

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie - technologie  
obrábění

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vliv tenkých vrstev a úpravy mikrogeometrie břitu cermetových VBD na  
frézování zápusťkové oceli

Autor: **Bc. Pavel BŮŽEK**  
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**  
Konzultant práce: **Ing. Ivana ČESÁKOVÁ**

Akademický rok 2011/2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Pavel BŮŽEK  
Osobní číslo: S10N0045P  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie-technologie obrábění  
Název tématu: Vliv tenkých vrstev a úpravy mikrogeometrie břítu cermetových VBD na frézování zápusťkové oceli  
Zadávací katedra: Katedra technologie obrábění

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu - výroba cermetů, VBD broušené x VBD lisované
3. Depozice cermetů
4. Návrh experimentů
5. Vyhodnocení výsledků
6. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **50 - 70 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**  
Seznam odborné literatury:

Mádl, J. : Technologie obrábění. Praha, ČVUT 2002, ISBN 80-01-02091-6  
Sandvik Coromant : Technická příručka obrábění; 2005  
Staňek, J., Němejc, J. : Metodika zpracování a úprava  
diplomových(bakalářských) prací. Plzeň, ZČU 2005, ISBN 80-7043-363-9

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Ivana Česáková**  
Katedra technologie obrábění  
Datum zadání diplomové práce: **13. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Ing. Jan Rehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 12. prosince 2011

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## **Autorská práva**

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

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Ivaně Česákové za vynikající spolupráci, přístup při vedení v průběhu experimentu i za její rady a diskuze ohledně řešení diplomové práce.

Dále Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce a připomínky při vypracovávání diplomové práce.

Katedře KTO při ZČU v Plzni za poskytnutí vybavení a přípravu v průběhu studia.

Firmě SHM s.r.o., sídlící v Šumperku za úpravu a proměření vzorků použitých při experimentu pro tuto diplomovou práci.

A v neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za podporu během studia a za jejich trpělivost.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Bc. Bůžek	<b>Jméno</b> Pavel	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2303T004 "Strojírenská technologie - technologie obrábění"		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Zetek, Ph.D.	<b>Jméno</b> Miroslav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST – KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b><del>BAKALÁŘSKÁ</del></b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv tenkých vrstev a úpravy mikrogeometrie břitu cermetových VBD na frézování zápustkové oceli		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	66	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	59	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	7
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	V této diplomové práci se řeší možnosti výroby cermetových nástrojů a výběr nejlepší možnosti, možnosti depozice tenkých otěruvzdorných vrstev na cermetové nástroje a její problematiku. Diplomová práce popisuje vliv úpravy mikrogeometrie na cermetových vyměnitelných břitových destičkách na řezivost nástroje a na adhezi tenkých otěruvzdorných vrstev při obrábění kalené zápustkové oceli.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Zápustková ocel, frézování, cermet, tenká otěruvzdorná vrstva, úprava mikrogeometrie

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Bc. Bůžek	<b>Name</b> Pavel	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2303T004 “Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Zetek, Ph.D.	<b>Name</b> Miroslav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST – KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The influence of thin layers and adjustment of the microgeometry cermets commutable indexable inserts of edge for milling of Tool diesteel		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2012
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	66	<b>TEXT PART</b>	59	<b>GRAPHICAL PART</b>	7
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This thesis deals with the possibilities of production of cermet tools and selecting the best possibilities, possibilities of deposition of thin abrasion resistant layers on cermet tool and its issues. This thesis describes the effect of microgeometry modifications on cermet exchangeable plates to cutting ability of the tool and abrasion resistant adhesion of thin layers when machining hardened die steel.
<b>KEY WORDS</b>	Die steel, milling, cermet, thin abrasion resistant layer, microgeometry modifications

## Obsah

Obsah.....	6
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	8
1 Úvod.....	10
1.1 Cíle diplomové práce:.....	10
2 Rozbor současného stavu .....	11
2.1 Výroba cermetů.....	11
2.1.1 Základní prvky cermetů a prvky ovlivňující jejich vlastnosti.....	12
2.1.2 Vliv přísad na fyzikálně-mechanické vlastnosti.....	14
2.2 Výroba cermetových VBD .....	17
2.2.1 Výroba cermetových VBD broušením .....	17
2.2.2 Výroba cermetových VBD lisováním .....	19
2.2.3 Výhody a nevýhody jednotlivých technologií.....	21
3 Depozice cermetů .....	22
3.1 Metody depozice tenkých vrstev na cermety.....	22
3.1.1 Metoda PVD .....	23
3.1.2 Metoda CVD .....	24
3.1.3 Metoda PACVD .....	25
3.1.4 Výhody a nevýhody jednotlivých metod při depozici cermetů.....	26
3.2 Druhy nepoužívanějších povlaků a jejich vlastnosti .....	27
3.2.1 Konkrétní nabídka povlaků s vlastnostmi .....	27
4 Návrh experimentů .....	29
4.1 Obrábění materiálu ČSN 19 663.....	29
4.1.1 První fáze experimentu pro obrábění materiálu ČSN 19 663 .....	29
4.1.2 Druhá fáze experimentu pro obrábění materiálu ČSN 19 663 .....	30
4.2 Obrábění materiálu ČSN 19 436.....	30
4.2.1 První fáze experimentu pro obrábění materiálu ČSN 19 436 .....	30
4.2.2 Druhá fáze experimentu pro obrábění materiálu ČSN 19 436.....	31
4.2.3 Třetí fáze experimentu pro obrábění materiálu ČSN 19 436 .....	31
4.3 Stroj.....	31
4.4 Nástroj.....	31
4.5 Použité VBD .....	32
4.6 Řezné podmínky .....	34
4.7 Záběrové podmínky .....	34
4.8 Obráběný materiál ČSN 19 663.....	34
4.9 Obráběný materiál ČSN 19 436.....	35
4.10 Měření a vyhodnocování řezných sil .....	35
4.10.1 Soustava pro měření řezných sil.....	36
4.10.2 Postup při vyhodnocování řezných sil.....	37
4.11 Měření opotřebení.....	39
4.12 Měření drsnosti .....	39
4.13 Měření zaoblení řezné hrany VBD .....	40
4.14 Měření drsnosti VBD.....	41
4.15 Měření zaoblení řezné hrany.....	41
4.16 Měření tloušťky VBD .....	42
5 Vyhodnocení výsledků .....	43
5.1 Řezné podmínky .....	43
5.1.1 Řezná rychlost .....	44

5.1.2	Hloubka řezu .....	45
5.2	Řezné síly.....	45
5.2.1	Složka $F_z$ .....	46
5.2.2	Složka $F_y$ .....	47
5.2.3	Složka $F_x$ .....	48
5.3	Trvanlivost.....	49
5.4	Rovinnost VBD.....	50
5.5	Vliv úprav VBD na řezný proces.....	50
5.5.1	Vybrání nejvýhodnějších úprav.....	51
5.5.2	Zaoblení řezné hrany .....	51
5.5.3	Drsnost povrchu VBD .....	53
5.5.4	Opotřebení .....	54
5.5.5	Drsnost obrobené plochy .....	55
5.5.6	Dosažená drsnost v závislosti na poloměru zaoblení ostří.....	56
5.5.7	Průběh složek řezné síly během přejezdu.....	56
5.5.8	Průběh složek řezné síly během trvanlivosti VBD.....	58
5.5.9	Závislost složky $F_z$ na poloměru zaoblení ostří .....	58
5.5.10	Závislost $F_z$ a VBB na čase.....	59
5.5.11	Závislost $F_x$ na drsnost povrchu VBD .....	60
5.5.12	Celkové silové zatížení.....	61
5.5.13	Chování složek řezných sil v závislosti na čase .....	62
5.6	Porovnání jednotlivých úprav v závislosti na povlaku .....	63
5.7	Komplexní shrnutí výsledků .....	66
6	Závěr.....	67
	Použitá literatura .....	68



### Přehled použitých zkratk a symbolů

PVD	fyzikální metoda vytváření tenkých vrstev (Physical Vapour Deposition)
CVD	chemická metoda vytváření tenkých vrstev (Chemical Vapour Deposition)
PACVD	chemická metoda vytváření tenkých vrstev pomocí plazmy (Plasma Active Chemical Vapour Deposition)
VBD	vyměnitelné břitové destičky
TiC	karbid titanu
TiN	nitrid titanu
TiCN	karbonitrid titanu
Ti	titan
Ta	tantal
W	wolfram
V	vanad
Mo	molybden
Ni	nikl
Co	kobalt
Cr	chrom
WC	karbid wolframu
TaC	karbid tantalu
SiC	karbid křemíku
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid hlinitý
ZrO <sub>2</sub>	oxid zirkoničitý
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	nitrid křemičitý
CO	oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
ZrN	nitrid zirkonu
CrN	nitrid chromu
HSC	vysokorychlostní obrábění
T200	trvanlivost VBD při rovnoměrném opotřebení hřbetu 0,2 μm [min]
v <sub>c</sub>	řezná rychlost [m/min]
f <sub>z</sub>	posuv na zub [mm/zub]
f <sub>p</sub>	přísuv [mm]
a <sub>p</sub>	axiální hloubka řezu [mm]
a <sub>e</sub>	radiální hloubka řezu [mm]

$F_x$	složka řezné síly ve směru osy x (ve směru posuvu) [N]
$F_y$	složka řezné síly ve směru osy y (ve směru přísuvu) [N]
$F_z$	složka řezné síly ve směru osy z (ve směru osy nástroje) [N]
$F_c$	celkové silové zatížení [N]
$R_a$	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
$R_t$	Celková výška profilu drsnoti
$R_z$	Největší výška profilu
VBB	rovnoměrné opotřebení na hřbetě [ $\mu\text{m}$ ]
VBN	maximální rozměr nerovnoměrného opotřebení na hřbetě [ $\mu\text{m}$ ]
$\gamma_A$	nástrojový úhel čela axiální [ $^\circ$ ]
$\gamma_R$	nástrojový úhel čela radiální [ $^\circ$ ]

# 1 Úvod

Tématem této diplomové práce je Vliv tenkých vrstev a úpravy mikromeetrie břítu cermetových VBD na frézování zápusťkové oceli. Strojírenský průmysl se řadí k jednomu z největších v celém světě a jeho zdokonalování je velmi důležité, jelikož postup doby si klade stále větší požadavky na vyrobené součásti. Ať se jedná o složitost, přesnost, kvalitu či kvantitu výrobků nebo i požadavky na nižší výrobní časy a náklady. Zároveň se však mezi požadavky řadí také nutnost používání stále kvalitnějších materiálů s vyšší pevností a tvrdostí.

Jedná se například o obrábění licích forem a zápusťek. Tyto výrobky se vyrábějí z velmi těžkoobrobitelných materiálů, které bylo v minulosti možno vyrobít pouze metodami nekonvenčního obrábění. Proto je pro takové operace nutno vybírat nástroje z moderních řezných materiálů, které disponují řadou pozitivních vlastností, moderní obráběcí stroje a volit správné výrobní technologie, které vedou k efektivní výrobě. Při použití některých řezných materiálů, kterým je například cermet, je možno tyto těžkoobrobitelné výrobky vyrábět i bez některých operací jako je hrubování či předdokončování, a tím dosáhnout kratších výrobních časů a úspory nákladů.

Při obrábění takových materiálů je také zapotřebí používat nástroje s vhodnou geometrií břítu, jelikož její nesprávné zvolení snižuje efektivitu nástroje. V dnešní době se pozornost ubírá především ke zkoumání mikromeetrie břítu u těchto nástrojů z důvodu kvality a tvaru řezné hrany, která má velký vliv především na řezivost nástroje, jeho efektivitu a zatížení celé obráběcí sestavy. Během výroby prochází řezný materiál několika procesy a na jeho závěru je často prováděno broušení, které má z pohledu mikromeetrie za následek vznik nepříliš kvalitní řezné hrany. Proto jsou na nástrojích či vyměnitelných břitových destičkách prováděny technologie, které mají vést k lepší mikromeetrii řezné hrany, a tím zvýšit možnosti využití těchto nástrojů.

Další úpravou řezného materiálu pro docílení efektivnějšího řezného nástroje je možnost depozice tenkých vrstev. Díky tomu se často docílí delší životnosti a lepších řezných vlastností řezného materiálu, avšak téma depozice moderních řezných materiálů je v současnosti velmi řešeno, jelikož u některých řezných materiálů je složitá a je nutné použití speciálních technologií a speciálních druhů vrstev.

## 1.1 Cíle diplomové práce:

Mezi základní cíle této diplomové práce patří především zjištění co nejvhodnějšího způsobu výroby cermetových nástrojů, cermetových vyměnitelných břitových destiček a jejich následné mikroúpravy. Dalším cílem bude zjištění možností depozice tenkých vrstev na cermetové nástroje a zjištění její problematiky. Výsledkem této diplomové práce by mělo být také zjištění vlivu mikromeetrie u cermetových vyměnitelných břitových destiček na adhezi tenkých otěruvzdorných vrstev a na řezivost nástroje.

## 2 Rozbor současného stavu

V současné době se na trhu pohybuje celá řada řezných materiálů a je nízká pravděpodobnost, že by v blízké budoucnosti mohlo dojít k objevení zcela nového řezného materiálu, a proto dochází za pomoci výzkumných týmů k neustálému vývoji těchto známých řezných materiálů. Výzkumy vedou k tomu, aby bylo možno obrábět stále vyššími řeznými rychlostmi při vysokých trvanlivostech nástrojů, přičemž je vývoj nejčastěji zaměřen na výrobní technologie.

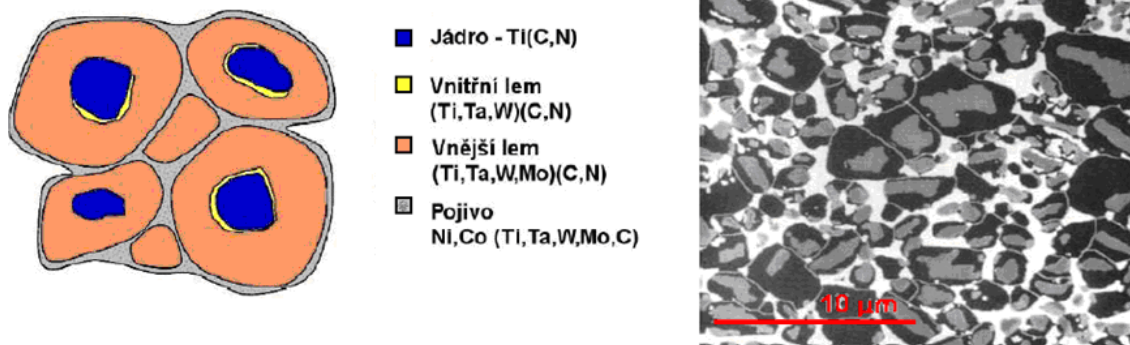
Cermet, patřící do skupiny moderních řezných materiálů byl vyvinut již v první polovině 20. století, avšak v této době nevyvolal velkou pozornost, jelikož nedisponoval dostatečnou houževnatostí. Postupem času docházelo k úpravám jejich struktury. Jejich použití bylo postupně přes dokončovací soustružení nízkými posuvovými rychlostmi, soustružení středními posuvovými rychlostmi a lehké frézování až po současnost, kdy se cermety používají pro různé operace jako je soustružení, frézování, řezání či vystružování. Postupem této doby se struktura cermetů neustále měnila, aby se dosáhlo co nejlepších vlastností tohoto řezného materiálu. V tabulce 2-1 jsou uvedeny některé druhy cermetů podle jejich časového vývoje.

**Tab.2-1 Historický vývoj cermetů [1]**

Rok	Nový materiál
1929-1931	TiC-Mo <sub>2</sub> C-Ni,Cr,Mo
1930-1931	TaC-Ni, Ti(C,N)-Ni(Co,Fe)
1931	TiC-TaC-Co, TiC-Cr,Mo,W,Ni,Co
1938	TiC-VC-Ni,Fe
1949	TiC-VC-NbC- Mo <sub>2</sub> C-Ni
1952-1966	TiC - tepelně zpracovatelné materiály
1968-1973	TiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1977	TiC-TaC-WC-ZrC-(Ni-Mo-Co) - Patentováno firmou Toshiba Tungaloy
1980	Ti(C,N) - precipitačně vytvrzené materiály
1981-1986	Karbidové/karbonitridové cermety na bázi W,Ti,Mo s komplexními pojivy na bázi Co,Ni
1988	(Ti,Ta,Nb,V,W)(C,N)-(Ni,Co), (Ti,Ta,Nb,V,Mo,W)(C,N)-(Ni,Co)-Ti <sub>2</sub> AlN - vysoká houževnatost
1988-1989	Cermety s 5-6% N
1990-1994	Submikrometrová zrnitost a používání povlaků (PVD a CVD)
1991	(Ti,Ta,Nb,V,Mo,W)(C,N)-Ni-Cr

### 2.1 Výroba cermetů

Cermet je řezný materiál vyrobený obdobně jako slinuté karbidy pomocí práškové metalurgie. Nejdůležitějším přidaným prvkem, který tvoří základ cermetu a jeho tvrdost je titan a to ve formě karbidu titanu (TiC), nitridu titanu (TiN) nebo karbonitridu titanu (Ti(C,N)). Dalšími přidanými karbidy bývají často také karbidy wolframu (WC), tantalu (TaC), niobu (NbC), molybdenu (Mo<sub>2</sub>C) či nitrid tantalu (TaN). Jako pojivo, které dodává cermetům houževnatost, se používá především nikl, který může být doplněn o kobalt či molybden. Každý přidaný prvek má svůj určitý vliv na výslednou vlastnost vyrobeného cermetu. Na obrázku 2-1 je schématické a mikroskopické znázornění mikrostruktury cermetu. [18]



obr.2-1 Schématický a mikroskopický snímek mikrostruktury cermetu

### 2.1.1 Základní prvky cermetů a prvky ovlivňující jejich vlastnosti [1,3,4,5]

**Titan (Ti)** - patří k hlavní části v cermetové struktuře. Tento prvek se vyrábí se z oxidu titaničitého získaného z minerálů ilmenitu, rutilu, pyrofilitu a hematitu. Karbid titanu se vyrábí v indukčních pecích ve vakuové nebo vodíkové atmosféře z oxidu titaničitého smíchaného s uhlíkem ve formě sazí nebo grafitu a to při teplotách 2000 až 2200°C. Pro výrobu nebo slinování cermetů na bázi Ti(C,N) je důležitá stabilita Ti(C,N), ta se mění se změnou obsahu dusíku, parciálního tlaku dusíku a teploty.



obr.2-2 Krystal kovového titanu [3]

**Wolfram (W)** - tento prvek slouží ve velkém množství především pro výrobu slinutých karbidů. pro jeho výrobu se používá hornina wolframit a wolframan vápenatý. Nejdůležitějším faktorem je jeho zrnitost, která se při jeho výrobě reguluje podle tepoty, rychlosti nárůstu teploty, množstvím průchodu materiálu, rychlostí proudění vodíku, či vlhkostí vodíku přiváděného do pece.



obr.2-3 Kovový wolfram [4]

**Tantal (Ta) a Niob (Ni)** - svými vlastnostmi jde o velmi podobné prvky, v cermetech jsou obsaženy hlavně ve formě karbidů. Karbid tantalu a karbid niobu (TaC, NiC) - vyrábí se podobně jako ostatní druhy karbidů nauhličováním oxidu kovu uhlíkem. Jelikož se oba prvky tantal i niob získávají ze stejných rud, bývají často obsaženy v jednom prvku i zbytky druhého. Proto se vyrobený karbid často označuje jako TaC.NbC.

**Niob (Ni)** - prvek, který je svými vlastnostmi velmi příbuzný tantalu, v minulosti se dlouho vedl názor, že se jedná o tentýž prvek. Je vyráběn z rudy kolumbit a tantalit obdobně jako tantal.

**Karbid tantalu a karbid niobu (TaC, NiC)** - vyrábí se podobně jako ostatní druhy karbidů nauhličováním oxidu kovu uhlíkem. Jelikož se oba prvky tantal i niob získávají ze stejných rud, bývají často obsaženy v jednom prvku i zbytky druhého. Proto se vyrobený karbid často označuje jako TaC.NbC.

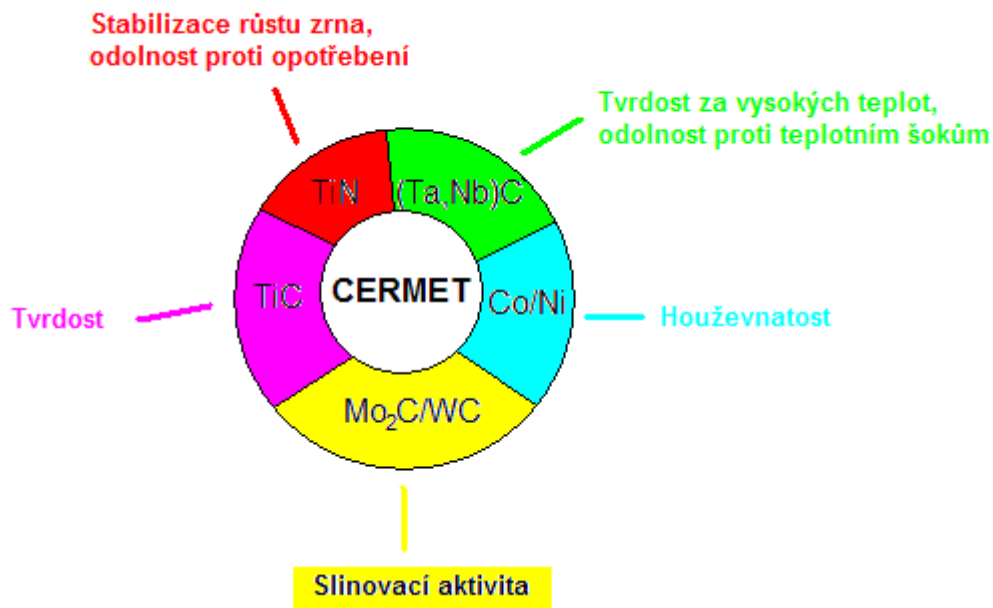
**Chrom (Cr)** - prvek, který je na Zemi obsažen ve velkém množství, je vyráběn z minerálů chromit a krokoit. Vyrábí se redukcí uhlíkem ve vysoké peci, čímž vzniká slitina chromu a železa zvaná ferrochrom, která se používá pro legování speciálních ocelí. Karbid chromu se vyrábí z oxidu chromitého a sazí nebo grafitu v odporové trubkové peci a ve vodíkové atmosféře při teplotě 1600°C. Jediný karbid používaný pro slinování je Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

**Vanad (V)** - poměrně rozšířený prvek obsažený v minerálech jako je například vanadinit, patronit nebo karnotit. Vyrábí se pražením drcené rudy nebo zbytkového kovového vanadu s chloridem sodným dále louhováním a tavením. Karbid vanadu se vyrábí smícháním oxidu vanadičitého se sazemi nebo grafitovým práškem ve vakuu při teplotě 1700°C. Vanad má velký vliv na růst zrn při slinování.

**Nikl (Ni)** - poměrně lehký prvek, který je v přírodě hojně zastoupen, obvykle se vyskytuje ve formě oxidu ve směsi se železem nebo jako sulfid. Vyrábí se redukcí oxidu niklu pomocí koksu a dále se čistí pomocí elektrolýzy. Při výrobě cermetů se nikl používá jako pojivo.

**Molybden (Mo)** - jedná se o poměrně vzácný kov, který je obsažen například v rudě molibdenit, wulfenit nebo powellit. Nejčastější metodou výroby je redukce oxidu molybdenového vodíkem. Karbid molibdenu je vyráběn přímým nauhličováním směsi molybdenového prášku a sazí nebo práškového grafitu při teplotě 500°C ve vodíkové atmosféře.

**Kobalt (Co)** - je obsažen v rudách jako je například linnaeit, karolit, smaltit nebo kobaltit. Vyrábí se z oxidů redukcí uhlíkem ve vodíkové atmosféře při teplotách 350 až 500°C. Plní funkci pojiva, tím že se na začátku výrobního procesu přimíchává do výchozí práškové směsi.

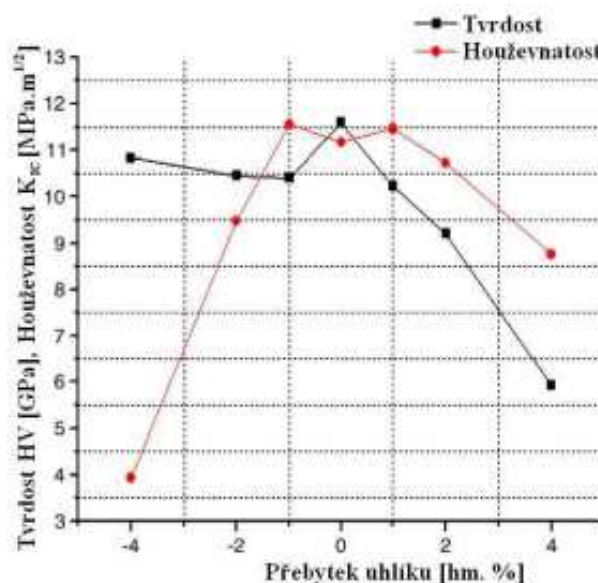


obr.2-4 Vliv základních složek na vlastnosti cermetu [5]

### 2.1.2 Vliv přísad na fyzikálně-mechanické vlastnosti [30]

Přidáváním jednotlivých přísad přidávaných do cermetů má velký vliv na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Na tyto vlastnosti má vliv o jakou přísadu (prvek) se jedná a v jakém množství je v cermetovém materiálu obsažena. V této kapitole bude rozebrán vliv nejčastěji používaných cermetových přísad.

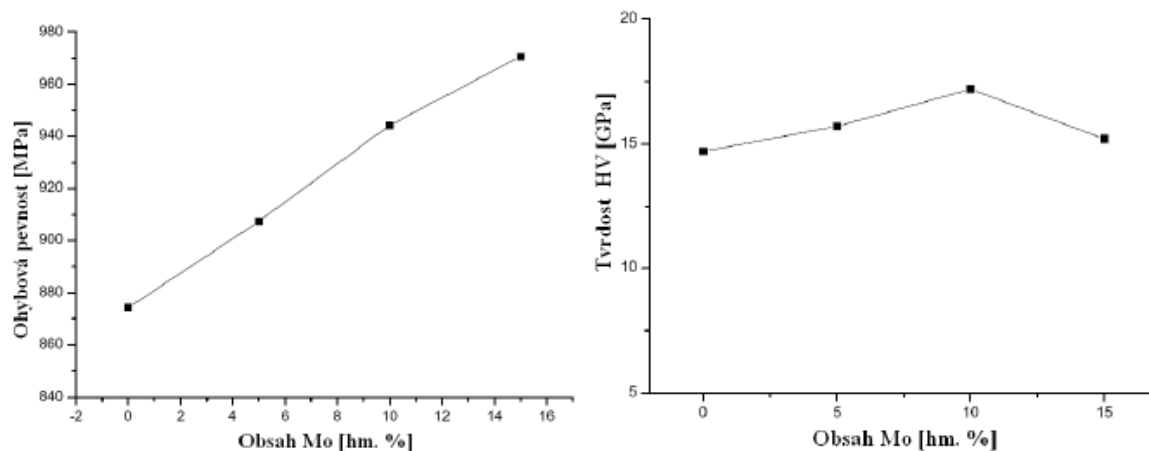
**Uhlík (C)** - Vliv tohoto prvku byl zkoumán dlouhá léta a potvrdilo se, že při zvyšujícím množství uhlíku se u cermetu výrazně snižuje tvrdost, přičemž nízký obsah uhlíku nemá na tvrdost velký vliv. Zároveň houževnatost klesá jak při přebytku uhlíku, tak i při jeho nedostatku (viz. graf na obr.2-5). Při vysokém přebytku uhlíku vznikají v cermetu póry a grafit, cermet tak vykazuje nejhorší mechanické vlastnosti, jelikož grafit se chová jako iniciátor trhlin.



obr.2-5 Vliv uhlíku na mechanické vlastnosti cermetu [30]

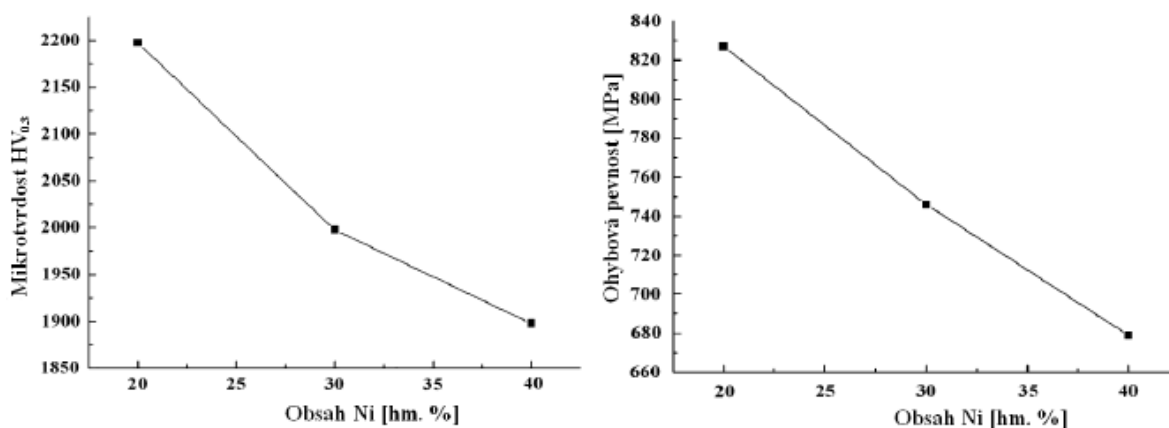
**Mangan (Mn)** - Při zkoumání vlivu manganu na mechanické vlastnosti cermetu bylo zjištěno, že se zvyšujícím se obsahem manganu roste ohybová pevnost až do hodnoty 2300 MPa. Tato skutečnost nastává při přibližně 10% obsahu Mn v cermetu. Vysoká ohybová pevnost je přisuzována malé zrnitosti a homogenní struktuře. K růstu tvrdosti cermetu v závislosti na obsahu manganu dochází až do 5% jeho obsahu v cermetu. Tvrdost cermetu se zde pohybuje okolo 90 HRA.

