetě nástroje má téměř lineárně rostoucí charakteristiku (obr. 8. 25). Elektrický odpor má velmi podobný průběh s pozvolným růstem odporu až po vyjetí z řezu, kde dochází k jeho poklesu. Tato změna je zapříčiněna chladnutím břitu tedy odporové vrstvy z řezu. Růst odporu je způsoben rostoucí teplotou odporové vrstvy a zároveň rostoucím opotřebením. U toho experimentu nebylo dosaženo kritéria opotřebení ani na hlavním hřbetě. Dříve totiž došlo k destrukci celého břitu z důvodu kombinace řezných podmínek a polotovaru se čtyřmi podélnými drážkami simulujícími těžký přerušovaný řez. Břit nástroje je zde více zatížen mechanickými i tepelnými rázy. Docházelo k tvorbě a odlamování nárůstků na obou hřbetech nástroje (obr. 8.26). Křivka znázorňující průběh opotřebení na čele nástroje má velmi podobný charakter jako křivka průběhu opotřebení na hlavním hřbetě nástroje.

Nástroj byl v řezu po dobu 61 s a v řezu urazil délku 85 mm, než došlo k jeho destrukci.

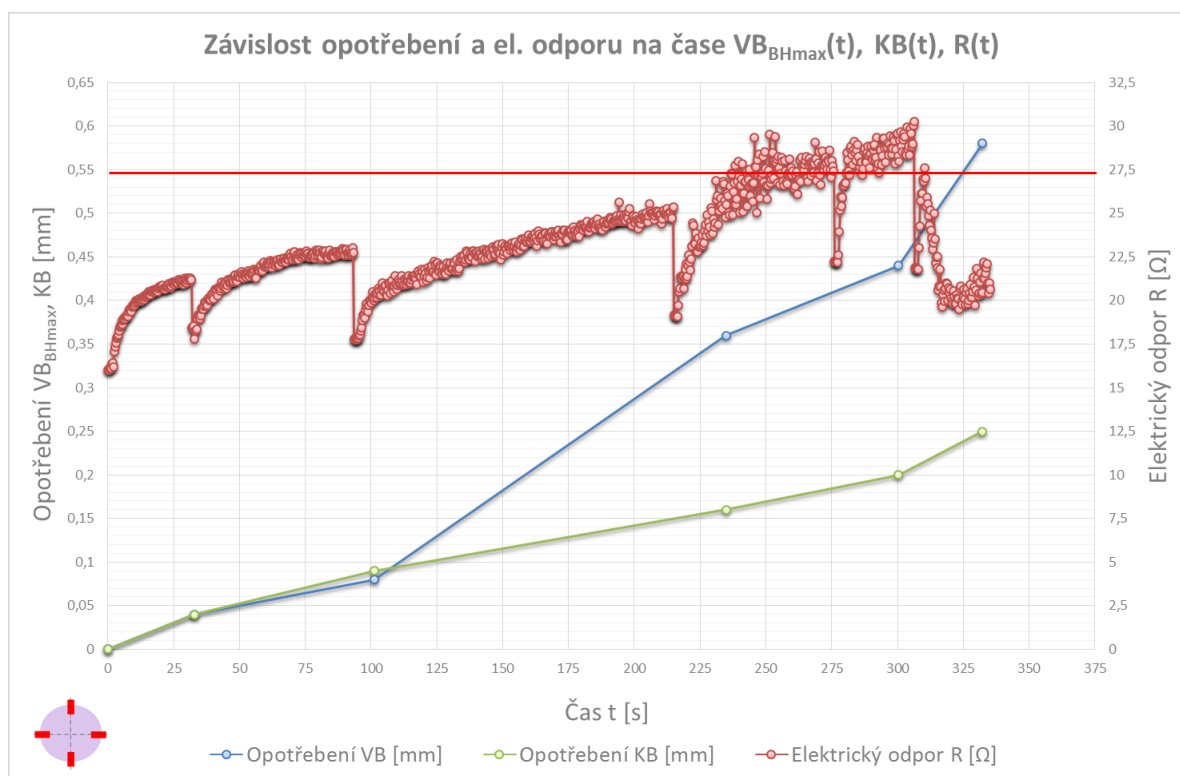


Obr. 8.26 Nárůstek na  $VB_V$  – řez. č. 4

## 8.8 Skupina D). Polotovarem jsou lišty upnuty v přípravku

Experimenty probíhaly na speciálním přípravku, v němž byly upnuty čtyři lišty vzájemně, ty byly vzájemně přesazeny o 90 °, jednalo se o simulaci těžce přerušovaného řezu.

### 8.8.1 Experiment D1 - Závislost opotřebení a elektrického odporu

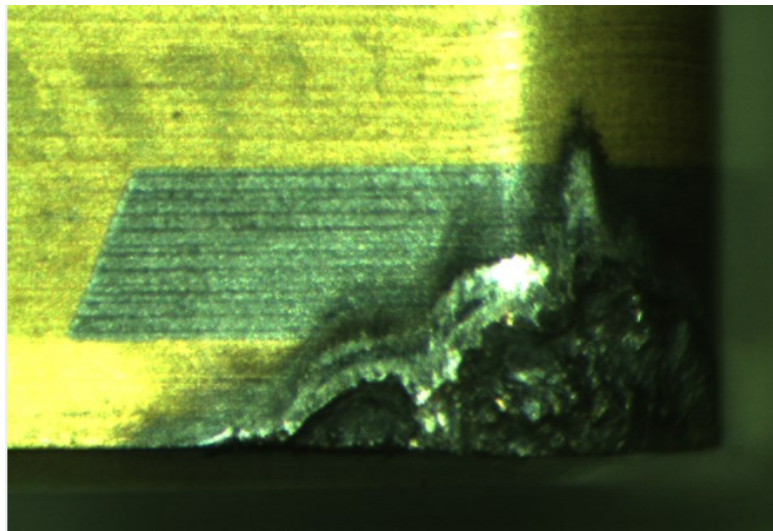


Obr. 8.27 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$   
( $v_c = 325 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f = 0,1 \text{ mm}$ ;  $ap = 2 \text{ mm}$ )

Průběh opotřebení na hřbetě nástroje má v první fázi pozvolný nárůst (obr. 8.27), který přechází ve výrazně rostoucí charakteristiku. První tři řezu má průběh elektrického odporu obdobnou charakteristiku, tedy postupný nárůst až po maximální hodnotu před vyjetím nástroje z řezu. Je zde vidět postupná rostoucí tendence mezi jednotlivými řezy. Opět se projevuje ovlivnění teplotou odporové vrstvy, nárůst odporu v průběhu řezu a jeho následný pokles po vyjetí z řezu. U čtvrtého a pátého řezu nastává změna. Průběh odporu je značně zkreslený, z důvodu tvorby a odpadnutí nestálých nárůstků (obr. 8.28), čímž dochází ke zkreslení experimentu. Není zde patrná závislost mezi průběhem elektrického

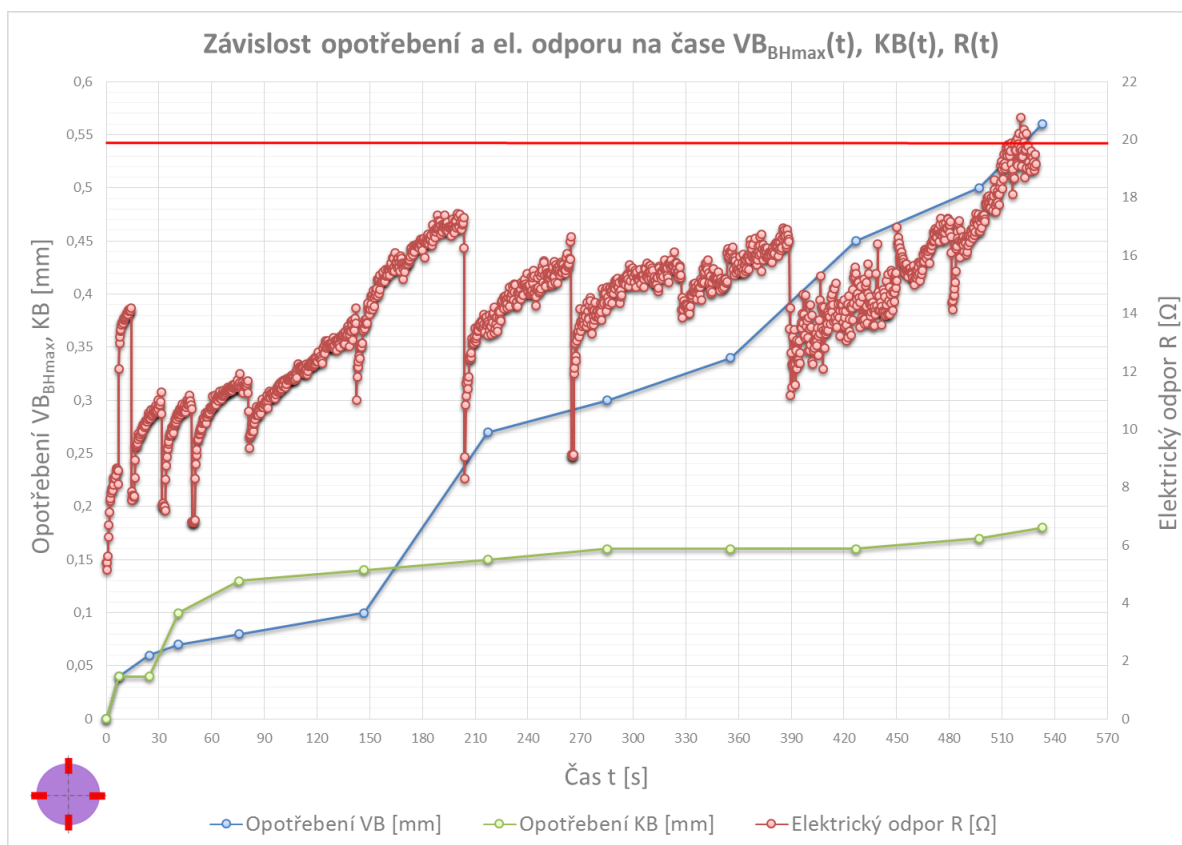
odporu a opotřebením nástroje. Průběh opotřebení na čele nástroje je téměř lineární.

Nástroj byl v řezu po dobu 332 s a v řezu urazil délku 203 mm, než se podařilo překročit dovolené kritérium opotřebení na hlavním hřbetě nástroje v čase 325 s.



