

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská-technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Konkurenceschopnost vývojových vrstev při frézování feriticko-
martenzitických ocelí

Autor: **Bc. Jakub KOVAŘÍK**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.**
Konzultant práce: **Ing. Jaroslava FULEMOVÁ**

Akademický rok 2012/2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra technologie obrábění

Akad. rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: Jakub Kovařík
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie-technologie obrábění

Téma diplomové práce:

**KONKURENCESCHOPNOST VÝVOJOVÝCH VRSTEV PŘI
FRÉZOVÁNÍ FERITICKO-MARTENZITICKÝCH OCELÍ**

Základní požadavky:

Porovnat nově vyvinutou tenkou vrstvu $TiB_2/TiBC$ s konkurenčními vrstvami na současném trhu

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Úvod do problematiky a cíle řešení
2. Současný stav řešené problematiky
3. Návrh, charakteristika a realizace experimentů
4. Technicko-ekonomické hodnocení výsledků
5. Závěr

Rozsah diplomové práce:

Textová část: 40-60 stran formátu A4
Forma zpracování diplomové práce: tištěná a elektronická (CD)

Doporučená literatura:

- [1] SANDVIK COROMANT: *Technická příručka obrábění*. Sandviken, Švédsko
ISBN: C-2900:3CZE/01, 2005
[2] SANDVIK COROMANT: *Příručka obrábění*. Sandviken, Švédsko
ISBN: C-2900:3CZE/01, 2011
[3] STANĚK, J., *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací*. Plzeň:
ZČU, 2005, TECSKM52b
[4] CIRP ANNALS - *Manufacturing Technology*: (<http://www.cirp.net/>)
a další elektronické zdroje viz <http://knihovna.zcu.cz>

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce:

Ing. Jaroslava Fulemová
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce:

29. 10. 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

25. 5. 2013

L.S.

Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne: 25. 5. 2013

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

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kovařík	Jméno Jakub	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Jméno Jan	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	BAKALÁŘSKÁ	DIPLOMOVÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Konkurenceschopnost vývojových vrstev při frézování feriticko-martenzitických ocelí		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	99	TEXTOVÁ ČÁST	67	GRAFICKÁ ČÁST	32
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Cílem práce bylo otestovat a vyhodnotit konkurenceschopnost nově vyvinuté tenké vrstvy TiB₂/TiBC. Práce zahrnuje zhodnocení současného stavu tenkých vrstev a způsoby jejich nanášení na základní substrát. Součástí práce je taktéž experimentální část, ve které je provedeno otestování nástrojů s vrstvou TiB₂/TiBC, TiAlN, Triple Coating a nástroje bez vrstvy přičemž je sledováno opotřebení řezného břitu a měřeny řezné síly při obrábění. Na základě těchto výsledků je pak provedeno technicko-ekonomické hodnocení a porovnání jednotlivých vrstev.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>tenká vrstva, VBD, TiB₂/TiBC, TiAlN, Triple-Coating, frézování</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kovařík	Name Jakub		
FIELD OF STUDY	2303T004 “Department of Machining Technology“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Name Jan		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	BACHELOR	DIPLOMA	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Competitiveness of developing layers during machining of ferritic-martensitic steels			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	99	TEXT PART	67	GRAPHICAL PART	32
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The purpose of this thesis was to determine the competitiveness of new developed thin layer TiB₂/TiBC. This thesis includes present state of thin layers and their applications on the substrate. Then the thesis includes experimental part which is carried out testing of tools with deposited thin layers TiB₂/TiBC, TiAlN, Triple-Coating and toll without layer. On these tools was observed tool wear and measured cutting forces during machining. Technical and economical evaluation is made from the results of the experiment. Also technical and economical evaluation includes comparison of the layers.</p>
KEY WORDS	thin layer, VBD, TiB ₂ /TiBC, TiAlN, Triple-Coating, milling

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Janu Řehořovi, Ph.D. za možnost uskutečnění této práce.

Největší dík patří Ing. Jaroslavě Fulemové, konzultantce této práce za její ochotu, spolupráci a cenné připomínky při tvorbě této diplomové práce.

Poděkování patří i mé rodině za podporu a také za finanční umožnění studia na fakultě strojní.

Obsah

1	Úvod	8
1.1	Zvyšování produktivity obrábění.....	8
1.2	Cíle diplomové práce.....	8
2	Zhodnocení současného stavu.....	10
2.1	Korozivzdorné oceli.....	10
2.1.1	Chemická koroze	10
2.1.2	Elektrochemická koroze	10
2.1.3	Rozdělení korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí.....	14
2.2	Obrobitelnost korozivzdorných ocelí	21
2.3	Metody nanášení tenkých vrstev	27
3	Experiment	46
3.1	Charakteristika experimentu.....	46
3.1.1	Experiment s VBD.....	46
3.1.2	Experiment s monolitními kuželovými frézami.....	46
3.2	Experimentální vybavení.....	46
3.3	Aplikace vrstvy TiB ₂ /TiBC na VBD.....	52
3.3.3	Závislost opotřebení VB ₀ na čase obrábění t.....	55
3.3.1	Konkurenceschopnost vrstvy TiB ₂ /TiBC při aplikaci na VBD.....	65
3.4	Aplikace vrstvy TiB ₂ /TiBC na monolitním nástroji.....	67
3.4.1	Konkurenceschopnost vrstvy TiB ₂ /TiBC při aplikaci na monolitním nástroji	70
4	Technicko-ekonomické hodnocení	80
4.1	Technické hodnocení	80
4.1.1	Hodnocení experimentu VBD.....	80
4.1.2	Hodnocení experimentu s monolitními kuželovými frézami	80
4.2	Ekonomické hodnocení.....	81
5	Závěr	82
6	Použitá literatura	84
7	Přílohy.....	87

1 Úvod

1.1 Zvyšování produktivity obrábění

Obrábění je technologický proces, jehož současným trendem je obrobit součást v nejkratším čase s výsledným povrchem, který splní dané kvalitativní požadavky. Dále k těmto hlavním kritériím lze přidat i minimalizaci nákladů, neboť v současné ekonomické době, kdo chce držet krok, musí se snažit snižovat náklady na polotovary, nástroje, procesní kapaliny, energie nebo obsluhu. Obecně se těchto pár požadavků dá shrnout pojmem produktivita obrábění, [1].

Aby obrábění bylo skutečně produktivní, musí být kladeny vysoké požadavky na soustavu S-N-O-P. Podmínkou této soustavy je její vyváženost. Pokud by jeden článek soustavy byl horší, soustava by nemohla odvádět požadovaný výkon. Vyvážená a moderní soustava S-N-O-P ovládaná kvalitní a proškolenou obsluhou, která je řízena technologií a managementem, dává možnost obrábět produktivně. Součástí této soustavy je řezný nástroj, který je úzce spojen s tématem této diplomové práce. Současné řezné nástroje pro strojní obrábění jsou vyráběny z různých materiálů, od nástrojových ocelí přes slinuté karbidy, řeznou keramiku až po syntetický diamant a kubický nitrid boru. V současnosti ani v blízké budoucnosti nelze spoléhat na objev nového progresivního řezného materiálu, proto je úsilí všech výrobců nástrojů soustředěno na zdokonalování stávajícího sortimentu a technologie výroby s přesným využitím aplikačních oblastí, [1, 2].

Tato práce se zabývá právě jedním faktorem, který výrobci zlepšují a to tenkými vrstvami. V současné době jsou tenkou vrstvou nejvíce povlakovány slinuté karbidy. Tenká vrstva může být tvořena nitridem, karbidem nebo oxidem kovu. Během 20. století byla aplikována vrstva TiC na VBD ze SK. V průběhu dalších let ji následovaly vrstvy TiN, TiCN a Al₂O₃ (v polovině 70. let 20. století). Dříve stačilo několik druhů vrstev, které tak vytvářely konkurenci jiným nástrojovým materiálům. Dnes již trh nabízí celou řadu tenkých vrstev, které mají svoje speciální aplikace, přičemž neustále platí zvyšování produktivity obrábění, [2].

1.2 Cíle diplomové práce

Tato práce vznikla v rámci řešení projektu SGS-2012-023, řešeném na KTO. Projekt byl zaměřen do oblasti progresivního frézování feriticko-martenzitických ocelí. Práce spadala do části projektu, která byla zaměřená na aplikaci nových progresivních tenkých vrstev a vznikala ve spolupráci s firmou VÚHŽ a.s. Tato firma vyvinula novou tenkou vrstvu TiB₂/TiBC. Záměrem této práce je zjistit konkurenceschopnost této nové vývojové vrstvy.

Úkolem bylo vybrat vhodnou aplikaci a podmínky frézování, konkrétně: stroj, nástroj, obráběný materiál, strategii frézování, řezné podmínky a procesní prostředí. Protože je nově vyvinutá vrstva aplikována na dva nástroje, vznikly proto dva experimenty. Cílem experimentů bylo nalezení vhodných řezných podmínek pro daný nástroj s vrstvou

TiB₂/TiBC. Poté zjistit odolnost proti opotřebení a silové zatížení během obrábění. Dále tyto naměřené hodnoty porovnat s hodnotami naměřenými při obrábění s jinými tenkými vrstvami a zjistit tak konkurenceschopnost vrstvy TiB₂/TiBC.

2 Zhodnocení současného stavu

2.1 Korozivzdorné oceli

Oceli, které patří do této skupiny, mají mnoho společných vlastností. Tyto vlastnosti jsou dané materiálovou strukturou a obsahem legujících prvků. Obecně lze říci, že všechny tyto ocele mají zvýšenou odolnost proti chemické korozi i elektrochemické korozi, a to jak za normálních teplot, tak i za teplot zvýšených.