**Molybden (Mo)** - Ze zkoumání vychází, že s rostoucím množstvím molybdenu roste ohybová pevnost cermetu, přičemž důvodem může být schopnost molybdenu zvyšovat smáčivost mezi keramickou a kovovou fází a snižovat velikost zrn cermetu. Na tvrdost cermetu má Mo vliv, že se zvyšujícím se obsahem roste tvrdost cermetu až do hranice 10% obsahu Mo, nad tuto hranici dochází k poklesu tvrdosti. Důvodem může být zpevnění karbidu Mo a zmenšení velikosti zrn. Grafické znázornění závislosti obsahu Mo na pevnost a tvrdost cermetu je znázorněna na obr.2-6.



obr.2-6 Vliv obsahu molybdenu na ohybovou pevnost a tvrdost cermetu [30]

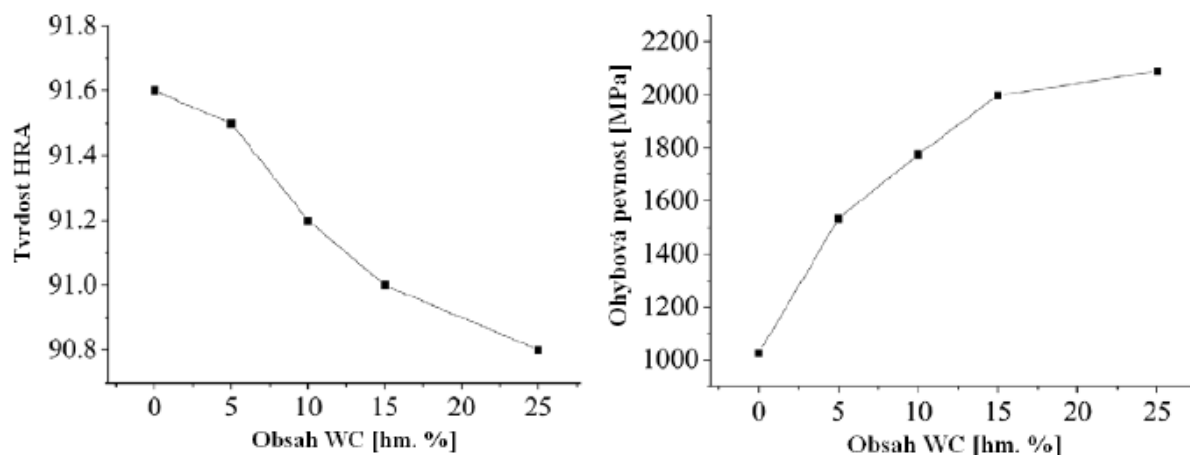
**Nikl (Ni)** - Nikl má na cermet vliv především z pohledu mikrotvrdosti a ohybové pevnosti. Při zvyšujícím se obsahem niklu dochází u cermetu ke snižování mikrotvrdosti i snižování pevnosti. Tyto skutečnosti mohou být způsobeny zmenšováním plochy TiC a poklesem obsahu fáze TiC v závislosti na růstu obsahu niklu. Obě tyto vlastnosti jsou zakresleny v grafu na obr.2-7.



obr.2-7 Vliv obsahu niklu na mikrotvrdost a ohybovou pevnost cermetu [30]

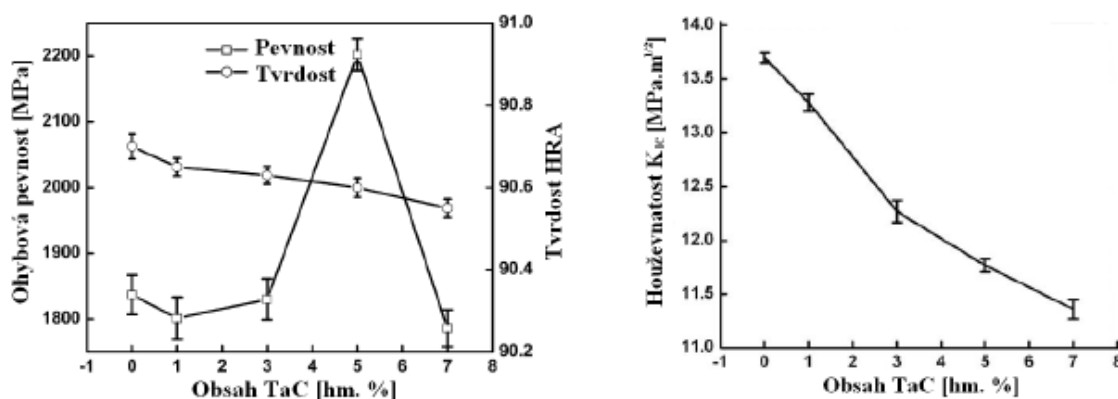


**Karbid wolframu (WC)** - U tohoto karbidu bylo prokázáno, že se zvyšujícím se obsahem WC dochází ke zvyšování ohybové pevnosti cermetu, jelikož díky vyššímu obsahu WC dochází ke zlepšení rozpustnosti Ti(C,N) a ostatní těžké prvky se tak snáze rozpouštějí do pojiva, u kterého tak dochází ke zpevnění. Naopak tvrdost se zvyšujícím se obsahem WC snižuje na základě zmenšování množství Ti(C,N). Závislost tvrdosti a pevnosti cermetu na množství obsaženého WC v cermetu je zobrazena na obr.2-8.



obr.2-8 Vliv obsahu karbidu wolframu na tvrdost a ohybovou pevnost cermetu [30]

**Karbid tantalu (TaC)** - Karbid tantalu má vliv na tvrdost, jelikož s rostoucím obsahem TaC dochází k mírnému poklesu tvrdosti. Tuto skutečnost má za následek nižší tvrdost TaC než TiC a při vyšším množství TaC v cermetu dochází ke zvýšení jeho objemového podílu a tím snížení objemového podílu tvrdé fáze. Závislost množství TaC na ohybovou pevnost cermetu, je taková, že v rozmezí obsahu 0 - 3% se ohybová pevnost nemění, s následným přibýváním obsahu TaC dochází k růstu ohybové pevnosti až do hranice 7% obsahu TaC. Růst obsahu TaC nad tuto hranici způsobuje zvýšení pórovitosti cermetu a pokles ohybové pevnosti. Při pohledu na lomovou houževnatost zjistíme, že při rostoucím obsahu TaC se její hodnota snižuje, jelikož dochází ke zvýšení povrchového napětí na rozhraní mezi jádrem a pláštěm, čímž dochází ke vzniku trhlin při namáhání v tahu.



obr.2-9 Vliv obsahu karbidu tantalu na tvrdost, ohybovou pevnost a houževnatost cermetu [30]

**Nitrid křemíku (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)** - Pomocí nitridu křemíku dochází u cermetů k jejich vyztužení. S nárůstem Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> klesá relativní hustota cermetu mírně do obsahu 2%, nad tuto hodnotu rychleji. S vyšším obsahem Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dochází k růstu tvrdosti a ohybové pevnosti až do obsahu 2% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, nad tuto hodnotu dochází k rychlému poklesu.

## 2.2 Výroba cermetových VBD

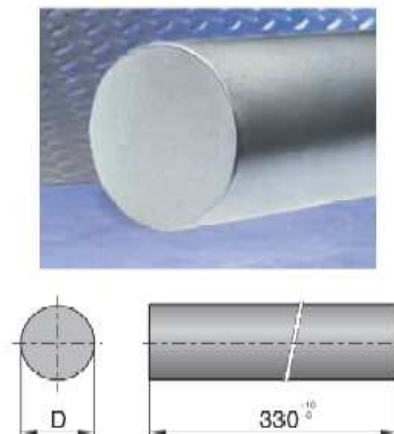
Cermetové nástroje je možno vyrábět dvěma způsoby. Prvním způsobem je výroba cermetových nástrojů a VBD pomocí broušení, tato metoda výroby je nejdéle využívanou. Druhou novější technologií výroby cermetových VBD je metoda pomocí lisování. Obě tyto metody jsou v současnosti využívány, jelikož mají každá své výhody a nevýhody.

### 2.2.1 Výroba cermetových VBD broušením [1,7,14,18]

Výroba cermetů, jejíž výsledným produktem je broušená vyměnitelná břitová destička, je velmi podobná výrobě vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů. Tímto způsobem jsou také často vyráběny cermetové monolitní nástroje. Nástroje nebo vyměnitelné břitové destičky jsou vyráběny z polotovaru, který se nazývá "roubík". Jedná se o polotovar ve tvaru válce, ze kterého se dále buďto vybrušují monolitní nástroje, a nebo v případě vyměnitelných břitových destiček, jsou roubíky děleny na menší polotovary, které se svým tvarem blíží tvaru vyměnitelné břitové destičky. Na těchto polotovarech je následně vybroušena požadovaná geometrie. Jako další úprava povrchu se volí například omílání či pískování a to především z důvodu zaoblení ostří a odstranění nerovností vzniklých broušením. Mezi tyto nerovnosti patří například trhliny nebo vruby vznikající na řezné hraně vlivem tepelných šoků při broušení.



obr.2-10 Příklad roubíku a kruhové broušené VBD [14]

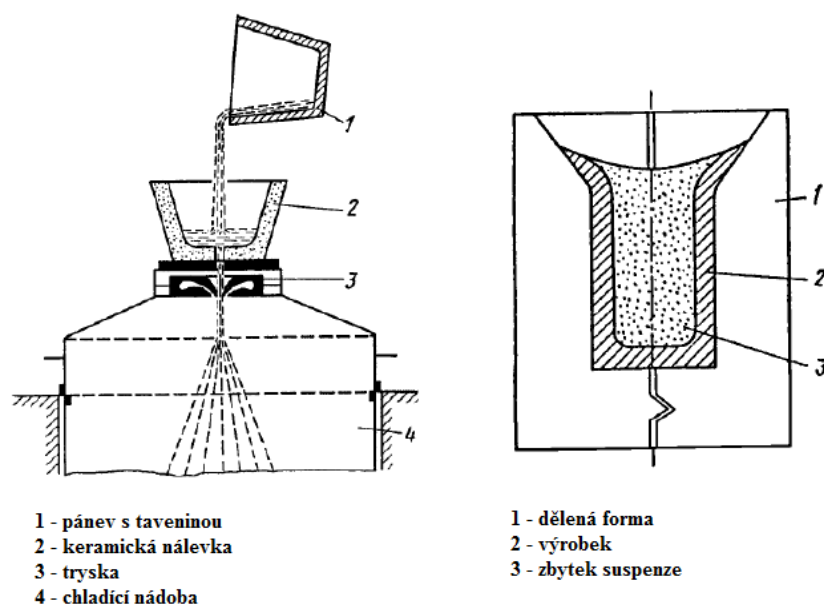


D [mm]	tol. [mm]
3,25	-0 / +0,10
4,20	-0 / +0,25
5,20	
6,20	-0 / +0,30
8,20	-0 / +0,45
10,20	
12,20	
14,20	
16,20	-0 / +0,55
18,20	
20,20	

obr.2-11 Příklad roubíku vyráběného firmou Ceratizit SA [30]

Tato metoda výroby je obdobná jako výroba u slinutých karbidů. Jde o to, že v první fázi musí dojít k důkladné přípravě prášku, dále se tato směs prášku formuje buďto metodou Izostatického lisování za studena nebo metodou vytlačování, po formování přichází na řadu proces slinování.

**Příprava prášků** - jde o velmi důležitou část výroby, jelikož vždy velmi záleží na množství, druhu, čistotě vyrobeného prášku, velikosti zrn a ekonomičnosti postupu. Prášky bývají vyráběny metodami fyzikálními a nebo chemickými. Fyzikální výrobou je drcení, mletí, rozprašování kapalného kovu nebo kondenzace z plynné fáze. Chemicky se vyrábí prášky pomocí chemické redukce a rozkladem, elektrolytickou redukcí nebo selektivním rozpouštěním. Po výrobě se prášky dále upravují pomocí třídění (prosévání, sedimentace), čistění (elektrostatické, magnetické, odplynování), mísení a homogenizace a následuje jejich sušení. Výsledkem přípravy prášku jsou karbidická zrna dokonale obalená jemným práškem pojivových kovů.



obr.2-12 Schéma zařízení pro výrobu prášku - zařízení na rozprašování prášku (vlevo), zařízení pro keramické lití (vpravo) [30]

**Formování směsi** - formování směsi lze provádět pomocí několika metod, kterými je formování ve formovacích lisech, Izostatické lisování za studena (CIP - Cold Isostatic Pressing), vytlačování přes trysku požadovaného tvaru, litím či vstřikováním do pomocných forem.

Při Izostatickém lisování za studena je prášková směs umístěna do pružné formy z latexu nebo silikonového kaučuku. Tato forma se uzavře z důvodu, aby se do formované směsi nedostala tlaková kapalina, pomocí níž dochází k vyvíjení tlaku. Průběh slinování lze rozdělit na tři fáze - nárůst tlaku (20 MPa/min), výdrž na konstantním tlaku (300 MPa) a snižování tlaku. Fáze snižování tlaku má největší vliv na vlastnosti výlisku, proto se tlak nejprve uvolňuje vysokou rychlostí, následně se rychlost uvolňování tlaku sníží kvůli oddělení výlisku od formy (možnost vzniku trhlin na výlisku) a dále po oddělení výlisku od formy se rychlost snižování tlaku může opět zvýšit.

Při formování pomocí vytlačování se využívá zařízení na vytlačování polotovarů, pomocí tohoto zařízení je možno vyrábět také polotovary pro monolitní nástroje. Toto zařízení

pracuje na principu plynulého řízení tlaku při neustálém plnění prášku do šnekového dopravníku. Směs prášku je dodávána do vytlačovacích komor.

**Slinování** - vylisované těleso se v průběhu slinování uloží do slinovací pece. Ve slinovací peci dochází k ohřevu a následnému ochlazení při řízených podmínkách ve vakuu či vodíkové nebo dusíkové atmosféře. Po ukončení slinování má výsledný produkt požadovanou mikrostrukturu, chemické, mechanické a fyzikální vlastnosti a je zcela zhutěn. [18]

**Dělení a broušení** - hotové cermetové polotovary (roubíky) jsou následně děleny na polotovary podobné požadovaným VBD. Tyto polotovary jsou následně broušeny do požadované rozměry a s požadovanou geometrií. Broušení je prováděno pomocí diamantových kotoučů, které se pro broušení cermetů jeví jako nejlepší řešení. Při broušení vzniká řada problémů jako existence různých druhů cermetů s různým složením, vlastnosti těchto cermetů jsou tedy rozdílné stejně jako jejich obrobitelnost. Dalším problémem je vznik vysokých teplot a následný vznik teplotních trhlin a pnutí v cermetovém materiálu, vznik vysokých řezných sil a tím i větší opotřebení brusného kotouče. Při broušení cermetů je také velmi důležitá důkladná filtrace chladícího media a kontrola brusného kotouče, u kterého může docházet k jeho zalepování. Z pohledu na všechny tyto skutečnosti je nutno brát při broušení cermetů ohled na několik parametrů jako je volba optimální řezné rychlosti, volba správného brusného kotouče, volba vhodné polohy obrobku, zvolit správné řezné prostředí. [10]

## 2.2.2 Výroba cermetových VBD lisováním

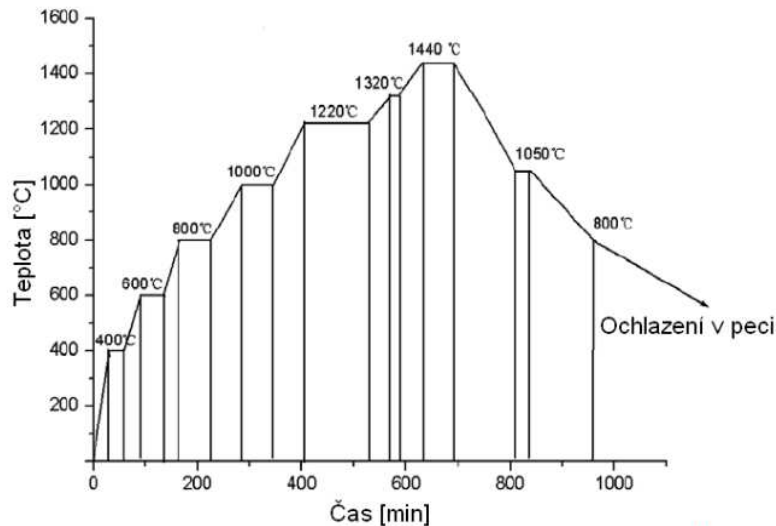
V případě cermetových lisovaných vyměnitelných břitových destiček se jedná o výrobu, na jejímž konci se již vyměnitelné břitové destičky nemusejí složitě upravovat broušením, broušení se používá pouze pro úpravu geometrie VBD. Díky tomu není povrch destičky narušován brusnými zrny a ani tepelně ovlivňován. Výroba se dělí na základní operace, kterými je příprava prášků, formování směsi, slinování, lisování a konečná úprava.

**Příprava prášků** - část přípravy prášků je obdobná jako v předešlé kapitole a proto zde bude vynechána (viz. 2.2.1).

**Formování** - nejčastěji se provádí pomocí lisování. Nejčastěji se používá formovacích lisů a jelikož směsi prášků mají nízkou plasticitu, přidává se do nich plastifikátor, což je látka zvyšující plasticitu, tekutost a má tmelící vlastnosti, čímž se zlepšují formovací vlastnosti směsi prášků a po vyjmutí z formy se zachová tvar výlisku. Z plastifikátoru se nesmí dostat do polotovaru nečistoty a také se musí nechat částečně odstranit pomocí sušení či předslinování. Jako nejběžnější plastifikátor se používá syntetický kaučuk nebo parafín, který se nechá rozpustit v benzínu, benzenu nebo tetrachlormetanu. Během lisování se mění některé důležité vlastnosti jako je zmenšování pórovitosti a zvětšování stykové plochy mezi zrny. Pevnost výlisku roste přibližně úměrně s použitým lisovacím tlakem. Metody používané při lisování prášků se dělí na metody s využitím tlaku a metody bez využití tlaku. S využitím tlaku jde o metody izostatického lisování (za normální nebo zvýšené teploty), válcováním, protlačováním, kování nebo vysokou rychlostí (explozí). U metod bez využití tlaku jde o volné slinování ve formě, zhutňování vibracemi, keramické lití nebo horké lití.

**Slinování** - proces při kterém se dosahuje požadovaných mechanických, chemických a fyzikálních vlastností slinovaného materiálu. Při slinování bývají použity teploty nižší než je teplota tavení slinovaného materiálu a to většinou 0,65 až 0,8 homologické teploty prvku s nejvyšší teplotou tavení. Homologickou teplotou se rozumí podíl teploty provozní ku teplotě tavení. Během slinování se tvar polotovaru nemění, mění se pouze jeho rozměry a to tak, že dochází ke smrštění přibližně o 20%. Podmínky slinování ovlivňuje teplota, čas, prostředí,

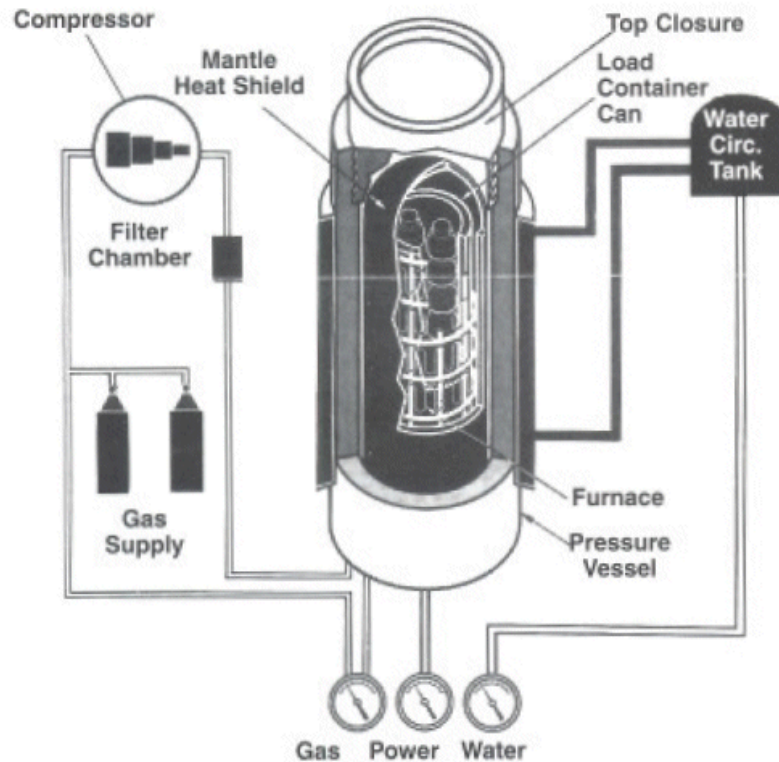
kterým může být buď ochranný plyn ( $N_2$ ,  $N_2+Co$ , Ar) nebo vakuum, a druh slinování. Slinování bývá přesně řízeno podle předepsaných podmínek a může být rozděleno do dvou částí, kterými je předslinování a samotné slinování. Během předslinování dochází k odstranění plastifikátoru. Během slinování dochází k uzavírání pórů a materiál se spojuje pomocí difúze. Na vlastnosti konečného výrobku mají vliv především rychlost ohřevu, teplota předslinování, teplota slinování, výdrž na teplotě a rychlost ochlazování. Na obr.2-13 je zakreslen průběh procesu při slinování cermetu.



obr.2-13 Průběh slinovacího procesu u cermetu [8]

**Vysokoteplotní izostatické lisování** - Tento proces výroby se také často označuje zkratkou HIP (Hot Isostatic Pressing). Při tomto procesu na výrobek působí rovnoměrně ze všech stran vysoký tlak inertního plynu (nejčastěji argon nebo helium) při vysokých teplotách. Tlak plynu v nádobě, ve které lisování probíhá se zvyšuje s jejím zahříváním až na požadovanou hodnotu. Vysokoteplotní izostatické lisování se používá především z toho důvodu, že materiály mají po slinování vysokou pórovitost. Materiál se musí obalit nepropustným obalem, který má nejčastěji tvar výsledného produktu, aby nedocházelo k pronikání plynu do pórů a tím se vytváří homogenní struktura bez pórů. Díky tomu výsledný materiál dosáhne vyšší houževnatosti, odolnosti proti únavě a jemnozrnné struktury. Schématický popis zařízení pro vysokotlaké izostatické zařízení je na obr.2-14.

**Konečná úprava** - Provádí se u některých vyměnitelných destiček, kde je nutné provést úpravu tvaru destičky. Konečná úprava se nejčastěji provádí pomocí broušení, kdy hotový nástroj nebo vyměnitelná břitová destička dostává přesnou geometrii. Vytváří se fazetky, přesné rovinné plochy a utvařeče třísek. Na závěr může být použito také kartáčování, které docílí zaoblenějších hran a břit je tak stabilnější a má vyšší trvanlivost.



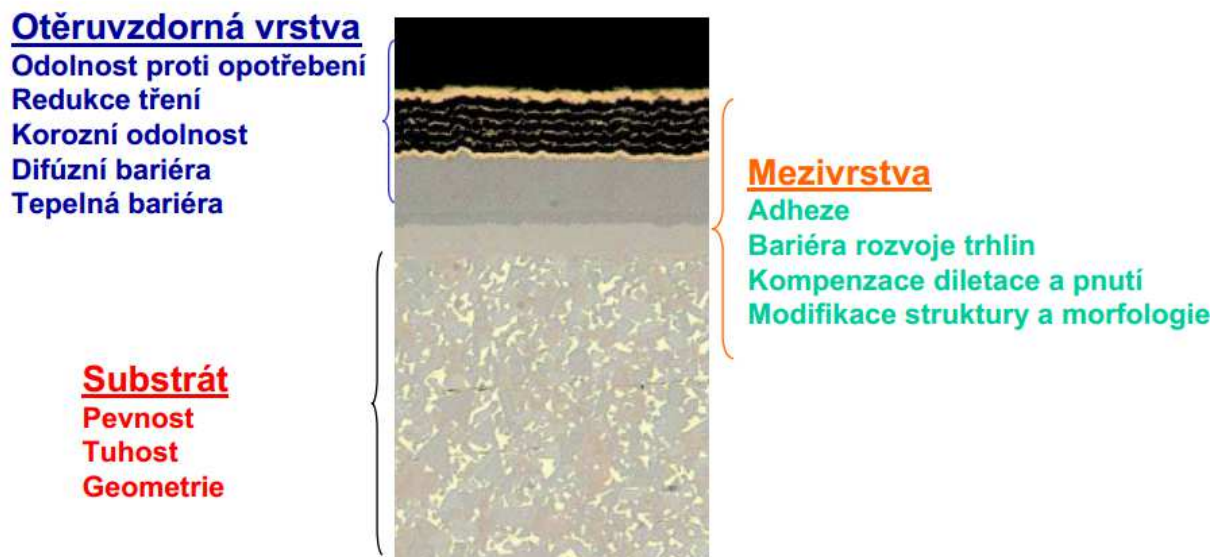
obr.2-14 Schéma zařízení pro vysokotlaké izostatické lisování [9]

### 2.2.3 Výhody a nevýhody jednotlivých technologií

Jednotlivé technologie výroby mají své výhody i nevýhody, metoda výroby pomocí lisování je výhodná především při pohledu na kvalitu dosaženého povrchu a zároveň vyměnitelná břitová destička vyrobená tímto způsobem není tepelně ovlivňována technologií broušení, což je v případě cermetů nežádoucí. Někteří výrobci začali od výroby cermetových VBD metodou broušení z roubíků odstupovat právě kvůli tomu, že takto vyrobené VBD byly při broušení tepelně namáhány a nedosahovaly takových vlastností jako VBD lisované. Časem se však ukázalo, že jsou při obrábění výhodné také monolitní cermetové nástroje, které se vyrábí právě broušením z roubíků, a proto se někteří výrobci začali ke klasické výrobě vracet. Především možnost docílení libovolného tvaru nástrojů a vyměnitelných břitových destiček patří k hlavní výhodě technologie výroby cermetových nástrojů pomocí broušení z roubíků.

### 3 Depozice cermetů

Nanášení tenkých vrstev na nástroje je známo již řadu let a deponují se nástroje z různých řezných materiálů. Hlavním důvodem pro nanášení tenkých vrstev na cermetové nástroje je především možnost prodloužení trvanlivosti nástroje, zvyšování houževnatosti, lepší odvod tepla z místa řezu a zvyšování odolnosti proti vznikajícím plastickým deformacím. Základní otázkou u deponování cermetů je chování tenké vrstvy nanesené na cermetový substrát především z pohledu na adhezi, nárůst mikrotvrdosti a velikost koeficientu tření. Pro cermety je nanášení tenkých otěruvzdorných vrstev výhodné, jelikož díky jejich depozici dochází k částečné eliminaci nevýhod cermetů, jelikož po depozici tenkých vrstev je řezný nástroj lépe chráněn proti opotřebení, má vyšší odolnost proti tepelným šokům, dochází ke zvýšení tepelné vodivosti a zlepšení kvality obrobeného povrchu a může být použito vyšších posuvů. Velkou výhodou je právě ochrana cermetového substrátu před vysokými teplotami vznikajícími v místě řezu, jelikož vysoké teploty mají velký vliv na mikrotvrdost, odolnost proti korozi a odolnost proti opotřebení.



obr.3-1 Schématický řez povlakovaným nástrojem s popisem vlastností jednotlivých vrstev [19]

#### 3.1 Metody depozice tenkých vrstev na cermety

Mezi základní metody depozice tenkých vrstev na cermetové nástroje jsou metoda PVD (Physical Vapour Deposition), CVD (Chemical Vapour Deposition) a metoda PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition). Při depozici se na cermetový substrát nanáší nejčastěji tloušťky povlaků mezi 2 až 15  $\mu\text{m}$ .