Obr. 8.28 Hrubé opotřebení  $VB_H$  – řez. č. 4

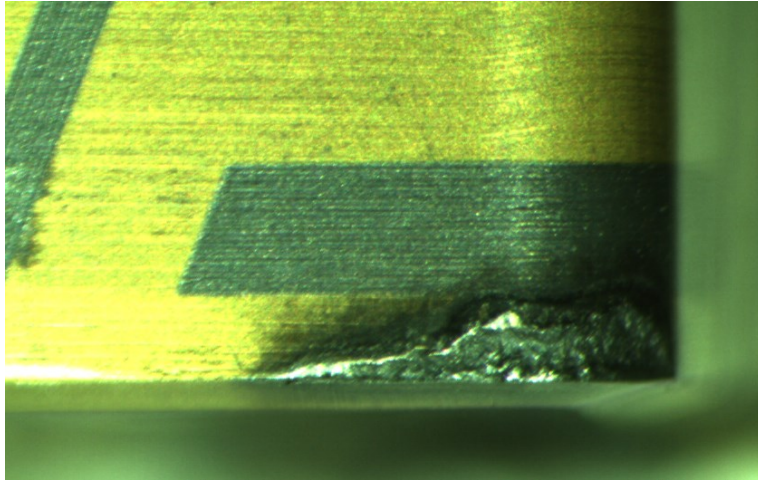
## 8.8.2 Experiment D2 - Závislost opotřebení a elektrického odporu



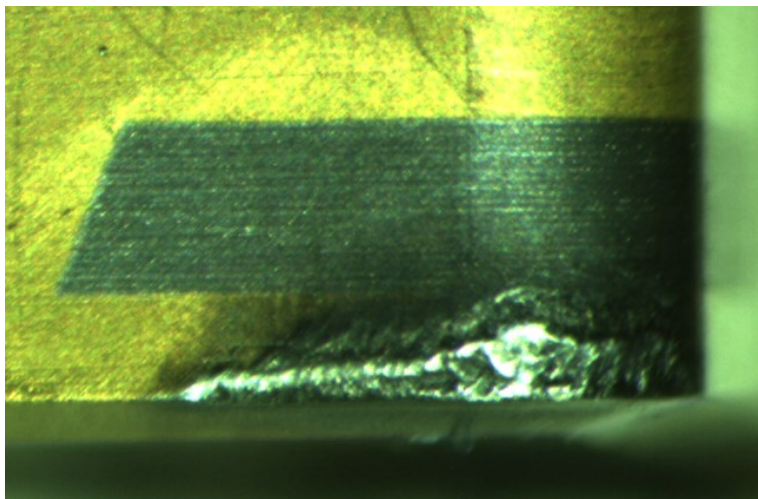
Obr. 8.29 Závislost opotřebení a el. odporu na čase  $VB_{BHmax}(t)$ ,  $KB(t)$  a  $R(t)$   
 ( $v_c = 515 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f = 0,1 \text{ mm}$ ;  $a_p = 2 \text{ mm}$ )

Opotřebení na hřbetě nástroje má běžný průběh. V první polovině má průběh odporu do jisté míry opakující se charakteristiku (obr. 8.29), ta je ovlivněna teplotními i mechanickými rázy a poklesem teploty při vyjetí z řezu. Dochází k výrazné tvorbě a destrukci nárůstků (obr. 8.30 a 8.31), jež zkreslují průběh elektrického odporu. V pozdější fázi experimentu ( $t = 390 \text{ s}$ ) se projevuje značné zkreslení průběhu odporu, oblast nárůstků je zde velmi nestabilní, přesto je vidět vzrůstající tendence elektrického odporu. Celkově je však průběh tak nestabilní, že nelze usuzovat závislost mezi průběhem elektrického odporu a průběhem opotřebení. Křivka průběhu opotřebení na čele nástroje má po počátečním nárůstu už jen nepatrně vzrůstající charakter.

Nástroj byl v řezu po dobu 532 s a v řezu urazil délku 508 mm, než se podařilo překročit dovolené kritérium opotřebení na hlavním hřbetě nástroje v čase 525 s.