2.1.1 Chemická koroze

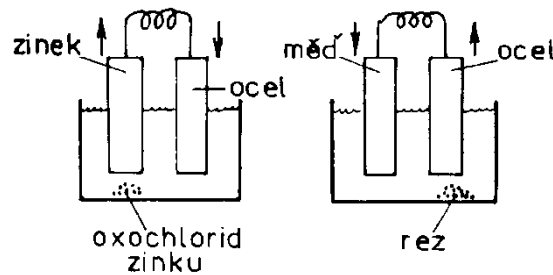
Je to chemická reakce, která probíhá mezi povrchem součásti (pevnou látkou) a prostředím (plynnou látkou) za normálních i vysokých teplot. Rychlost chemické koroze závisí zejména na vysoké teplotě. Jako oxidační plynné prostředí lze uvést: vzduch, O_2 , CO_2 , SO_2 . Naopak, redukční plynné prostředí je v atmosféře: CH_4 , NH_4 . Jako příklad tohoto typu koroze lze uvést tvorbu okují při tváření oceli za tepla, [3].



Obr. 2.1. Tvorba okují

2.1.2 Elektrochemická koroze

U tohoto typu koroze je součást ponořena v elektrolytu. Elektrolyt je buď kapalný roztok, nebo tavenina, který je vodivý. Materiál koroduje, když se vytvoří galvanický článek. Tato reakce probíhá za normální teploty. O tom jestli je prvek elektropozitivní nebo naopak elektronegativní rozhoduje jeho elektrodový potenciál $E^{\circ}[V]$. Na oxidaci nebo redukci má vliv i umístění samotného prvku v Beketově řadě kovů, [4].



Obr. 2.2. Korozie elektro-negativnějšího zinku s ocelí (vlevo) a tvorba rzi s elektro-pozitivnější mědí.

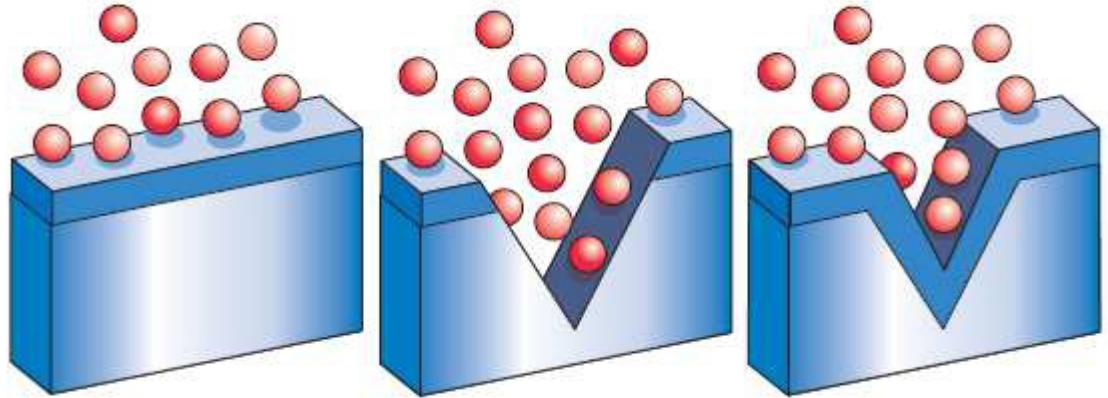
Beketova řada kovů řadí kovy podle hodnot elektronového potenciálu. Tyto hodnoty jsou vztaženy k vodíku, který má nulovou hodnotu elektronového potenciálu. Elektronový potenciál informuje o vlastnostech kovů, zejména pak o oxidačně-redukčních vlastnostech a reaktivitě kovů. Dále Beketova řada rozděluje kovy na ušlechtilé a neušlechtilé, viz obr. 3, [4,5].

K	Ba	Ca	Na	Mg	Al	Mn	Zn	Cr	Fe	Cd	Co	Ni	Sn	Pb	H	Cu	Ag	Hg	Au
+	2+	2+	+	2+	3+	2+	2+	3+	2+	2+	2+	2+	2+	2+	+	2+	+	2+	3+
K	Ba	Ca	Na	Mg	Al	Mn	Zn	Cr	Fe	Cd	Co	Ni	Sn	Pb	H	Cu	Ag	Hg	Au
neušlechtilé																ušlechtilé			

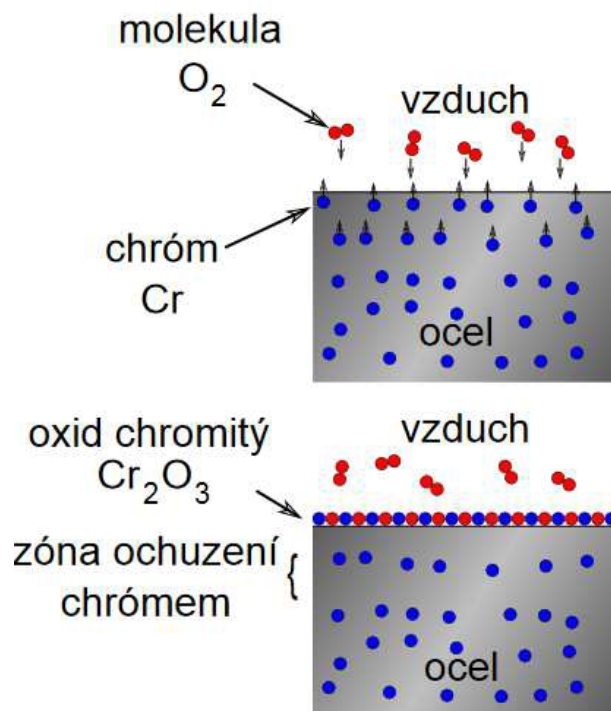
Obr. 2.3. Beketova řada kovů

Odolnosti vůči korozi je docíleno díky pasivaci povrchu oceli. Jedná se o tzv. pasivační oxidickou vrstvu s vysokým obsahem chromu. **Nutnou podmínkou pasivace je minimální obsah 11,74 % Cr rozpuštěného v tuhém roztoku, resp. Cr = 11,74 % + 14,5 % C.** K pasivaci povrchu oceli dojde, pokud je kovově čistý povrch vystaven vlivům prostředí, které obsahuje dostatečné množství kyslíku pro tvorbu oxidu chromu. Tato reakce probíhá automaticky, podmínkou je pouze dostatečné množství kyslíku na povrchové ploše. Tloušťka pasivační vrstvy je úměrná času působení. Jako příklad lze uvést, že za přírodních podmínek, tj. při kontaktu se vzduchem nebo provzdušněnou vodou vzniká trvalá antikorozi povrchová plocha. Tímto mechanismem vzniklá antikorozi vrstva zůstává zachována dokonce i při mechanickém poškození (např. poškrábání, mechanickém zpracování). Tato vrstva se dokáže dokonce i sama obnovit. Je to vlastnost, která je dána mechanismem, jenž spočívá v samotném materiálu. Této schopnosti se říká autopasivace. Pro autopasivaci je zejména důležitý obsah Cr. Tento obsah musí být minimálně 10,5 hmotnostních procent. Dalším požadavkem je hmotnostní procento C, které nesmí být vyšší než 1,2. Díky autopasivaci nepotřebují korozivzdorné oceli žádné dodatečné povrchové úpravy, podmínkou

je tak pouze dostatečný přísun kyslíku. Dalšími pozitivně působícími prvky na pasivační vrstvu oxidů jsou: hliník (Al) a křemík (Si), [5].



Obr. 2.4. Pasivační vrstva a mechanismus autopasivace, [6].



Obr. 2.5. Detailnější mechanismus pasivace u korozivzdorných ocelí, [7].

Přidáním dalších legujících prvků jako jsou nikl (Ni), molybden (Mo), dusík (N), titan (Ti) nebo niob (Nb) se antikoroziční vlastnosti dále zlepšují. Nicméně nesmí být opomenuta správná konstrukce součásti a její zpracování. Špatně zvolená konstrukce společně s namáháním a vysokou teplotou mohou za určitých podmínek porušit pasivační stav a tak zabránit trvalé odolnosti a obnově vůči korozi. Dále může nastat problém u míst, kde není nebo je špatně přístupný kyslík, např.: u mechanických spojů, u špatně přístupných rohů nebo

u nekvalitně provedených svarů. Výsledkem pak může být lokální koroze a to buď ve formě důlků, nebo štěrbin.

Důlková koroze – tento chemický děj probíhá při velké rychlosti reakce na malé ploše, obr. 2.6.



Obr. 2.6. Důlková koroze na povrchu trubky, [8].

Štěrbínová koroze – lokalizovaná koroze, která vzniká mezi dvěma povrchy, buď přechod kov-kov, ale i přechod kov-nekov. Děj probíhá podél nich nebo v jejich těsném okolí, obr. 2.7.

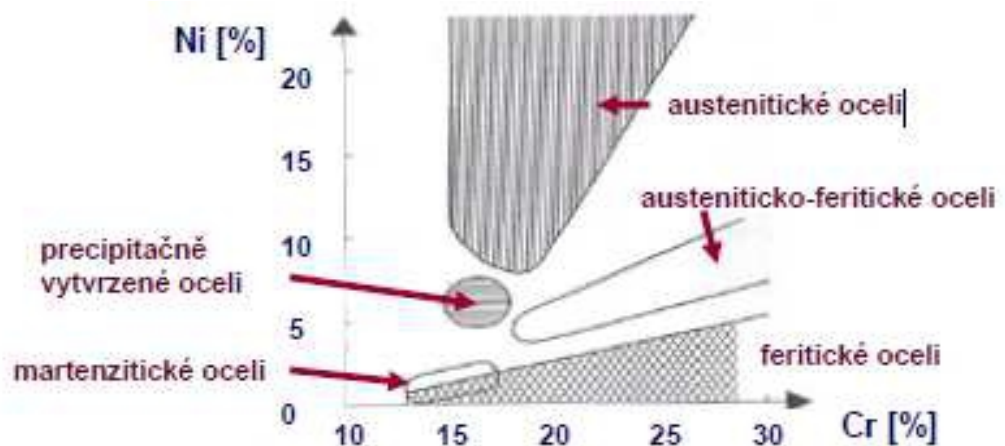


Obr. 2.7. Ukázka štěrbinové koroze příruby z nerezové oceli, [9].