### 3.1.1 Metoda PVD

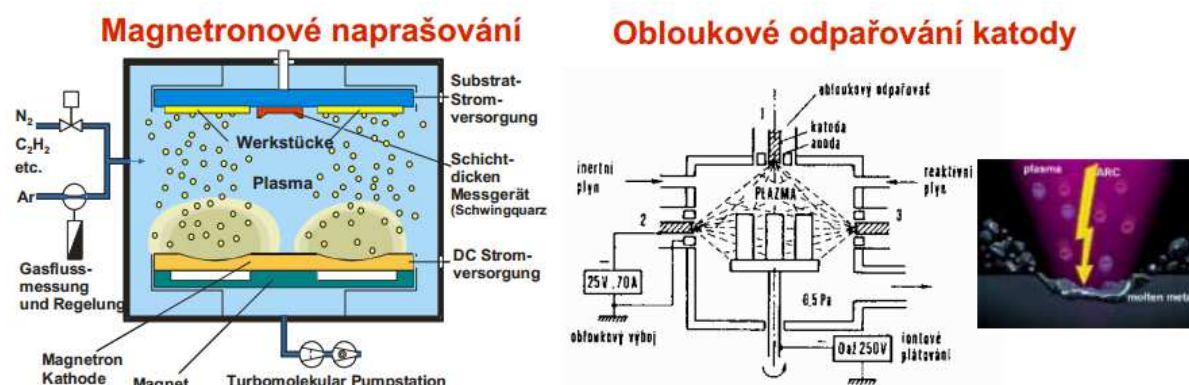
Metoda fyzikální depozice je metoda známá již řadu let. V minulosti byla vyvinuta především pro depozici tenkých vrstev na nástroje z rychlořezné oceli. Povlak je vytvářen nejčastěji napařováním popřípadě naprašováním. Při napařování je podstata v tom, že materiál použitý pro depozici je odpařován. V případě naprašování je povrch deponovaného materiálu bombardován ionty materiálu sloužícího jako povlak. U obou těchto možností se celý proces odehrává v atmosféře aktivního plynu, nejčastěji dusíku. Během depozice pomocí metody PVD dochází k reakci plynu s kovovými výparry a tím vzniká chemická sloučenina vytvářející na nástroji tenkou vrstvu. Proces probíhá za podmínek vysokého vakua a je charakteristický nízkými teplotami, které se pohybují v rozmezí 150 °C až 600 °C.

Mezi nejčastější vrstvy vytvářené pomocí této metody se řadí vrstvy: TiN, AlTiN, TiAlN, TiAlSiN, CrN, CrCN, CrAlSiN, TiCN, ZrN. Mohou být vytvářeny nejen monovrstvy, ale také multivrstvy.

Výhodou této metody je, že je možno povlakovávat různé nástroje, proces povlakování PVD je velmi produktivní, jelikož vytvoření povlaku je časově nenáročné. Metoda PVD nemá nepříznivý vliv na vlastnosti řezného materiálu a mohou se pomocí ní povlakovat i ostré hrany. U cermetů zaručíme při vyšší houževnatosti lepší odolnost proti opotřebení a zpomalení opotřebení na hřbetě ve tvaru vrubu.

Nevýhodou metody PVD je, že metoda je prováděna za vysokého vakua, deponované nástroje se musejí z důvodu rovnoměrného nanesení povlaku neustále pohybovat, tato metoda vytváří tlaková zbytková pnutí v povlaku. Nástroj musí být před depozicí důkladně připraven (očištění, odmaštění) a je zde možnost nanesení pouze tenké vrstvy povlaku (cca 5 μm). [6,12]

Na obr.3-2 je schématické zakreslení principu pro depozici tenkých vrstev pomocí metody PVD, vlevo zařízení pro naprašování a vpravo pro napařování. Na obr.3-3 je poté zachycen mikroskopický snímek profilu břitu VBD s povlakem naneseným pomocí metody PVD.



obr.3-2 Schématický princip zařízení pro depozici povlaků pomocí PVD [19]





obr.3-3 Profil povlaku na břitě VBD naneseného pomocí metody PVD [20]

### 3.1.2 Metoda CVD

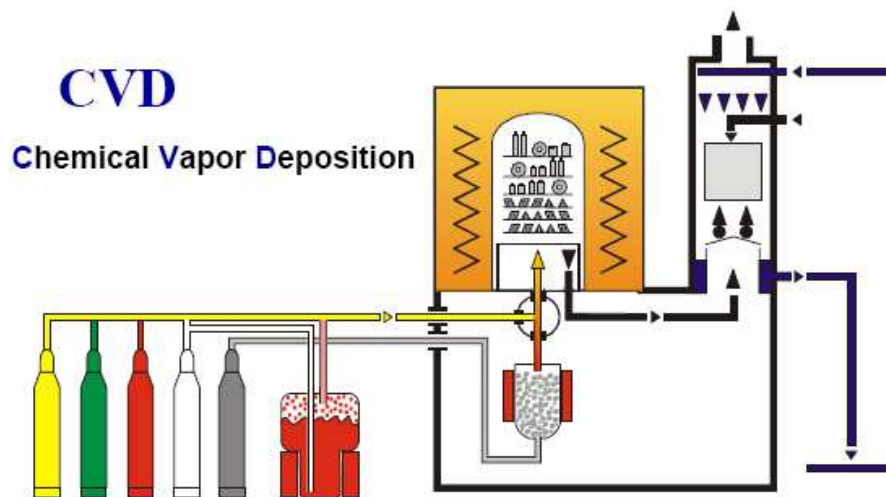
Metoda chemické depozice, je metoda probíhající při vysokých teplotách. Teploty se nejčastěji pohybují v rozmezí od 1000 °C do 1200 °C. Metoda CVD byla zpočátku využívána převážně k nanášení tenkých vrstev na nástroje ze slinutých karbidů. Povlak bývá vytvořen ve čtyřech různých variantách, kterými jsou:

- tepelně indukovaná
- plazmaticky aktivovaná
- elektronově indukovaná
- fotonově indukovaná

Nejčastěji nanášenými vrstvami pomocí metody CVD jsou následující: TiC, TiCN, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v různých kombinacích jako multivrstvy TiC+TiN+TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nebo TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN

Výhodou této metody je možnost nanesení tenké vrstvy o větší tloušťce než v případě metody PVD, v tomto případě se jedná o tloušťky v rozmezí 5 až 15 µm. Další výhodou oproti metodě PVD je, že nástroj se během procesu depozice nemusí neustále pohybovat, mohou se pohybovat nástroje se složitou geometrií včetně vnitřních průměrů. Výhodou je výborná adheze mezi povlakem a substrátem nástroje. Na nástroje jsou touto metodou často nanášeny multivrstvy, které zvyšují využitelnost nástroje.

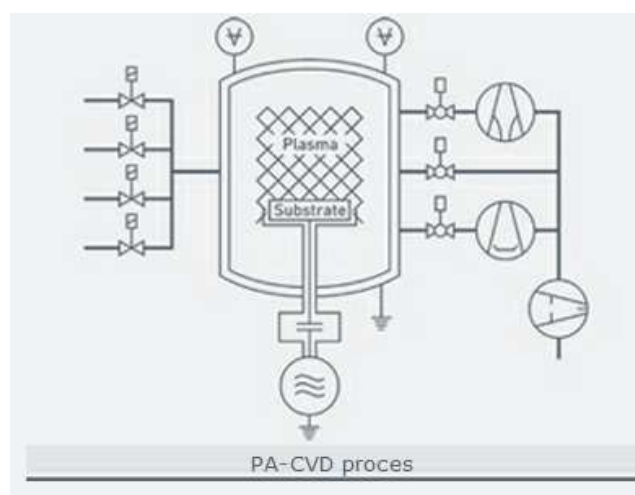
Mezi nevýhody lze zařadit vysoké teploty při depozici, díky čemuž může docházet k ovlivnění základového materiálu (snížení ohybové pevnosti), v nanesené vrstvě také vznikají zbytková tahová pnutí. Pomocí metody CVD je také nevhodné deponovat tenké vrstvy na nástroje s ostrými hranami. U nanášení tenkých vrstev na cermety pomocí metody CVD je také nevhodné nanášet povlaky určené pro slinuté karbidy na bázi WC, jelikož má za následek vznik vlasových trhlinek a následný výlom břitů. Na obr.3-4 je schématicky zobrazeno zařízení pro depozici povlaků pomocí metody CVD. [6,12]



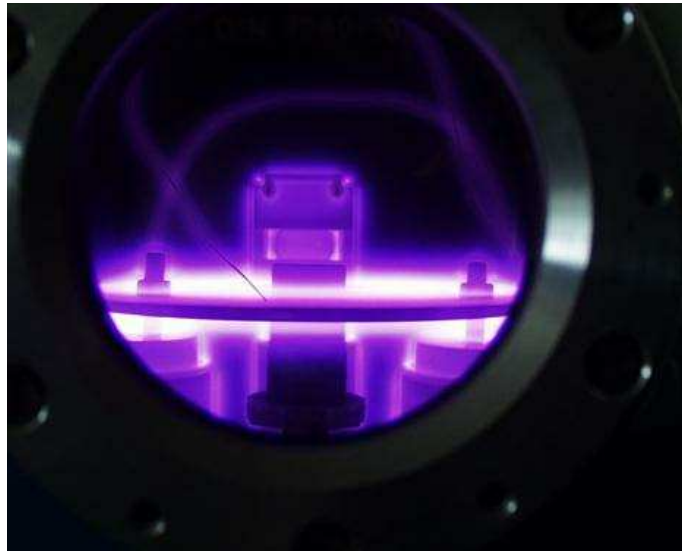
obr.3-4 Schématický princip zařízení pro depozici povlaků pomocí CVD [19]

### 3.1.3 Metoda PACVD

Tato metoda je speciální případ depozice tenkých vrstev pomocí chemického nanášení tenkých vrstev. Jedná se o metodu chemické depozice aktivované pomocí plazmy. Nanášený materiál se na deponovanou součást nanáší ve formě plynu. Mezi základní rozdíl mezi touto metodou a metodou CVD je ten, že u metody PACVD nejsou zapotřebí tak vysoké teploty. Teploty se zde pohybují v průběhu depozice mezi 450 °C až 650 °C při tlaku 200 Pa. Tuto metodu můžeme někdy najít také pod označením PECVD. V průběhu této metody nedochází na deponované součásti k rozměrovým změnám a velkou výhodou je také možnost nitridace a nanášení povlaku v jednom procesu. Dalšími výhodami je, že u této metody není zapotřebí vysokého vakua, je možno deponovat i dutiny metoda je relativně rychlá (2-3  $\mu\text{m}$  za 3,5 hodiny), povlaky PACVD se vyznačují extrémně nízkým koeficientem tření. U cermetů se tato metoda používá nejčastěji k nanášení multivrstev. Při experimentech prováděných na cermetových nástrojích deponovaných pomocí metody PACVD bylo zjištěno, že tyto tenké vrstvy ovlivňují výsledné vlastnosti cermetového nástroje. Bylo zjištěno, že životnost nástroje se velmi zvýšila přičemž průběh opotřebení na hřbetě byl téměř lineární. Dále se došlo ke zjištění skutečnosti, že nejlepší adheze vrstvy k cermetovému substrátu je docílena vrstvou TiCN. [21,23,32]



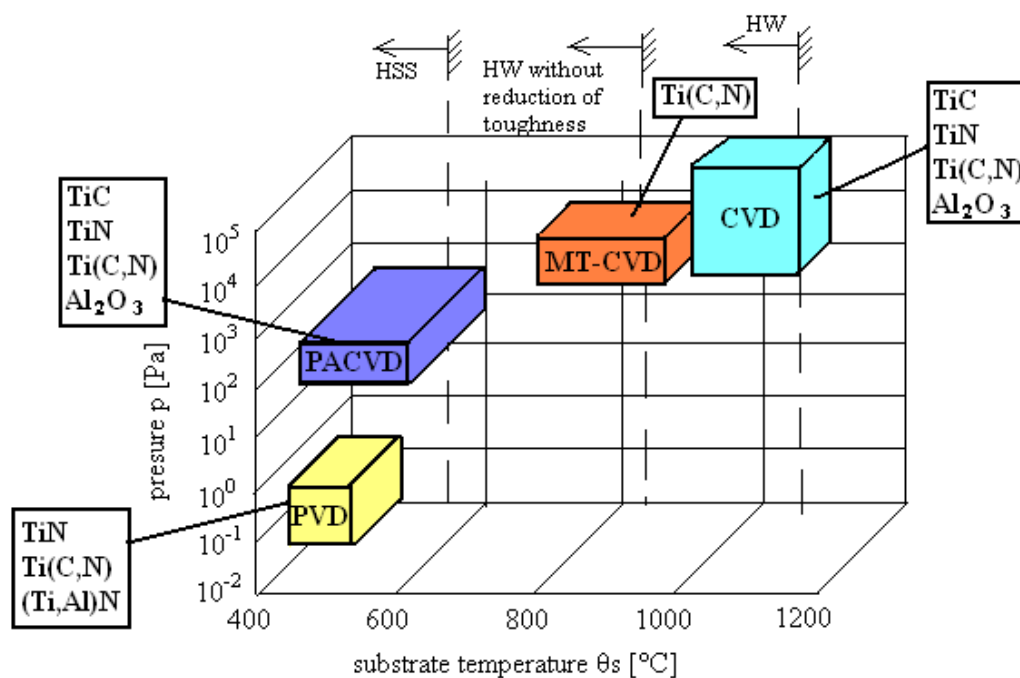
obr.3-5 Schématický princip zařízení pro depozici povlaků pomocí PACVD [22]



obr.3-5 Pohled do zařízení při průběhu povlakování pomocí metody PACVD [24]

### 3.1.4 Výhody a nevýhody jednotlivých metod při depozici cermetů

Každá z těchto metod má řadu svých výhod a nevýhod, jak již bylo popsáno v předešlých kapitolách, nejčastější metoda pro depozici tenkých vrstev na cermetové nástroje je metoda PVD, druhou nejčastější metodou je metoda PACVD. Nejméně používanou metodou, u které nadále dochází ke zkoumání v oblasti deponování cermetových nástrojů je metoda CVD. Tato metoda je charakteristická velmi vysokými teplotami při depozici a cermetový nástroj je tak vystaven velkým teplotním šokům. U takto teplem ovlivněného cermetového nástroje může docházet ke změně mikrostruktury a vzniku povrchového napětí.



obr.3-6 [32] Jednotlivé techniky deponování [32]

### 3.2 Druhy nejpoužívanějších povlaků a jejich vlastnosti [25,26,27]

Z pohledu nanášení tenkých vrstev je mnoho variant pro zvolení povlaku. Vždy je nutné vědět jakými vlastnostmi určitý povlak disponuje. V této kapitole bude popsáno několik nejpoužívanějších druhů povlaků a příklady konkrétních povlaků nabízených firmami.

**TiN** - základní povlak využívaný na řadu nástrojů, charakteristická je jeho zlatavá barva s jednotnou strukturou. Disponuje dobrou odolností proti opotřebení. Zabraňuje vytváření nárůstku, snižuje tření a odolává vysokým teplotám. Vykazuje nízkou reakci s kovovými materiály.

**TiCN** - jedná se o tvrdý povlak s relativně vysokou houževnatostí vyznačující se stříbrnou barvou. Tento povlak má velmi nízký koeficient tření a vysokou odolností vůči otěru. Vhodným materiálem pro obrábění nástroji s tímto povlakem jsou oceli se středním obsahem uhlíku a střední až nižší pevností se sklonem k nalepování se na břit. Je určen k obrábění například šedé litiny a důležitým předpokladem je nutnost chlazení.

**TiAlN** - jedná se o univerzální povlak, který je vhodný pro široké spektrum materiálů se středními a vysokými pevnostmi. Je vhodný pro vysoké řezné rychlosti. Tento povlak je nanášen jako multivrstva a díky tomu disponuje výborným poměrem tvrdosti a houževnatosti. Je vhodný pro obrábění bez chlazení.

**AlTiN** - povlak vhodný pro frézování vysokými řeznými rychlostmi, může se jím obrábět i bez chlazení. Tento povlak disponuje velmi vysokou oxidační odolností a je vhodný pro obrábění ocelí s vysokými pevnostmi a tvárných litin.

**CrN** - tento povlak je vhodný pro obrábění čistých neželezných kovů (hliník, měď), jelikož zabraňuje nalepování obráběného materiálu na nástroj

**CrAlSiN** - povlak pro náročné aplikace, odolný vůči oxidaci a nalepování obráběného materiálu na břit nástroje. Jeho charakteristická barva je ocelově šedá

**TiAlSiN** - jde o povlak vhodný pro náročné aplikace jako například obrábění tvrdých kalených materiálů bez nutnosti chlazení.

#### 3.2.1 Konkrétní nabídka povlaků s vlastnostmi [28]

Povlak Balnit	Složení povlaku	Tvrdość HV 0,05	Souč. tření <sup>1)</sup>	Tloušťka vrstvy [µm]	Teplota užití max [°C]	Barva povlaku	Typ vrstev povlaku
Futura Nano	TiAlN	3300	0,30 – 0,35	3 – 5	900	fialově- šedá	nanostrukt.
Futura Top	TiAlN	3300	0,25	3 – 5	900	fialově- šedá	nanostrukt.
Futura Gold	TiAlN+TiN	3300	0,30 – 0,35	3 – 5	900	zlató- žlutá	nanostrukt.
G	TiCN+TiN	3000	0,40	dle aplikace	400	zlató- žlutá	vícivrstvý
Hardlube	TiAlN+ WC/C	dle obs. TiAlN	0,15 – 0,20	3 – 6	800	třavě- šedá	nanostrukt. lamelární
Triton	DLC (a-C:H)	>2500	0,10 – 0,20	dle aplikace	350	černo- šedá	jednovrstvý
X.Ceed	TiAlN	3300	0,40	3 – 5	900	modro- šedá	jednovrstvý
X.Treme	TiAlN	3500	0,40	1 – 3	800	fialově- šedá	jednovrstvý
Lumena	TiAlN	3400	0,30 – 0,35	8 – 12	900	fialově- šedá	nanostrukt.
Alcrona	AlCrN	3200	0,40	2 – 6	1100	modro- šedá	jednovrstvý

Pozn.: <sup>1)</sup> Proti oceli bez mazání na sucho

obr.3-7 Povlaky firmy Oerlikon Balzers Coating [28]

TYP VRSTVY	SLOŽENÍ	BARVA	TLOUŠŤKA μm	TVRDOST [GPa]	MAX. TEPLOTA POUŽITÍ	KOEFICIENT TŘENÍ PROTI OCELI
Alpha-PLATIT MP	TiCN multi	bronzově hnědá	1-4	33	400	0,2
Alpha-PLATIT	TiCN	šedá	1-4	37	400	0,2
Beta-PLATIT	TiN	zlatá	1-7	25	600	0,55
Delta-PLATIT	CrN	stříbrně šedá	1-4/10	18	700	0,3
Universal- PLATIT	TiAlN multi	fialová	1-4	30	800	0,4
Extra AI-PLATIT	AlTiN	černá	1-4	38	800	0,7
	AlTiCrN	tmavě šedá	1-4	40	900	0,55
	CrTiN	zlatá	1-4	30	600	0,4
AlXN3	---	černá	3-5	32	1000	0,4
cVlc	TiCN/DLC	černo šedá	1-3	37	450	0,15
CROMVlc2	CrN/DLC2	černá	1-5	25	700/450	0,1
nACo	---	fialově modrá	1-4	45	1200	0,45
nACRo	---	modro šedá	1-4	40	1100	0,35
DLC	---	černá	1	18	400	0,15
DLC2	---	černá	1-3	25	450	0,1
MoS2	MoS2	černá	0,5-1	-	400	0,1
nACo3	TiN+AlTiN+AlTiSiN	fialově modrá	1-4	45/34	1200/900	0,45

obr.3-8 Povlaky firmy LISS, a.s. [29]

COATING NAME	COATING COLOR	HARDNESS (HV)	COATING THICKNESS (μ = MICRONS)	COEFFICIENT OF FRICTION (COF)	COATING TEMP (F)	DEFINITION AND COMMON USE Call us for assistance in coating selection
<b>TiN</b> (Titanium Nitride)	Gold	2300-2500	Industry Standard: 2.2μ - 3.2μ Maximum Range: 1-8μ DCT Tolerance: 2.5μ +/- 20%	0.4	700	Great general purpose coating, a proven starter coating for numerous applications (common use: machining ferrous materials, molding, medical industry) NOTE: Can be stripped and reapplied to add life to expensive components.
<b>TiCN</b> (Titanium Carbo Nitride)	Rose	2800-3200	Industry Standard: 2.5μ - 3.5μ Maximum Range: 1-8μ DCT Tolerance: 2.8μ +/- 20%	0.3	800	Improved hardness, toughness, wear resistance over TiN with very low COF (common use: stamping, punching, blanking, forming tools, tough machining, injection molding) NOTE: Can be stripped and reapplied to add life to expensive components.
<b>TiAlN</b> (Titanium Aluminum Nitride)	Dark Gray	2900-3100	Industry Standard: 1.8μ - 3.2μ Maximum Range: 1-5μ DCT Tolerance: 2.4μ +/- 20%	0.35	850	Forgiving coating with high surface hardness at elevated temp (common use: machining difficult materials, dry or high temp. machining, fast feed rate machining, die cast core pins) NOTE: Can be stripped and reapplied to add life to expensive components.
<b>AlTiN</b> (Aluminum Titanium Nitride)	Dark Gray	3000-3400	Industry Standard: 1.8μ - 3.2μ Maximum Range: 1-5μ DCT Tolerance: 2.5μ +/- 20%	0.35	800	Versatile coating, low COF, higher breakdown temp. than TiAlN (common use: dry machining, high temp. machining, fast feed rate machining, hot forging)
<b>TiAlSiN</b> (Titanium Aluminum Silicon Nitride)	Gray	3200-3500	Industry Standard: 1.8μ - 3.2μ Maximum Range: 1-4μ DCT Tolerance: 2.5μ +/- 20%	0.35	850	Extremely hard and tough, higher breakdown temp than TiAlN/AlTiN, excellent wear resistance when post treated by DCT (common use: machining cast iron. Any tough application in high temperatures, high temp drilling) NOTE: Can be stripped and reapplied to add life to expensive components.
<b>ZrN</b> (Zirconium Nitride)	Pale Gold	2300-2500	Industry Standard: 2.2μ - 3.8μ Maximum Range: 1-5μ DCT Tolerance: 3.0μ +/- 20%	0.35	600	Exceptional abrasion resistance and lubricity (common use: General purpose machining, medical)
<b>CrN</b> (Chromium Nitride)	Silver	1800-2100	Industry Standard: 2.2μ - 3.8μ Maximum Range: 1-5μ DCT Tolerance: 3.0μ +/- 20%	0.45	700	Great sliding wear resistance, ductile and helps prevent cold welding similar in use to hard chrome plating (common use: machining in a corrosive environment, machining aluminum, copper, metal forming, die cast molds)
<b>AlCrN</b> (Aluminum Chromium Nitride)	Blue-Gray	3000-3200	Industry Standard: 1.8μ - 3.2μ Maximum Range: 1-5μ DCT Tolerance: 2.5μ +/- 20%	0.35	900	Superb hot hardness with extraordinary wear resistance under extreme mechanical stress (common use: machining such as gear cutting tools, inserts, some punching and die cast)

obr.3-9 Povlaky firmy Dayton Coating Technologies [26]

## 4 Návrh experimentů

Základem před návrhem experimentu bylo důkladné promyšlení toho, co bylo od experimentu požadováno. Tím bylo zjištění vlivu úpravy mikrogeometrie a nanesení povlaků na cermetové vyměnitelné břitové destičky. Vliv se měl zkoumat s ohledem na trvanlivost a řezivost.

Všechny experimenty, které byly pro tuto diplomovou práci provedeny, se uskutečnily v halových laboratořích ZČU FST katedry KTO. Strojem použitým pro obrábění bylo vertikální obráběcí centrum MCV 750A, na kterém se frézovalo pomocí speciální dvoubřité frézovací hlavy o průměru 32 mm. Jako řezný materiál byly použity kruhové cermetové vyměnitelné břitové destičky od firmy Ceratizit s označením TCN 54. Na těchto VBD byly použity povrchové úpravy. U vyměnitelných břitových destiček bylo také před provedením samotného experimentu proměřeno několik parametrů jako přesné proměření poloměru zaoblení ostří nebo drsnost VBD na čele. První materiál, na kterém byl experiment prováděn, byla kalená nástrojová ocel ČSN 19 663. Od frézování této oceli muselo být později odstoupeno, jelikož při následné tepelné úpravě došlo k destrukci tohoto materiálu. Druhým materiálem, byla kalená nástrojová ocel s označením ČSN 19 436, na tomto materiálu se již v minulých letech na KTO experimenty s cermety prováděly. Během experimentu byly postupně nastavovány, různé řezné podmínky, aby byly nalezeny nejvhodnější. S těmito řeznými podmínkami byl poté experiment dokončen.

Součástí experimentu bylo postupné sousledné frézování materiálu a současné sledování a zaznamenávání vzniklých řezných sil, průběhu otupování řezné hrany, trvanlivosti vyměnitelné břitové destičky, drsnost a tvrdost obrobené plochy. Cílem experimentu bylo navrhnout optimálních řezných podmínek, při kterých mohl být experiment dokončen a při kterých došlo k samotnému zhodnocení jednotlivých VBD podle úprav, které na nich byly provedeny.

### 4.1 Obrábění materiálu ČSN 19 663

Prvním materiálem, na kterém se testovalo, byl materiál ČSN 19 663, pro tento materiál byl experiment rozdělen do dvou základních fází.

#### 4.1.1 První fáze experimentu pro obrábění materiálu ČSN 19 663

První částí experimentu bylo sledování velikosti řezných sil a trvanlivosti v závislosti na změně řezných podmínek. Částečně se vycházelo z již známých řezných podmínek, které byly použity pro obrábění na experimentu do diplomové práce Josefa Hodánka na téma Vliv povrchových úprav cermetových VBD na řezivost nástroje při obrábění kalených nástrojových ocelí. Použité řezné podmínky byly následující:  $v_c = 450$  (400, 500, 750, 800) m/min;  $f_z = 0,05$  mm/zub;  $a_p = 1$  (0,5) mm;  $a_e = 1,5$  mm

#### 4.1.2 Druhá fáze experimentu pro obrábění materiálu ČSN 19 663

Ve druhé části experimentu se vybíraly nejlépe vyhovující řezné podmínky, avšak materiál se choval při obrábění nestále a to jak z pohledu na trvanlivost, tak i z pohledu řezných sil. Proto byl experiment přerušen a na materiálu byla provedena zkouška tvrdosti. Tato zkouška ukázala, že materiál má v různých místech jinou hodnotu tvrdosti. Materiál musel být tedy znovu tepelně zpracován, při tom však bohužel došlo k destrukci materiálu a ten byl dále nepoužitelným.



obr.4-1 Materiál ČSN 19 663 po destrukci

## 4.2 Obrábění materiálu ČSN 19 436

Druhým materiálem, byl materiál ČSN 19 436. Experiment na tomto materiálu byl proveden z důvodu destrukce materiálu ČSN 19 663. Experiment byl rozdělen do tří fází.

### 4.2.1 První fáze experimentu pro obrábění materiálu ČSN 19 436

V první fázi experimentu bylo zjištění optimálních řezných podmínek, při kterých byl experiment proveden. V případě obrábění tohoto materiálu byla výhodou skutečnost, že přímo na tomto materiálu byl proveden experiment Josefa Hodánka do jeho diplomové práce. Řezné podmínky byly tedy přibližně známy. Jednalo se o následující řezné podmínky:  $v_c = 450$  m/min;  $f_z = 0,05$  mm/zub;  $a_p = 1$  mm;  $a_e = 1,5$  mm. S těmito řeznými podmínkami byly vyzkoušeny neupravené VBD určené pro experiment do této diplomové práce i VBD, které používal pro své experimenty Josef Hodánek. Tyto pokusy byly provedeny z důvodu zjištění, zda se novější a starší cermetové VBD chovají stejně. Bylo zjištěno, že nové VBD dosahují nižší trvanlivosti než starší VBD. Nové VBD byly otestovány i při následujících jiných řezných podmínkách:  $v_c = 400$  (500, 800) m/min,  $f_z = 0,05$  mm/zub;  $a_p = 1$  (0,5) mm;  $a_e = 1,5$  mm. Po provedení těchto testů bylo zjištěno, že se nové VBD chovají podobně jako starší VBD, ale trvanlivost je u nich nepatrně nižší. Bylo usouzeno, že nové VBD jsou s největší

pravděpodobností méně kvalitní. Jako nejlépe vyhovující řezné podmínky z hlediska trvanlivosti byly zvoleny tyto:  $v_c = 450$  m/min;  $f_z = 0,05$  mm/zub;  $a_p = 1$  mm;  $a_e = 1,5$  mm.

#### 4.2.2 Druhá fáze experimentu pro obrábění materiálu ČSN 19 436

Ve druhé fázi experimentu již byly testovány VBD, na kterých byly provedeny různé povrchové úpravy. Při testování těchto VBD se sledovaly velikosti řezných sil, opotřebení, trvanlivosti a také dosažená drsnost povrchu obrobku.

#### 4.2.3 Třetí fáze experimentu pro obrábění materiálu ČSN 19 436

Poslední částí experimentu bylo vybrání VBD s nejlepšími vlastnostmi a tyto VBD byly otestovány při řezných podmínkách s vyšší řeznou rychlostí:  $v_c = 800$  m/min;  $f_z = 0,05$  mm/zub;  $a_p = 1$  (0,5) mm;  $a_e = 1,5$  mm.