Obr. 8.30 Tvorba nárůstku na  $VB_H$  – řez. č. 4

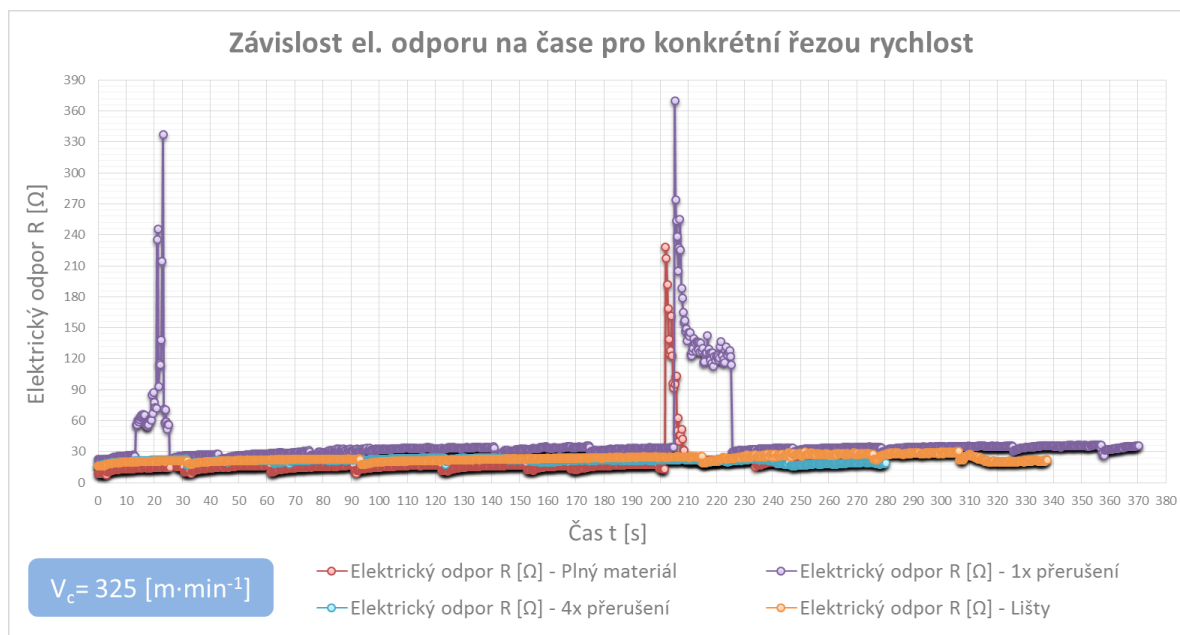


Obr. 8.31 Tvorba nárůstku na  $VB_H$  – řez. č. 6



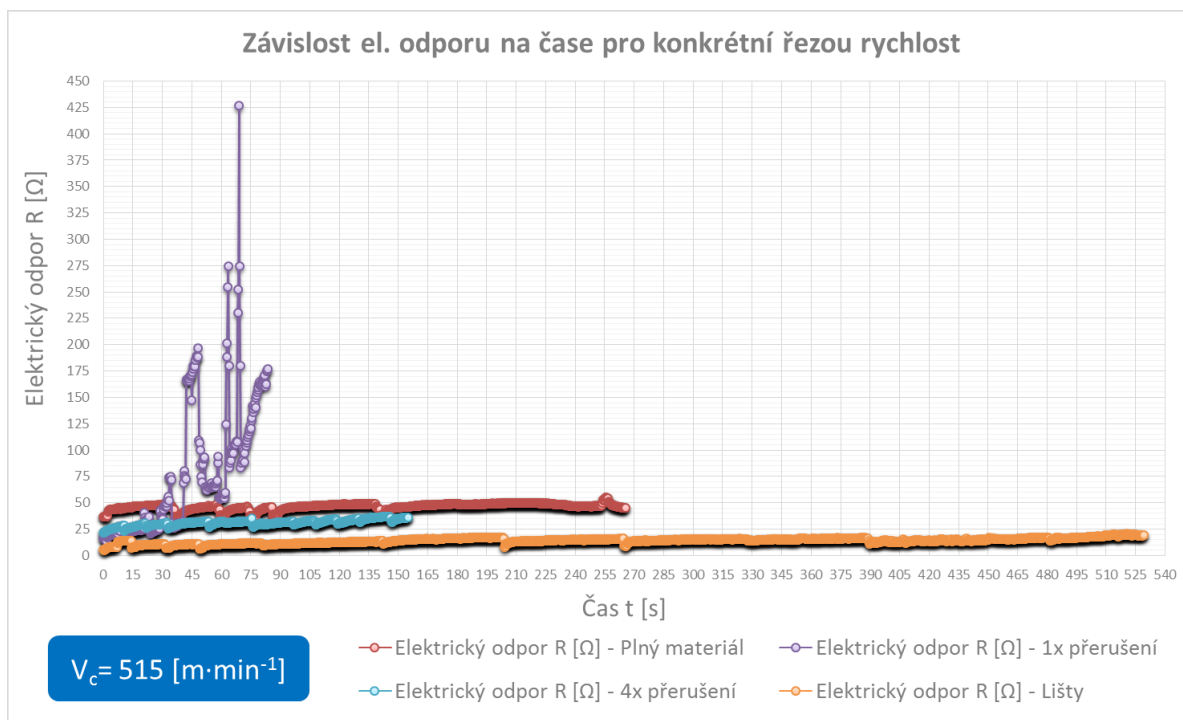
## 9 Srovnání experimentů

### 9.1 Závislost elektrického odporu na čase pro konkrétní řeznou rychlost



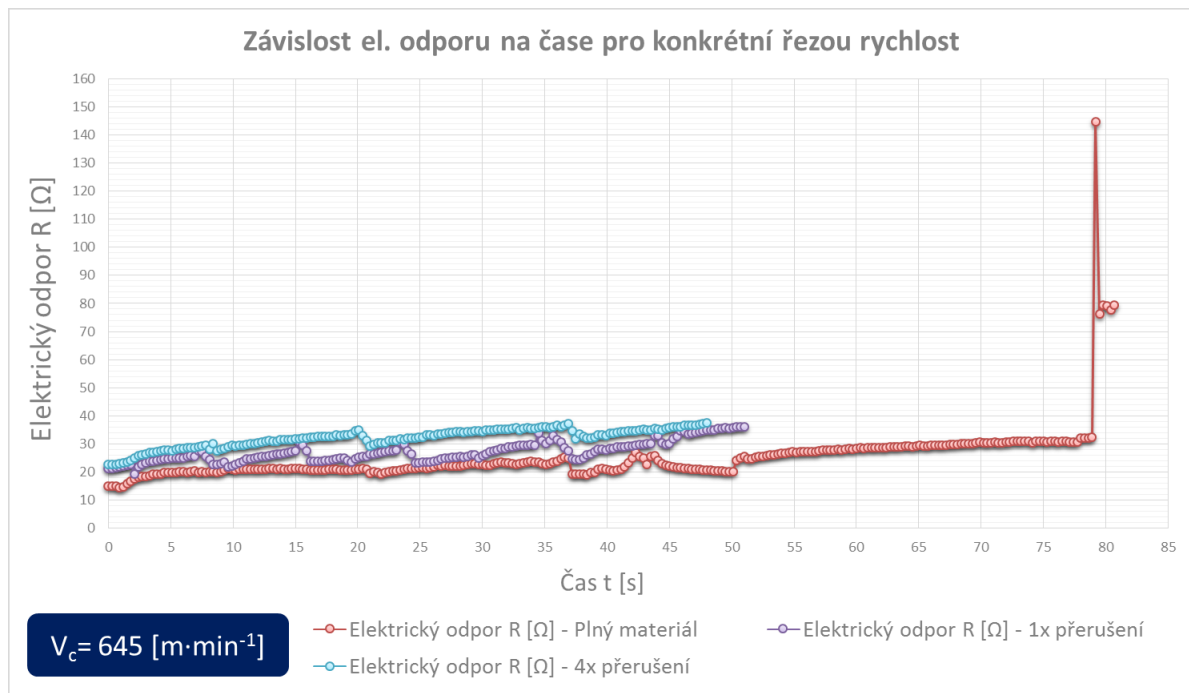
Obr. 9.1 Závislost elektrického odporu na čase pro řeznou rychlost  $v_c = 325 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Průběh elektrického odporu (obr. 9.1) je pro všechny polotovary velmi podobný, pouze u polotovaru s jedním přerušením a na plném materiálu jsou patrné výrazné anomálie. Ty jsou v obou případech způsobeny odlomením hřbetního nárůstku a následnou tvorbou dalšího nárůstku.



Obr. 9.2 Závislost elektrického odporu na čase pro řeznou rychlost  $v_c = 515 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

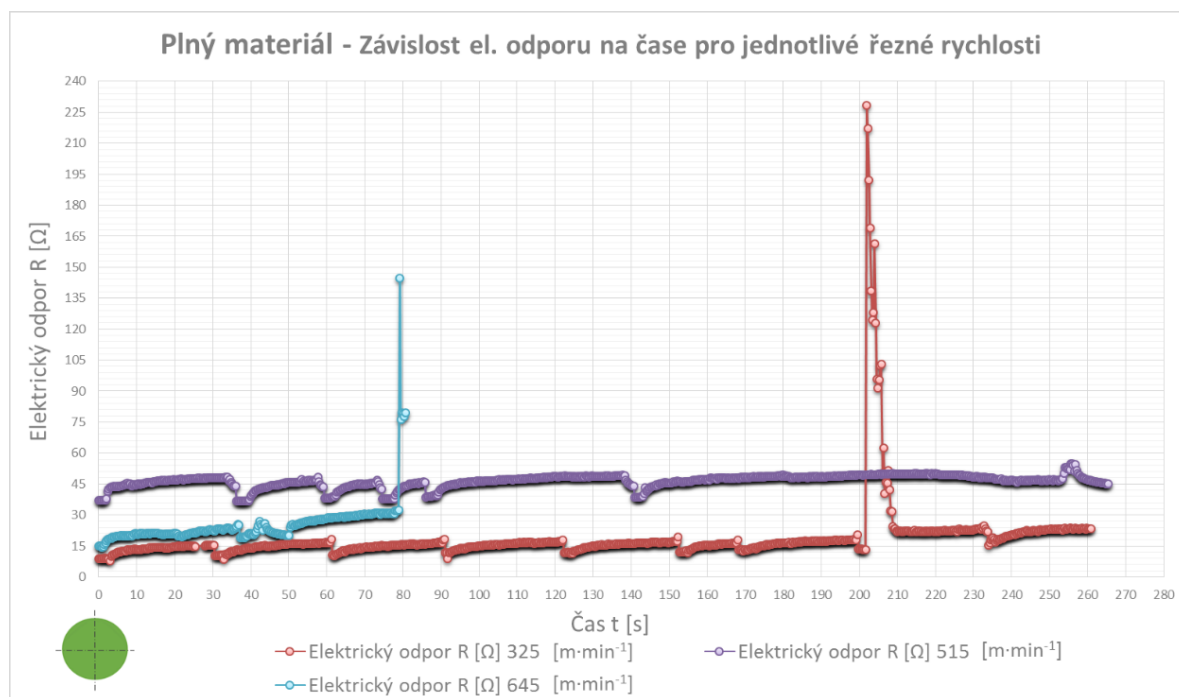
Křivka průběhu elektrického odporu (obr. 9.2) je pro všechny polotovary téměř shodná. Výrazné anomálie je možné pozorovat pouze u polotovaru s jedním přerušením. Výkmit hodnot odporu je způsoben opakujícím se růstem a odlamováním hřbetního nárůstku. Daný průběh je lépe vidět na obr. 8.18



Obr. 9.3 Závislost elektrického odporu na čase pro řeznou rychlost  $v_c = 645 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

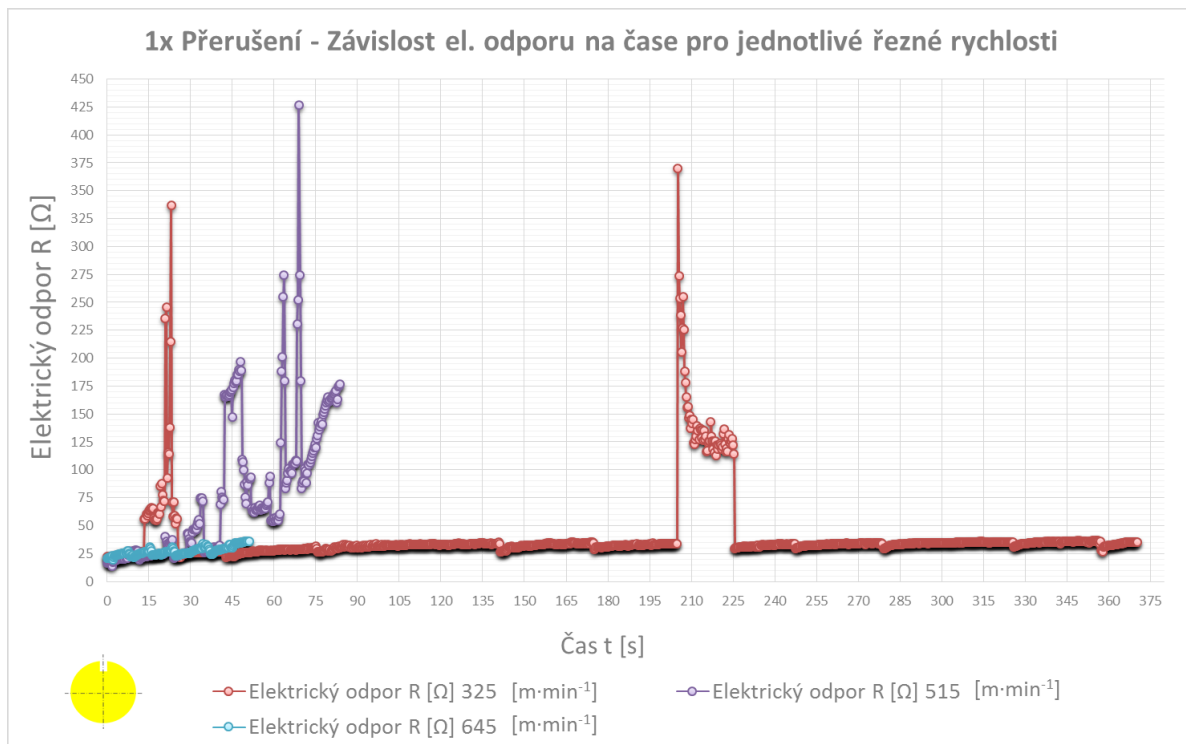
Závislost elektrického odporu na čase má téměř identický průběh pro všechny tři polotovary (obr. 9.3). Jediná zásadní anomálie je u plného materiálu na konci řezu, která však nastává až po dosažení kritéria opotřebení na hřbetě nástroje, je vyvolána odlomením hřbetního nárůstku a jeho následným růstem na podloží původního nárůstku.

## 9.2 Závislost elektrického odporu na čase pro jednotlivé řezné rychlosti v rámci konkrétního polotovaru



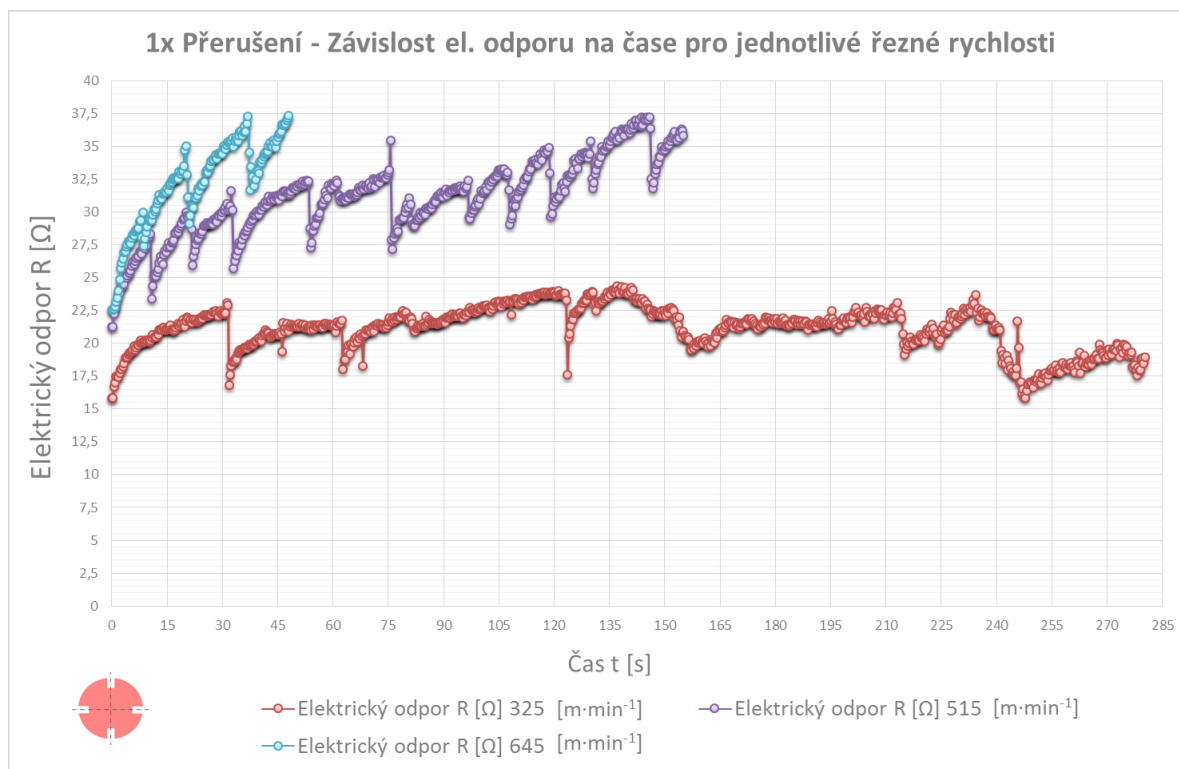
Obr. 9.4 Plný materiál - závislost el. odporu na čase pro jednotlivé řezné rychlosti

Ze srovnání jednotlivých průběhů elektrického odporu (obr. 9.4) na plném materiálu není evidentní ovlivnění jeho průběhu související se změnou řezné rychlosti. Tvorba nárůstků probíhá u všech řezných rychlostí, nejméně však při nejvyšší řezné rychlosti.