2.1.3 Rozdělení korozi- a žáruvzdorných ocelí

Oceli se rozdělují podle:

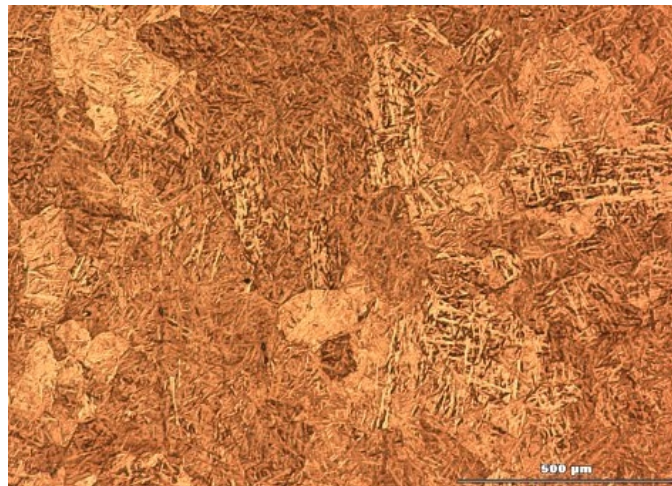
- chemického složení:
 - Chromové (oceli s obsahem chromu 12 – 30 %)
 - Chrom-niklové (hlavními přísadovými prvky, kterými jsou chrom a nikl se docílí lepší odolnosti proti korozi a dále vyšší houževnatosti i plasticity než u standardních chromových ocelí)
 - Chrom-manganové (Tyto oceli jsou levnější variantou ocelí chrom-niklových, díky manganu, který je levnější náhradou drahého niklu. Tyto oceli mají nevýhodu, že nemají tak vysokou odolnost proti korozi a žáruvzdornosti oproti ocelím chrom-niklovým)
- struktury:



Obr. 2.8. Korozi- a žáruvzdorné oceli rozdělené podle struktury, [10].

Martenzitické oceli

Martenzitické korozi- a žáruvzdorné oceli s obsahem chromu do 18 % a obsahem uhlíku do 1,5 %. Tyto oceli mají po zakalení martenzitickou strukturu. Obecně lze říci, že všechny martenzitické korozi- a žáruvzdorné oceli dosahují nejlepší korozi- a žáruvzdornosti u leštěného povrchu, [14].



Obr. 2.9. Martenzitická struktura, [11].

Martenzitické korozivzdorné oceli bez obsahu Ni - tyto oceli obsahují 13 % Cr a 0,15 – 0,45 % C. Jsou používány v běžných podmínkách, kde na ně působí: vzdušná atmosféra nebo voda (vodní pára). Díky přístupu vzdušného kyslíku tak dochází k pasivaci povrchu. Podle obsahu uhlíku se tyto oceli používají:

- s obsahem 0,2 % C – na lopatky parních turbín, součásti čerpadel nebo jako součásti v chemickém průmyslu (odolávají slabé kyselině dusičné HNO_3 a slabým organickým kyselinám), [14].
 - s obsahem 0,3 – 0,4 % C – tyto oceli mají využití u součástí, které jsou více namáhané na otěr, [13].
 - s obsahem 0,5 – 0,6 % C a 15 % Cr s přidavkem Mo, W a V se zlepšuje odolnost proti rovnoměrné i důlkové korozi. V praxi lze tyto oceli použít v potravinářském a lékařském průmyslu, [14].
 - s obsahem cca 1,0 % C a 17 % Cr se docílí ještě vyšších korozivzdorných vlastností, ale pouze za cenu, že tyto ocele již nejsou svařitelné. Jejich využití je především v chemickém průmyslu jako konstrukční díly s velkými požadavky na otěruvzdornost, [14].
- Martenzitické korozivzdorné oceli s obsahem Cr i Ni - tyto oceli obvykle obsahují kolem 17 % Cr, 2 % Ni a 0,2 % C. Využívají se především v energetickém průmyslu jako lopatky parních turbín, ale celkově na všechny součásti, které se dostávají do kontaktu s vodou (párou). Stejně jako korozivzdorné oceli bez obsahu Ni i tyto oceli jsou odolné proti oxidickým anorganickým kyselinám, ale mají oproti nim výhodu v podobě vyšších hodnot pevnosti, lepší plastičnosti a jsou podmíněně svařitelné, [14].
 - Super-martenzitické oceli zobrazují směr vývoje ocelí v této oblasti. Tyto oceli mají specifické složení. Hlavním znakem je nízký obsah C pod 0,015 %. Dále pak: 11 – 13 % Cr, 5,5 – 6,5 % Ni, 2 – 2,5 % Mo a velmi málo S (síry), [14].

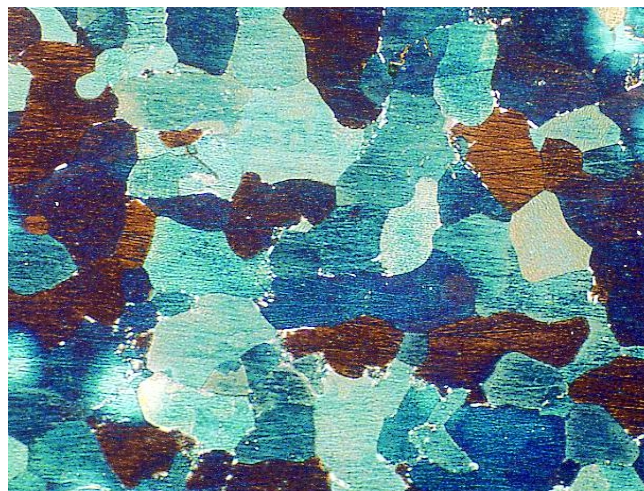
Strukturu této oceli tvoří jemnozrnný, nízko popuštěný martenzit. Každý legující prvek má své opodstatnění:

- Cr – zaručuje dostatečnou korozní odolnost
- Ni – zvyšuje odolnost proti korozi a zlepšuje houževnatost
- Mo - zvyšuje odolnost proti korozi a zvyšuje odolnost oceli vůči koroznímu praskání při namáhání
- Cu, Ti, N, V – mají vliv na optimalizaci struktury a zvyšují odolnost oceli vůči korozi.

Tyto nové oceli se vyznačují: vysokou hodnotou pevnosti při zlepšené houževnatosti, dobrou svařitelností. Používají se například jako potrubí pro těžbu a transport agresivních plynů, [14].

Feritické korozivzdorné oceli

Obsahují 13 – 30 % Cr, $C < 0,1$ %. Jejich uplatnění je velmi široké a souvisí s jejich vysokou pevností a odolností proti koroznímu praskání. Záleží na obsahu Cr a dalších legujících prvků, [14].



Obr. 2.10. Feritická struktura (barevný ferit + bílý terciální cementit), [12].

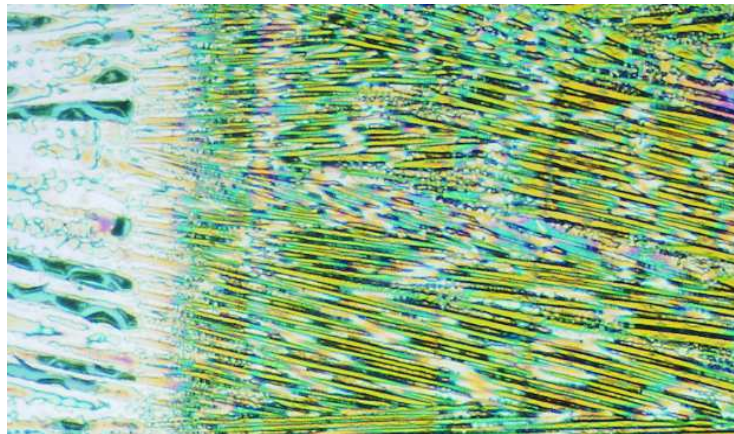
- 13 % chromové oceli – obsah Cr mezi 11,5 - 13,5 % Cr, $C < 0,08$ %. Vykazují dobrou korozní odolnost za přístupu vzdušného kyslíku, vody, vodní páry i slabých anorganických kyselin. Používají se v chemickém, potravinářském průmyslu. Využívají se i jako výměňkové trubky při zpracování ropy, [14].
- 17 % chromové oceli – obsah Cr mezi 16 – 18 % Cr, $C < 0,08$ %, legující prvky: Mo, Ti. Tyto oceli mají široké uplatnění díky svým vlastnostem. Jsou korozivzdorné proti atmosférické korozi, svojí odolnost si udržují i ve slané vodě a slabých organických i anorganických kyselinách, ale i v roztocích

různých solí. Uplatňují se v potravinářském, automobilovém průmyslu, ale i ve vzduchotechnice nebo architektuře, [14].

- 25 % chromové oceli – různý obsah C. Tyto oceli se liší od obou předchozích skupin tím, že mají vyšší korozní odolnost díky vysokému obsahu Cr. Zároveň jsou tím ale i omezené, protože vysoký obsah Cr způsobuje křehnutí materiálu za určitých teplot (nad 900°C). Toto platí pro všechny tři skupiny feritických ocelí, [14].