### 4.3 Stroj

Veškeré obrábění v tomto experimentu se provádělo na vertikálním obráběcím centru MCV 750 A. Tento stroj je součástí vybavení halové laboratoře KTO ZČU a je na něm možno provádět frézovací, vrtací či vyvrtávací operace. Výrobce tohoto obráběcího centra je firma KOVOSVIT Sezimovo Ústí. Podrobné informace o stroji jsou uvedeny v příloze č.1.

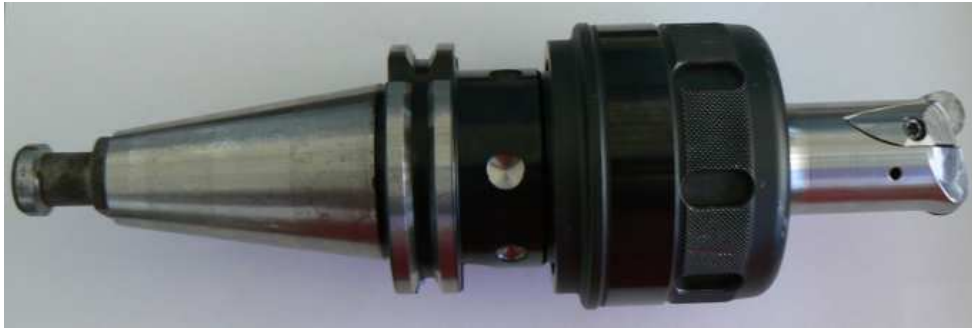


obr.4-2 Obráběcí centrum MCV 750 A [11]

### 4.4 Nástroj

Jako nástroj, byla použita frézovací hlava o průměru 32 mm, tato frézovací hlava je dvoubřitá a je určena pro kruhové VBD o průměru 12,025 mm. Při experimentu byl v záběru vždy jen jeden břit, druhá VBD byla ubroušena a byla upnuta v nástroji pouze z důvodu vyvážení nástroje. Nástroj měl negativní geometrii, kdy axiální úhel čela byl  $\gamma_A = -13^\circ$  a radiální úhel čela  $\gamma_R = -16^\circ$ . Podrobnější informace o nástroji jsou uvedeny v příloze č.2.





obr.4-3 Frézovací hlava pro experiment [11]

#### 4.5 Použité VBD

Pro experiment byly použity cermetové vyměnitelné břitové destičky od firmy Ceratizit s označením TCN 54. Tyto VBD měly kruhový tvar o průměru 12,025 mm, kdy úhel čela  $\gamma$  a úhel hřbetu  $\beta$  byly rovny nule. Na těchto VBD byly provedeny různé úpravy mikrogeometrie jako mokré pískování, suché pískování, omílání v kombinaci s tenkými vrstvami TiAlSiN nebo CrAlSiN. Pro obrábění byly použity VBD s těmito různými kombinacemi povrchových úprav a všechny tyto kombinace navíc pro dvě drsnosti VBD ( $R_a$  0,2  $\mu\text{m}$  a  $R_a$  0,8  $\mu\text{m}$ ). Pro snazší orientaci byly tyto destičky očíslovány a byla vytvořena tabulka (Tab.4-1), ve které je křížkem označena úprava provedená, ve sloupci s  $R_a$  je drsnost povrchu VBD podle výrobce. Dále je v tabulce popsána hodnota velikosti zaoblení ostří před úpravou mikrogeometrie a hodnota po úpravě.

K těmto různým kombinacím úprav byly v experimentu použity také VBD bez úpravy pro  $R_a$  0,2 (VBD 22 a VBD 23) a pro  $R_a$  0,8 (VBD 51 a VBD 52) a VBD z první série výrobní várky, které byly použity při experimentu do diplomové práce Josefa Hodánka. VBD z původní výrobní dávky byly použity především z důvodu zvolení řezných podmínek a do hlavní části experimentu nebyly použity. Celkem bylo tedy pro experiment použito 24 různých kombinací úprav na VBD. Úpravy včetně deposice cermetových VBD pomocí metody PVD zajistila firma SHM s.r.o., sídlící v Šumperku.



obr.4-4 Příklad cermetových kruhových VBD použitých pro experiment

Tab.4-1 Označení úprav na VBD

Číslo vzorku	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Výchozí radius [ $\mu\text{m}$ ]	Radius po úpravě [ $\mu\text{m}$ ]	Suché pískování	Mokrě pískování	Omytí	CrAlSiN	TiAlSiN
1	0,2	19,4	24,4		X			
2	0,2	27,6	27,6		X			
3	0,2	10,2	21,2		X		X	
4	0,2	22,2	23,3		X		X	
5	0,2	21,2	22,7		X			X
6	0,2	20	22,6		X			X
7	0,2	20	28,3	X				
8	0,2	22,3	28,3	X				
9	0,2	16,6	23,8	X			X	
10	0,2	22,8	28,4	X			X	
11	0,2	22,1	24,4	X				X
12	0,2	24,6	27,1	X				X
13	0,2	21,1	23,7			X		
14	0,2	28,5	28,5			X		
15	0,2	25,1	26,1			X	X	
16	0,2	22,8	26,8			X	X	
17	0,2	19,3	20,1			X		X
18	0,2	20,7	24,1			X		X
19	0,2	20,5	20,5				X	
20	0,2	27,7	27,7				X	
61	0,8	15,9	18,7		X			
62	0,8	14,6	21,5		X			
63	0,8	17,3	18,5		X		X	
64	0,8	20,6	21,8		X		X	
65	0,8	16,4	22,2		X			X
66	0,8	15,3	20		X			X
67	0,8	14,5	20,8	X				
68	0,8	18,2	20,8	X				
69	0,8	11,7	20	X			X	
70	0,8	16,8	18,9	X			X	
71	0,8	15,9	21,2	X				X
72	0,8	18,6	22,8	X				X
73	0,8	26,9	27,4			X		
74	0,8	13	22			X		
75	0,8	18,3	18,6			X	X	
76	0,8	13	19,2			X	X	
77	0,8	14	19,7			X		X
78	0,8	12,1	17,9			X		X
79	0,8	18,4	18,4				X	
80	0,8	16,6	16,6				X	

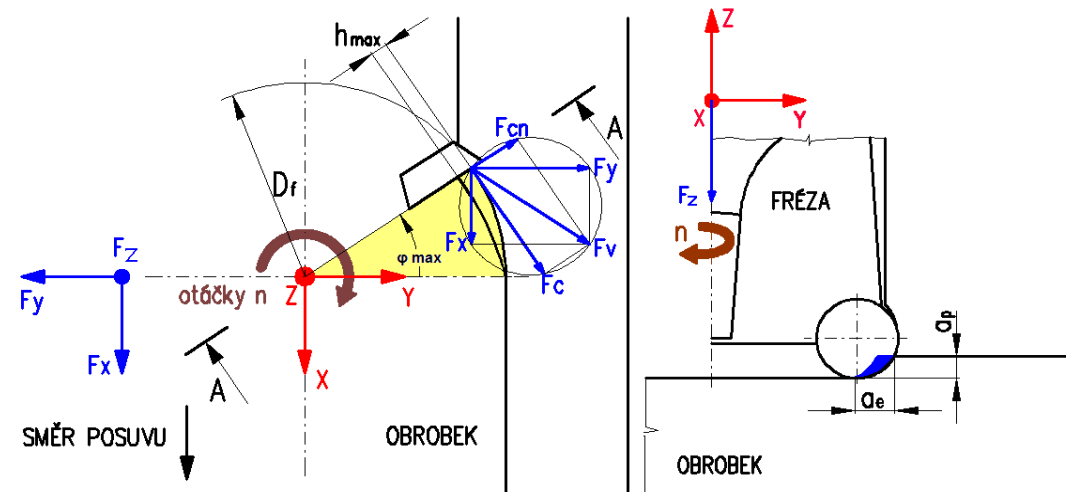
## 4.6 Řezné podmínky

Řezné podmínky pro experiment byly zvoleny podle zkušeností z měření Josefa Hodánka a následně přezkoušeny zda mají nové VBD podobné vlastnosti jako VBD použité v dřívějším experimentu. Kombinace řezných podmínek byly tedy následující:

- řezná rychlost  $v_c$  : 450 (400, 500, 750, 800) m/min
- posuv na zub  $f_z$ : 0,05 mm/zub
- hloubka řezu  $a_p$  : 1 (0,5) mm
- šířka řezu  $a_e$  : 1,5 mm
- obrábění probíhalo bez použití procesních kapalin

## 4.7 Záběrové podmínky

Záběrové podmínky použité v experimentu jsou schématicky znázorněny na následujícím obrázku:



obr.4-5 Schématické znázornění záběrových podmínek použitých v experimentu [12]

## 4.8 Obráběný materiál ČSN 19 663

Experiment byl proveden na dvou materiálech, prvním byla nástrojová ocel ČSN 19 663 (EN ISO 55NiCrMoV7). Tato ocel se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály, její tvrdost se pohybuje okolo 52 HRC. Jedná se Nikl - chrom - molybden - vanadovou ocel, která se kalí v proudu vzduchu nebo v oleji. Ocel vykazuje vysokou tvrdost po kalení, dobrou houževnatost a pevnost za tepla a dobrou odolnost proti popuštění. Z hlediska obrobitelnosti se tato nástrojová ocel řadí do třídy 9b. Další bližší specifikace materiálu jsou uvedeny v příloze č.3. [13]



obr.4-6 Materiál ČSN 19 663 při experimentu před destrukcí upnutý na dynamometru

#### 4.9 Obráběný materiál ČSN 19 436

Druhým materiálem použitým pro experiment byl materiál ČSN 19 436 (EN ISO X210Cr12) s tvrdostí 51 HRC. Jedná se o vysocelegovanou ledeburitickou chromovou ocel, která se také řadí do skupiny těžkoobrobitelných materiálů. To je způsobeno především vysokým obsahem uhlíku, který se během kalení přetváří na tvrdé karbidické částice, které způsobují při obrábění rychlé opotřebení nástroje. Z hlediska obrobitelnosti se tento materiál řadí do třídy 9b. Další bližší specifikace materiálu jsou uvedeny v příloze č.4. [10]



obr.4-7 Materiál ČSN 19 436 upnutý na dynamometru [10]

#### 4.10 Měření a vyhodnocování řezných sil

Při experimentu bylo jeho součástí měření vzniklých řezných sil. Pro toto měření byl použit přímý způsob měření pomocí tří-složkového piezoelektrického dynamometru od firmy Kistler. Bližší specifikace dynamometru použitého v experimentu jsou uvedeny v příloze č. 5.

#### 4.10.1 Soustava pro měření řezných sil

Pro měření řezných sil pomocí dynamometru byla použita soustava, která se skládala z následujících přístrojů:

- tří-složkový piezoelektrický dynamometr
- kabel pro přenos náboje z dynamometru do zesilovače
- zesilovač
- řadič
- měřící karta
- notebook se softwarem LabVIEW 8

Zapojení měřící soustavy bylo provedeno tak, že na pracovním stole frézovacího centra MCV 750 A byl upnut dynamometr s obráběným materiálem pomocí upínacích šroubů. K dynamometru byl připojen kabel pro přenos elektrického náboje (obr. 4-8).



obr.4-8 Tří-složkový piezoelektrický dynamometr s připojeným kabelem

Druhý konec kabelu pro přenos elektrického náboje byl připojen ze zadní strany do zesilovače. Na zesilovači musely být nastaveny na jednotlivých kanálech různé konstanty podle tabulky umístěné na řadiči. Dále se musela nastavit hodnota zesílení, která odpovídala nastavení softwaru LabVIEW v měřícím notebooku. Zesilovač z přední strany je zobrazen na obr.4-9 a ze zadní strany na pravém obr.4-10.



obr.4-9 Zesilovač

Zesilovač a řadič byli propojeny pomocí tří kabelů, k zesilovači byl také pomocí jednoho kabelu připojen ovladač pro reset signálu v soustavě. Na horní straně řadiče byl přepínač, jímž se volil režim, ve kterém se obrábělo, v našem případě frézování byl v poloze Fx. Řadič a jeho propojení je zobrazeno na obr.4-10.



obr.4-10 Řadič a jeho propojení se zesilovačem

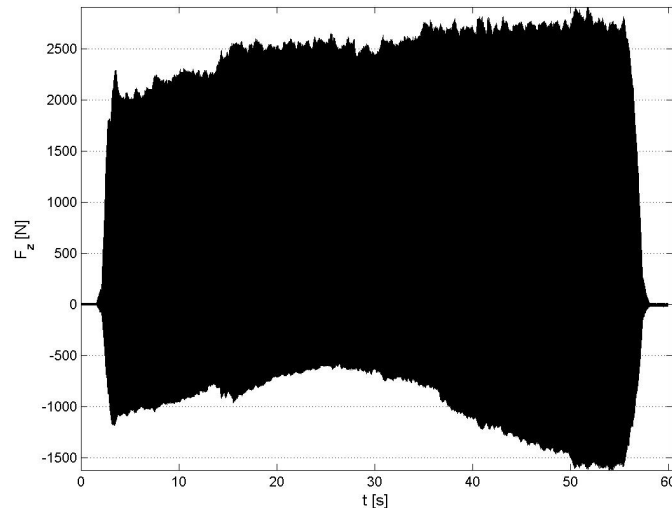
Z řadiče vycházel široký kabel pro připojení měřicí karty, která byla vsunuta do měřícího notebooku se softwarem LabVIEW 8 (obr.4-11).



obr.4-11 Notebook se softwarem LabVIEW 8 a měřicí karta

#### 4.10.2 Postup při vyhodnocování řezných sil

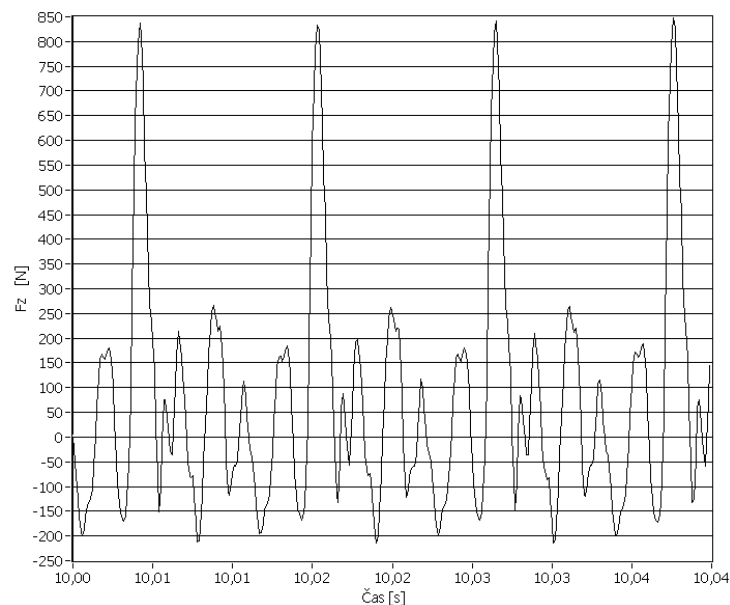
Po dokončení experimentu se všemi VBD bylo přikročeno k vyhodnocování řezných sil vzniklých při obrábění. Postup vyhodnocování sil byl takový, že nejprve se všechny soubory se záznamem řezných sil vzniklé v programu LabVIEW nechali převést pomocí programu Matlab na soubory typu obrázku, přičemž vznikly soubory s jednotlivými složkami řezné síly pro jednotlivé přejezdy. K tomuto kroku bylo přistoupeno z důvodu velkého množství naměřených dat a snazší orientaci v těchto souborech.



obr.4-12 Příklad záznamu složky řezné síly vzniklé v programu Matlab

Tyto soubory byly následně prostudovány a bylo přistoupeno k samotnému vyhodnocování velikosti řezných sil vzniklých při experimentu. Postup vyhodnocování byl následující:

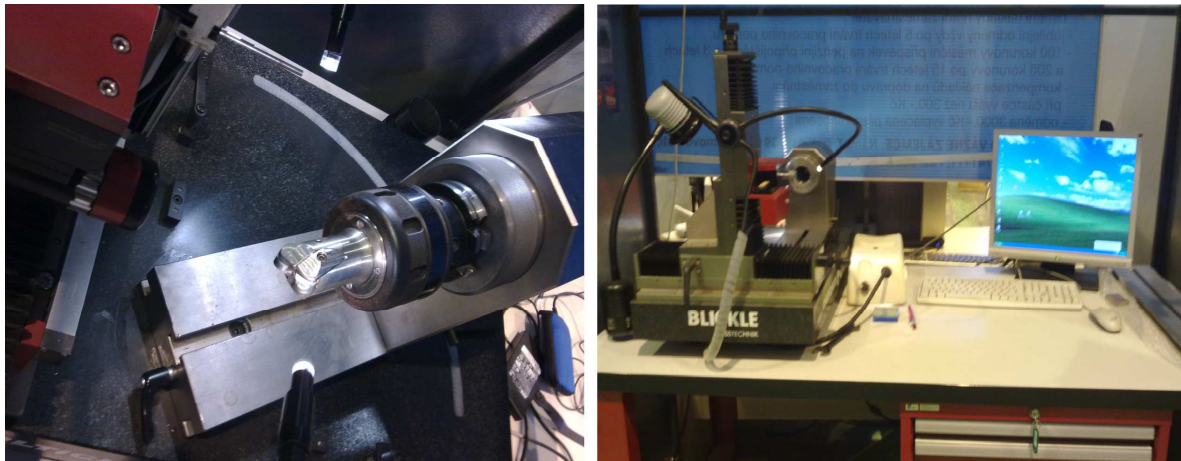
- Podle grafů vzniklých v programu Matlab byla vybrána místa (čas), ve kterých došlo k pečlivějšímu rozboru složek řezné síly
- Vyhodnocení jednotlivých složek řezné síly bylo vždy na začátku záznamu (10s), uprostřed záznamu (30s) a na konci záznamu (50s).
- V programu LabVIEW byly všechny složky řezné síly přiblíženy v časovém intervalu 0,05 sekundy, čímž byly vidět jednotlivé záběry bříty při obrábění. Tyto záznamy se mezi jednotlivými složkami porovnávaly, tím došlo k přesnému zjištění, v jakém místě byl břit v záběru, a mohlo dojít k odečtení velikosti jednotlivých složek řezné síly.
- Tyto velikosti řezných sil byly zapsány do tabulky v programu MS Excel, ve kterém byly také zpracovány.



obr.4-13 Přiblížený záznam složky řezné síly Fz

## 4.11 Měření opotřebení

Kromě měření řezných sil se na každé testované VBD měřila také hodnota opotřebení a čas trvanlivosti. Opotřebení se měřilo na prvních testovaných VBD po prvním popřípadě po druhém přejezdu, následně pak po čtyřech přejezdech. U upravených VBD se první měření provádělo po čtyřech přejezdech a každé další opět po čtyřech přejezdech nebo v závislosti na průběhu opotřebení či na emisi hluku. Měření opotřebení se provádělo na hřbetu VBD, jako kritériální rovnoměrné opotřebení bylo  $V_{Bkrit} = 200 \mu\text{m}$ , v případě vzniku vrubu bylo  $V_{BNkrit} = 500 \mu\text{m}$ . Všechna měření opotřebení probíhala na optickém mikroskopu Multicheck PC 500, kdy byl zvolen objektiv se zvětšením 75x. Nástroj byl upnut v upínači měřicího zařízení a byl vůči snímacímu objektivu pootočen o  $60^\circ$  z důvodu přesnějšího měření.



obr.4-14 Upnutý nástroj při měření velikosti opotřebení (vlevo) a sestava pro měření opotřebení Multicheck PC 500

## 4.12 Měření drsnosti

Pro každou VBD byla také v průběhu experimentu měřena drsnost dosaženého povrchu. Drsnost se měřila vždy po dosažení kritériální hodnoty opotřebení. Znalost velikosti dosažené drsnosti obrobeného povrchu je pro cermetové nástroje velmi důležitá a to především z důvodu nasazení těchto nástrojů při dokončovacích operacích. Při měření se braly v úvahu především parametry  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_t$ . Jako měřicí přístroj pro měření drsnosti byl použit moderní přístroj Mahr MarSurf M300 od firmy Mahr GmbH. (obr.4-15).



obr.4-15 Přístroj Mahr MarSurf M300 pro měření drsnosti [15]



### 4.13 Měření zaoblení řezné hrany VBD

Během experimentu bylo přihlíženo také k velikosti zaoblení řezné hrany jednotlivých VBD. Hodnoty těchto zaoblení před jednotlivými úpravami i po těchto úpravách byly naměřeny firmou SHM, s.r.o. se sídlem v Šumperku. Pro měření zaoblení řezné hrany VBD bylo použito bezdotykové optické zařízení MikroCAD Lite od firmy GFMesstechnik GmbH. Veškeré naměřené protokoly z tohoto měření firma dodala spolu s upravenými destičkami. [16]



obr.4-16 Přístroj pro měření zaoblení řezné hrany MikroCAD Lite [16]

Pro porovnání dosažených hodnot byl použit také moderní přístroj, který se řadí mezi nejmodernější zařízení pro komplexní diagnostiku řezné hrany. Tímto měřicím zařízením bylo zařízení Alicona InfiniteFocus od firmy Alicona Imaging GmbH. Jedná se o optický 3D mikro souřadnicový systém pro měření tvaru a drsnosti. Může být použit také pro měření ploch a objemů. Při měření je zajištěna opakovatelná přesnost. [31]



obr.4-17 Přístroj pro měření zaoblení řezné hrany Alicona InfiniteFocus [31]

#### 4.14 Měření drsnosti VBD

Dalším měřeným parametrem při experimentu byla hodnota drsnosti na jednotlivých VBD a kvalita povrchu řezné hrany. Měření drsnosti bylo provedeno v laboratořích KTO, kdy byl nejprve použit měřicí přístroj pro měření drsnosti Mahr MarSurf M300, který byl z důvodu přesnosti měření nahrazen moderním laboratorním měřicím zařízením Hommel Etamic T8000 RC. Toto zařízení je flexibilním řešením pro měření geometrických tvarů, drsností a vlnitosti povrchu. Díky tomuto zařízení mohly být také vygenerovány měřicí protokoly a následně použity v této diplomové práci.[17]



obr.4-18 Měřicí zařízení Hommel Etamic T8000 RC pro měření drsnosti [17]

#### 4.15 Měření zaoblení řezné hrany

Kvalita zaoblení řezné hrany byla zkoumána na skenovacím elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA TS 5130 opět firmou SHM, s.r.o. se sídlem v Šumperku, která prováděla povrchové úpravy na VBD. Snímky byly pořízeny se zvětšením 500x a 1500x pod úhlem 10°. Veškeré fotografie pořízené při měření byly firmou opět poslány spolu s upravenými VBD a budou uvedeny v následující kapitole diplomové práce.



obr.4-19 Skenovací elektronový mikroskop TESCAN VEGA TS 5130 [16]

#### **4.16 Měření tloušťky VBD**

Z důvodu důkladného prozkoumání jednotlivých VBD bylo přistoupeno také k proměření tloušťky v jednotlivých místech po obvodu a u uprostřed VBD. Každá měřená VBD byla po obvodu rozdělena na 6 dílů. Měření probíhalo tak, že se VBD proměřila pomocí třmenového mikrometru v každém z označených dílů a také uprostřed. Tyto hodnoty se zanesly do tabulky v programu MS Excel a sloužily ke zhodnocení rovnoběžnosti ploch na VBD. K tomuto kroku se přistoupeno z důvodu vybrání VBD s nejlepšími parametry, aby v průběhu experimentu nedocházelo k pootáčení VBD upnutých v nástroji.

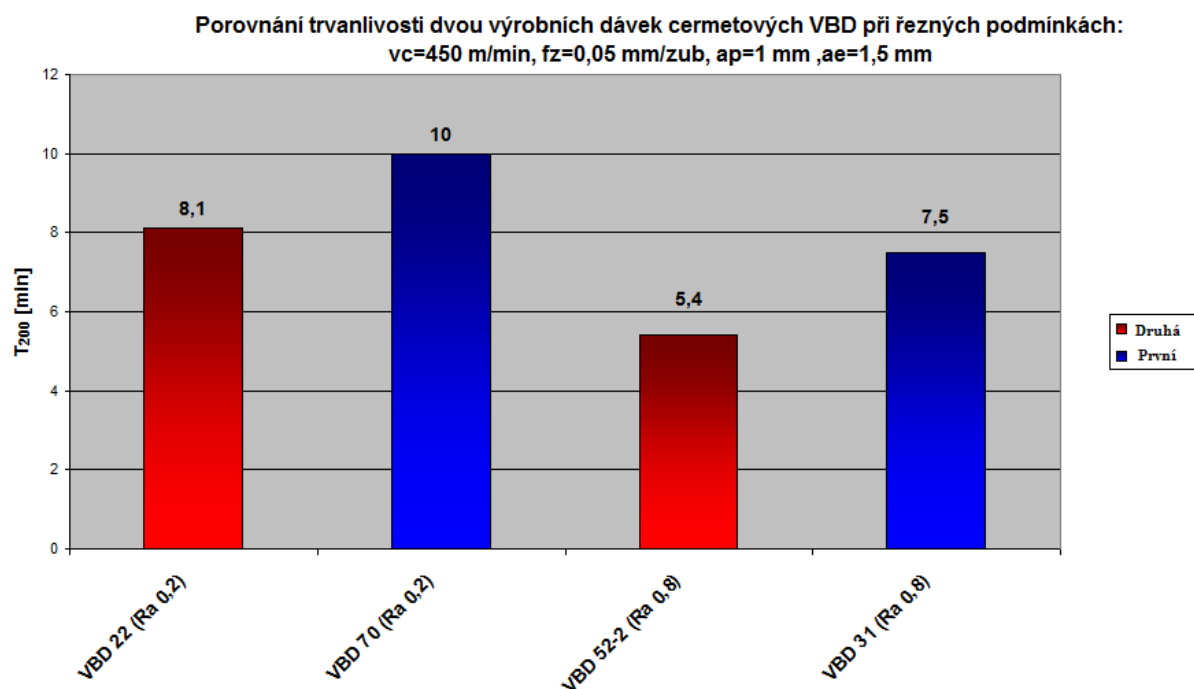
## 5 Vyhodnocení výsledků

V této části diplomové práce dochází k vyhodnocování výsledků získaných během experimentu. Mezi základní parametry zkoumané v této diplomové práci patří především vliv úpravy mikrogeometrie a povlaků na řezný proces při frézování kalené zápustkové oceli. Dojde zde tedy k rozebrání vlivu řezné rychlosti, řezných sil, jednotlivých úprav povrchu VBD, zaoblení řezné hrany či drsnosti povrchu VBD. Celkovým výsledkem vyhodnocení experimentu bude komplexní vliv jednotlivých vlivů na řezný proces. Na počátku experimentu byla hlavním materiálem nástrojová ocel ČSN 19 663, bohužel však při jejím opětovném tepelném zpracování došlo k destrukci polotovaru a muselo být přistoupeno k alternativnímu řešení v podobě materiálu s obdobnými vlastnostmi. Tímto materiálem byl materiál ČSN 19 436. Dále se tedy budou vyhodnocovat pouze výsledky získané při obrábění tohoto materiálu.

### 5.1 Řezné podmínky

V průběhu experimentu bylo testováno několik řezných rychlostí, přičemž byly použity neupravené řezné VBD, tzn pouze po broušení. Důvodem bylo porovnání dosažených opotřeбенí a trvanlivostí těchto VBD s VBD, které byly použity pro experiment Josefa Hodánka v jeho diplomové práci. Tento experiment byl proveden se stejným obráběným materiálem, pouze VBD byly z jiné výrobní várky. Při experimentu byly naměřeny hodnoty, které potvrdily podobnost vlastností VBD dvou výrobních dávek a díky tomu mohly být použity stejné řezné podmínky, které byly v diplomové práci Josefa Hodánka vybrány jako nejvýhodnější. Tyto řezné podmínky byly následující:  $v_c = 450$  m/min,  $f_z = 0,05$  mm/zub,  $a_p = 1$  mm,  $a_e = 1,5$  mm.