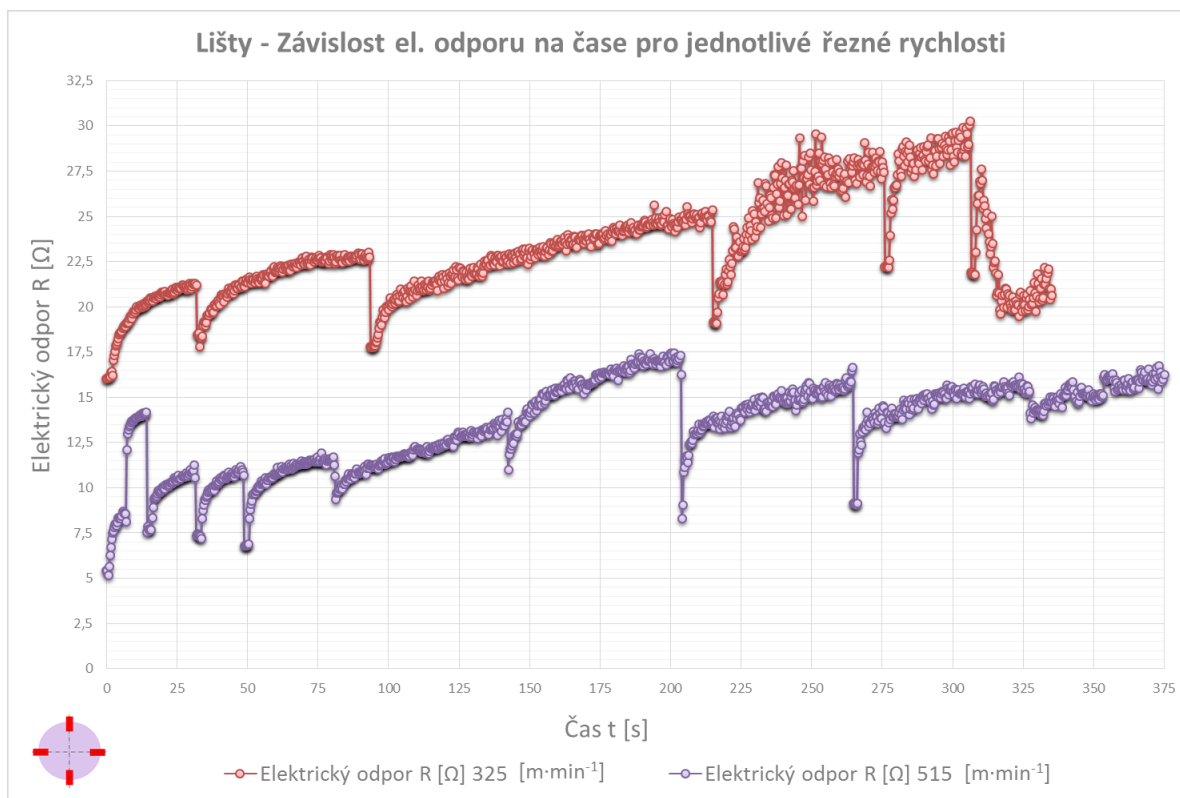
Obr. 9.5 1x přerušení - závislost el. odporu na čase pro jednotlivé řezné rychlosti

Ze srovnání jednotlivých průběhů elektrického odporu (obr. 9.5) na polotovaru s jednou drážkou není patrné ovlivnění jeho průběhu související se změnou řezné rychlosti. Tvorba nárůstků probíhá ve větší či menší míře u všech tří řezných rychlostí.



Obr. 9.6 4 x přerušení - závislost el. odporu na čase pro jednotlivé řezné rychlosti

Na první pohled není z grafu zřejmý vliv řezné rychlosti na průběh elektrického odporu (obr. 9.6) při experimentech na polotovaru se čtyřmi podélnými drážkami, jednotlivé průběhy mají velmi podobný charakter.



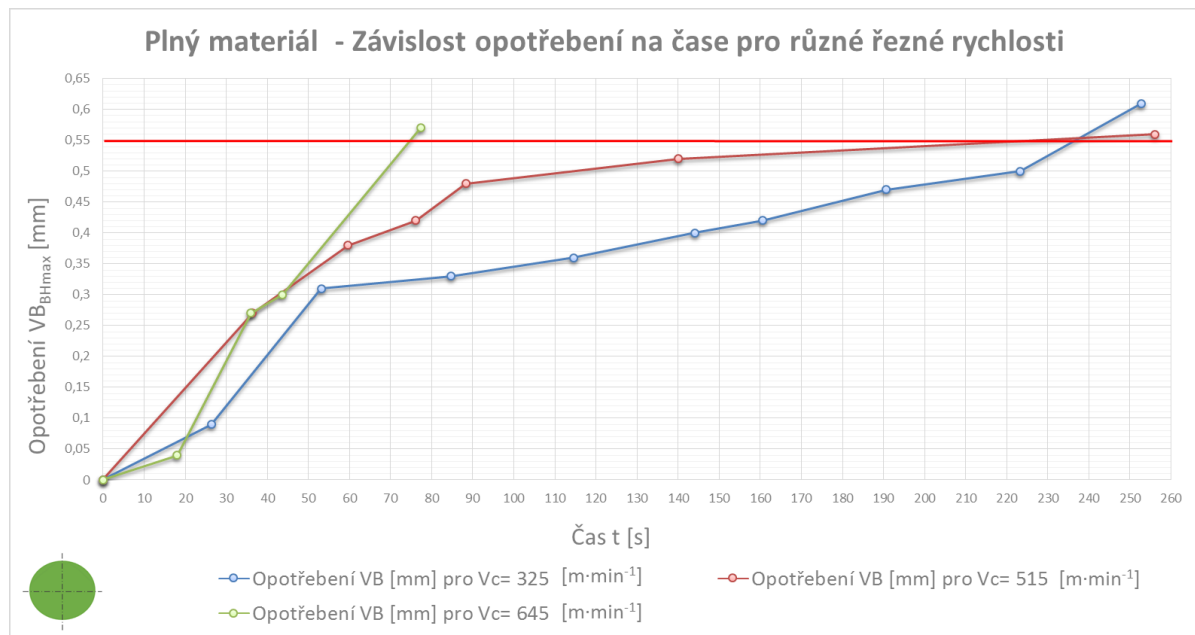
*Obr. 9.7 Lišty - závislost el. odporu na čase pro jednotlivé řezné rychlosti*

Při experimentech na přípravku s podélnými lištami se nejeví ovlivnění průběhu elektrického odporu (obr. 9.7) změnou řezné rychlosti. Na přípravku s lištami probíhal experiment pouze pro první dvě řezné rychlosti. Při řezné rychlosti  $v_c=645 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  docházelo ke značnému chvění obráběcího stroje a přípravku, a proto nebyl tento experiment proveden. Oba průběhy elektrického odporu mají velmi podobný charakter a jsou ovlivněny jevy, které souvisí s tvorbou nárůstku. Průběh odporu je rovněž ovlivněn mechanickými a teplotními rázy.

### 9.3 Opotřebení na čelní ploše

V rámci všech experimentů byl sledován také průběh opotřebení na čele nástroje a to šířka výmolu na čelní ploše KB. Během žádného experimentu se nepodařilo dosáhnout nebo překročit kritérium opotřebení  $KB = 0,75 \text{ mm}$ . Vždy došlo dříve k lomu břitu a tím ke znehodnocení celé destičky (často také k narušení odporové vrstvy i u okolních břítů), proto se v těchto experimentech dále nepokračovalo. Samotný průběh výmolu na čelní ploše KB je podobný pro všechny experimenty.

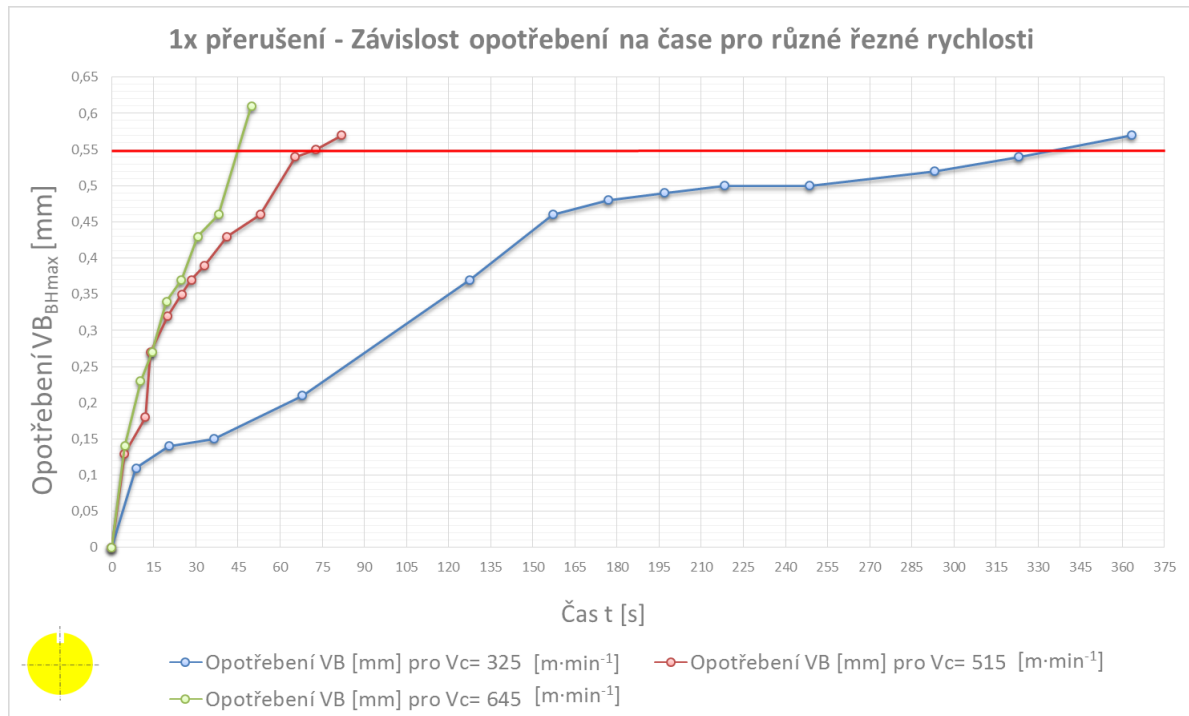
## 9.4 Závislost opotřebení na čase pro různé řezné rychlosti