Austenitické korozivzdorné oceli

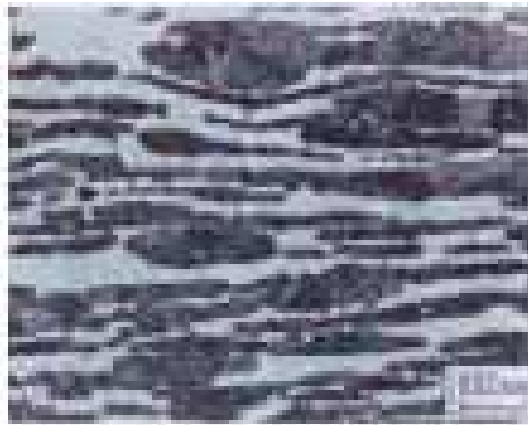
Tyto oceli si udržují austenitickou strukturu, i když je teplota pod bodem mrazu. Obsahují C < 0,1 %, 16–22 % Cr, 8–40 % Ni, 0–5 % Mo. Strukturu zajišťují i austenitické prvky: Ni, Mn, N a C. Podle konkrétního složení se austenitické oceli dělí na různé druhy. Rozhoduje o tom poměr chromu, niklu, uhlíku a manganu. Případně dalších legujících prvků, kterými jsou: N, Mo, Cu, Ti, Nb, Si. Velké využití mají tyto oceli v potravinářském průmyslu například jako kuchyňské nože, [15].



Obr. 2.11. Austenitická struktura s austenitickým návarem, [14].

Duplexní korozivzdorné oceli

Tyto oceli se nazývají duplexní, protože mají smíšenou strukturu. Přidáním Ni do základní matrice korozivzdorné oceli na bázi Cr, vzniká výsledná struktura, která obsahuje ferit δ i austenit. Tato struktura umožňuje vytvoření jemnějšího zrna v obou fázích. Podíl feritu se odvíjí podle obsahu feritotvorných a austenitotvorných prvků. Mohou být legovány: Mo, Cu, N kdy lze dosáhnout vyšší korozní odolnosti proti bodové a štěrbinové korozi oceli. Tyto oceli mají vysokou pevnost v tahu, dosahují vyšší meze kluzu 400 – 500 MPa, odolávají velmi dobře korozi, mají dobrou svařitelnost. Obsahují obvykle 18 – 28 % Cr, 4 – 7 % Ni, a podíl feritu, který v těchto duplexních ocelí vzniká, se pohybuje okolo 25 – 80 %. Při běžných teplotách se podíl fází feritu a austenitu pohybuje v poměru 50 : 50. Nejběžněji se tyto oceli používají v chemickém, potravinářském průmyslu, na medicínskou techniku, na zařízení pro těžbu ropy a zemního plynu. Omezení nastává při používání za vyšších teplot (700°C – 1000°C), kde dochází k vytvrzování oceli a tedy i ke křehnutí, [16].



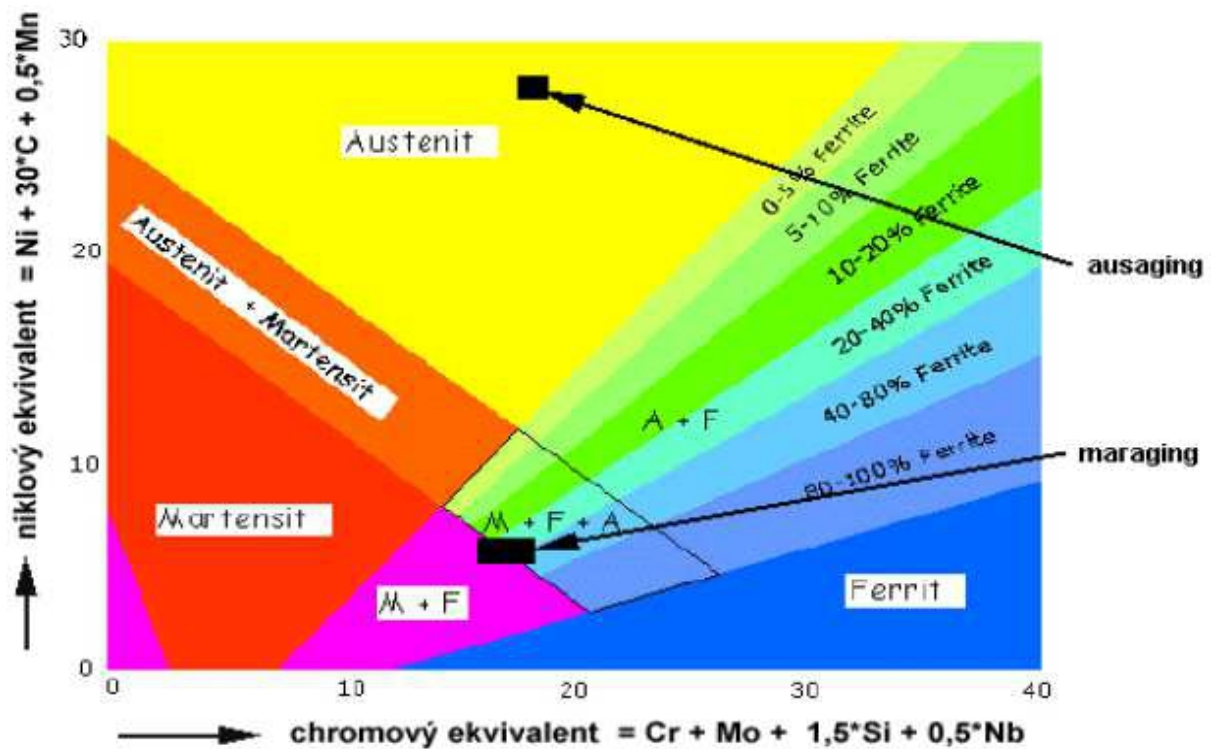
Obr. 2.12. Struktura duplexní oceli, [16].

Používají se v mnoha průmyslových odvětvích, jsou ceněny pro svou odolnost vůči agresivnímu prostředí. Aplikace v chemickém, papírenském a potravinářském průmyslu. Také v zařízeních určených pro těžbu ropy a zemního plynu nebo v zařízeních, kde jsou vystaveny účinkům kyselin nebo chlóru, [16].

PH nerezové oceli

PH označení těchto ocelí znamená, že jsou precipitačně vytvrzované. Jsou to velmi tvrdé a pevné oceli. Velmi rychle reagují na tepelné zpracování, [17].

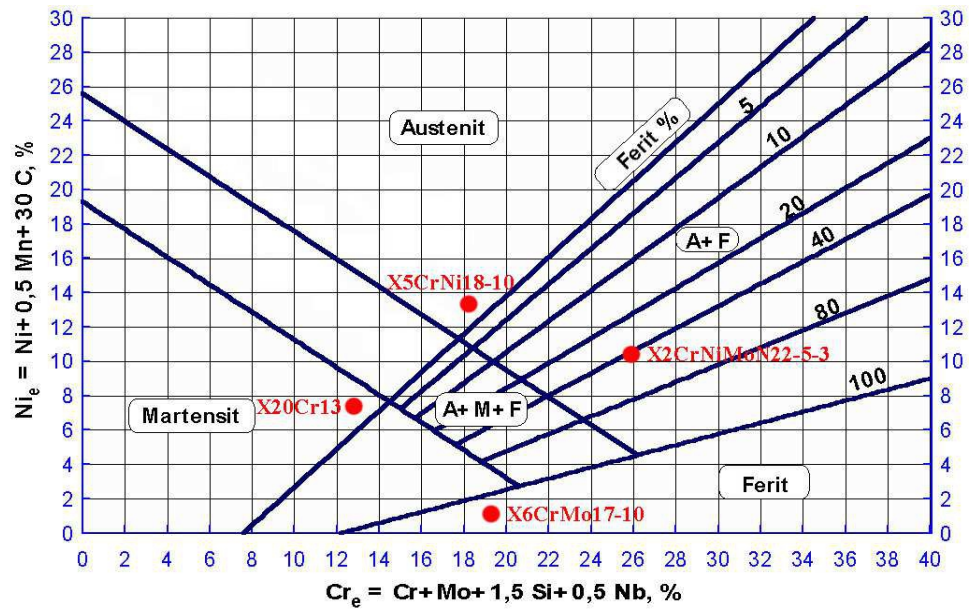
- Maraging oceli – jejich název je odvozen od anglického "martensite ageing" v překladu stárnutí martenzitu. Tyto oceli patří mezi nejpevnější homogenní materiály. Svou tvrdost získávají díky vytvrzování nízkouhlíkového Ni-martenzitu intermetalickými fázemi Ni_3Ti . Novinkou těchto ocelí jsou pak jejich korozivzdorné modifikace, které jsou dolegovány asi 10% Cr. Jsou kaleny v oleji při teplotách 800 – 840°C. Díky nízkému obsahu C (0,01 – 0,03%) vzniká po zakalení niklový martenzit, takto zakalená ocel má nejlepší obrobiteľnosť (svařitelnost). Jak již bylo napsáno výše, po tepelném zpracování, v tomto případě vytvrzování při 450 - 550°C, dochází ke zpevnění. Hodnota meze kluzu se zvýší cca 2,5x (téměř až 3000 MPa). Oceli s takovými parametry jsou používány v jaderném, kosmickém a leteckém průmyslu, kde je požadována velká spolehlivost a mechanická odolnost, [17].



Obr. 2.13. PH oceli v Shaefflerově diagramu, [17].