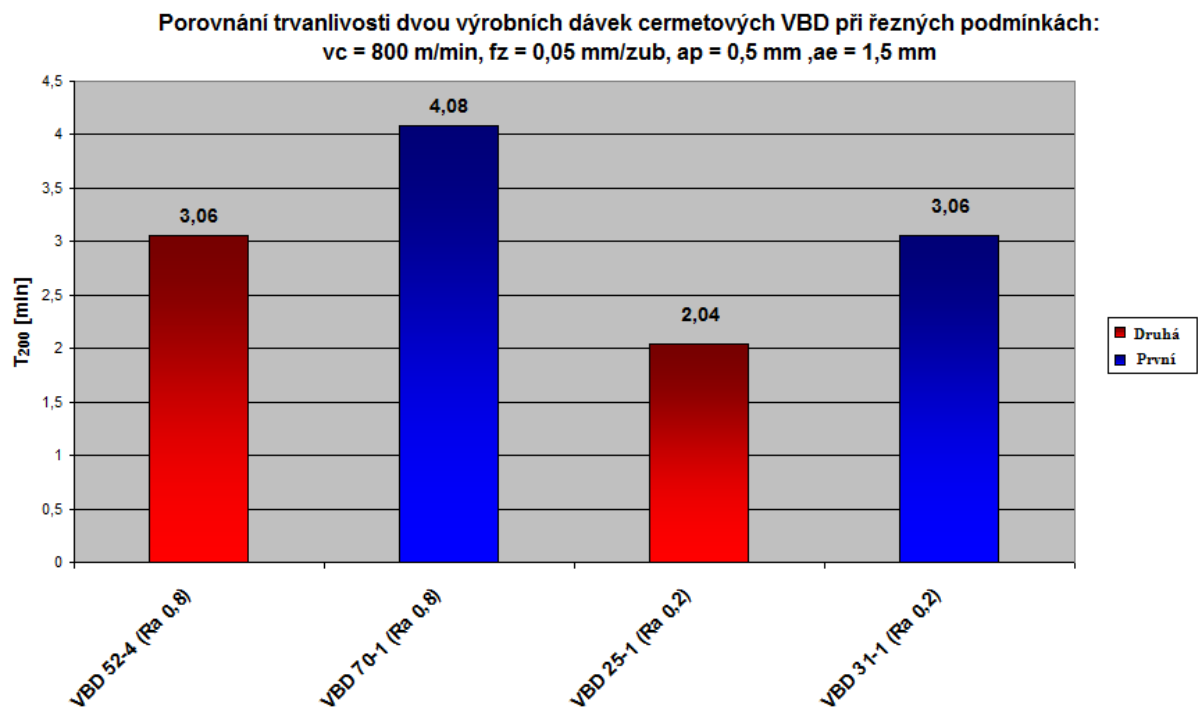
Z grafu na obr.5-1 je patrné, že první výrobní várka cermetových VBD dosahovala o něco vyšší trvanlivosti než VBD z výrobní várky novější, na nichž byl experiment proveden. Tato skutečnost může být důsledkem změny ve struktuře cermetových VBD.



obr.5-1 Graf porovnání dvou výrobních dávek cermetových VBD [10]

### 5.1.1 Řezná rychlost

Na začátku experimentu byla podle předchozího vyhodnocení vybrána řezná rychlost, která byla dodržena po celou dobu:  $v_c = 450$  m/min. Pro porovnání byl proveden ještě experiment s řeznou rychlostí  $v_c = 800$  m/min při hloubce řezu  $a_p = 0,5$  mm. Z grafu na obr.5-2 je patrný podobný rozdíl v trvanlivosti první a druhé výrobní dávky VBD obdobně jako v grafu na obr.5-1. Porovnáním hodnot trvanlivostí v těchto dvou grafech je zřejmé, že pro rychlost  $v_c = 800$  m/min jsou dosažené trvanlivosti několikanásobně nižší než pro řeznou rychlost  $v_c = 450$  m/min.



obr.5-2 Graf porovnání dvou výrobních dávek cermetových VBD

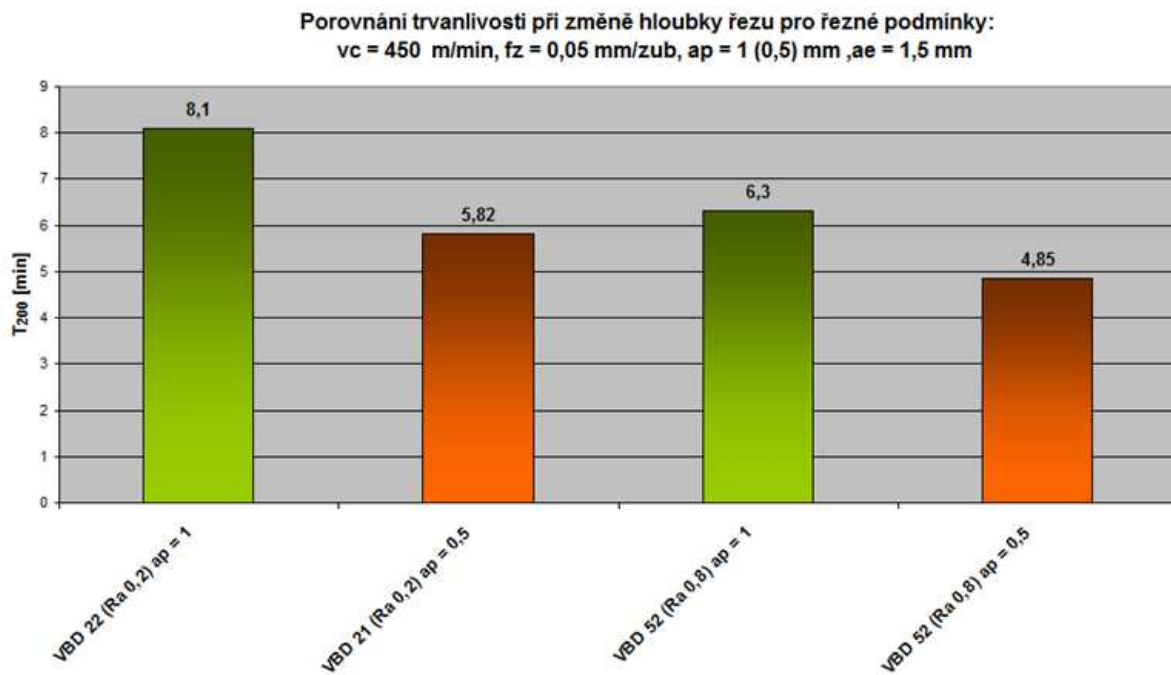
Při pohledu na řeznou rychlost lze také konstatovat, zda experiment probíhal v režimu HSC. Jelikož není jasně stanoveno při jakých konkrétních řezných podmínkách obrábění HSC probíhá, je nutno se na průběh obrábění podívat podrobněji. Prvním důkazem, že se jedná o obrábění HSC, je skutečnost, že během obrábění docházelo k rozžhavení v místě řezu a odletování žhavých třísek. Tento jev je typický právě pro obrábění v režimu HSC, jelikož při něm přechází největší část vzniklého tepla do třísky, která jej odvádí z místa řezu. Tato tříška je ovlivněna řadou tepelných vlivů a její struktura je velmi křehká.



obr.5-3 Vznikající rozžhavané třísky (vlevo) a křehké třísky vznikající v průběhu experimentu

### 5.1.2 Hloubka řezu

Velikost hloubky řezu se měnila pouze na počátku experimentu a to s neupravenými VBD. Důvodem bylo zjištění, zda se hlavní část experimentu s upravenými VBD bude provádět při hloubce řezu  $a_p = 1$  mm nebo při  $a_p = 0,5$  mm. Z grafu na obr.5-4 je patrné, že při hloubce  $a_p = 1$  mm bylo dosahováno vyšší trvanlivosti jak pro VBD s nižší drsností ( $R_a 0,2 \mu\text{m}$ ), tak i pro VBD s vyšší drsností ( $R_a 0,8 \mu\text{m}$ ). Proto byla zvolena hloubka řezu  $a_p = 1$  mm.



obr.5-4 Graf porovnání trvanlivosti VBD při změně hloubky řezu

## 5.2 Řezné síly

V průběhu experimentu byly pro všechny VBD naměřeny řezné síly. Pokaždé se jednalo o záznam jednotlivých složek řezné síly ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ). Souřadný systém dynamometru se shodoval se souřadným systémem stroje, rozdíl byl pouze ve znaménkách, jelikož osa z pro stroj směřovala v kladném směru směrem vzhůru, pro dynamometr však směrem dolů. Osa y v kladném směru pro stroj směřovala směrem dovnitř stroje, pro dynamometr tomu bylo naopak. Pouze osa x se v kladném směru shodovala jak pro stroj, tak i pro dynamometr:

$$F_x \text{ stroj} = F_x \text{ dynamometr}$$

$$F_y \text{ stroj} = -F_y \text{ dynamometr}$$

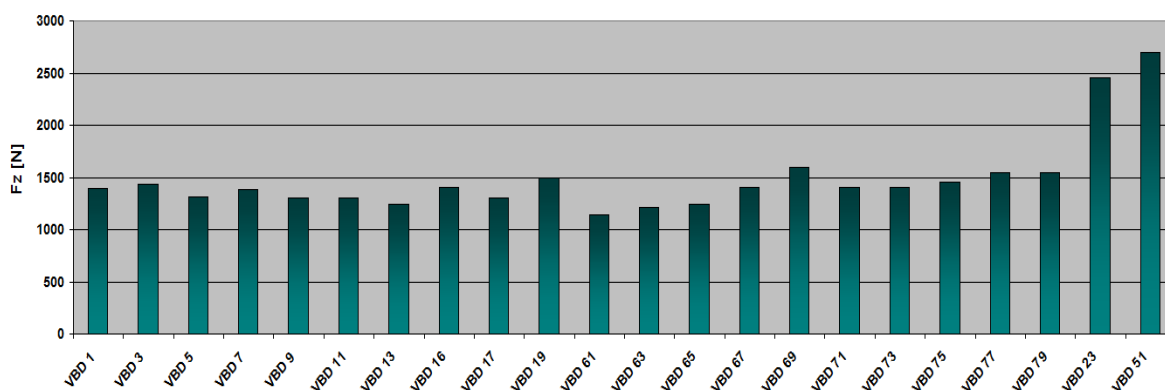
$$F_z \text{ stroj} = -F_z \text{ dynamometr}$$

Pro zaznamenávání do grafů se všechny vzniklé síly braly s absolutní hodnotou.

### 5.2.1 Složka Fz

Jako nejdůležitější složka řezné síly se brala složka Fz, jelikož tato složka řezné síly měla nejvyšší hodnotu a tudíž největší vliv na proces obrábění. Jelikož měl nástroj negativní geometrii, znamená to, že působením vysoké řezné složky docházelo k 'odtláčování' materiálu ve směru osy z. Na následujícím grafu je velikost zaznamenané složky Fz po 15ti vteřinách prvního přejezdu pro VBD s jednotlivými úpravami. Pro jednodušší orientaci v grafu jsou na ose x popsány VBD podle číselného označení, které odpovídá druhu úpravy, která byla na destičce provedena podle kapitoly 4.5 v této diplomové práci. V grafu na obr.5-5 můžeme vidět velikosti složky Fz pro jednotlivé VBD po 15ti vteřinách prvního přejezdu, v tomto čase měla na velikost sil stále vliv úprava provedená na jednotlivých VBD. Je zde patrné, že velká část VBD s různými úpravami měla podobnou velikost složky řezné síly Fz pohybující se mezi 1100 N - 1500 N. Největší rozdíl od této hodnoty mají poslední dvě VBD (VBD 23 a VBD 51), tyto VBD jsou pouze broušeny (VBD 23 na Ra 0,2  $\mu\text{m}$  a VBD 51 na Ra 0,8  $\mu\text{m}$ ).

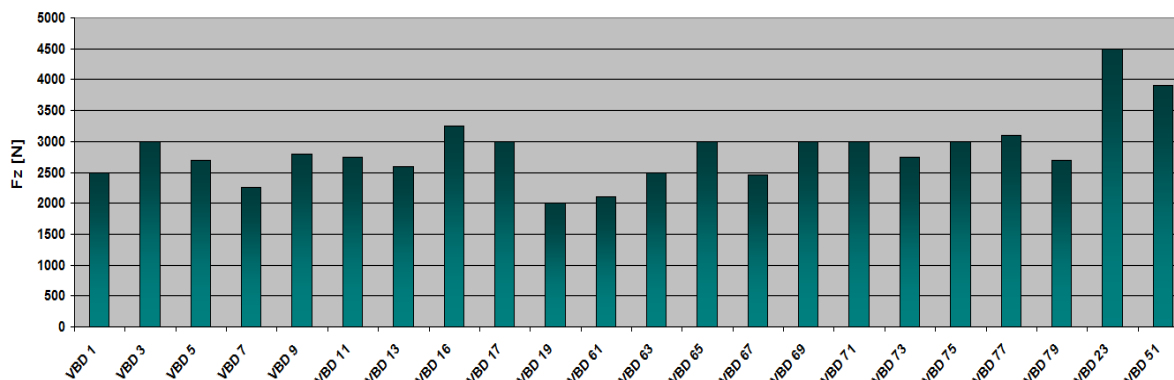
Velikost složky Fz po 15ti sekundách přejezdu při řezných podmínkách:  $v_c=450$  m/min,  $f_z=0,05$  mm/zub,  $a_p=1$  mm,  $a_e=1,5$  mm



obr.5-5 Graf porovnání složky řezné síly Fz pro jednotlivé VBD po 15ti vteřinách přejezdu

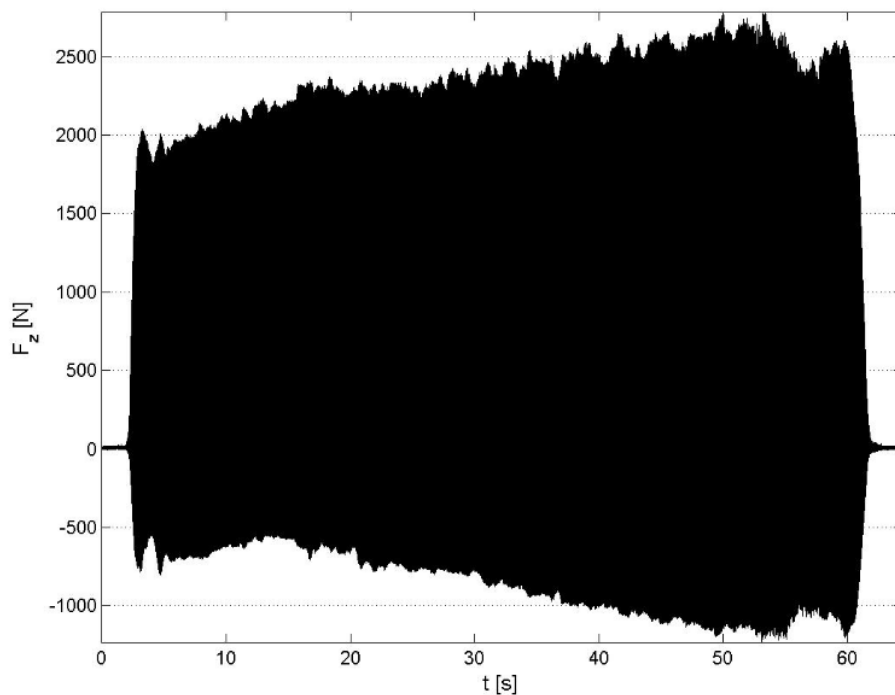
Na následujícím grafu na obr.5-6 jsou pro porovnání zobrazeny hodnoty vzniklých složek řezné síly Fz na konci trvanlivosti každé VBD. U velkého množství VBD jsou zde patrné větší rozdíly v hodnotách velikostí složek Fz než tomu bylo v grafu na obr.5-5. Tato skutečnost je následkem toho, že v této fázi trvanlivosti jednotlivých VBD již nemá takový význam povrchová úprava jednotlivých VBD a poloměr zaoblení řezné hrany.

Velikost složky Fz na konci trvanlivosti při řezných podmínkách:  $v_c=450$  m/min,  $f_z=0,05$  mm/zub,  $a_p=1$  mm,  $a_e=1,5$  mm



obr.5-6 Graf porovnání složky řezné síly Fz pro jednotlivé VBD na konci jejich trvanlivosti

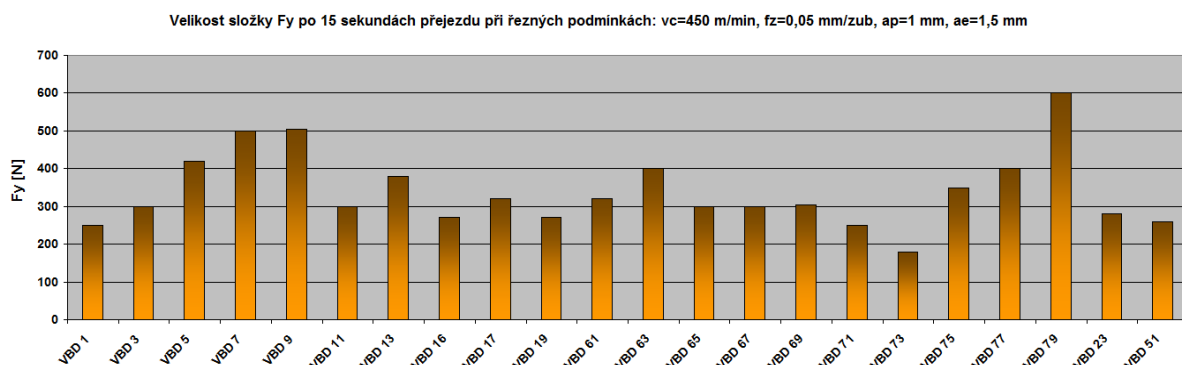
Na obr.5-7 je zobrazen typický průběh složky řezné síly  $F_z$  během jednoho přejezdu. Je zde vidět téměř plynulé zvyšování hodnoty  $F_z$ . Tento obrázek byl pořízen vyhodnocením pomocí softwaru Matlab.



obr.5-7 Typický průběh složky řezné síly  $F_z$

### 5.2.2 Složka $F_y$

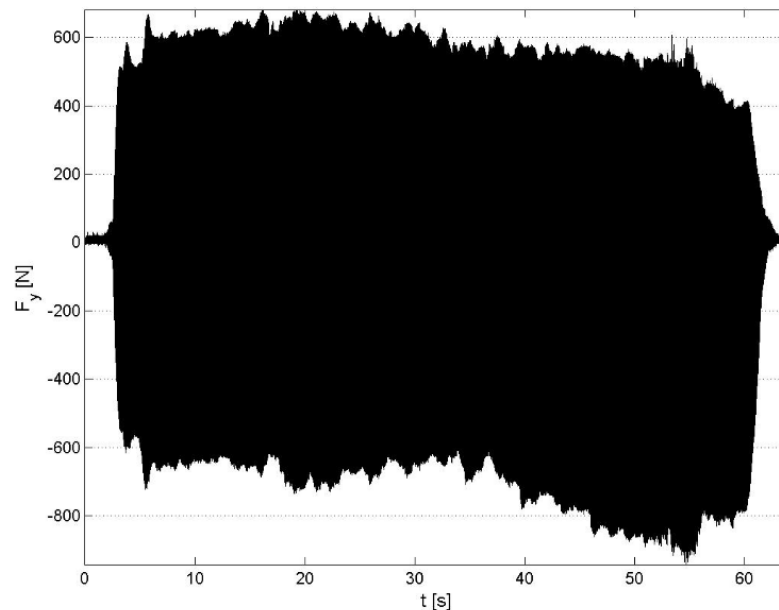
Další složkou řezné síly je složka  $F_y$ , tato složka se vyznačovala nejnižšími dosaženými hodnotami ze všech složek řezné síly. Na obr.5-8 je uveden graf s hodnotami velikostí složek  $F_y$  pro jednotlivé VBD. Je zde vidět, že hodnoty mají vyšší rozptýl, než tomu bylo v případě složky  $F_z$ . Také je zde možno vidět, že ani VBD bez úpravy nemají nejvyšší hodnoty, jako tomu bylo v případě složky  $F_z$ .



obr.5-8 Graf porovnání složky řezné síly  $F_y$  pro jednotlivé VBD po 15ti vteřinách přejezdu



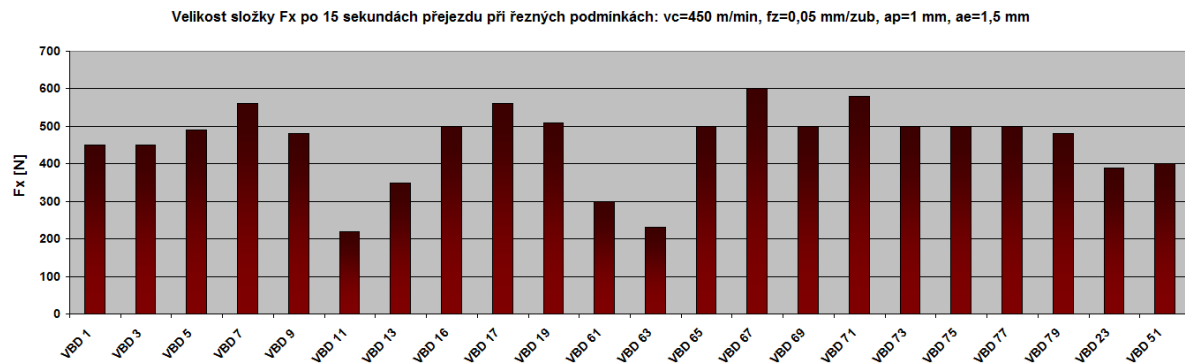
Na obr.5-9 je pro znázornění vyobrazen průběh složky řezné síly  $F_y$ . Typickým tvarem průběhu byl téměř symetrický tvar podle pomyslné osy v hodnotě 0 N.



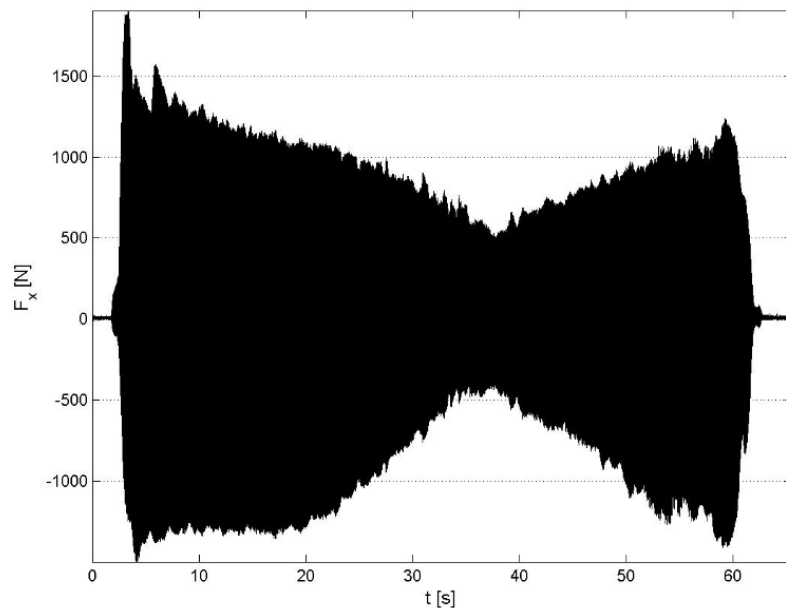
obr.5-9 Typický průběh složky řezné síly  $F_y$

### 5.2.3 Složka $F_x$

Poslední složkou řezné síly byla složka  $F_x$ . Tato složka se řadí k druhé nejdůležitější po složce  $F_z$ , jelikož se v ní promítá kvalita povrchu VBD a velikost zaoblení ostří. Právě velikost  $F_x$  roste s nižší kvalitou čela VBD a to především z důvodu, že po čele VBD odchází tříska. V případě nízké drsnosti v kombinaci s povrchovou úpravou VBD se velikost složky  $F_x$  snižuje. Pro případ vyhodnocování této složky řezné síly se musel brát ohled na zvláštní průběh této složky v průběhu přejezdu. Na obr.5-11 je vyobrazen záznam složky  $F_x$  v průběhu jednoho přejezdu. Tvar tohoto průběhu je charakteristický tím, že v prostřední části přejezdu dosahuje velikost složky  $F_x$  nejmenších hodnot a na začátku a konci přejezdu hodnot značně vyšších. Důvod tohoto průběhu, který byl zaznamenán pouze u řezné složky  $F_x$  se nadále zkoumá. Na obr. 5-10 je zobrazen graf s velikostmi složky řezné síly  $F_x$  pro jednotlivé VBD. Z tohoto grafu je patrné, že u většiny VBD byla naměřena podobná hodnota, pouze u několika VBD došlo k naměření nižších hodnot (VBD 11, VBD 13, VBD 61, VBD 63). U těchto VBD se dá pokles velikosti této složky řezné síly vysvětlit například vlivem drsnosti povrchu VBD nebo konkrétním druhem úpravy mikrogeometrie. V případě VBD 13 a VBD 61 došlo k naměření podobných hodnot i v případě VBD, jelikož bylo provedeno několik opakování a tím pádem by se nemělo jednat o vnesení chyby do měření. Jako vnesená chyba měření by se dalo brát v úvahu například elektrické rušení v měřící soustavě nebo nalepování třísky v průběhu obrábění, díky čemuž mohlo docházet ke změně geometrie nástroje. Jelikož třísky odletující z místa řezu nelétaly ve stále stejném směru, nelze tento jev vyloučit.



obr.5-10 Graf porovnání složky řezné síly  $F_x$  pro jednotlivé VBD po 15ti vteřinách přejezdu



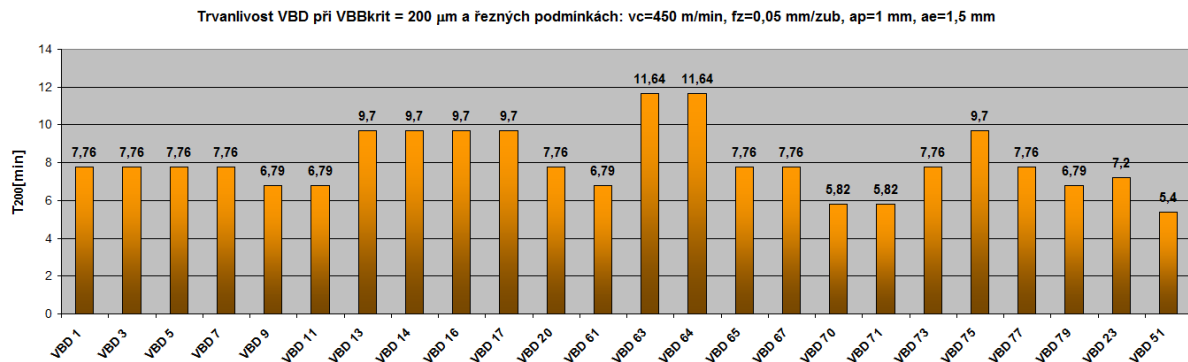
obr.5-11 Typický průběh složky řezné síly  $F_x$

### 5.3 Trvanlivost

Další částí vyhodnocení experimentu bylo porovnání dosažených trvanlivostí jednotlivých VBD v závislosti na úpravě mikrogeometrie popřípadě povrchové úpravě, která na nich byla provedena. K trvanlivosti se při vyhodnocování experimentu přihlíželo jako k jednomu z nejdůležitějších parametrů, jelikož právě v závislosti na čase lze jednotlivé parametry VBD dobře porovnávat. Na grafu na obr.5-12 jsou vybrané VBD, kdy byl vybrán vždy jeden představitel od každé úpravy. Z grafu je patrné, že časový rozptyl mezi jednotlivými VBD je značný, proto bylo vybráno pro další rozbor pouze 5 VBD s nejlepšími vlastnostmi. Podrobnější popis a vyhodnocení těchto vybraných VBD bude popsán v kapitole 5.9.1 této diplomové práce. Jako tyto VBD byly vybrány následující:

- VBD 14
- VBD 16
- VBD 17
- VBD 64
- VBD 75

Dále můžeme z grafu na obr.5-12 vidět, že nejhorší trvanlivosti dosáhla VBD s označením VBD 51. Tato VBD je pouze broušena na drsnost Ra 0,8. Druhá VBD bez úpravy s označením VBD 23 dosáhla trvanlivosti vyšší, ale v porovnání s ostatními upravenými VBD byla její trvanlivost relativně nízká. Nejlépe dopadly VBD, které byly upraveny metodou mokrého pískování s naneseným povlakem CrAlSiN. Druhou nejlepší úpravou z tohoto pohledu byla metoda omíláním v kombinaci s nanesenými povlaky CrAlSiN a TiAlSiN.



obr.5-12 Vybrané VBD a jejich velikost trvanlivosti

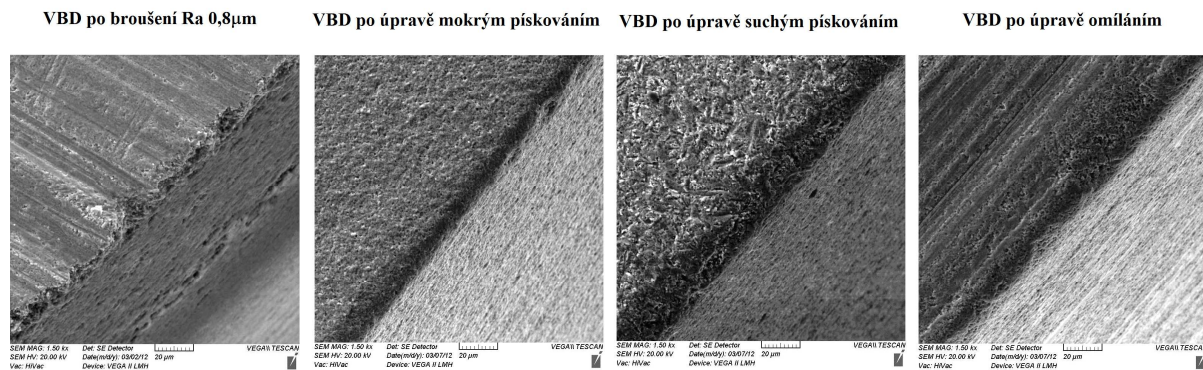
## 5.4 Rovinnost VBD

Částí přípravy experimentu bylo také měření rovinnosti jednotlivých VBD. Hlavním důvodem měření rovinnosti bylo z jistění z minulých let, že při nedostatečné rovinnosti VBD může docházet k samovolnému pootočení VBD upnuté v lůžku nástroje a ke zkreslení naměřených hodnot. Měření probíhalo tak, že se každá VBD rozdělila na šest částí po jejím obvodu a v těchto místech se proměřovala pomocí mikrometru šířka VBD. Sedmým místem byl střed VBD. Tyto hodnoty se zapsaly do tabulky kvůli přehlednosti.