*Obr. 9.8 Plný materiál - závislost opotřebení na čase pro různé řezné rychlosti*

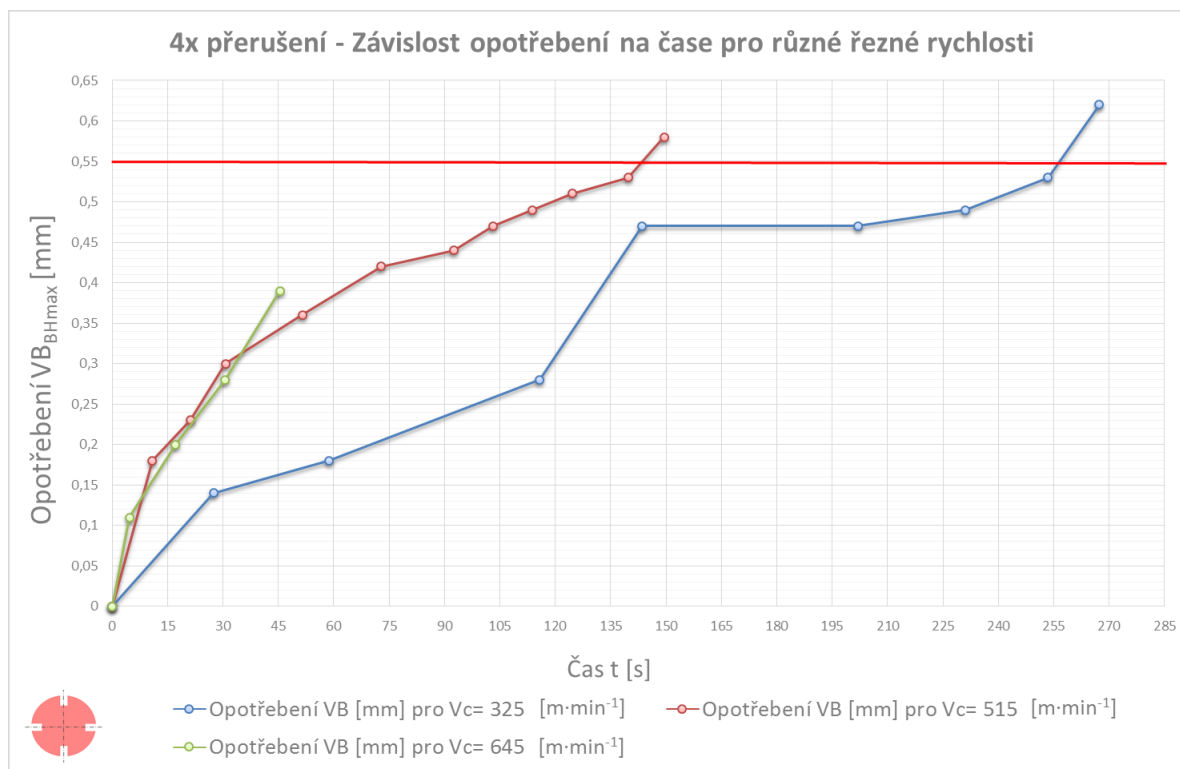
Na polotovaru z plného materiálu mají křivky průběhu opotřebení běžný charakter (obr. 9.8). Nejrychleji bylo dosaženo kritérium opotřebení a u nejvyšší řezné rychlosti ( $v_c = 645 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) a nejdéle vydržel v řezu nástroj s nejnižší řeznou rychlostí ( $v_c = 325 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ). U experimentu s řeznou rychlostí  $v_c = 515 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  bylo dosaženo opotřebení v podobném čase. Tato skutečnost naznačuje oblast vhodné řezné rychlosti na polotovaru z plného materiálu.





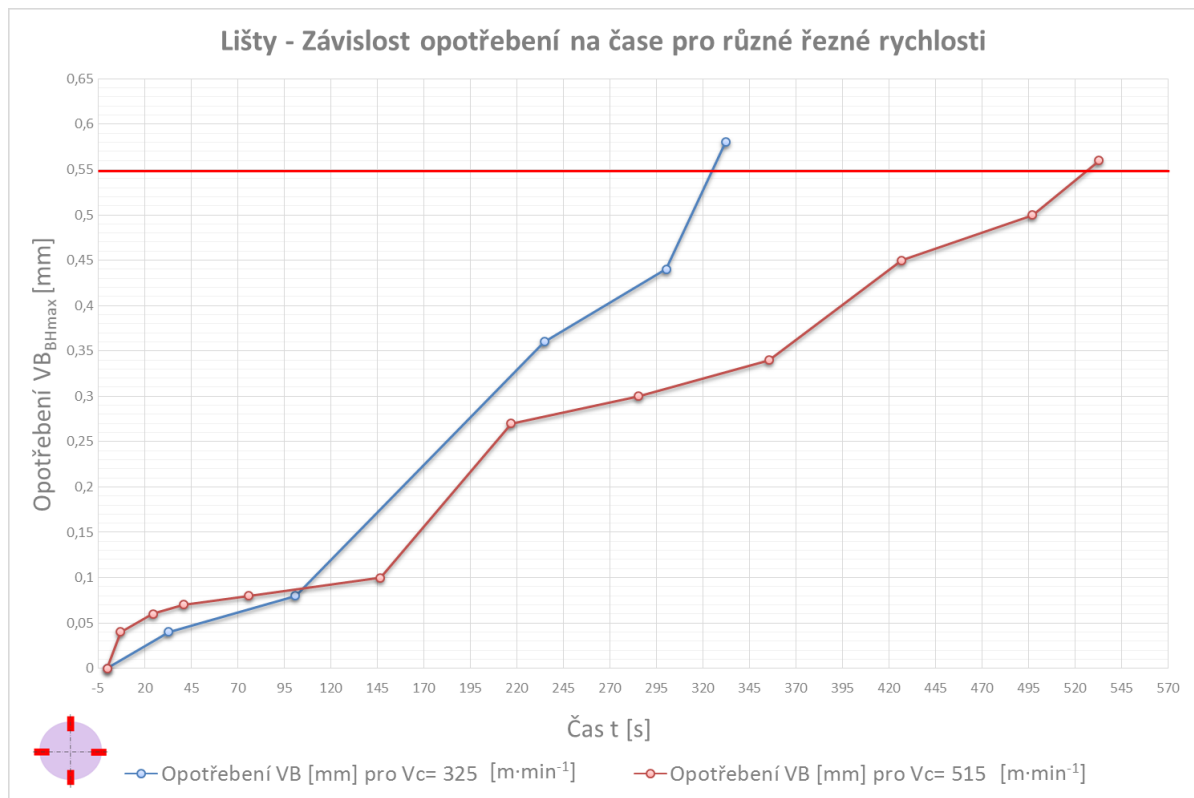
**Obr. 9.9 1 x přerušení - závislost opotřebení na čase pro různé řezné rychlosti**

Při experimentech na polotovaru s jednou podélnou drážkou (obr. 9.9) je vidět mnohem strmější průběh opotřebení pro  $v_c = 645$  m·min<sup>-1</sup> a  $v_c = 515$  m·min<sup>-1</sup>. Graf průběhu opotřebení pro nejnižší řeznou rychlost ( $v_c = 325$  m·min<sup>-1</sup>) má naopak delší průběh oproti experimentu na plném materiálu.



Obr. 9.10 4 x přerušení - závislost opotřebení na čase pro různé řezné rychlosti

Experimenty na polotovaru se čtyřmi drážkami (obr. 9.10) probíhaly obdobně jako na polotovaru s jednou drážkou. U nejvyšší řezné rychlosti ( $v_c = 645 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) nebylo dosaženo kritéria opotřebení na hřbetě nástroje, protože dříve došlo k destrukci břitové destičky. Průběh opotřebení u nejnižší řezné rychlosti ( $v_c = 325 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) je lehce delší než na plném polotovaru, ale kratší než při experimentu s jednou podélnou drážkou.