- **Ausaging oceli** – opět dodatečné tepelné vytvrzení austenitu, podobné mechanické vlastnosti jako maraging oceli

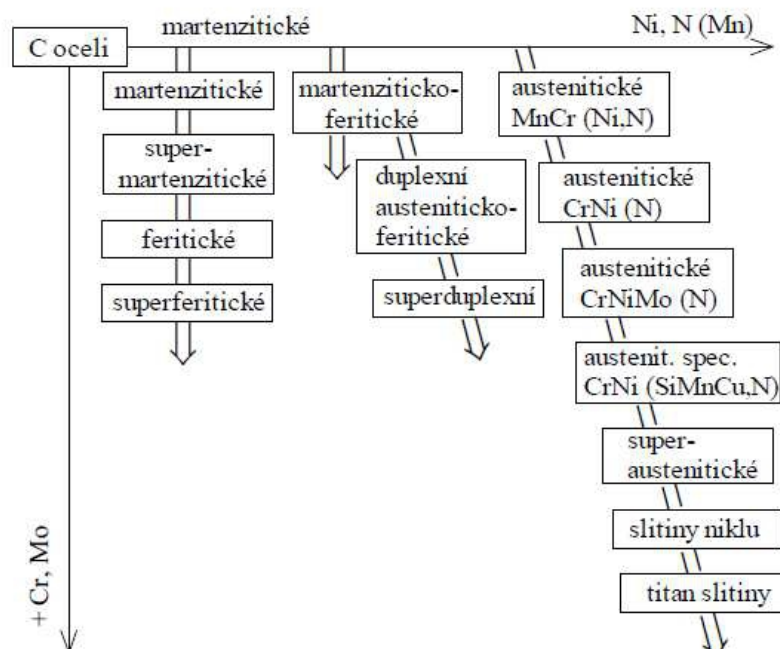
Pro určení kvalifikovaného odhadu složení korozivzdorných ocelí se používá Shaefflerův diagram (obr. 2.14). Jedná se o určení struktury a obsahu Cr a Ni. Z tohoto binárního diagramu lze určit vlivy na výslednou strukturu oceli vyjádřené pomocí feritotvorných prvků prezentované ekvivalentem %Cr a austenitotvorných prvků prezentované ekvivalentem %Ni. Tyto ekvivalenty %Cr a %Ni jsou vyjadřovány podle následujících vztahů:



Obr. 2.14. Shaefflerův diagram, [17].

Existuje několik upravených typů tohoto diagramu, záleží na počtu a obsahu legujících prvků a druhu oceli.

Graf 2.1 udává rozdělení nerezových ocelí v závislosti, jestli obsahují feritotvorné nebo austenitotvorné prvky, [17].



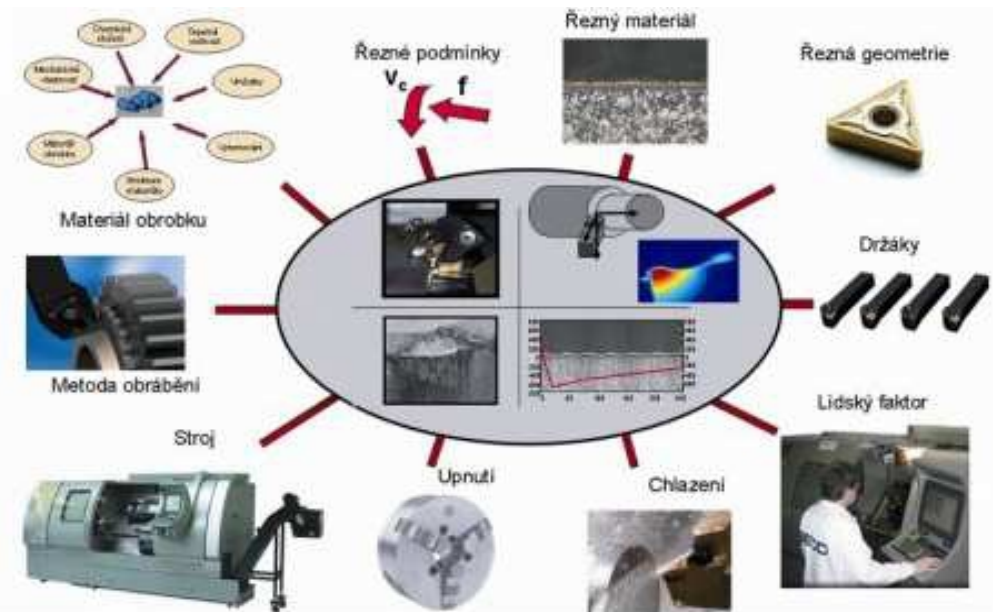
Graf 2.1. Rozdělení nerezových ocelí v závislosti na obsahu legujících prvků, [17].

2.2 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí

Obrobitelnost jako pojem

Při obrábění kovů působí nástroj na materiál obrobku. Přesněji, řezná hrana nástroje působí silou na povrch obrobku tak velkou, že odebrává tento materiál ve formě třísky. Vzniká tak obrobený povrch. Tento povrch musí splňovat nejrůznější požadavky, např.: drsnost, tvrdost, mikrostrukturu, přesnost rozměru a tvar. Aby bylo docíleno všech těchto vlastností v co nejkratším čase a za nejnižší cenu ke spokojenosti zákazníka, musí se kontrolovat a porozumět řadě proměnných předtím, než začne samotný proces obrábění. Mezi proměnné patří:

- materiál obrobku
- řezné nástroje
- řezné podmínky
- strojní vybavení
- strategie řezného procesu
- upnutí nástrojů a obrobku
- způsob chlazení
- lidský faktor (znalosti technologů, obsluha stroje)



Obr. 2.15. Obrobitelnost jako vlastnost materiálu ovlivněna různými faktory, [17].

Obrobitelnost posuzujeme podle různých faktorů:

Kvantitativní měřítko

- index obrobitelnosti – zařazuje obrobek do různých tříd obrobitelnosti. Každá třída má svůj referenční materiál. Skupinu i třídu obrobitelnosti obrobku lze stanovit také podle chemického složení a základních mechanických vlastností, [18].
- životnost nástroje – zde existují dva pohledy. Buď se bude obrábět s ohledem na maximální životnost nástroje, tím se myslí doba nástroje při samotném obrábění (provozní operace) dokud se nástroj úplně neopotřebuje při určitých řezných podmínkách. Druhý pohled má řezné podmínky náročnější, neboť je zde obráběno s ohledem na maximální úběr materiálu, proto i životnost nástroje nebude tak vysoká jako v prvním případě, [18].
- kvalita povrchu – záleží na tepelném zpracování a způsobu výroby. Konkrétně u korozivzdorných ocelí vzniká na povrchu pasivační vrstva, která má jiné mechanické vlastnosti, než zbytek obrobku, [18].

Kvalifikace

- pokud je obrobitelnost kvalifikována jako dobrá musí splňovat faktory, které lze souhrnně nazvat hospodárny. Sledováním těchto faktorů snižujeme náklady na obrábění a tím i cenu samotného obrobku. Do této skupiny patří:
 - obrábění s minimalizací energetických nároků (příkon stroje)
 - obrábění s minimalizací opotřebení nástroj (prodloužení jeho životnosti)
 - použití minimálních řezných sil (výkon stroje → snížení příkonu, delší životnost nástroje)
 - eliminace problémů v oblasti utváření třísky a její následný odvod
 - kvalita obrobené plochy (přesnost, drsnost)

Vlastnosti materiálu

Tato podskupina patří mezi nejvýznamnější, které mají vliv na řezný proces, konkrétně sem patří:

- mechanické vlastnosti – mechanické konvenční obrábění, při kterém je materiál odebírán ve formě třísky. Největší problém je překonat odpor materiálu proti deformaci neboli tvrdost. Čím vyšší tvrdost tím se musí docílit vyšších řezných sil → tím je zapotřebí vyšší výkon stroje, [18].
- chemické složení – na vlastnosti materiálu má velký vliv zastoupení, přítomnost a množství legujících prvků. Legující prvky se rozdělují:
Austenitotvorné – rozšiřují oblast železa γ (austenitu).

Mangan (Mn) – zvyšuje pevnost a snižuje tažnost. Při obrábění působí jako abrazivní částice při odchodu třísky po čele nástroje. Má široké uplatnění díky své ceně, je to levná náhrada niklu.

Nikl (Ni) – zvyšuje pevnost více než chrom, ale méně než mangan a křemík. Používá se u ocelí, u kterých je požadována vysoká houževnatost, a jsou použity v nízkých teplotách. Legování niklem je drahé, používá se spíše výjimečně, protože zvýšení pevnosti není úměrné ceně, [18].

Feritotvorné – zužují oblast austenitu

Křemík (Si) – zvyšuje prokalitelnost méně než chrom a mangan. Ve feritu se křemík zcela rozpouští a tím zvyšuje pevnost.

Chrom (Cr) – tento prvek je důležitý, protože zajišťuje pasivaci u korozivzdorných ocelí. V tuhé fázi musí být přítomen nejméně 11,7 %. Protože se však chrom částečně váže na uhlík ve formě karbidu $(Fe,Cr)_{23}C_6$, musí být jeho minimální obsah v oceli $Cr [\%] = 11,74 + 1,454 C [\%]$. V ocelích s nižším obsahem uhlíku se obsah chromu pohybuje mezi 12 – 14 %, u ocelí s vyšším obsahem uhlíku mezi 14 – 16 %, [18].

Molybden (Mo) – tento prvek se částečně rozpouští ve feritu a tím zvyšuje jeho tvrdost, zbylá část tvoří karbidy, [18].

Wolfram (W) – používá se jako legující prvek u žáruvzdorných ocelí. Zjemňuje lamely perlitu, tím zvyšuje pevnost, [18].

Vanad (V) – zjemňuje zrno. Jeho vliv na vlastnosti oceli je závislý na tepelném zpracování, konkrétně na rozpustnosti vanadu v austenitu. Za normálních teplot se vanad váže s uhlíkem a vzniká karbid vanaditý. Vanad zvyšuje odolnost proti korozi a žáruvzdornost ocelí, [18].

Niob (Nb) – zvyšuje mez kluzu, zjemňuje zrno. Podobně jako vanad zvyšuje odolnost proti korozi, [18].