Proměřeno bylo 70 VBD, přičemž pro experiment jich bylo vybráno pouze 48. Také naměřené hodnoty ukázaly, že novější VBD mají oproti starším lepší rovinnost. Největší odchylky se pohybovaly okolo 0,04 mm, u starší várky byly hodnoty odchylek tloušťky VBD po obvodu i dvojnásobné. Po proměření a vyhodnocení rovinnosti VBD byly vybrány VBD s nejlepšími hodnotami a tím došlo k eliminaci možnosti pootočení VBD v průběhu experimentu. Vybrané VBD se dále poslaly k povrchové úpravě.

## 5.5 Vliv úprav VBD na řezný proces

Na VBD použitých pro experimenty bylo provedeno několik úprav mikrogeometrie popřípadě nanesení tenkých vrstev. Tyto úpravy již byly zmíněny v kapitole 4.5 této diplomové práce. V této kapitole budou zmiňované úpravy popsány blíže a bude podrobněji popsán vliv úprav mikrogeometrie a povlaků na jednotlivých VBD. Z časových důvodů byly vybrány jen ty VBD, které vykazovaly nejlepší vlastnosti ze všech zkoušených z hlediska vzniklých řezných sil a dosažené trvanlivosti. Na obr.5-13 je příklad fotografií ze skenovacího elektronového mikroskopu jednotlivých provedených úprav.



obr.5-13 Fotografie zvětšené řezné hrany s různými úpravami mikrogeometrie

### 5.5.1 Vybrání nejvýhodnějších úprav

Po vyhodnocení trvanlivosti a velikosti sil vzniklých při obrábění jednotlivými VBD bylo vybráno 5 VBD, které dosahovaly nejlepších vlastností. Při výběru se bral ohled na to, jaké úpravy jsou na těchto VBD provedeny, aby byly vrány VBD s různými úpravami a mohlo tak dojít k jejich porovnání. Pro vybrané VBD byly vytvořeny různé závislosti, které budou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Jako VBD s nejlepšími vlastnostmi byly vybrány následující:

**VBD 14** - tato VBD byla upravena pomocí omílání a nebyla na ni nanášena žádná tenká vrstva. Před úpravou byla VBD broušena na Ra 0,2µm, přičemž po úpravě dosahovala drsnost VBD Ra 0,13µm. Poloměr zaoblení řezné hrany byl po úpravě 28,5µm.

**VBD 16** - tato VBD byla upravena pomocí omílání a byla na ni nanášena tenká vrstva CrAlSiN. Před úpravou byla VBD broušena na Ra 0,2µm, přičemž po úpravě dosahovala drsnost VBD Ra 0,17µm. Poloměr zaoblení řezné hrany byl po úpravě 26,8µm.

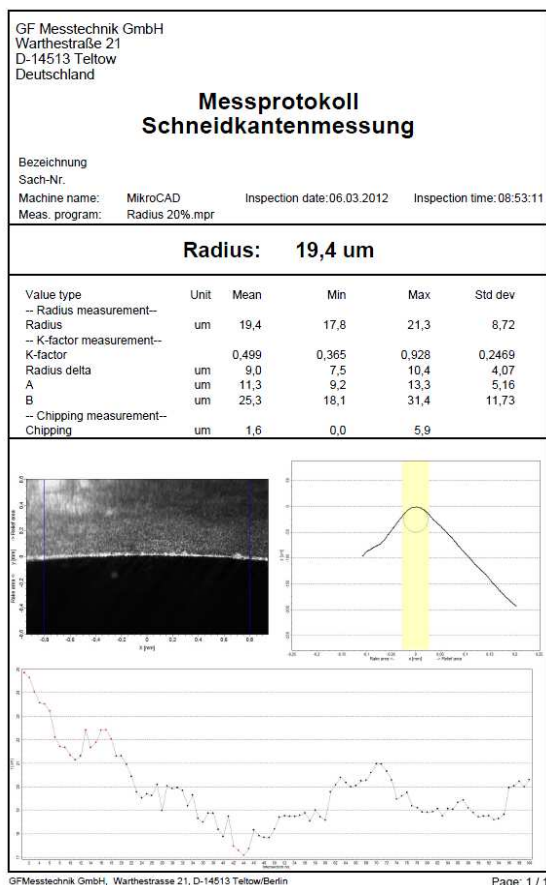
**VBD 17** - tato VBD byla upravena pomocí omílání a byla na ni nanášena tenká vrstva TiAlSiN. Před úpravou byla VBD broušena na Ra 0,2µm, přičemž po úpravě dosahovala drsnost VBD Ra 0,18µm. Poloměr zaoblení řezné hrany byl po úpravě 20,1µm.

**VBD 64** - tato VBD byla upravena pomocí mokřého pískování a byla na ni nanášena tenká vrstva CrAlSiN. Před úpravou byla VBD broušena na Ra 0,8µm, přičemž po úpravě dosahovala drsnost VBD Ra 1,02µm. Poloměr zaoblení řezné hrany byl po úpravě 21,8µm.

**VBD 75** - tato VBD byla upravena pomocí omílání a byla na ni nanášena tenká vrstva CrAlSiN. Před úpravou byla VBD broušena na Ra 0,8µm, přičemž po úpravě dosahovala drsnost VBD Ra 0,91µm. Poloměr zaoblení řezné hrany byl po úpravě 18,6µm.

### 5.5.2 Zaoblení řezné hrany

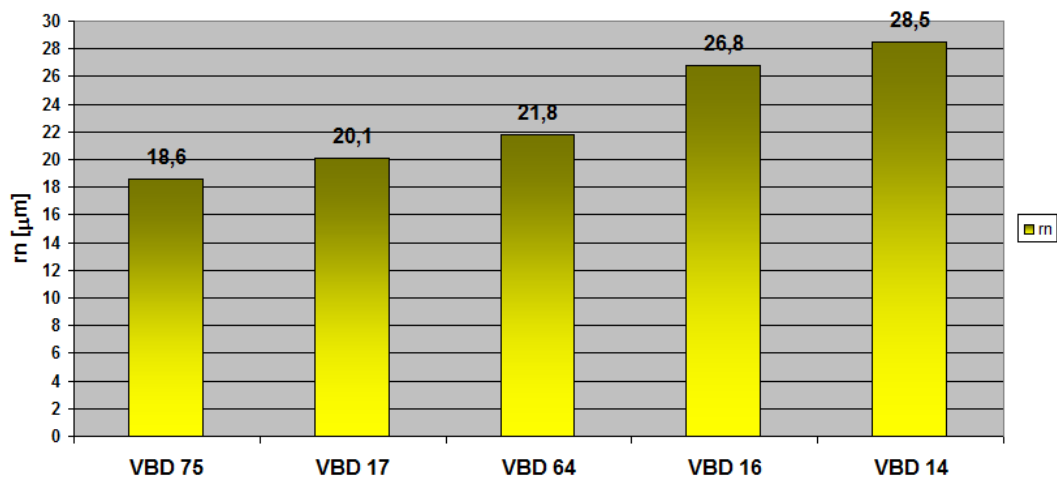
Proměření velikosti zaoblení řezné hrany bylo provedeno firmou SHM, s.r.o. se sídlem v Šumperku, která prováděla úpravu vzorků. Firma po proměření poslala protokoly z jednotlivých měření. Měření bylo provedeno za pomoci bezdotykového optického zařízení MikroCAD Lite. Na obr.5-14 je vyobrazen příklad zaslání protokolu. Tyto hodnoty se dále využívaly k vytvoření závislosti vlivu velikosti zaoblení řezné hrany na různé parametry jako například velikosti vzniklých řezných sil nebo drsnosti obrobené plochy.



obr.5-14 Protokol z měření zaoblení řezné hrany

Z časových důvodů řešení diplomové práce bylo k širšímu zkoumání vlivu velikosti zaoblení řezné hrany na řezný proces přihlíženo pouze u 5ti vybraných VBD. Tyto VBD byly vybrány v kapitole 5.3. U těchto VBD byl hodnocen vliv velikosti zaoblení řezné hrany v závislosti na několika parametrech, kterými byla dosažená drsnost nebo velikost složky řezné síly  $F_z$ . Na obr.5-15 je graf s hodnotami poloměru zaoblení ostří vybraných VBD, se kterými bylo provedeno podrobnější vyhodnocení.

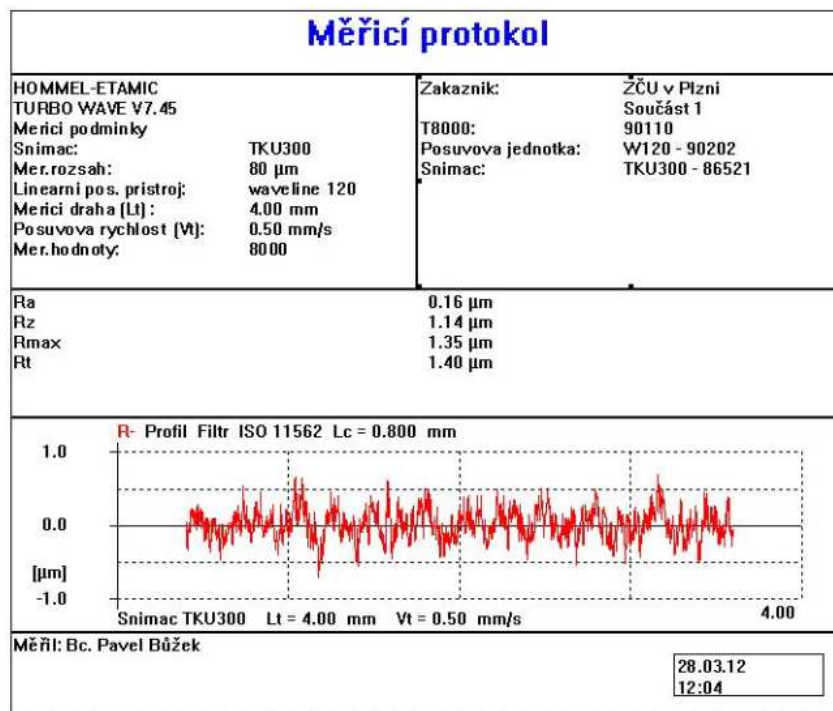
Hodnoty poloměru zaoblení ostří u jednotlivých VBD



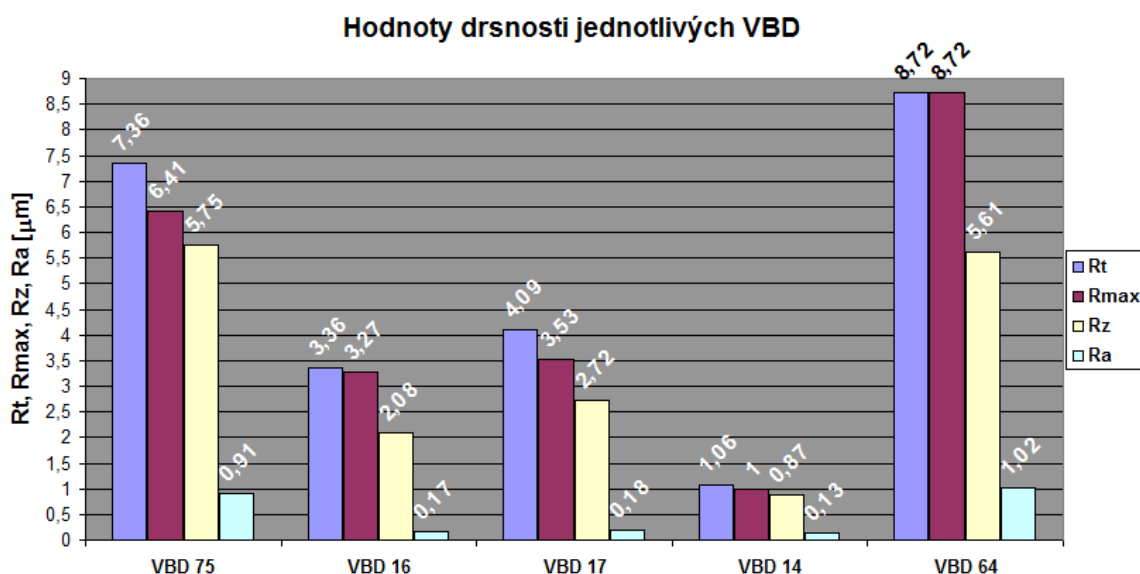
obr.5-15 Graf hodnot poloměru zaoblení ostří pro vybrané VBD

### 5.5.3 Drsnost povrchu VBD

Zaznamenávání drsnosti dosažené po dokončení trvanlivosti VBD bylo dalším měřítkem při vyhodnocování vlivu úprav povrchu na těchto VBD. Drsnost povrchu VBD byla proměřena v laboratořích Katedry KTO. Použito bylo moderní měřicí zařízení Hommel Etamic T8000 RC. Díky tomuto zařízení byly vygenerovány protokoly použité při vyhodnocování. Jako parametry byly brány Ra, Rz, Rt a Rmax. Příklad protokolu z měření drsnosti je na obr.5-16. Na grafu na obr.5-17 jsou poté zaznamenány hodnoty drsností povrchu VBD dosahujících nejvyšších trvanlivostí. U těchto VBD bude v kapitole 5.9.5 rozebrán vliv drsnosti povrchu VBD na velikost složky řezné síly  $F_x$ .



obr.5-16 Protokol z měření pomocí zařízení Hommel Etamic T8000 RC

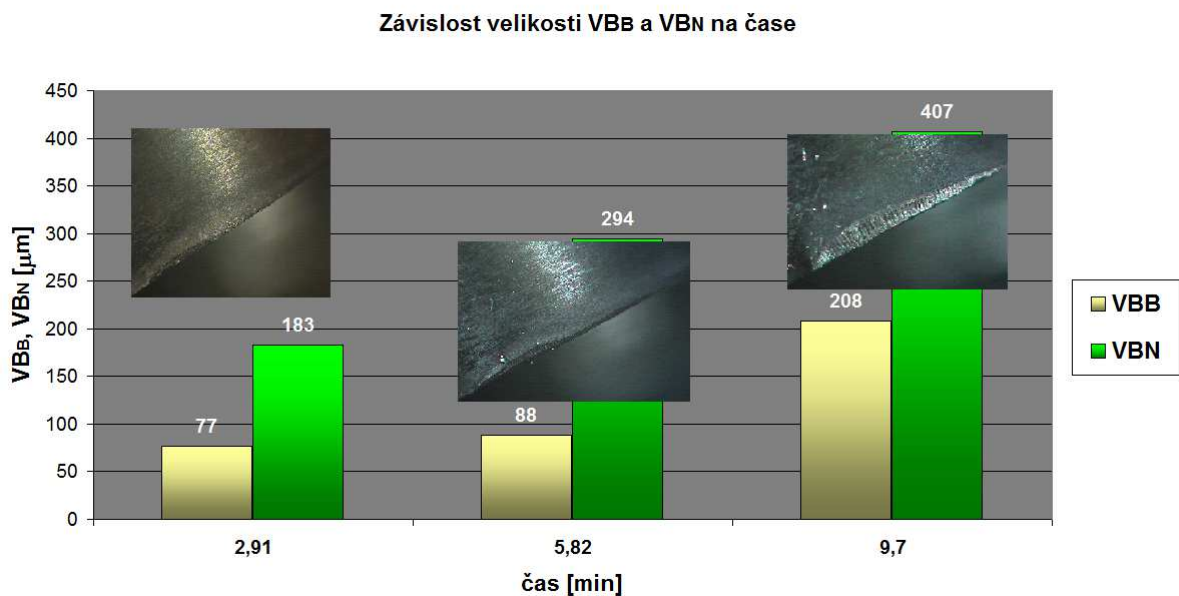


obr.5-17 Hodnoty drsností jednotlivých vybranými VBD

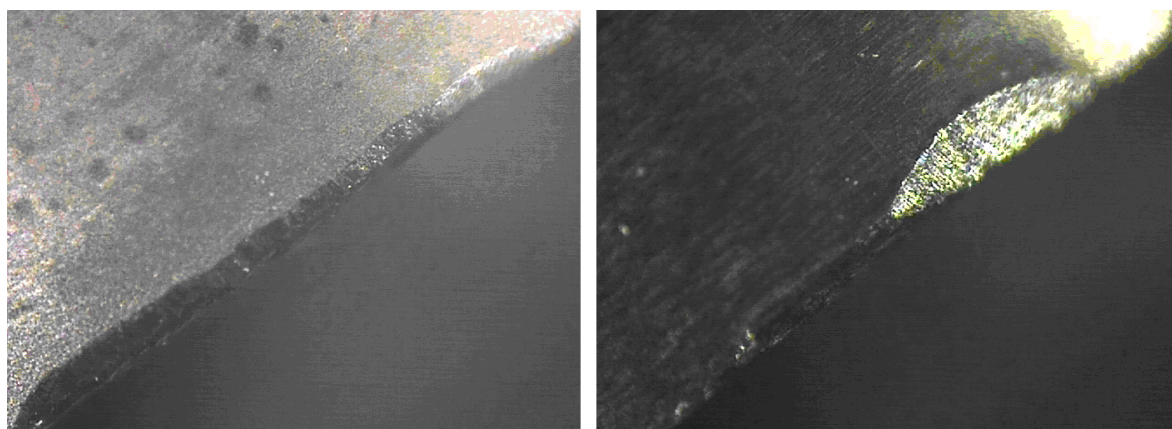
### 5.5.4 Opotřebení

Velikost a tvar opotřebení hřbetu VBD v průběhu experimentu byly základními parametry pro určení trvanlivosti nástroje. Jako kritériální rovnoměrné opotřebení bylo  $VB_{Bkrit} = 200 \mu\text{m}$  a jako kritériální opotřebení ve tvaru vrubu bylo  $VB_{Nkrit} = 500 \mu\text{m}$ . K měření sloužil optický mikroskop Multicheck PC 50, který je součástí halových laboratoří Katedry KTO. Pomocí tohoto měřicího zařízení bylo možno pořídit přesné náměry a fotografie velikostí a tvaru jednotlivých opotřebení.

Typický průběh opotřebení v závislosti na čase je zobrazen na obr.5-18. Na tomto obrázku je patrné, že opotřebení probíhalo od opotřebení rovnoměrného a ke konci trvanlivosti VBD se začalo objevovat opotřebení ve tvaru vrubu. Nejčastější tvar opotřebení, které v průběhu experimentu vznikalo, bylo opotřebení na obr.5-19 vlevo. Sklon k vytváření opotřebení ve tvaru vrubu měli spíše VBD broušené na vyšší drsnost, popřípadě na obr.5-19 vpravo je vidět, že vysoký sklon k tvorbě opotřebení ve tvaru vrubu měli VBD při vysoké řezné rychlosti ( $v_c = 800 \text{ m/min}$ ).



obr.5-18 Typický průběh opotřebení hřbetu v závislosti na čase



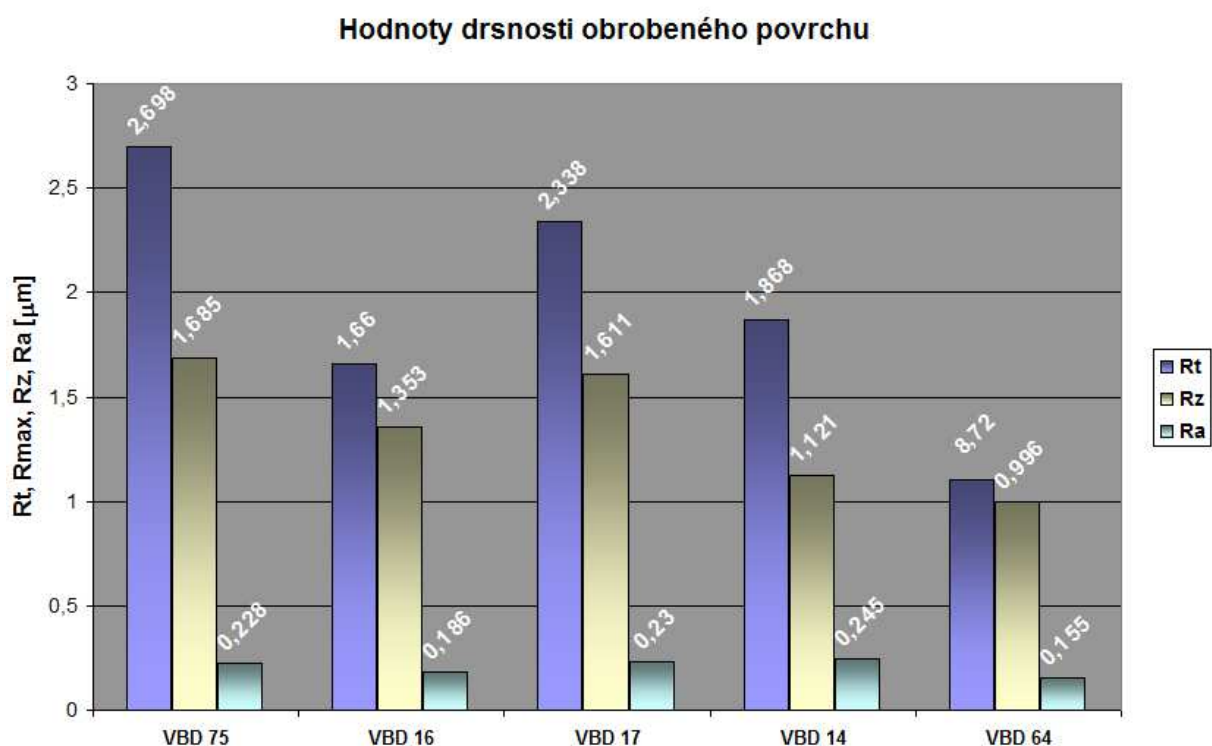
obr.5-19 Snímky opotřebení hřbetu typické pro  $v_c = 450 \text{ m/min}$  (vlevo) a  $v_c = 800 \text{ m/min}$

### 5.5.5 Drsnost obrobené plochy

Po ukončení trvanlivosti jednotlivých VBD vždy došlo k proměření drsnosti obrobeného povrchu. Měřenými parametry byly hodnoty Ra, Rz a Rt ze zařízení Mahr MarSurf M300. V grafu na obr.5-20 jsou zobrazeny hodnoty naměřených drsností pro blíže zkoumané VBD v závislosti na trvanlivosti dosažené těmito VBD.

Tab.5-1 Hodnoty dosažených drsností obráběného povrchu

Označení VBD	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]
VBD 75	0.228	1.685	2.698
VBD 16	0.186	1.353	1.66
VBD 17	0.23	1.611	2.338
VBD 14	0.245	1.121	1.868
VBD 64	0.155	0.996	1.105



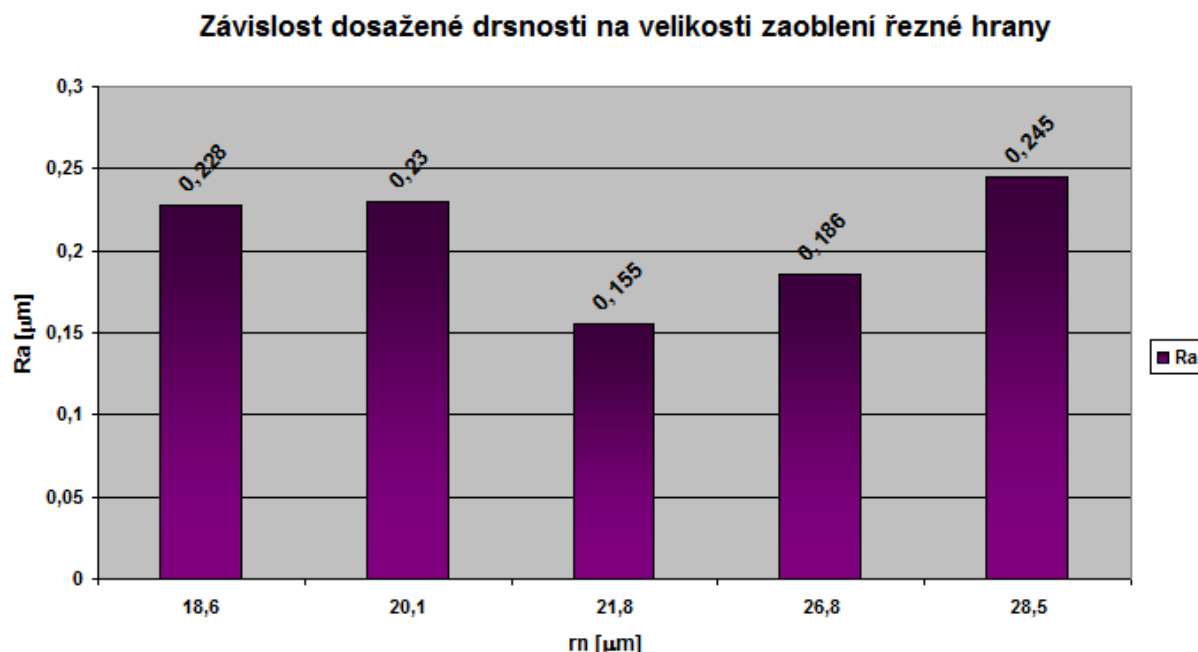
obr.5-20 Hodnoty drsností povrchu dosažených jednotlivými vybranými VBD

Z tab.5-1 a grafu na obr.5-20 je možno vidět, že nejlepší dosažené drsnosti se povedlo docílit pomocí VBD 64 a to Ra 0,155 $\mu\text{m}$ . Tato VBD měla úpravu mikrogeometrie mokrého pískování s nanesenou tenkou vrstvou CrAlSiN. Když se na dosažené drsnosti podíváme celkově, je možno vidět, že kvalitního obrobeného povrchu se docílilo pomocí všech VBD kdy se hodnoty pohybovaly převážně v rozmezí Ra 0,15 - 0,3  $\mu\text{m}$ .



### 5.5.6 Dosažená drsnost v závislosti na poloměru zaoblení ostří

Pro vybrané VBD byla vytvořena závislost dosažené drsnosti  $R_a$  na velikosti zaoblení řezné hrany. Graf této závislosti je na obr.5-21. Při pohledu na tuto závislost s ohledem na všechny použité VBD se nedá zaručit, že je tato závislost platná. Můžeme však říci, že nejlepších drsností se nejčastěji dosahovalo při použití VBD s poloměrem zaoblení řezné hrany v rozmezí 21 - 23  $\mu\text{m}$ . Další skutečností je, že lepší drsnosti se převážně dosahovalo při použití VBD, které měly před úpravou mikrogeometrie vyšší drsnost ( $R_a$  0,8  $\mu\text{m}$ ).

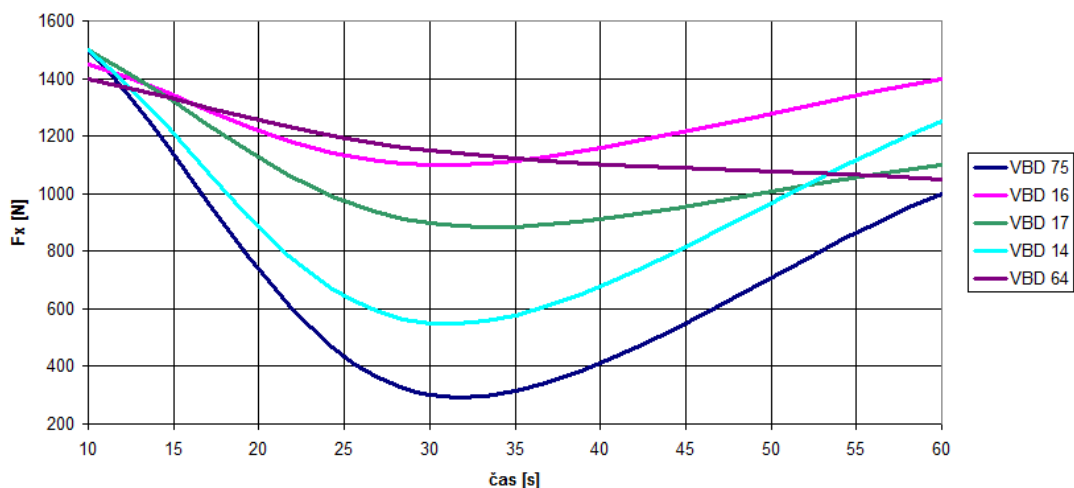


obr.5-21 Závislost dosažené drsnosti  $R_a$  na velikosti zaoblení řezné hrany

### 5.5.7 Průběh složek řezné síly během přejezdu

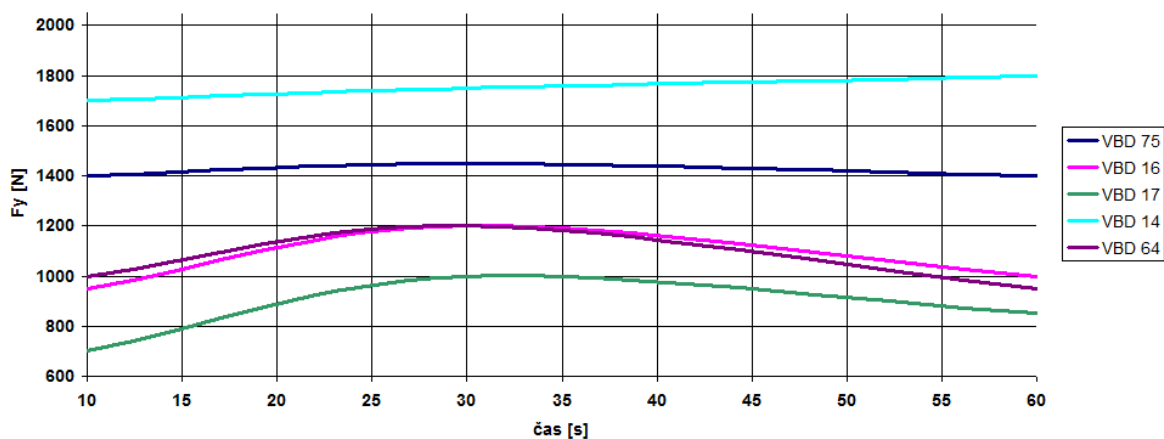
Dále se můžeme z pohledu na řezný proces blíže podívat na to, jak se během přejezdů vyvíjely jednotlivé složky řezné síly. Na obr.5-22 až obr.5-24 jsou zobrazeny průběhy složek řezné síly  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  při posledním přejezdu pro vybrané VBD. U složky  $F_x$  můžeme vidět, že ve většině případů došlo v polovině přejezdu k několikanásobnému snížení velikosti této složky. Porovnáme-li tuto složku se složkami  $F_y$  a  $F_z$ , je vidět, že u ostatních složek k poklesu sil nedošlo. Tento jev má nejspíše za následek měřící soustava a je nadále otázkou zkoumání.