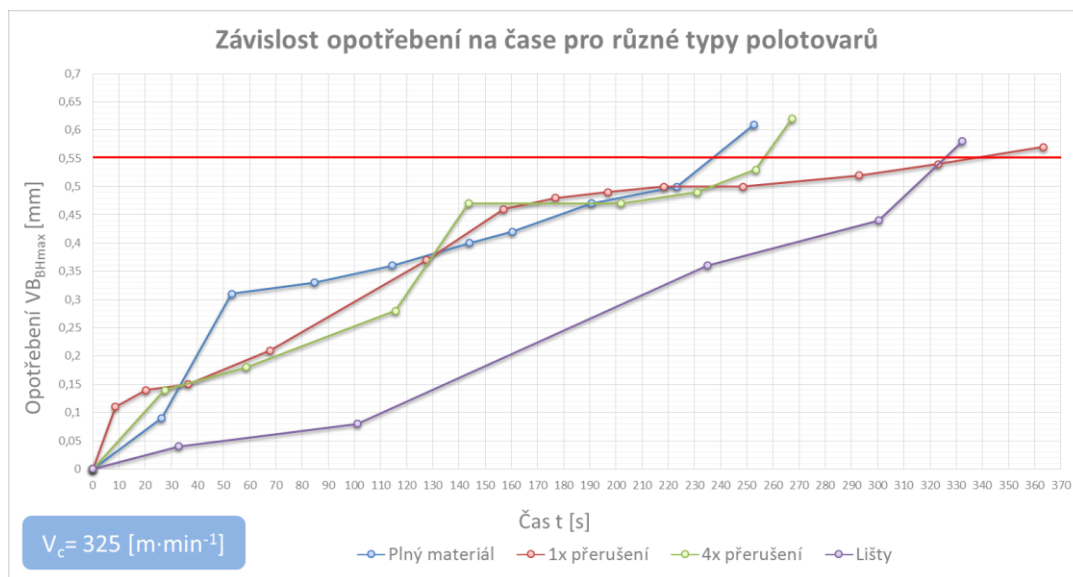


*Obr. 9.11 Lišty - závislost opotřebení na čase pro různé řezné rychlosti*

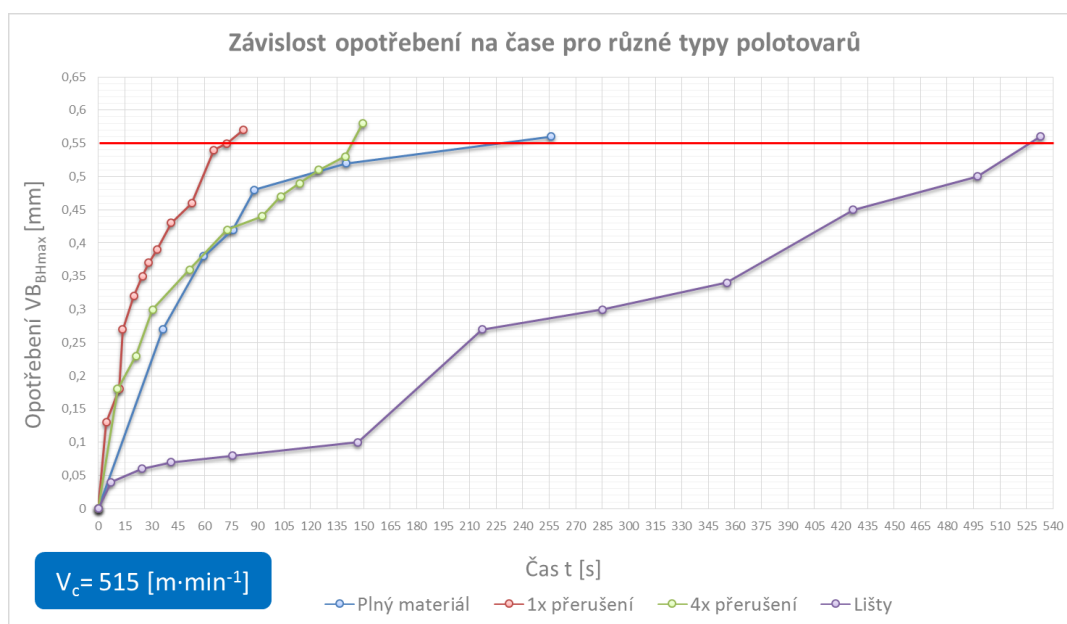
Na přípravku pro simulaci těžkého řezu probíhaly experimenty jen pro první dvě řezné rychlosti (obr. 9.11). Překvapující je, že nástroj při obrábění nižšími řeznými rychlostmi ( $v_c = 325 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $v_c = 515 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) vydržel v řezu déle než na plném polotovaru a na polotovaru se čtyřmi podélnými drážkami. Z toho lze usuzovat, že rázová složka nemá při těchto řezných podmínkách převažující vliv. Tyto řezné podmínky mají kladný vliv na trvanlivost nástroje.

## 9.5 Závislost opotřebení na čase pro různé typy polotovarů

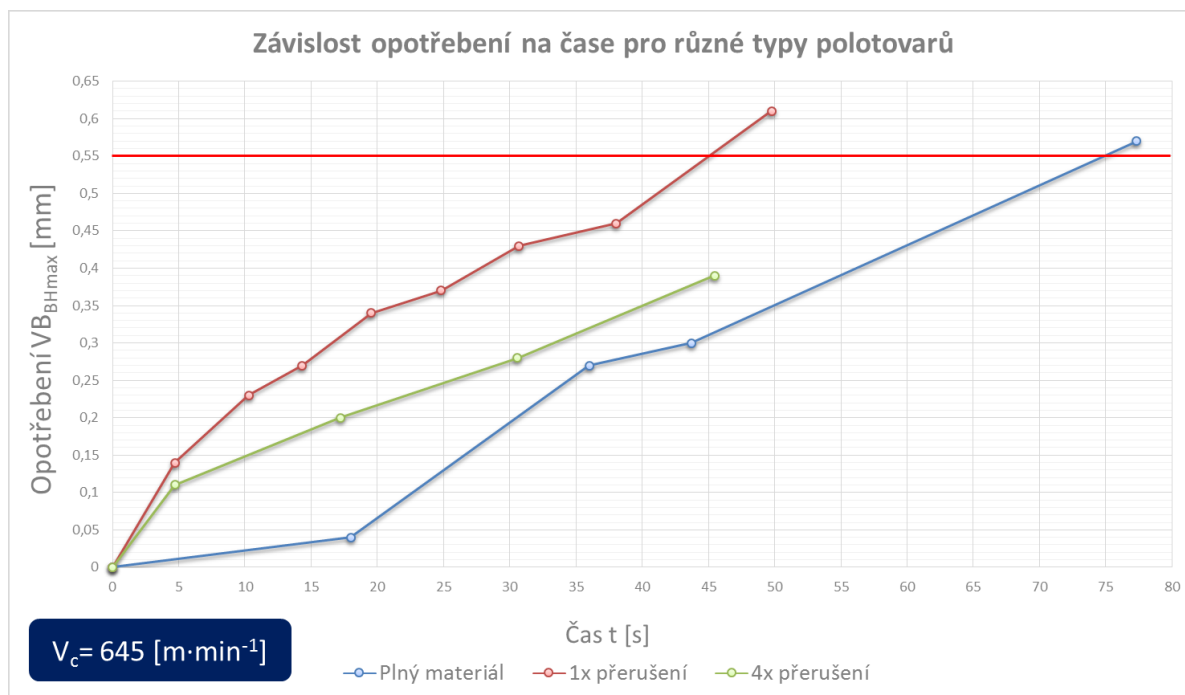
Mezi doplňková měření patří rovněž srovnání průběhu opotřebení na jednotlivých polotovarech vždy v rámci jedné řezné rychlosti. Na následujících grafech je možno vidět toto srovnání (obr. 9.12, 9.13, 9.14). Je zde znázorněn vliv daného polotovaru a řezných podmínek na průběh a dosažení kritéria opotřebení.



Obr. 9.12 Závislost opotřebení na čase pro různé typy polotovarů při  $v_c = 325 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 9.13 Závislost opotřebení na čase pro různé typy polotovarů při  $v_c = 515 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 9.14 Závislost opotřebení na čase pro různé typy polotovarů při  $v_c = 645 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

## 10 Závěr

Cílem praktické části disertační práce bylo zkoumat chování technologie integrovaných odporových vrstev na vyměnitelné břitové destičce. Zjistit, zda je možné najít závislost mezi průběhem elektrického odporu a průběhem opotřebení, případně jeho dosažením.

Byly provedeny vždy tři experimenty (tří různé řezné rychlosti) pro každou skupinu polotovarů za účelem simulace co možná nejrůznorodějších podmínek obrábění. Jednotlivé typy polotovarů vycházely z vhodnosti použití řezné keramiky KS6000, a také z předešlých experimentů, které zkoumaly tuto problematiku. Z prací zabývajících se danou problematikou je známo, že je elektrický odpor měřitelný i po přerušení obvodu (tedy po přerušení celé odporové vrstvy na jedné z hřbetních ploch a zároveň na čele nástroje) pokud je nástroj v řezu. To bylo dalším podnětem pro testování odporové vrstvy v přerušovaném řezu, kde by se mohla tato skutečnost ověřit.

Kvůli dlouhé trvanlivosti nástrojového materiálu při obrábění běžných litin bylo rozhodnuto použít hůře obrobitelný materiál a to litinu s kuličkovým grafitem EN-GJS-700, tím bylo dosaženo zostření podmínek experimentu a rychlejšího opotřebení destičky, které je pro tento experiment žádoucí. Obdobně byly zvoleny řezné podmínky s přihlédnutím na technické limity stroje a přípravku.

Pro veškeré experimenty bylo společným jmenovatelem opotřebení na hlavním hřbetu nástroje. Po jeho dosažení byla snaha docílit i opotřebení na čele nástroje, které je v této práci definované šířkou výmolu na čelní ploše KB [mm]. Toho však nebylo docíleno, jelikož před samotným dosažením následovala destrukce nástroje. Z uvedených důvodů se v těchto experimentech dále nepokračovalo a jako srovnávací kritérium bylo zvoleno opotřebení na hlavním hřbetě nástroje tedy jeho maximální velikost  $VB_{BHmax}$  [mm].

Ze zpracovaných výsledků lze usuzovat určitou závislost mezi elektrickým odporem a opotřebením, ale ne natolik, aby podpořily vhodnost této technologie. Na základě průběhu odporu není možné určit aktuální stav opotřebení, ani předpokládat jeho následný průběh. Hodnoty elektrického odporu byly prokazatelně zkreslovány tvorbou nárůstků a naprášené vrstvy materiálu na odporové vrstvě a

jejich velmi nestabilním chováním, což lze názorně vidět na grafickém znázornění jednotlivých experimentů. Dalším faktorem je vliv teploty odporové vrstvy na průběh elektrického odporu, která nebyla dostatečně zmapována z důvodu nevhodného rozsahu pyrometru. Z toho důvodu nemůžeme určit její vliv na průběh odporu a shledat do jaké míry převažuje teplota a do jaké míry rostoucí nárůstky. S rostoucí teplotou totiž roste i elektrický odpor, kdežto s rostoucím průřezem odporové vrstvy (tvorba nárůstku) odpor klesá. Chování nárůstku je nepředvídatelné a po jeho odlomení dochází opět k růstu dalšího nárůstku a k jeho následnému odlomení.

Dle uvedených skutečností se jeví jako velmi komplikované jakékoli filtrování nebo zpracování hodnot elektrického odporu za účelem nalezení matematické závislosti mezi elektrickým odporem a opotřebením v závislosti na čase. I kdyby se to podařilo, musel by být definován samostatný algoritmus pro každý materiál a konkrétní řezné podmínky.

Určitým omezením technologie je rovněž pevně definovaná hodnota kritéria opotřebením na dané destičce. Odporová vrstva má danou šířku na hřbetě i na čele břitové destičky, tudíž je nástroj předurčen pro určité řezné podmínky, obráběný materiál a výslednou jakost obrobené plochy. Každý nástroj musí být navržen a vyroben pro konkrétní požadavky.