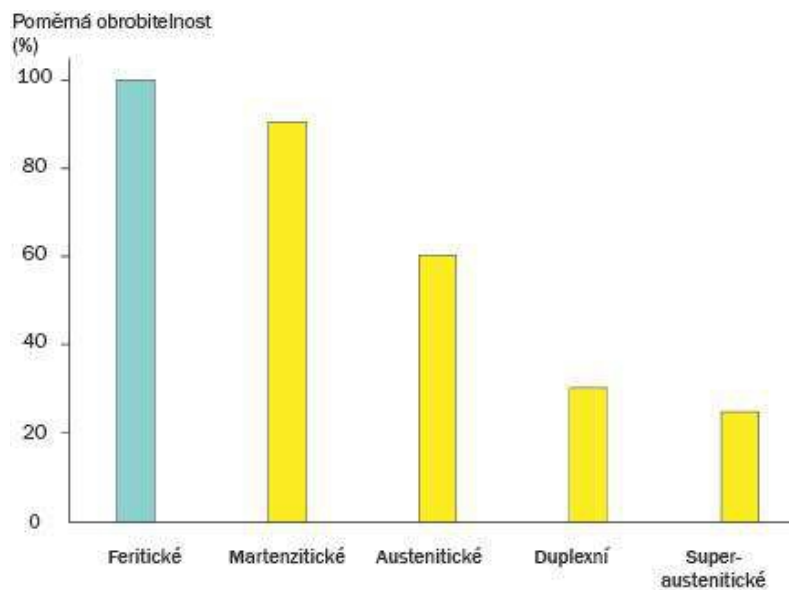
Titan (Ti) – tvoří v oceli karbid, nitrid nebo karbonitrid. Tyto precipitáty zvyšují tvrdost oceli.

- tepelné vlastnosti – podle teorie je nejlepší, když je teplo vzniklé při obrábění odváděno z místa řezu prostřednictvím třísek. Část vzniklého tepla řezným procesem se odvádí ještě do obrobku, do okolního prostředí a do nástroje. Nejvíce tepla se odvede do obrobku, ale záleží na tepelné vodivosti materiálu, na použitých řezných podmínkách (konkrétně na řezné rychlosti v_c) a na geometrii břitu, [18].
- struktura a původ materiálu – struktura materiálu je dána především obsahem Cr a C, dále pak množstvím legujících prvků. Jak bylo popsáno výše, má každý legující prvek vliv na určité vlastnosti obrobku. Původ materiálu lze chápat tak, jak výrobce dokáže dodržet technologický postup výroby, tepelné zpracování, obsah legujících prvků. Obecně kdo vyrobí konkrétní ocel co nejkvalitněji a ocel si udrží své udávané mechanické vlastnosti, [18].

Obrobitelnost korozivzdorných ocelí (shrnutí)

Obrobitelnost jakéhokoliv materiálu je určena podle několika základních kritérií: tažností (přilnavostí), tendencí k deformačnímu zpevnění, tepelnou vodivostí, tvrdostí

a abrazivností. Všechny tyto vlastnosti materiálu jsou ovlivněny množstvím legujících prvků, tepelným zpracováním materiálu a způsobem výroby polotovaru (výkovek, odlitek). Pokud je zapotřebí kvalitní nerezová ocel s velkým množstvím legujících prvků, lze předpokládat, že bude obrobiteľnosť horší (obrábění náročnější), díky sloučení tvrdých fází legujících prvků s uhlíkem (karbidy). Obrázek níže popisuje zvyšování řezných sil a tím i zhoršující se obrobiteľnosť těchto ocelí. Měrná řezná síla se při obrábění pohybuje mezi 1800 – 2500 N/mm². Takto vysoké řezné síly mají další vliv na průběh obrábění. Vzniká velké teplo, a jelikož se nestihne odvést společně s třískou, musí být materiál i nástroj v průběhu obrábění chlazen. Bohužel ani přítomnost chladicí kapaliny nezabrání vytváření nárůstku a mechanickému zpevňování povrchu, [22].



Obr. 2.16. Obrobiteľnosť korozivzdorných ocelí, [19].

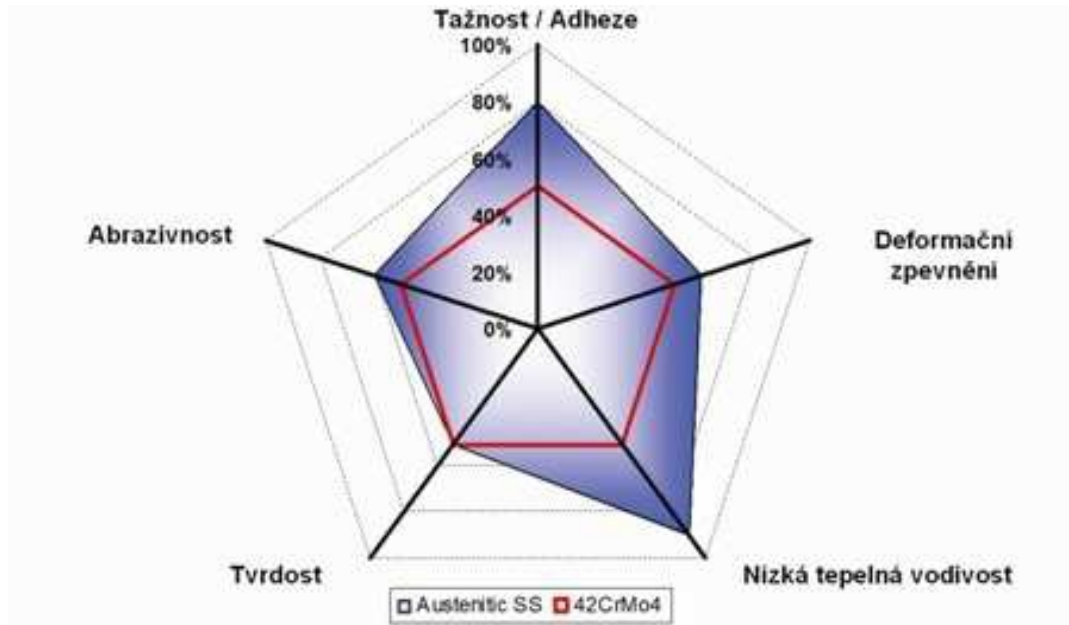
Při obrábění korozivzdorných ocelí vznikají dlouhé třísky, které jsou nevýhodné a namáhají čelo nástroje. Další nevýhodou je, že tyto třísky nemají pravidelný tvar a tak je kontrola při jejich tvorbě složitější. Tvorba třísek a jejich kontrola je snazší u feritických a martenzitických ocelí, naopak u austenitických a duplexních je kontrola utváření třísky a tím i obrábění celkově složitější, [22].

Obrobiteľnosť se dá také porovnávat s předem určeným etalonem. Pro skupinu korozivzdorných ocelí je to ocel 42CrMo4. Jedná se o nízkolegovanou ušlechtilou chrom-molybdenovou ocel určenou k zušlechťování. Tato ocel má uplatnění u součástí, které jsou více namáhané. Po zakalení má tvrdost okolo 58 HRC. Patří mezi nejčastěji používané oceli určené k zušlechťování. Tato ocel se obrábí ve stavu žíhaném na měkko. Při obrábění v nižších rychlostech jí lze použít i ve stavu zušlechťeném. Přidáním síry se obrobiteľnosť zlepšuje, [22].

Chemické složení oceli 1.7225 (42CrMo4)

C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo	Ni	V
0,38-0,45	max 0,4	0,6-0,9	max. 0,025	max. 0,035	0,9-1,2	0,15-0,3	-	-

Tab. 2.1 Chemické složení oceli 1.7225.



Obr. 2.17. Austenitické nerezové oceli v porovnání s 42CrMo4, [20].

Tažnost – korozivzdorné oceli mají vyšší tažnost než běžné oceli. Z tohoto poznatku vyplývá, že materiál nástroje musí být houževnatější. Společně se správnou geometrií tak pevnostní vlastnosti bříty zlepšují a zvyšují odolnost vůči vylomení bříty nástroje. Tenké vrstvy napovlakované na nástroji musí mít nižší koeficient tření, nižší tendenci k adhezi (ulpívání). Geometrie bříty musí dobře utvářet třísku, mikrogeometrie řezné hrany musí být navržena tak, aby se dokázala vyrovnat s vysokou tažností obrobku. Řezná rychlost v_c musí být vyšší než při obrábění běžných ocelí, neboť díky vyšší řezné rychlosti nedochází k takové adhezi, [22].

Deformační zpevnění – korozivzdorné oceli při rostoucím stupni přetvoření mají tendenci se stávat tvrdšími a pevnějšími. Mikrogeometrie řezného bříty má za úkol snižovat toto deformační pnutí. Aby se předešlo značnému opotřebení na bříty nástroje v podobě vrubů, je vhodné často měnit hloubku řezu a zvolit vyšší pracovní posuvy. Většímu opotřebení na řezné hraně se při obrábění korozivzdorných ocelí nelze vyhnout, je to doprovodný jev, který je součástí obrábění korozivzdorných ocelí, [22].

Tepelná vodivost – tyto oceli mají nižší tepelnou vodivost než běžné oceli. Tím vzniká problém, kdy není dostatečně odváděno teplo při obrábění do třísky, ani do materiálu obrobku. Zůstává tedy v místě řezu, což má za následek vyšší teplotu nástroje při obrábění. Proto je nutné při obrábění těchto ocelí místo řezu chladit chladicí kapalinou, a obrábět nástrojem, který si drží vysokou tvrdost za vysokých teplot. Ideální by bylo, kdyby všechno

vzniklé teplo bylo odvedeno společně s třískami. Nicméně pracovní posuvy a řezná rychlost by se měla volit s ohledem na maximální omezení vzniku tepla. Při obrábění korozivzdorných ocelí je běžná plastická deformace břitu nástroje, [22].