Průběh složky žezné síly  $F_x$  během jednoho přejezdu



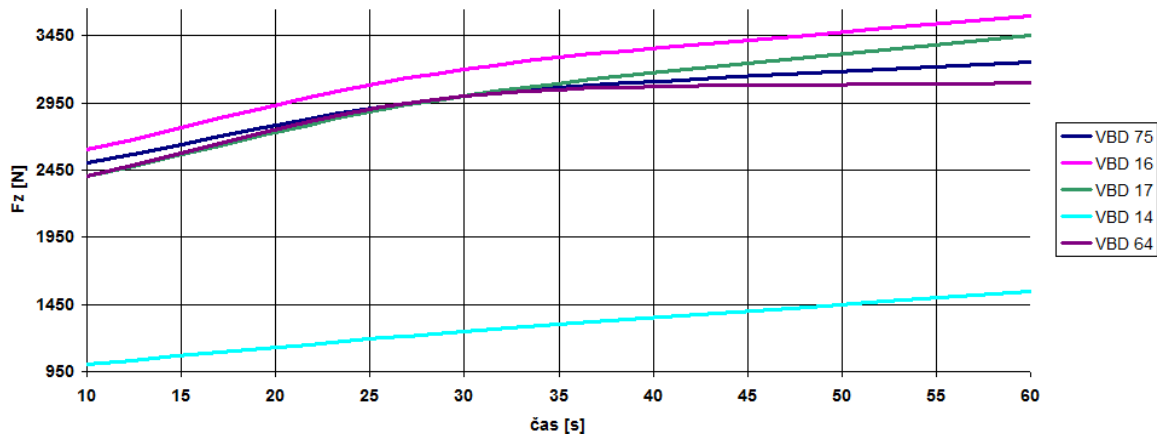
obr.5-22 Průběh složky řezné síly  $F_x$  v průběhu přejezdu pro vybrané VBD

Průběh složky řezné síly  $F_y$  během jednoho přejezdu



obr.5-23 Průběh složky řezné síly  $F_y$  v průběhu přejezdu pro vybrané VBD

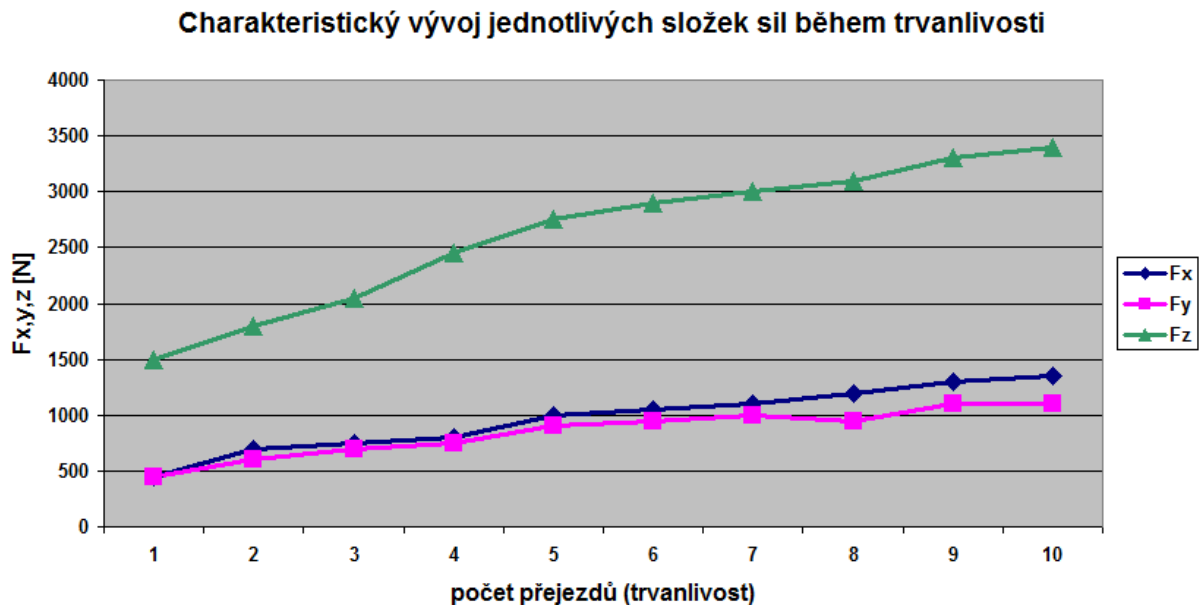
Průběh složky řezné síly  $F_z$  během jednoho přejezdu



obr.5-24 Průběh složky řezné síly  $F_z$  v průběhu přejezdu pro vybrané VBD

### 5.5.8 Průběh složek řezné síly během trvanlivosti VBD

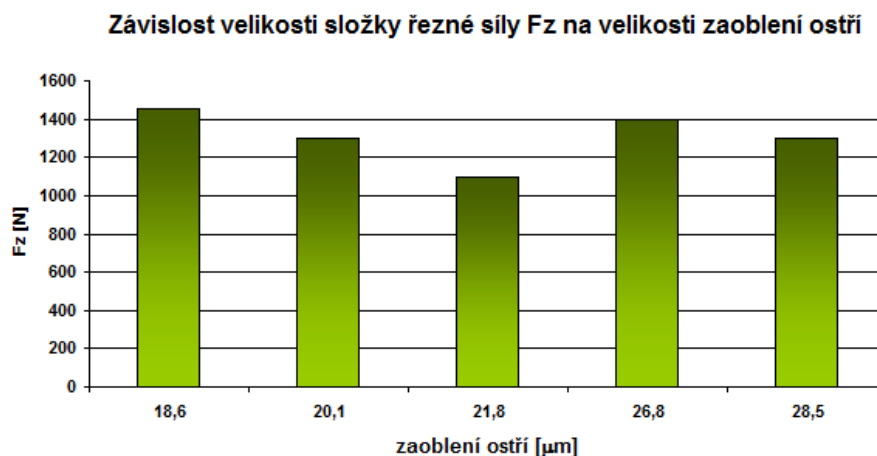
Během obrábění docházelo k postupnému zvyšování řezných sil podle toho, jak se jednotlivé VBD opotřebovávali a proto je třeba se na tuto skutečnost podívat podrobněji. Na obr.5-25 je jako příklad zachycen charakteristický vývoj růstu složek řezné síly v závislosti na trvanlivosti VBD 16, přičemž u ostatních vybraných VBD byl nárůst jednotlivých složek obdobný. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán u složky řezné síly  $F_z$ .



obr.5-25 Charakteristický vývoj jednotlivých složek řezné síly během trvanlivosti

### 5.5.9 Závislost složky $F_z$ na poloměru zaoblení ostří

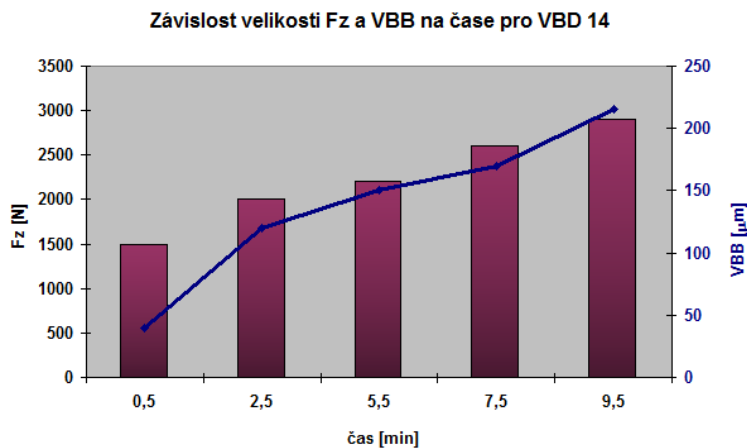
Následující závislost, která se zkoumala u vybraných VBD, byla závislost velikosti složky řezné síly  $F_z$  na poloměru zaoblení ostří. Jak je možno vidět z grafu na obr.5-26, nejnižších hodnot  $F_z$  se dosahovalo při poloměru zaoblení ostří v rozmezí 20-23  $\mu\text{m}$ . Tato závislost však není stabilní při celkovém pohledu na všechny zkoušené VBD, jelikož má zde vliv různá změna mikrogeometrie na jednotlivých VBD a proto by pro dokázání či vyvrácení této závislosti muselo být provedeno více experimentů.



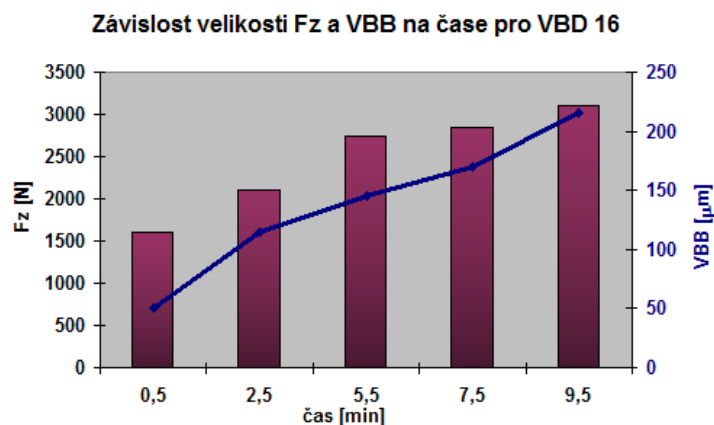
obr.5-26 Vliv poloměru zaoblení ostří na velikost složky  $F_z$

### 5.5.10 Závislost $F_z$ a VBB na čase

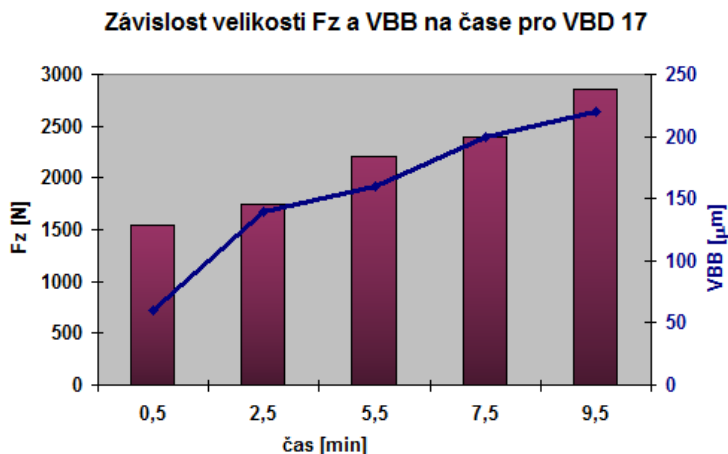
V této kapitole je rozebrán vývoj opotřebení na hřbetě a velikosti složky řezné síly  $F_z$  v závislosti na čase. Na obr.5-27 až obr.5-31 jsou tyto závislosti vyjádřeny pomocí grafů pro jednotlivé vybrané VBD. Z grafů je patrné, že křivka opotřebení bříty má klasický průběh. Během trvanlivosti je vidět také znázornění nárůstu složky řezné síly  $F_z$ .



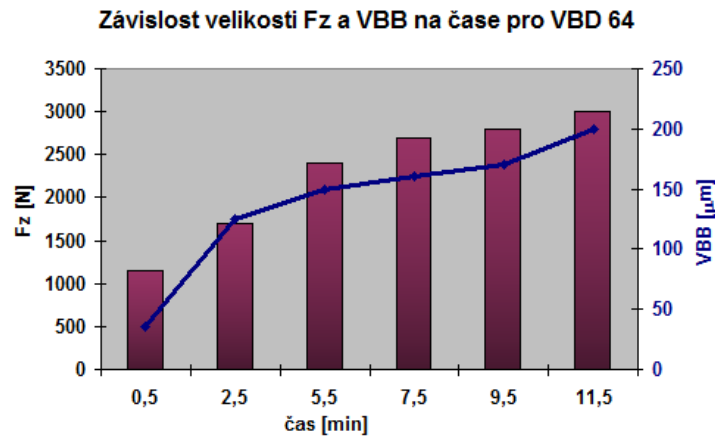
obr.5-27 Závislost  $F_z$  a VBB na čase pro VBD 14



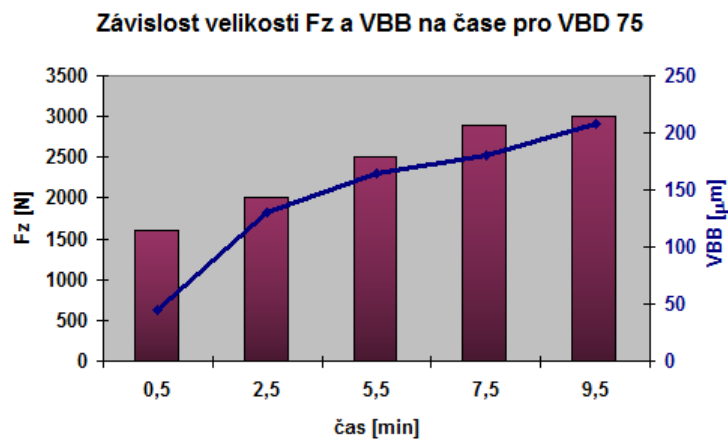
obr.5-28 Závislost  $F_z$  a VBB na čase pro VBD 16



obr.5-29 Závislost  $F_z$  a VBB na čase pro VBD 17



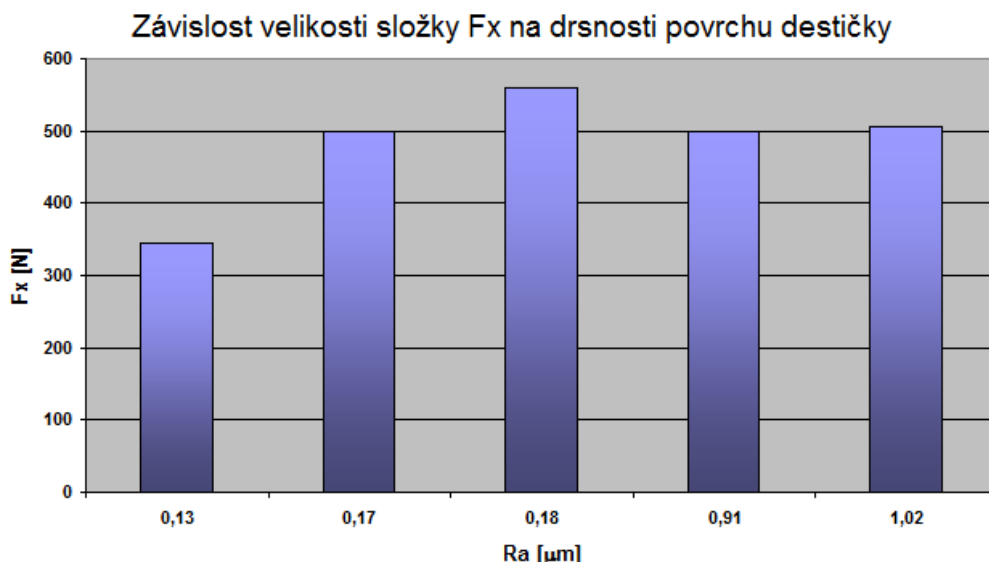
obr.5-30 Závislost Fz a VBB na čase pro VBD 64



obr.5-31 Závislost Fz a VBB na čase pro VBD 75

### 5.5.11 Závislost $F_x$ na drsnost povrchu VBD

V této kapitole dojde k hodnocení závislosti složky řezné síly  $F_x$  na drsnost povrchu jednotlivých vybraných destiček. Jelikož lze předpokládat, že právě na tuto složku řezné síly bude mít drsnost povrchu destičky největší vliv z důvodu odchodu třísky po čele VBD. Na grafu na obr.5-32 je patrné, že s rostoucí drsností povrchu VBD  $R_a$  dochází ke zvyšování složky  $F_x$ . Pro VBD s drsností  $R_a$  0,13  $\mu\text{m}$  je hodnota  $F_x$  nejnižší, přičemž pro VBD s drsností  $R_a$  1,02 je hodnota složky  $F_x$  mnohem vyšší. Vliv drsnosti povrchu VBD na složku  $F_x$  není popsán žádnou konkrétní závislostí, ale je zřejmé, že kvalita povrchu VBD má na tuto složku vliv.



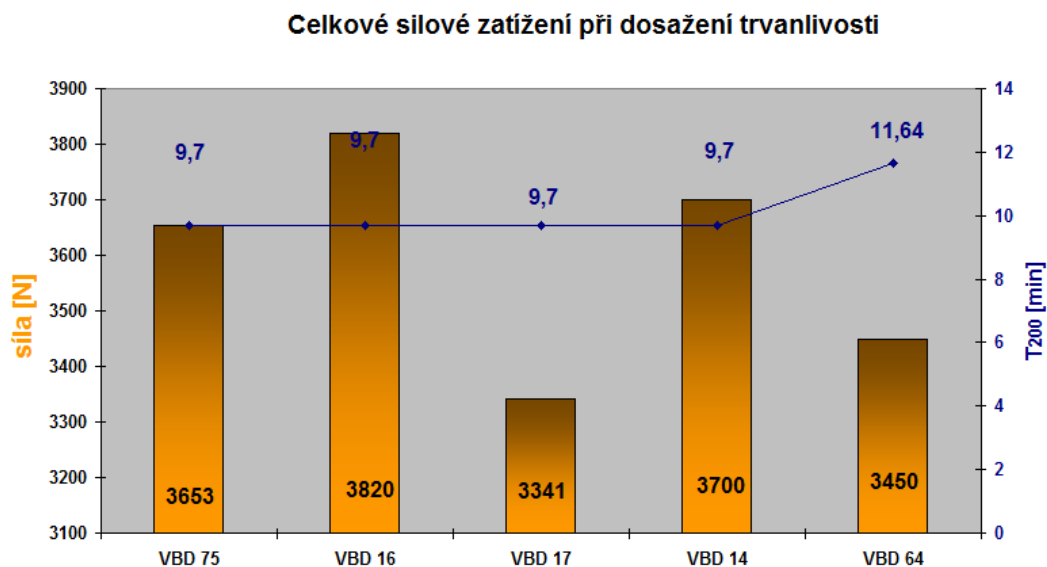
obr.5-32 Vliv drsnosti povrchu VBD na velikost složky řezné síly  $F_x$

### 5.5.12 Celkové silové zatížení

Z důvodu jednoduššího zobrazení velikosti řezných sil vzniklých při obrábění vybranými VBD byla vypočtena hodnota celkové síly  $F_c$  a vynesena do grafu, přičemž druhým vneseným parametrem je doba trvanlivosti pro  $VBB_{krit} = 200 \mu\text{m}$ . Z grafu na obr.5-33 je tedy patrné, jak vysokými silami byla zatížena soustava stroj-nástroj-obrobek v průběhu trvanlivosti jednotlivých vybraných VBD. Výpočet velikosti výsledné síly  $F_c$  byl proveden dle vzorce:

$$F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \text{ [N]}$$

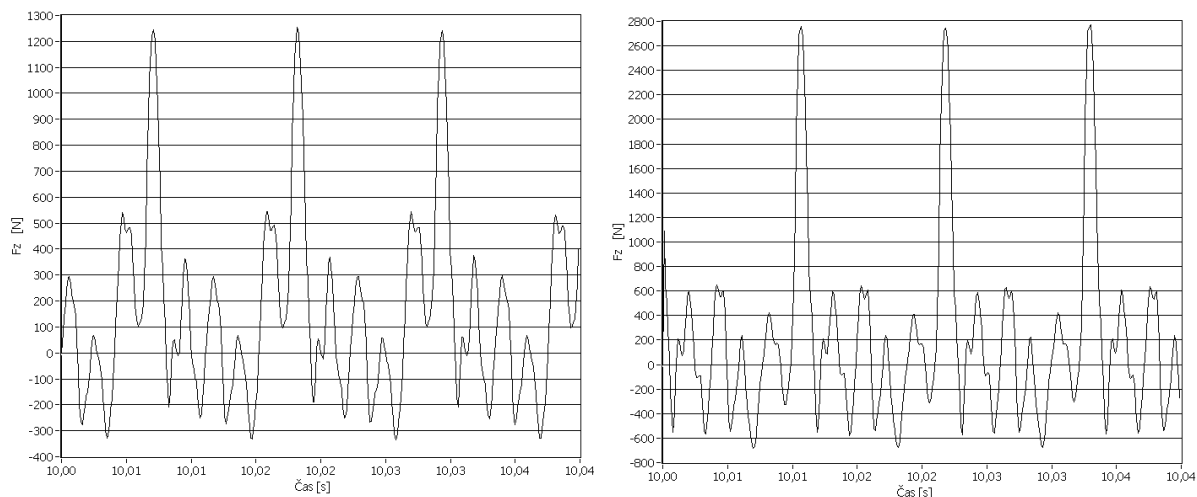
Jednotlivé hodnoty složek řezné síly byly vybrány při posledním přejedu tak, že se vypočetl průměr hodnot těchto složek na počátku přejezdu, uprostřed přejezdu a na konci přejezdu. Na grafu z obr.5-33 je jasně patrné, že nejlepšími vlastnostmi z pohledu celkové řezné síly a doby trvanlivosti disponovala VBD 64. Na této VBD byla provedena úprava pomocí mokrého pískování a byla na ni nanesena tenká vrstva CrAlSiN.



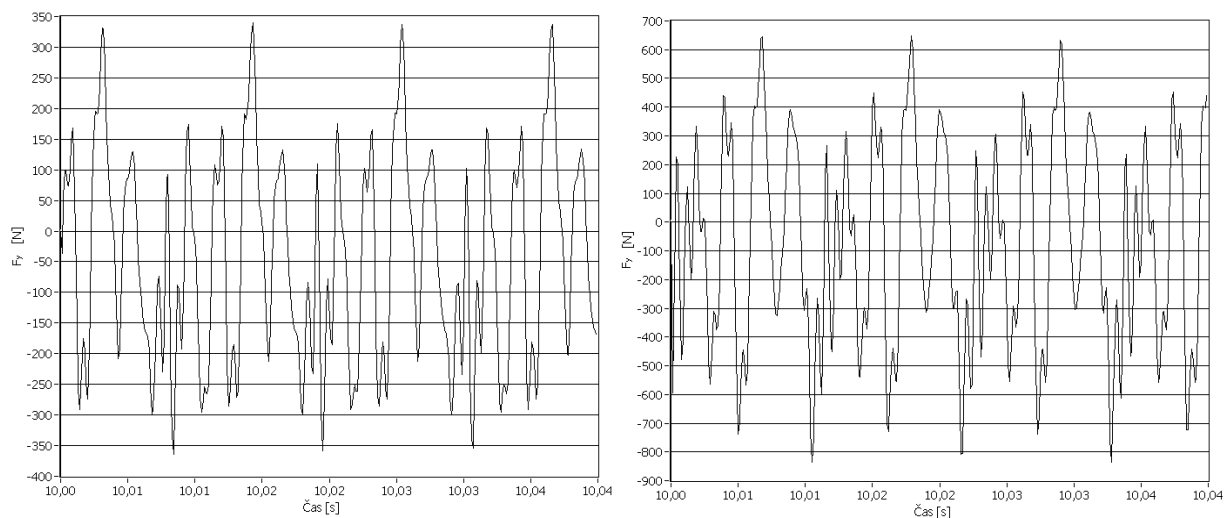
obr.5-33 Celkové silové zatížení při dosažení trvanlivosti jednotlivých VBD

### 5.5.13 Chování složek řezných sil v závislosti na čase

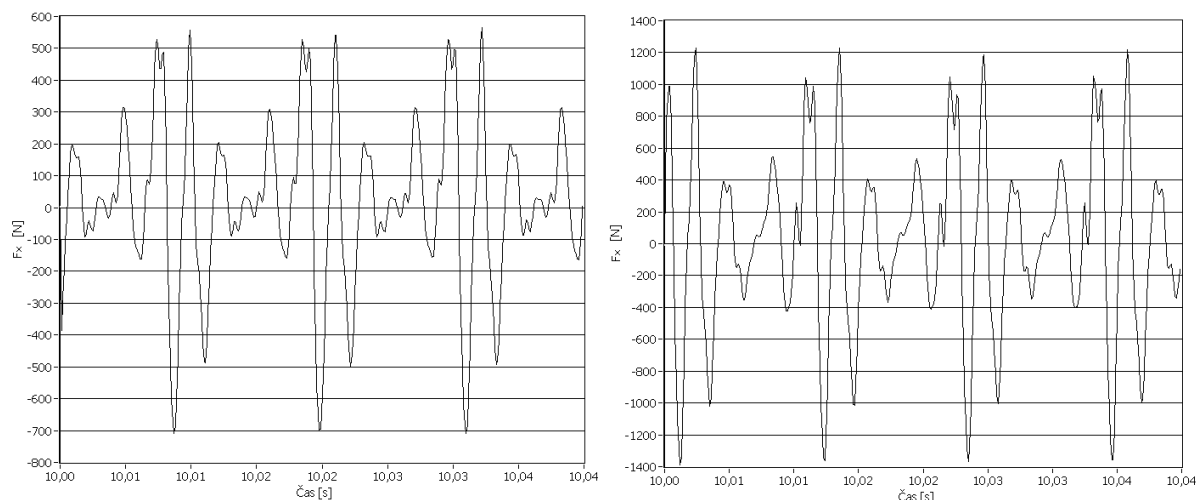
Dalším zajímavým tématem je chování jednotlivých složek řezné síly v závislosti na čase. Na obr.5-34 až obr.5-36 jsou zobrazeny jednotlivé složky řezné síly v časovém přiblížení pomocí softwaru LabVIEW. Na obrázcích na levé straně je zobrazeno chování složek řezné síly při na začátku prvního přejezdu, kdy můžeme brát v úvahu působení úpravy mikrogeometrie na řezný proces. Na obrázcích na pravé straně jsou zobrazeny složky řezné síly při posledním přejezdu, kdy lze s jistotou říci, že použitá VBD je ve značném stadiu opotřebení. Největší rozdíl mezi jednotlivými snímky, pokud nebudeme brát v úvahu nárůst sil, můžeme vidět ve vznikajících vibracích mezi jednotlivými záběry bříty. Z obrázků můžeme vidět, že složky řezné síly  $F_z$  a  $F_y$  se stabilněji chovají na počátku přejezdu, kdy je břit ještě neopotřeбен. Složka  $F_x$  se naopak chová stabilněji při přejezdu posledním, což může být způsobeno vytvořeným opotřeбенím, které by se mělo chovat stabilněji než ostrá hrana bříty na počátku trvanlivosti VBD. Další možností pro vznikající vibrace by mohlo být nalepování rozžhavené třísky na břit a její následné odletování. Bližším zkoumáním tohoto jevu se nadále zabývá Katedra KTO na ZČU v Plzni.



obr.5-34 Porovnání chování složky  $F_z$  při prvním (vlevo) a posledním přejezdu



obr.5-35 Porovnání chování složky  $F_y$  při prvním (vlevo) a posledním přejezdu



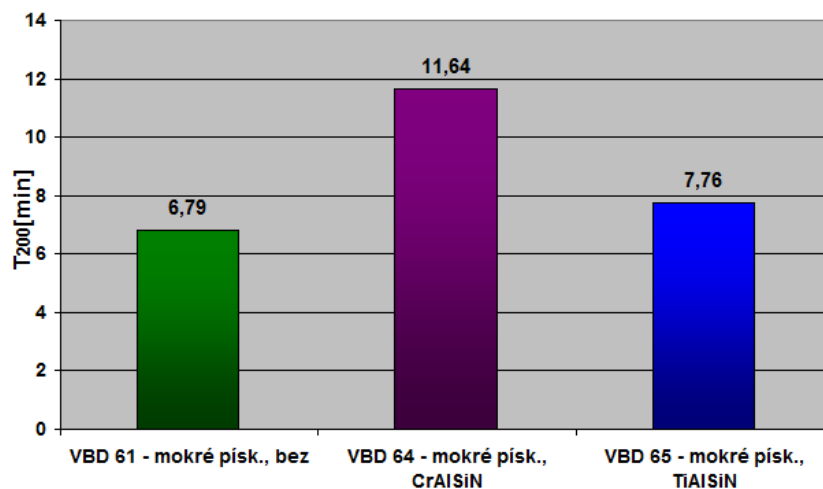
obr.5-36 Porovnání chování složky  $F_x$  při prvním (vlevo) a posledním přejezdu

## 5.6 Porovnání jednotlivých úprav v závislosti na povlaku

Nyní se dostáváme k vyhodnocení výsledků experimentu z pohledu na vliv nanesených povlaků na VBD s jednotlivými úpravami. Nejprve dojde k zaměření na porovnání dosažené trvanlivosti pro jednotlivé úpravy a následně na porovnání vzniklé řezné síly.