Dalším aspektem podporující nevhodnost technologie je samotná výroba břitové destičky s integrovanou odporovou vrstvou. Celá technologie je výrobním tajemstvím společnosti Kyocera, přes to lze usuzovat, že odstranění vodivé odporové vrstvy za účelem tvorby samostatného elektrického obvodu pro každý břit bylo provedeno nejspíš laserem (jak je uvedeno v zahraniční literatuře zabývající se touto problematikou) nebo jinou technologií. To musí být časově náročné i nákladné, vezmeme-li v potaz nutnost upínat destičku ve více polohách, tak aby byl částečně odstraněn povlak na každém břitu. Také je nezbytný speciální nástrojový držák se snímacími kontakty a v neposlední řadě zařízení sloužící pro sběr a zpracování signálů z nástroje. Dané zařízení musí komunikovat s řídicím systémem obráběcího stroje.

Na základě výše zmíněných skutečností by autor práce nedoporučoval tuto technologii pro praktické využití. Technologie diagnostiky nástroje pomocí odporových vrstev je již známa delší dobu a zatím se nijak nerozšířila do praxe, což

jen potvrzuje závěry z předkládané práce. Při experimentech nebylo zaznamenáno chování průběhu elektrického odporu, které by jasně signalizovalo blížící se opotřebením nástroje nebo jeho dosažení pokud je nástroj v řezu, což by měla být klíčová vlastnost této technologie.

Pro diagnostiku řezného procesu ve vztahu k řeznému nástroji se jeví jako vhodnější jiné technologie, například technologie monitorování příkonu pohonných jednotek. U obráběcího stroje jsou všechny pohyby vykonávány pomocí elektro motorů. Příkon daného elektromotoru je snadno měřitelný pomocí wattmetrů. Hodnoty příkonu jsou sledovány řídicím systémem, který dává informaci také obsluze stroje. Změny příkonu dávají informaci o změně geometrie nástroje nebo jeho porušení. Nejedná se o přímou diagnostiku obráběcího procesu, ani naměřené hodnoty nejsou tak přesné jako například u metody sledování řezných sil pomocí dynamometrů, přesto se tato technologie běžně používá v praxi (obráběcí stroje Makino). Limitní hodnoty při kterých dojde k zastavení procesu obrábění, nastavuje přímo programátor, případně jsou korigovány samotnou obsluhou. Výhodou jsou nízké pořizovací a provozní náklady. Díky tomu se s výhodou používají u bezobslužných obráběcích strojů. Zde bychom mohli uvažovat o použití nástrojů s odporovou vrstvou za předpokladu, že by byla celá technologie správně odladěna a byla i ekonomicky výhodná.

## 10.1 Vědecký přínos

Odborná literatura zabývající se diagnostikou řezného nástroje zmiňuje metodu sledování opotřebením pomocí odporových vrstev pouze v obecné rovině. Nacházíme zde několik zahraničních článků zabývajících se přímo konkrétním experimentem, ale nehovoří se o výhodách a úskalích této metody v širších souvislostech.

Tato disertační práce odhalila spoustu doprovodných jevů ovlivňujících chování odporové vrstvy, z nichž můžeme usuzovat spoustu komplikací pro použití v praxi. Rovněž se objevily oblasti, které je nutno lépe prozkoumat, jako například vliv teploty na odporovou vrstvu a z toho plynoucí srovnání průběhu elektrického odporu a teploty v čase.



## 10.2 Závěry pro praxi

Na základě předložené disertační práce by autor nedoporučil tuto technologii pro použití v praxi. Pokud bychom měli vycházet z chování elektrického odporu v této práci. Vychází se z předpokladu, že zatím žádný výrobce nenabízí výrobu destiček s požadovanými kritérii opotřebení na zakázku. Dalším aspektem je nedostupnost kompletního řešení na trhu tedy nástroj, k němu speciální nástrojový držák a především zařízení pro zpracování a vyhodnocení signálu, které komunikuje s řídicím systémem obráběcího stroje nebo je jeho součástí.

V rámci doprovodného experimentu při podélném soustružení oceli bylo ověřeno chování odporové vrstvy při kompletním přerušení obvodu. Elektrický odpor byl neměřitelný pouze při vyjetí nástroje z řezu. Při najetí do materiálu opět dochází k uzavření obvodu a můžeme zaznamenat přítomnost elektrického odporu ve velmi podobných hodnotách. To nám naznačuje nevhodnost metody pro signalizaci dosažení kritéria opotřebení v průběhu řezu.

## 10.3 Doporučení pro další zkoumání

Chování elektrického odporu bylo zkeslené doprovodnými jevy jako jsou například tzv. adhezivní nárůstky, proto se nabízí testovat odporovou vrstvu za podmínek, které sníží jejich výskyt. Slabou stránkou experimentu byl pyrometr s nevhodným rozsahem měřených teplot pro zvolené experimenty. Z tohoto důvodu je nutné podrobněji zkoumat vliv teploty na elektrický odpor.

Další doporučení:

- Testovat VBD na dalších druzích litiny.
- Testovat odporovou vrstvu na jiném druhu řezné keramiky.
- Testovat chování nástroje s porušenou odporovou vrstvou.
- Testovat odporovou vrstvu za podmínek, kdy nevzniká nebo téměř nevzniká nárůstek.

## 11 Conclusion

The aim of the practical part of the thesis was to investigate the behavior of technology, integrated resistive layers on the cut insert. Determine whether it is possible to find a relationship between the electric resistance and the progress of tool edge wear, possibly reaching it.

They were done three experiments (three different cutting speeds) for each group of semi-finished product to simulate the most diverse possible machining conditions. Individual types of semi-finished products were based on the appropriateness of the use of cutting ceramics KS6000, as well as from previous experiments that have examined this issue. From the works dealing with these problems it is known that the electrical resistance is measurable even after the circuit interruption (that is, after interruption of the whole resistive layer on surfaces close to cutting edge) when the tool is in the cut. It was further impetus for testing resistive layer in the interrupted cut, which could verify this fact.

Due to the long life of the tool material for machining of cast irons was decided to use harder machinable material and a spheroidal graphite cast iron EN-GJS-700. Thanks to this was achieved sharpening experiment conditions and rapid wear of the cutting edge, which is desirable for this experiment. The cutting conditions were chosen with regard to the technical limits of the machine and the fixture for clamping of leaves.

For all experiments was a common feature of tool wear on the main flank surface. After his achievement was to achieve even wear on the tool face, which is in this work defined by the width of bump on the face of KB [mm]. However, this has not been achieved because there were destroyed tool before. For these reasons, in these experiments did not continue and as a benchmark was chosen wear on the main flank surface, which is marked  $VB_{BHmax}$  [mm].

The processed results suggest some relationship between electrical resistance and tool wear, but not enough to support the suitability of this technology. On the basis of the electrical resistance curve it is not possible to determine the current state of tool wear, nor to assume his subsequent conduct. The values of electrical resistance were clearly changed by creating of built up edge and sputtered

layer on the resistive layer. Their behavior was very unstable as can be clearly seen on the graphical representation of the individual experiments. Another factor is the influence of temperature to the resistive layer and electric resistance conduct which has not been sufficiently mapped due to improper range of pyrometer. Therefore we can't determine how the temperature effect the resistance and find which ingredient influencing values of electric resistance (build up edge or temperature). With increasing temperatures is increasing electrical resistance, whereas with increasing cross section of resistance layer (build up edge) resistance decreases. The build up edge behavior is unpredictable after its breaking off the new one starting grow again.

According to the mentioned facts it seems to be very complicated any filtering or processing of values of the electrical resistance in order to find the mathematical relationships between the electric resistance and tool wear depending on time. Even if it succeeded, it would have to be defined by a separate algorithm for each material and specific cutting conditions.

Certain limitations of technology is also concrete (firmly defined) value of tool wear criteria on the insert. The resistive layer has the concrete width on the flank and face surfaces of the tool. For that reason the tool is destined for certain cutting conditions, workpiece material, and the resulting quality of the machined surface. Each tool (insert) must be designed and manufactured to specific requirements.

Another aspect which not confirming suitability of technology is the production of insert with integrated resistive layer. The whole technology is trade secret of company Kyocera. There is an assumption that the removal of the conductive resistive layer to separate electrical circuit for each cutting edge was performed probably by laser (as shown in the foreign literature on this topic), or by other technologies. It must be time consuming and expensive, if we take into account the need to clamp the plate in several positions. It is also necessary special tool holder with switch contacts and finally a device used for collecting and processing signals from the tool. The device must communicate with the control system of the machining machine.

Based on the above mentioned facts, the author would not recommend this technology for practical use. Technology of tool diagnostic by using resistive layers

is already known for a long time and so far does not spread to the industry, which only confirms the findings of the present study. There were not recorded behavior of electric resistance which reflect the tool wear conduct. It means there is no clear relationship between tool wear and resistivity which indicate oncoming tool wear or its achievement which should be a key feature of this technology.

For the diagnosis of the cutting process relative to the cutting tool it would seem more appropriate other technologies such as the monitoring of power drive units. All machining machine movements are done by an electric motors. Input power of the electric motor is easily measured using a power meter. Power values are monitored by a control system which gives information also to operators of the machine. Power changes give information about changing the geometry of the tool or its damage. This is not a direct diagnosis of a machining process, or the measured values are not as accurate as for example in methods of monitoring the cutting force using a dynamometer, but this technology is commonly used in practice (machining machine Makino). Limit values at which stops the machining process, set directly programmer, or are corrected by the operator. The advantage of low purchase and operating costs. Thanks to this preferably used for unattended machines. Here we could consider the use of tools with a resistive layer provided that the entire technology correctly tuned and being economically advantageous.

### 11.1 Scientific benefits

Specialized literature dealing with diagnostic method thanks to resistive layers describes this only in general terms. We can find several foreign articles dealing with specific experiment, but it does not speak about the benefits and pitfalls of this method in a broader context.

This thesis has found plenty of accompanying effects influencing the behavior of the resistive layer, from which we can infer a lot of complications for practical use. Also appeared areas to be better explored, such as temperature effects on the resistive layer and the resulting comparison between electrical resistance and temperature over time.

## 11.2 Conclusions for practice

Based on the submitted dissertation author would not recommend this technology for practical use. If we had to build on the behavior of electrical resistance in this work. We proceed from the assumption that so far no manufacturer does not offer the production of insert with requested width of tool wear criteria according to customer requirements. Another aspect is the unavailability of a complete solution in the market the tool with a special tool holder and especially the equipment for processing and evaluating a signal that communicates with the control system of the machining machine.