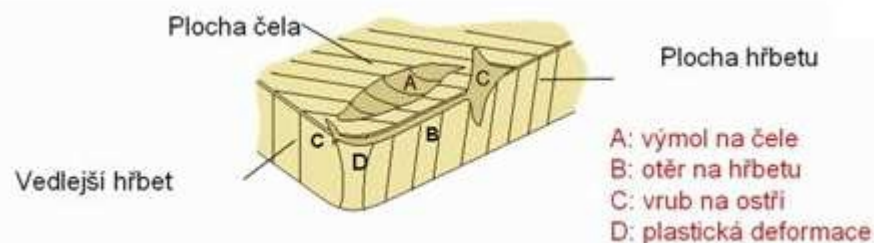


Obr. 2.18. Ukázka plastické deformace nástroje, [20].

Opotřebení v podobě plastické deformace vzniká při operacích za vysokých teplot, při velké řezné rychlosti v_c , při dlouhých dobách ponechání nástroje v řezu nebo při velkých řezných rychlostech v kombinaci s velkými posuvy. Důvodem této plastické deformace břitu je tepelné a mechanické přetížení, které má za následek změknutí pojiva (nejčastěji kobaltu). Tímto vzniká větší rádius špičky břitu nebo může dojít i k jeho vylomení. Pokud by se pokračovalo v obrábění, vzniká nepřesný obrobek. Tomuto i jakémukoliv jinému opotřebení se při obrábění nelze vyhnout, ale lze ho eliminovat a předcházet tím, že se včas odhalí vznikající deformace. Jako opatření lze aplikovat:

- chlazení chladicí kapalinou, snížení řezné rychlosti a posuvu
- obrábět masivnějším břitem s větším rádiusem špičky
- tvrdší a ořezuvzdornější řezný materiál (vhodnější tenká vrstva)
- použití nástroje s lepší geometrií

Tvrdość – tvrdost korozivzdorných ocelí je podobná jako u běžných ocelí, proto není nutné zvyšovat výkon stroje a měnit řezné podmínky (hloubka řezu, pracovní posuvy). Během obrábění se bude řezný nástroj opotřebovávat a při správném nastavení by se mělo docílit největšího opotřebení na hřbetu nástroje, [22].



Obr. 2.19. Druhy opotřebení na hřbetě VBD, [21].

Abrázivnosť – je větší než u normálních ocelí. Zvýšená hodnota vyvolává potřebu povlakovat nástroje tenkou vrstvou. Vrstva musí mít dobrou adhezi k základnímu substrátu. Bez

kvalitního adhezního spojení dochází k degradaci systému substrát - tenká vrstva. Jeden z procesů, které ovlivňují adhezi vrstvy k základnímu substrátu je pak předdepoziční příprava substrátu. Obecně se dá říci, že pod pojmem předdepoziční příprava substrátu si lze představit všechny procesy, které se uskuteční před samotným nanášením tenké vrstvy na nástroj. Dále pak také procesy, které svým působením ovlivňují čistotu, morfologii a chemické složení samotného povrchu substrátu. Všechny tyto procesy mají významný vliv na adhezi tenké vrstvy k substrátu. Přílnavost ovlivňuje:

- úprava řezných hran
- chemické čištění substrátu
- iontové čištění substrátu
- stripping (odpovlakování) nastává v případě nanášení nové vrstvy, kdy je potřeba nejprve starou vrstvu sundat a poté nadeponovat novou.

2.3 Metody nanášení tenkých vrstev

Tenké vrstvy se dnes aplikují na různé materiály například: rychlořezné oceli, slinuté karbidy, cermety, ale i plasty. Od vrstvy, která se nanáší, se očekává vysoká tvrdost a velmi dobrá odolnost proti opotřebení. Materiál, který představuje tenkou vrstvu má vyšší pevnost a tvrdost než ten samý materiál v jiné formě. Této skutečnosti je dosaženo díky tomu, že tenká vrstva neobsahuje žádné pojivo, na rozdíl od substrátu. Dále je to z důvodu jemnějšího zrna a menšího počtu strukturních defektů. Tenká vrstva se svými vlastnostmi zamezuje tvorbě nárůstku (BUE) na břitu nástroje a zároveň zvyšuje odolnost proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje. Metody depozice tenkých vrstev lze rozdělit do dvou základních skupin. Metody PVD jejichž základ spočívá ve fyzikálním principu metody nebo v odprášení či odpaření a ionizaci. Pro tuto metodu se používají zejména prvky: Ti, Al, Si, Cr, Zr, které jsou pak nanášeny na nástroje při teplotách nižších než 600°C. Druhou skupinu tvoří metody CVD, které se vyznačují tím, že pro depozici tenké vrstvy používají reaktivní plyny. Např.: $TiCl_3$, CH_4 nebo $AlCl_3$. Zde je pracovní teplota vyšší (900 ÷ 1100°C). Dále v této kapitole budou tyto dvě metody popsány podrobněji, [1].

- **Metoda PVD** (Physical Vapour Deposition) – fyzikální napařování, které se vyznačuje nízkými pracovními teplotami (pod 600°C). Z tohoto důvodu byla tato metoda uplatňována pro nanášení nástrojů z rychlořezných ocelí, protože právě nízká teplota je zárukou, že nedochází k tepelnému ovlivnění nástroje. U této metody je tenká vrstva nanášena:
 - napařováním,
 - napařováním,
 - iontovou implementací.

Napařování – materiál je odpařován z terčů, které jsou různými způsoby zahřívány. Samotný substrát je pak ohříván stejnosměrným nebo střídavým napětím. Atomy, které se odpaří z terče předtím, než zkondují na substrátu, se pohybují po

nekolizních drahách. Tento způsob nanášení a ulpívání má za následek vytváření povlaku, který má nerovnoměrnou tloušťku. Aby se tomuto jevu zabránilo, je do pracovní komory přiváděn plyn (nejčastěji argon) pod tlakem 0,7 až 26,7 Pa. Díky tomu je vytvořená tenká vrstva rovnoměrná, [1].

Odpařovací zdroje jsou rozděleny podle toho, jak přeměňují tuhé nebo kapalně látky do plynného stavu. Zdroje rozdělujeme na: odporové, indukční, obloukové, paprsek elektronů, laser. Nejdostupnější a cenově nejvýhodnější jsou zdroje odporové, konkrétně vyhřívané dráty a kovové fólie různých typů, druhů a tvarů, což je další výhodou těchto zdrojů. Nejčastějším materiálem těchto zdrojů je wolfram (W), molybden (Mo) a tantal (Ta). Společnými vlastnostmi těchto kovů jsou vysoká teplota tavení a nízký tlak par, takže nedochází ke kontaminaci tenké vrstvy, [1].

Dále se hojně využívá **odpařování elektronovým paprskem** (metoda EB-PVD Electron Beam Physical Vapor Deposition). Tato metoda využívá, jak z názvu vyplývá elektronové paprsky vysokého výkonu. Paprsky jsou vytvářeny elektronovými děly a mají za úkol roztavení a odpaření materiálu z kovových ingotů a zároveň i přehřev základního substrátu uloženého opět ve vakuové komoře. EB-PVD zařízení umí odpařovat i prvky, jejichž páry mají nízký tlak. Jedná se o molybden (Mo), wolfram (W), uhlík (C). Dále toto zařízení umí vytvořit povlaky, kde se střídá několik vrstev (kov, oxid, karbid, nitrid). Nevýhodou tohoto zařízení je pak v tom, že není vhodné pro depozici tenké vrstvy na řezné nástroje, [1].

Výhody obou výše popsaných metod jsou zejména možnosti deponovat čisté tenké vrstvy z materiálů, které jsou rovněž kvalitní, co se týká čistoty, dále tyto materiály substrátu mohou být jakéhokoliv tvaru. Další výhodou je, že se u obou metod snadno řídí a sleduje jejich průběh. Obě PVD metody jsou nejlevnější. Za **nevýhody** lze považovat nízké využití zdrojového materiálu, velké tepelné zatížení, potřebu rozměrné vakuové komory. Dále při utváření tenké vrstvy vzniká možnost zanesení nečistot v důsledku odpařování titanu z nosiče vyrobeného z MgO. Při znečištění kyslíkem a hořčíkem, protože titan redukuje MgO. Také dochází k nerovnoměrnému nanesení tenké vrstvy a špatné depozice u tvarově složitějších součástí z důvodu přímočaré dráhy a omezeného povrchu zdroje, [1].

Obloukové odpařování – tato metoda využívá katodické obloukové systémy, které existují ve dvou druzích. První technologie využívá oblouk, který je opakovaně zapalován a zhasen za pomoci kondenzátoru. Výhodou je, že terč je chladný mezi jednotlivými pracovními cykly. Nevýhodou je pak nízká rychlost depozice vrstvy. Druhá technologie se nazývá kontinuální. Její výhodou je v jednoduchosti a výborném využití celého terče, nevýhodou pak vznik částic, které znečišťují vytvářející tenkou vrstvu. Obě technologie odpařují materiál terče stejným principem a to pomocí nízkonapětového elektrického oblouku. Anoda, která je tvořena vakuovou komorou zařízení hoří oblouk po celé ploše, na katodě, kterou představuje terč, hoří oblouk

pouze bodově. Pro obloukové napařování se používá zařízení, které se skládá z centrální válcové katody, které se dělí na dvě části, které jsou vyrobené z titanu (Ti) a slitiny AlSi. Tato katoda je chlazená vodou, která proudí okolo v axiálním směru. **Výhody** této technologie jsou v uspořádání katody v jakékoliv poloze, lze odpařit jakékoliv materiály pod podmínkou, že jsou vodivé, což lze brát i jako nevýhodu. Samotný terč není tolik znečištěn jako u metody napařování. Za **nevýhodu** lze dále považovat velké zatížení tepelnou radiací, [1].