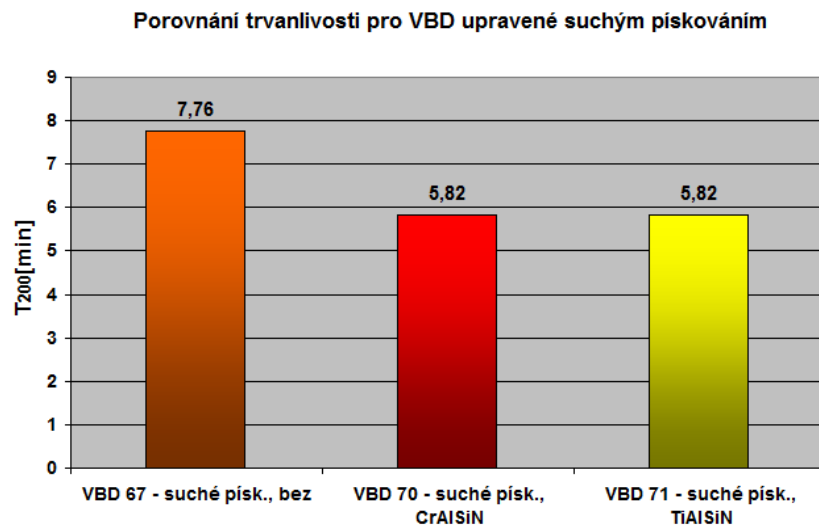
Na grafu na obr.5-37 můžeme vidět, že při úpravě mikrogeometrie pomocí mokrého pískování a následném nanesení tenké vrstvy je viditelně vyšší trvanlivost u VBD s nanesenými povlaky. Při úpravě mikrogeometrie pomocí suchého pískování došlo v případě nanesení povlaků ke značnému snížení trvanlivosti (obr.5-38) a lze usoudit, že tato úprava mikrogeometrie je před depozicí tenkých vrstev na cermetové VBD nevhodná. V případě úpravy mikrogeometrie omíláním došlo ke zvýšení trvanlivosti nástroje pouze v případě nanesení vrstvy CrAlSiN (obr.5-39). Z celkového pohledu na toto hodnocení lze usoudit, že nejvhodnější úpravou před depozicí tenkých vrstev na cermetové VBD je mokré pískování a zároveň, že vhodnější tenkou vrstvou je vrstva CrAlSiN.

Porovnání trvanlivosti pro VBD upravené mokřým pískováním

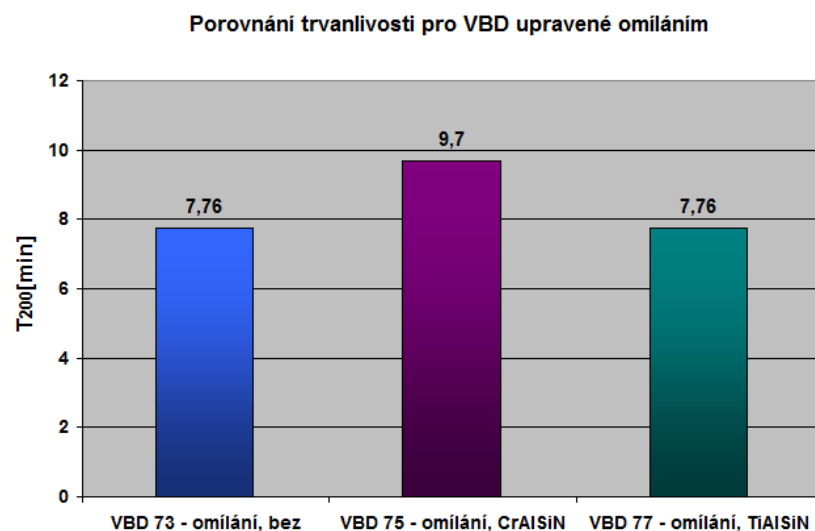


obr.5-37 Porovnání trvanlivosti VBD upravených pomocí mokrého pískování



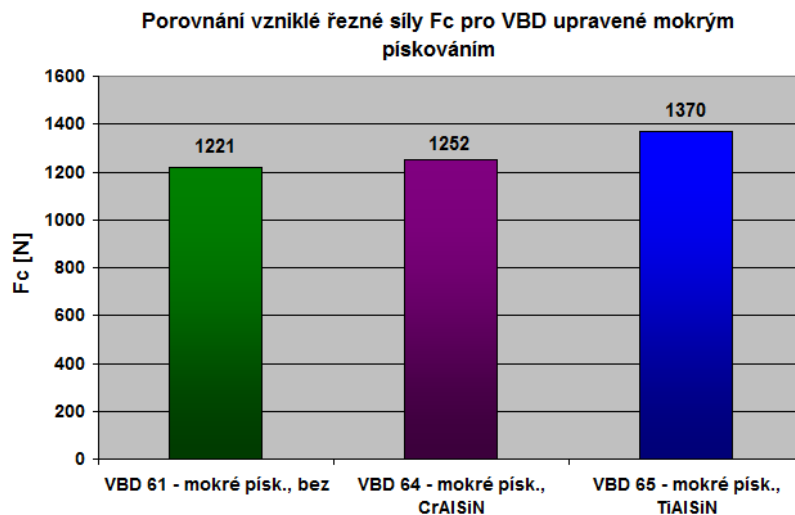


obr.5-38 Porovnání trvanlivosti VBD upravených pomocí mokrého pískování

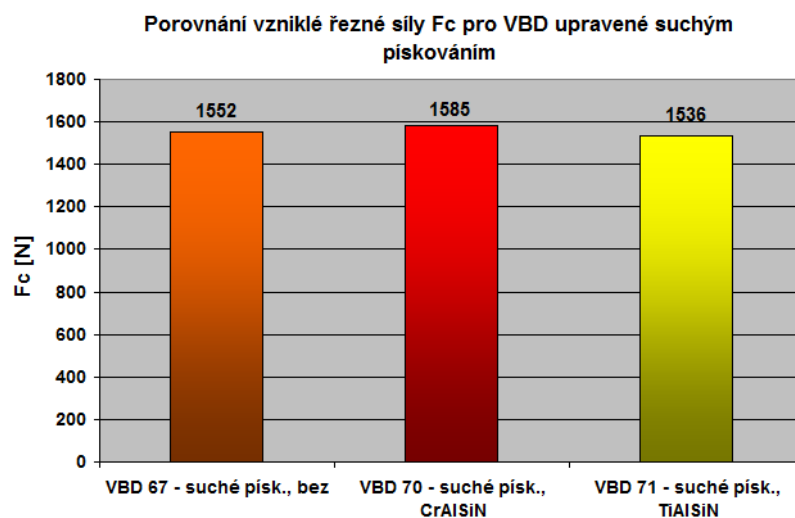


obr.5-39 Porovnání trvanlivosti VBD upravených pomocí omílání

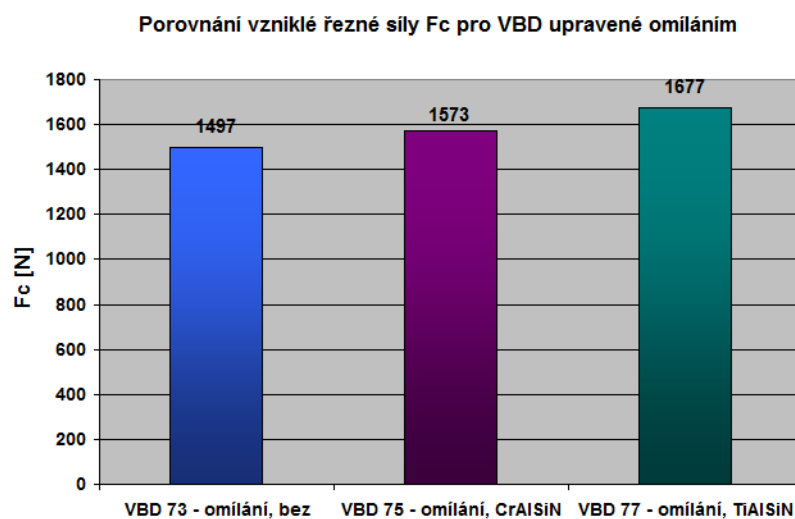
Druhým porovnáním z pohledu na vliv úpravy mikrogeometrie na nanesené tenké vrstvy byla velikost řezné  $F_c$  síly vzniklé při obrábění jednotlivými VBD. Při porovnání grafů na obr.5-40 až obr.5-42 je patrné, že u VBD s nanesenými tenkými vrstvami došlo téměř vždy k navýšení řezné síly oproti VBD bez povlaku. Řezné síly vynesené v grafech byly vypočteny z jednotlivých složek naměřených během průběhu experimentu v čase 10 vteřin. V tomto čase lze předpokládat, že použitá VBD nebyla ještě natolik opotřebena a je možno počítat s tím, že nedošlo k porušení tenké vrstvy a úpravy mikrogeometrie.



obr.5-40 Porovnání vzniklé řezné síly pro VBD upravených pomocí mokřého pískování



obr.5-41 Porovnání vzniklé řezné síly pro VBD upravených pomocí suchého pískování



obr.5-42 Porovnání vzniklé řezné síly pro VBD upravených pomocí omílání

## 5.7 Komplexní shrnutí výsledků

Na základě provedeného experimentu bylo v předešlých kapitolách rozebráno několik důležitých výsledků. Základem pro tyto výsledky bylo stanovení nejlepších řezných podmínek, při kterých byla provedena hlavní část tohoto experimentu. Tyto řezné podmínky byly následující:  $v_c = 450$  m/min,  $f_z = 0,05$  mm/zub,  $a_p = 1$  mm,  $a_e = 1,5$  mm.

Při těchto řezných podmínkách došlo k obrábění pomocí VBD, na kterých byly vytvořeny různé úpravy mikrogeometrie (omílání, suché pískování, mokré pískování) v kombinaci s nanesenými tenkými vrstvami (CrAlSiN, TiAlSiN) a VBD upravené pouze broušením. Při porovnání těchto VBD se bral ohled na dosažené trvanlivosti a řezné síly vzniklé během obrábění. Na základě tohoto porovnání bylo vybráno 5 nejlepších VBD, které byly dále podrobněji zkoumány. Mezi těmito VBD byly 4 VBD s úpravou omíláním a jedna VBD s úpravou mokrého pískování. Jedna z těchto VBD byla bez povlaku a na jednu VBD byla nanášena vrstva TiAlSiN. Na všech ostatních VBD byla nanášena vrstva CrAlSiN.

Před podrobnějším zkoumáním těchto vybraných VBD byl vytvářen průběžný závěr, že nejvýhodnější variantou úpravy mikrogeometrie je omílání VBD, které byly před touto úpravou broušeny na drsnost  $R_a 0,2$   $\mu\text{m}$ . V průběhu podrobnějšího zkoumání však bylo zjištěno, že nejlepších vlastností se dosáhlo pomocí VBD upravené pomocí mokrého pískování s nanesenou tenkou vrstvou CrAlSiN, kdy tato VBD byla dle výrobce před úpravou broušena na drsnost  $R_a 0,8$   $\mu\text{m}$  a skutečná naměřená hodnota drsnosti po úpravě dosahovala  $R_a 1,02$   $\mu\text{m}$ , což je nejvyšší drsnost ze všech podrobněji zkoumaných VBD. Pomocí této VBD byla dosažena nejvyšší trvanlivost (11,5 min) při nízkých řezných silách. Pomocí této VBD bylo dosaženo nejkvalitněji obroběného povrchu s drsností  $R_a 0,155$   $\mu\text{m}$ .

Z pohledu na hodnocení vlivu úpravy mikrogeometrie na adhezi tenkých otěruvzdorných vrstev lze usoudit, že nejlepší úpravou před depozicí tenkých vrstev je úprava mokřím pískováním. Při této úpravě došlo pro nanášenou vrstvu CrAlSiN k navýšení trvanlivosti o téměř 70% vůči VBD upravené pouze broušením. Dalším závěrem z tohoto hodnocení je, že v porovnání použitých povlaků TiAlSiN a CrAlSiN dosahoval ve většině případů lepších vlastností povlak CrAlSiN.

## 6 Závěr

Mezi základními cíli této diplomové práce bylo na jejím začátku zjištění nejvhodnějšího způsobu výroby cermetových nástrojů a cermetových vyměnitelných břitových destiček a jejich následné zpracování. V průběhu práce došlo ke zjištění, že nejvhodnější výrobou cermetových vyměnitelných břitových destiček je výroba pomocí lisování. U této metody výroby je možno vyloučit úpravu VBD pomocí broušení, a díky tomu zamezit ovlivnění výsledných vlastností cermetového řezného nástroje. Na druhou stranu se vyrábějí také cermetové monolitní nástroje, které jsou vyráběny starší metodou pomocí broušení, a proto u této metody řada výrobců zůstává a vyrábí tak cermetové vyměnitelné břitové destičky broušením. Kvůli tomuto je nutnost zdokonalovat úpravy cermetových VBD, aby výsledný produkt dosahoval nejlepších možných vlastností. Mezi tyto úpravy patří vhodná volba broušení, úprava mikrogeometrie například pomocí omílání či pískování a následná depozice tenkých otěruvzdorných vrstev.

Dalším cílem této diplomové práce bylo zjištění možností depozice tenkých vrstev na cermetové nástroje. Jako nejpoužívanější metoda nanášení tenkých vrstev na cermetové nástroje je metoda PVD, avšak cermet je řezný materiál, který má vysokou teplotní odolnost a jeví se tak jako řezný materiál, který by mohlo být možno deponovat metodou CVD. Metoda PVD má také řadu nevýhod, jelikož je při ní nutnost vysokého vakua a nástroj musí být v průběhu depozice neustále v pohybu kvůli rovnoměrnému nanesení vrstvy. Druhou novější metodou je metoda PACVD, kdy se jedná o metodu chemické depozice aktivované pomocí plazmy. Tato metoda má řadu výhod, jelikož je díky ní možno nanášení vrstev, které jsou klasicky nanášeny pomocí metody CVD avšak není při ní potřeba vysokých teplot ani vysokého vakua. Depozice tenkých otěruvzdorných vrstev na cermetové nástroje umožňuje částečné odstranění základních nevýhod cermetového materiálu jako je jeho nízká houževnatost a nízká tepelná vodivost. Tenké vrstvy částečně chrání cermetový substrát proti tepelným šokům vznikajícím během obrábění a prodlužují trvanlivost cermetových nástrojů. S cermetovými nástroji opatřenými tenkou vrstvou lze také dosáhnout kvalitnějšího obrobeneho povrchu. Takto upravené cermetové nástroje mají svoje uplatnění především v oblasti HSC obrábění z důvodu vyšší trvanlivosti nástroje, zvýšení produktivity obrábění, snížení řezných sil a snížení střední teploty řezání.

Posledním cílem, na který byl zaměřen experiment, bylo zjištění vlivu mikrogeometrie u cermetových vyměnitelných břitových destiček na adhezi tenkých otěruvzdorných vrstev a na řezivost nástroje. Z pohledu na trvanlivost jednotlivých VBD je patrné, že nejlepší vliv na adhezi tenké vrstvy měla úprava mokrého pískování, zde je nejpatrnější rozdíl mezi trvanlivostí VBD bez depozice tenké vrstvy a VBD s nanesenou tenkou vrstvou CrAlSiN. Negativní vliv na depozici tenké vrstvy na VBD měla úprava mikrogeometrie pomocí suchého pískování, kde došlo k poklesu trvanlivosti oproti VBD bez povlaku. Porovnáním dvou v experimentu použitých povlaků došlo ke zjištění, že se jako výhodnější povlak na cermetových VBD choval povlak CrAlSiN. Z pohledu na řezivost nástroje bylo možno vidět, že VBD upravené pouze broušením dosahovali nižších trvanlivostí než VBD s úpravou mikrogeometrie a u těchto VBD došlo k naměření mnohem vyšších řezných sil. Z těchto skutečností plyne, že úprava mikrogeometrie cermetových nástrojů má velké přínosy v procesu obrábění, jak z pohledu na depozici tenkých otěruvzdorných vrstev tak na řezivost nástroje. Další přínosy do procesu obrábění pomocí cermetů má depozice tenkých otěruvzdorných vrstev, jelikož deponovaný nástroj vydrží delší trvanlivost a nevznikají příliš vysoké řezné síly.

## Použitá literatura

- [1] HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje, (2008) *MM Publishing, s.r.o. Praha ISBN 978-80-254-2250-2*
- [2] SOVA, F.: Technologie obrábění a montáže. Plzeň, ZČU 1998, 2002. (skriptum)
- [3] Wikipedia. *Titan(prvek)*, článek dostupný z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan\\_\(prvek\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_(prvek))
- [4] Wikipedia. *Wolfram*, článek dostupný z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Wolfram>
- [5] ETTMAYER, P., KOLASKA, H., LENGAUER, W., DREYERT K. *Ti(C,N) Cermets – Metallurgy and Properties. International Journal of Refractory Metals a Hard Materials. 13 (1995). Pp. 343-351. ISSN 0263-4368*
- [6] VAŇEČEK, S. *Cermety a jejich efektivní využití*, Diplomová práce. FSI VUT v Brně. Brno 2009
- [7] ATEAM. *Prášková metalurgie*. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. ZČU v Plzni. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/praskova\\_metalurgie.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/praskova_metalurgie.pdf)
- [8] YAN, L; NING, L; XIAOBO, Z; CHUNLAN, R. *Effect of WC content on the microstructure and mechanical properties of (Ti, W)(C, N)-Co cermets. Materials Science and Engineering. 12 November 2006, vol. 26, pp. 33-40. ISSN 0921-5093*
- [9] HOCHGRAF, F.: Hot Isostatic Pressing, New Hampshire Materials Laboratory, INC. October 1, 1999. Dostupné z: <http://www.nhml.com/resources/1999/10/1/hot-isostatic-pressing>
- [10] HODÁNEK, J. *Vliv povrchových úprav cermetových VBD na řezivost nástroje při obrábění kalených nástrojových ocelí* Diplomová práce. ZČU FST KTO. Plzeň 2011
- [11] ČESÁKOVÁ, I., ZETEK, M., SKLENIČKA, J.: Vliv tenké vrstvy na kvalitu obrobeného povrchu a silové zatížení cermetového nástroje. FST ZČU v Plzni
- [12] BŮŽEK, P. *Použití cermetových řezných nástrojů v obrábění*. Bakalářská práce. ZČU FST KTO. Plzeň 2009.
- [13] JKZ Bukačovice a.s.: Přehled nabízených produktů - Nástrojová ocel 1.2714. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/cs/printpdf/produkty/nastrojova-ocel-12714>
- [14] Alibaba.com - Ti(C,N)-based cermet rods(Tool with micro-drill). Dostupné z: [http://www.alibaba.com/product-gs/527186082/Ti\\_C\\_N\\_based\\_cermet\\_rods.html](http://www.alibaba.com/product-gs/527186082/Ti_C_N_based_cermet_rods.html)
- [15] DETERCO, Inc.: Products - Mahr Federal. Dostupné z: [http://www.deterco.com/products/Mahr%20Federal/mahr\\_marsurf\\_m300.htm](http://www.deterco.com/products/Mahr%20Federal/mahr_marsurf_m300.htm)
- [16] SHM Šumperk - Technické informace - Měření jednotlivých vlastností vrstev. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/cs/technicke-informace/mereni>
- [17] KTO ZČU v Plzni: Hommel Etamic T8000 RC - popis měřícího zařízení. Dostupné z: [http://kto.zcu.cz/dokumenty/Poster\\_-\\_Hommel\\_Etamic\\_T8000.pdf](http://kto.zcu.cz/dokumenty/Poster_-_Hommel_Etamic_T8000.pdf)
- [18] HUMÁR, A.: Materiály pro řezné nástroje. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006. [online]. 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] ATEAM. Tenké vrstvy vytvořené PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. ZČU v Plzni. 2006. Dostupné z: <http://www.ateam.ic.cz/seminar.pdf>
- [20] ŠÍMA, M., JÍLEK, M., HOLUBÁŘ, P.: PVD povlaky na bázi oxidů Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *MM průmyslové spektrum*, vydání 4/2012. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pvd-povlaky-na-bazi-oxidu-al2o3.html>
- [21] HOUDEK, J., KOUŘIL, K. Opatřování břitů nástrojů ze slinutých karbidů, *MM průmyslové spektrum*, vydání 1,2/2005, dostupné z <http://www.mmspektrum.com/vydani/2005/1/1>
- [22] Ionbond AG Olten: PACVD Technologie. Dostupné z: <http://www.ionbond.com/dynasite.cfm?dsmid=83916>
- [23] HOŘEJŠ, S.: Povlakování nástrojů metodou PACVD, *MM průmyslové spektrum*, vydání 4/2008, dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-nastroju-metodou-pacvd.html>
- [24] Technische Universität Wien, Institut für Angewandte Physik: PACVD. Dostupné z: <http://www.iap.tuwien.ac.at/www/opt/pacvd.php>
- [25] SHM Šumperk - Produkty - PVD povlaky. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/cs/produkty/pvd-povlaky/marwin-ticn>
- [26] Dayton Coating Technologies, LLC: DCT Coatings. Dostupné z: <http://www.webdct.com/coatings.html>
- [27] ZPS-FN a.s.: Typy povlaků. Dostupné z: <http://www.zps-fn.cz/html/typy-povlaku-24.html>
- [28] Technik ihned: Tabulka vlastností vybraných povlaků Ballnit. Dostupné z: <http://technik.ihned.cz/attachment.php/280/11617280/FaNnp204PV5K0JrdzoU3fyTv9qkRs61/Te0408s20a.jpg>
- [29] LISS a.s., Služby a produkty: Typy povlaků. Dostupné z: <http://www.liss.cz/?page=products&i=f706917d3e00be78c72ade83caa57c69>
- [30] HANOUSEK, P. *Cermety a jejich efektivní využití*, Diplomová práce. FSI VUT v Brně. Brno 2011
- [31] Alicona Imaging GmbH - Přehled výrobků. Dostupné z: <http://www.alicon.com/>
- [32] ČESÁKOVÁ, I., ZETEK, M., ŘEHOŘ, J.: Problematika obrábění cermetovými nástroji s tenkou vrstvou. ERIN 2009

## **Přílohy**

Příloha č. 1 Parametry obráběcího centra MCV 750 A.....	II
Příloha č. 2 Charakteristika frézovací hlavy.....	III
2.1 Základní technické údaje .....	III
2.2 Řezná geometrie nástroje.....	III
Příloha č. 3 Specifikace materiálu ČSN 19 663 .....	IV
Příloha č. 4 Specifikace materiálu ČSN 19 663 .....	V
Příloha č. 5 Charakteristika třísložkového dynamometru Kistler 9255 A.....	VI

## Příloha č. 1 Parametry obráběcího centra MCV 75 A

Druh.....	vertikální obráběcí centrum
Typ.....	MCV 750 A
Počet CNC řízených os.....	3
Jmenovitý výkon vřetena.....	16 kW
Rozsah otáček vřetena.....	20 – 13000 min <sup>-1</sup>
Změna otáček.....	plynulá
Zdvih v ose X, Y, Z.....	750, 500, 500 mm
Rozměry upínacího stolu.....	1000x500 mm
Pracovní posuvy X, Y, Z.....	1-15000 mm.min <sup>-1</sup>
Rychloposuvy X, Y, Z.....	25 m.min <sup>-1</sup>
Řídicí systém.....	Heidenhein TNC 426



obr.P1 MCV 750 A

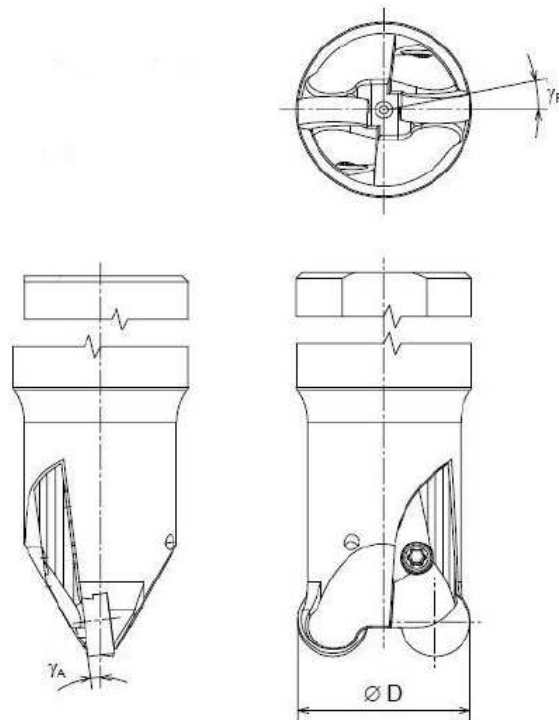


## Příloha č. 2 Charakteristika frézovací hlavy

### 2.1 Základní technické údaje

Typ frézovací hlavy.....	prototyp (fa. Hofmeister)
Průměr frézovací hlavy.....	32 mm
Délka řezné části nástroje.....	50 mm
Upínací část.....	Ø 32 h6, WELDON DIN 1835
Možnost zahlubování.....	< 1 mm
Příjezd do řezu po rampě.....	< 3°
Tvar VBD.....	kruhový
Průměr VBD.....	12,025 mm
Počet VBD.....	2
Geometrie.....	$\gamma_A = -13^\circ$ , $\gamma_R = -16^\circ$

### 2.2 Řezná geometrie nástroje



obr.P2 Řezná geometrie frézovací hlavy [10]

### Příloha č. 3 Specifikace materiálu ČSN 19 663

Nikl - chrom - molybden - vanadová ocel vhodná kalení v proudu vzduchu nebo v oleji s vysokou prokalitelností. Ocel vykazuje vysokou tvrdost po kalení, dobrou odolnost proti popuštění, dobrou houževnatost a pevnost za tepla. Dobře odolává prudkým tepelným změnám i tepelné únavě. Ocel je dobře tvárná za tepla a dobře obrobitelná ve stavu žíhaném na měkko. Je vhodná na nástroje pro tváření za tepla jako jsou zápustky všech velikostí, zejména s pevností nad 1300 Nmm<sup>2</sup> pro buchary a kovací lis, průtlačníky s pevností nad 1600 Nmm<sup>2</sup> pro protlačování neželezných kovů.

Označení dle ČSN.....	16 663
Označení dle DIN.....	56NiCrMoV7
Označení dle W.Nr .....	1.2714
Označení dle AISI .....	L6
Obsah C .....	0,55 %
Obsah Si .....	..0,3 %
Obsah Mn .....	0,7 %
Obsah Mo .....	0,5 %
Obsah Cr .....	1,1 %
Obsah V .....	0,1 %
Tvrdost .....	45 - 54 HRC



obr.P3 Materiál ČSN 19 663 upnutý na dynamometru

## Příloha č. 4 Specifikace materiálu ČSN 19 436

Nástrojová ušlechtilá legovaná ocel, která je vhodná pro práci za studena, kdy je maximální teplota povrchu <math><200^{\circ}\text{C}</math>. Použití může být například pro vysoce výkonné lisovací a střížné stroje, pro nože do strojních nůžek, plochá kovádla, protahovací trny, frézy na dřevo či pro tažné matice a trny.

Označení dle ČSN.....	16 436
Označení dle DIN.....	X210Cr12
Označení dle W.Nr .....	1.2080
Označení dle AISI .....	D3
Obsah C .....	1,9 - 2,2 %
Obsah Si .....	..0,1 - 0,4 %
Obsah Mn .....	0,15 - 0,45 %
Obsah P .....	0,03 %
Obsah Cr .....	11 - 12 %
Obsah S .....	0,03 %
Tvrдость .....	51 HRC



obr.P4 Materiál ČSN 19 436 upnutý na dynamometru

## Příloha č. 5 Charakteristika třísložkového dynamometru Kistler 9255 A

Délka.....	260 mm
Šířka.....	260 mm
Výška.....	95 mm
Kalibrace.....	kalibrované
Měřicí rozsah $F_x$ , $F_y$ , ( $F_z$ ) .....	$\pm 20$ kN (-10 až 40 kN)
Citlivost $F_x$ , $F_y$ , ( $F_z$ ) .....	$\approx -8$ pC/N ( $\approx -3,7$ pC/N)
Vlastní frekvence ...	$\approx 3$ kHz
Rozsah provozních teplot .....	0 až 70° C
Spojení .....	Fischer 9 pol. neg.
Váha .....	52 kg



obr.P5 Třísložkový dynamometr Kistler 9255 A