The accompanying experiment during longitudinal turning steel verified behavior of the resistive layer with interrupted (open) circuit. Electrical resistance was possible to measure only, when was the tool out of the cut. If is the tool in the cut again the circuit is closed again and there is measureable value of electrical resistance. This suggests the inadvisability of method for signaling achievement criteria of tool wear during cutting.

## 11.3 Recommendations for further investigation

The behavior of the electric resistance was distorted accompanying phenomena called adhesive build up edge, due to this fact is necessary to test the resistive layer at the condition occurs build up edge. The weakness of the experiment was inappropriate pyrometer with not suitable temperature range. For this reason, it is necessary to further examine the effect of temperature on the electrical resistance.

Other recommendations:

- Test inserts in other types of cast iron.
- Test resistive layer at a different type of ceramics.
- Test tool behavior with interrupted resistive layer.
- Test resistive layer under conditions where is no creation of built up edge.

## Literatura

- [1] AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o. 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [2] NESLUŠAN, M., TUREK, S., BRYCHTA, J., aj. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina: Zilinska univerzita, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [3] KRATOCHVÍL, J., *Metodika sledování opotřebenění keramických nástrojů pomocí odporových vrstev během řezu: disertační práce*. Ostrava: VŠB Fakulta strojní, 2010. 96s., 2 příl.
- [4] SEKIYA, Katsuhiko; YAMANE, Yasuo; TORIMOTO, Ayumu. Tool life detecting system using damage sensor-integrated insert. *JSME International Journal* [online]. 2006, 49, 2, [cit. 2011-05-22]. s. 301-306. Dostupný z WWW: <[http://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmec/49/2/301/\\_pdf](http://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmec/49/2/301/_pdf)>. ISSN 1344-7653.
- [5] RICHTER, Alan. New lathe tool offers direct in-process diagnosis of cutting process. *Cutting tool engineering plus* [online]. 2001, 53, 1, [cit. 2011-05-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.ctemag.com/pdf/2001/0101-pluggingin.pdf>>.
- [6] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing,s.r.o, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [7] *Kyocera Cutting Tools 2010-2011 : Part 1 Section A - Section G* [online]. [cit. 2011-05-27]. Dostupné z WWW:<<http://www.epaperflip.com/aglaia/viewer.aspx?docid=822a4f43fe71472e97025f8dca7e98f9>>.
- [8] JURKO, J; ZAJAC, J; ČEP, R. Top trendy v obrábění. *II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o Žilina, 2006. s. 193. ISBN 80-968954-2-7.
- [9] HUMÁR, Antonín: *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část* Studijní opory pro magisterskou formu studia . 2003
- [10] *Příručka obrábění*. Šumperk : Pramet Tools,s.r.o., 2003. 100 s.
- [11] VASILKO, Karol. *Analytická teória trieskového obrábania*.Fakulta výrobních technológií TU v Košiciach, so sídlom v Prešove:Prešov 2007. 338s ISBN: 978-80-8073-759-7
- [12] PŘIKRYL, Z. - MUSÍLKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*, SNTL Praha, 1982.
- [13] Samuels, J. - Tani, M. - Beiswenger, C. I.: *Measurements of crater wear using replica molds*, CIRP 1/1976, pp. 77
- [14] BILÍK, Oldřich. *Obrábění II*. 2. díl, II.vydání. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2001. 118 s. ISBN 80-7078-944-1.
- [15] Giusti, F. - Santochi , M. – Tantussi, G.: *On line sensing of flank and crater wear of cutting tools*, CIRP, 1/1987, pp. 41

- [16] *Serie KTR 1085*. [online] URL: <<http://www.maurer-ir.de/>> [citováno 1. února 2016].
- [17] *ENCYCLOPEDIA BRITANNICA*. [online]. [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/media/263/Hot-isostatic-pressing-a-pressure-assisted-method-for-sintering-advanced>.
- [18] HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006. [online]. [cit. 2012-02-12]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat\\_pro\\_rez\\_nastroje/materialy\\_pro\\_rezne\\_nastroje\\_v2.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf).
- [19] MAŤEJKA, J.; ČESÁNEK, J.; KŘÍŽ, A. Vývojové trendy v oblasti řezné keramiky. Vrstvy a povlaky 2005. Trenčín: DIGITAL GRAPHIC, 2005. 133- 136 s. ISBN 80-969310-1-6.
- [20] JANÁSEK, A., Experimentální ověření vlivu tepelných a mechanických rázů na stav ostří při nepravidelném přerušovaném řezu.: disertační práce. Ostrava: VŠB Fakulta strojní, 2015. 121s.
- [21] JURKO, J. Opatrebenie rezných nástrojov, Prešov, 2005,ISBN 80-8073-255-8
- [22] POPEOVÁ. *Monitorovanie opotrebenia rezných nástrojov*, Vydavateľstvo ŽU EDIS Žilina: Žilina 2001 ISBN80-7100-700-5

## Publikační činnost

- [1] DUPALA, O; ČEP, R; HATALA, M. Production Technology of Spindle Part. *Technologické inženýrstvo*. 2009, 6, 2, s. 19-22. ISSN 1336-5967.
- [2] PETRŮ, J; ŠEVČÍKOVÁ, X; GREPL, M; DUPALA, O. Evaluation of microhardness of Surface Layer after High-Speed Milling. *Technologické inženýrstvo*. 2010, 7, 2, s. 36-39. ISSN 1336-5967.
- [3] DUPALA, O; ČEP, R; BRYCHTA, J. New Methods for Determining the Machinability. *Technologické inženýrstvo*. 2010, 7, 2, s. 3-5. ISSN 1336-5967.
- [4] JANÁSEK, A; DUPALA, O; BRYCHTA, J. Comparison of Production Technology for Cable-end Use CAM or Numeric Controlled Multi-Spindle Automatic Lathes. *Technologické inženýrstvo*. 2010, 7, 2, s. 49-52. ISSN 1336-5967.
- [5] DUPALA, O; NOVÁKOVÁ, J; PETRŮ, J; JANÁSEK, A. Modern Hydraulic Holding Fixtures. *AMO Journal*. 2010, 1, 4, s. 60-63. ISSN 1313-8987.
- [6] DUPALA, O; BRYCHTA, J; ČEP, R. Determining the Workability of the New Metallurgical Materials. *World Academy of Science Engineering and Technology*. 2010, 6, 69, s. 759-762. ISSN 2010-3778.
- [7] DUPALA, O; ČEP, R; OČENÁŠOVÁ, L; PETŘKOVSKÁ, L; NOVÁKOVÁ, J. Change Technology of Drilling Head (Změna technologie výroby vrtací hlavy). *ERIN 2009 Sborník přednášek, Proceeding of Papers*, Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2009, s. 41 + CD. ISBN 978-80-248-1982-2.
- [8] DUPALA, O; KRATOCHVÍL, J; ČEP, R; JANÁSEK, A; ČEPOVÁ, L. Tool Wear Depending on the Electrical Resistance. In *ERIN 2011 Proceedings of Abstracts of 5 Annual International Traveling Conference for Young Researchers and PhD Students*. Prešov : Harmony Aperion, 2011. s. 31 + CD. ISBN 978-80-89347-04-9.
- [9] ČEP, R; JANÁSEK, A; DUPALA, O. TaeguTec Ceramic Cutting Tool Tests at Interrupted Cut Simulator. In *ERIN 2011 Proceedings of Abstracts of 5 Annual International Traveling Conference for Young Researchers and PhD Students*. Prešov : Harmony Aperion, 2011. s. 28 + CD. ISBN 978-80-89347-04-9.
- [10] DUPALA, O. Podpora aktivní účasti na mezinárodní vědecké konferenci ICMIE 2010 "International Conference on Mechanical and Industrial Engineering". *Den tvůrčích činností Moravskoslezského kraje: Sborník příspěvků 5. ročník konference*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. s. 65-68. ISBN 978-80-248-2410-9.
- [11] ZLÁMAL, T.; PETŘKOVSKÁ, L.; BRYCHTA, J.; DUPALA, O. Product of Component for Submarine Oil Extraction. In *6th international seminar Advance Manufacturing Technologies, Sozopol 22th-28th June 2012*. Sozopol, Bulgaria:



- Faculty of Industrial Technology, Technical University of Sofia, Bulgaria, p. 66 – 71. ISSN1313-4264.
- [12] DUPALA, O; ČEP, R; KRATOCHVÍL, J. The Design of Specific Mechanical Fixtures. *In ERIN 2011 Proceedings of Abstracts, Czech Technical University in Prague, 2012.* p. 95 - 99. ISBN 978-80-01-05038-5.
- [13] DUPALA, O; BRYCHTA, J. Upínání tvarově příbuzných obrobků. *Sborník anotací příspěvků sympozia: Progresivní metody ve výrobních technologiích.* Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. s. 6. ISBN 978-80-248-2929-6.
- [14] BRYCHTA, J; ČEP, R; PETRŮ, J; DUAPAL,O. High Speed Technology and Construction of the Accuracy Generation of Machine Tools. *11 International Conference: New Ways in Manufacturing Technologies.* Prešov: Technical University of Košice, 2012. s. 6. ISBN 978-80-248-2929-6.
- [15] DUPALA, O; ČEP, R; KRATOCHVÍL, J. Trvanlivost nástroje v závislosti na elektrickém odporu. *Sborník anotací příspěvků sympozia: Progresivní metody ve výrobních technologiích.* Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. s. 16. ISBN 978-80-248-2502-1.
- [16] JANÁSEK, Adam, ČEPOVÁ, Lenka, PETRŮ, Jana, DUPALA, Ondřej, ČEP, Robert: Experimental Milling Tests Of Cutting Tools At Stainless Steel. *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, Universit of Zenica, 2012, s. 31-34. 977-184-0494-00-9
- [17] CEP, Robert, Adam JANASEK, Lenka CEPOVA, Jana PETRU a Ondrej DUPALA. Experimental Milling Tests of Cutting Tools at Stainless Steel. *16th International Research / Exspert Conference - Trends in the Development of Machinery and Associated Technology: TMT 2012.* 2012, roč. 16, č. 1, s. 31-34. ISSN 1840-4944.
- [18] ČEP, Robert, Adam JANÁSEK, Jana PETRŮ a Ondřej DUPALA: Experimental Testing of Ceramic Cutting Inserts at Irregular Interrupted Cutting Process. *Proceedings: IMETI 2013, WMSCI 2013, CISCi 2013, IMSCI 2013* : July 9-12, 2013, Orlando, Florida, USA, International Institute of Informatics and Systemics, 2013, s. 145-149, ISBN: 978-1-936338-86-3.

## **Seznam příloh:**

Příloha č. 1 CD s naměřenými daty.