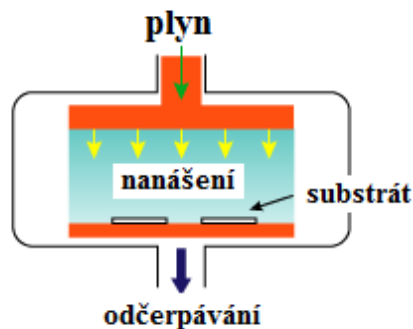
Iontová implantace – jedná se o PVD proces nanášení tenké vrstvy, kde povrch substrátu nebo samotný deponovaný povlak je vystaven bombardování částic, které mají vysokou energii. Mezi terčem a katodou existuje silné elektrické pole, proto dochází k elektrickému výboji v atmosféře, která ionizuje jak částice plynu, tak částice odpařované z terče. Reakcí iontů tak vzniká tenká vrstva, která ulpívá na povrchu substrátu. Tuto metodu lze využít pro nanášení tenkých vrstev, které mohou mít různé složení na povrchy, které mohou být i tepelně zušlechtěné. Tato metoda dovoluje nanášení povlaků i na plasty. Mezi její **výhody** patří odstranění znečištěné vrstvy bombardováním částicemi. Do povrchu rostoucí tenké vrstvy je přivedeno velké množství energie. U tenké vrstvy možnost přesného definování jejího chemického složení, zároveň je proces rovnoměrný a tím i samotná vrstva vzniká rovnoměrně. Touto metodou nejčastěji vznikají povlaky: TiN, TiCN, TiAlN, TiAlVN, CrN, CrAlN. Metoda dále zajišťuje perfektní adheze tenké vrstvy na substrát i vysoká hustota samotné tenké vrstvy. **Nevýhody** jsou: potřeba řídit během nanášení mnoho procesních parametrů. Díky přivedení velkého množství energie může docházet k nadměrnému ohřevu substrátu. Možnost vzniku tlakových napětí v tenké vrstvě nebo zachycení bombardujícího plynu v rostoucí tenké vrstvě, ale tyto dvě varianty se vyskytují pouze za určitých podmínek, [1].

Zjednodušený postup nanášení tenké vrstvy pomocí metody PVD

- očištění předmětů, které budou deponovány a jejich uložení na pracovní stůl a následné vložení do pracovní komory
- zavření pracovní komory a její natlakování na pracovní tlak (5×10^{-3} Pa), následné chlazení této komory pro ještě lepší docílení vakua
- dochází k iontovému bombardování, které čistí a ohřívá předměty, které chceme deponovat. Vše se děje v ochranné atmosféře (argon)
- samotný proces nanášení tenké vrstvy. Po dosažení správné pracovní teploty se nejdříve nanese adhezivní vrstva a poté vrchní tenká vrstva
- proces chlazení, např. napuštěním dusíku do pracovní komory, poté zavzdušnění komory
- otevření pracovní komory, vyndání nadeponovaných předmětů

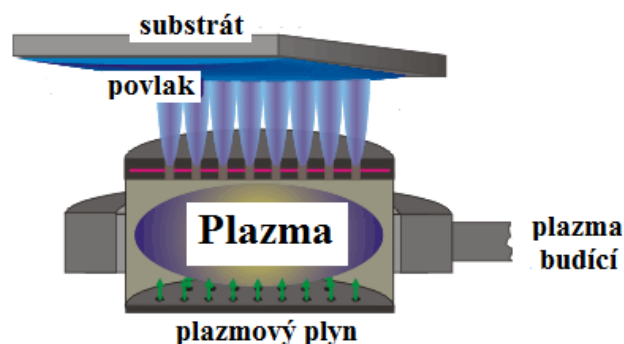
- **Metoda CVD** (Chemical Vapour Deposition) – chemické napařování z plynné fáze, které probíhá při vysokých teplotách ($900 \div 1100^{\circ}\text{C}$) a je nejčastějším způsobem nanášení tenké vrstvy na slinuté karbidy. Tento chemický proces využívá reakce plynných sloučenin s plazmou, která se vytváří v těsné blízkosti povrchu slinutého karbidu. Podmínkou pro tuto reakci je, aby plynné fáze obsahovaly sloučeninu, která bude stabilní a těkavá, neboť je třeba zajistit, aby přivedením energie v podobě ohřevu, plazmového oblouku nebo laseru se tato sloučenina rozložila. Tyto sloučeniny jsou obvykle TiCl_4 , ZrCl_4 , AlCl_3 . K požadované reakci je ještě potřeba, aby v plynných sloučeninách byl obsažen i reaktivní plyn, který neobsahuje kov. V tomto případě nejčastěji N_2 , NH_4 nebo CH_4 . Změnu v kvalitě tenkých vrstev nanášených metodou CVD přinesly modifikované metody, které se oproti klasické CVD metodě liší následujícími společnými znaky. Nízké pracovní teploty při zachování technologie vzniku tenké vrstvy. Mezi tyto metody patří:

- PACVD (Plasma CVD)



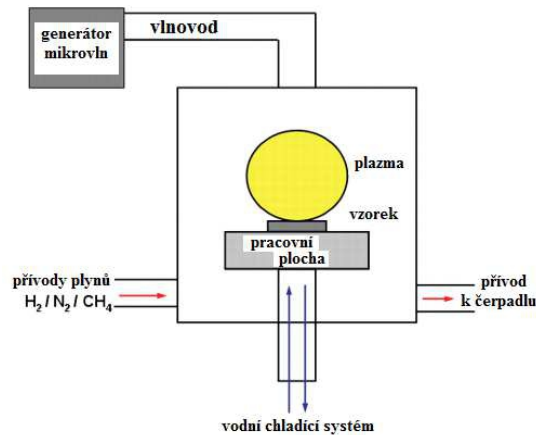
Obr. 2.20. Schéma metody PA CVD, [1].

- PECVD (Plasma Enhanced CVD)



Obr. 2.21. Schéma metody PE CVD, [1].

- MWP-CVD (MicroWave Plasma CVD)



Obr. 2.22. Schéma metody Micro Wave Plasma CVD, [1].

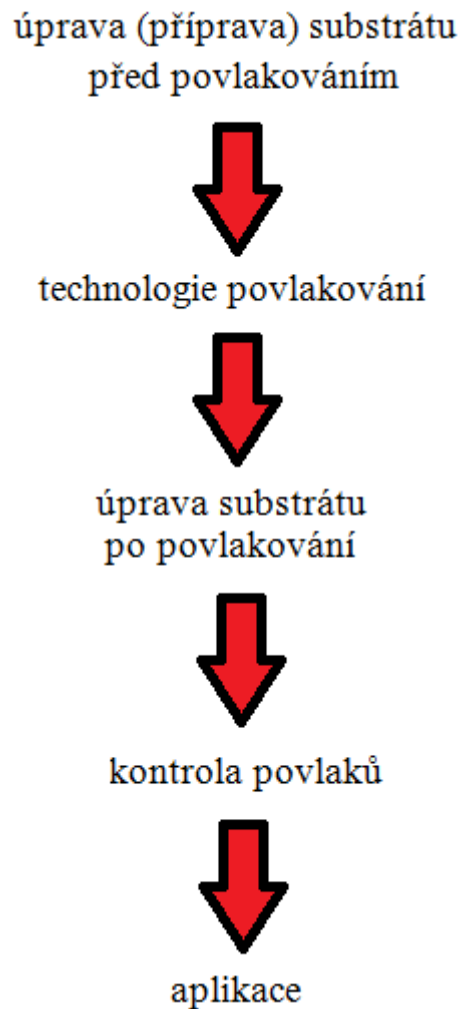
Jako další metody, které fungují na stejném principu lze uvést:

- LP CVD (Low-Pressure CVD) nízkotlaká CVD metoda
- HF CVD (Hot Filament CVD) CVD metoda se žhavicím vláknem
- LI CVD (Laser Inducted CVD) laserem indukovaná CVD metoda
- CA CVD (Cascade Arc Plasma-assisted CVD) metoda CVD s lavinovým plazmatickým výbojem

Metoda CVD využívá reaktor, přesněji využívá dva typy. První typ je reaktor s horkou stěnou, kde je stěna reaktoru obklopena vyhřívacími prvky. Jejich funkce je zahřívání předmětů, na které bude nanesena tenká vrstva a samozřejmě udržovat stálou konstantní teplotu stěny reaktoru, [1].

Cyklus nástroje

Celý pracovní proces depozice je náročný, jak po finanční, tak i časové stránce. Je proto rozdělován do několika dílčích technologických procesů, které (pokud jsou prováděny správně) výrazně ovlivňují kvalitu nanesené tenké vrstvy a také její soudržnost se základním substrátem. Celý cyklus má následující sled operací, [1].



Obr. 2.23. Výrobní cyklus nástroje.

Níže je rozepsána každá část technologického procesu:

Úprava (příprava) substrátu před depozicí

Pod tuto operaci spadá:

- *vybroušení nástroje* – do technologie broušení nástroje patří mnoho parametrů, které mají vliv na nástroj, například: stroj, brusný nástroj, chladicí kapalina a způsob broušení. Nejdůležitější je kvalita břítu a broušených ploch. Při dobré kvalitě broušeného povrchu je docíleno dobré adheze vrstvy, naopak pokud se vyskytují ostré nerovnosti, tenká vrstva se odlupuje. Nerovnosti se odstraňují různými úpravami, je však nutné zvolit takové médium, které neulpívá na nástroji.
- *úprava nástroje před depozicí* – existuje několik metod úprav, například:
 - *odmaštění* – používají se látky na bázi uhlovodíků, které odpovídají přísným ekologickým normám. Dříve byla mastnota odstraňována benzínem nebo petrolejem.

- *mokrý čišťení* – používá k čišťení kapaliny, které obsahují KOH a NaOH. Jedná se o metody kombinující: oplachy, tlakové oplachy, ultrazvuk, vakuové sušení nebo elektrochemické metody. Nejdříve se nástroj vyčistí v roztoku s alkalickým prostředím, následují oplachy, jejichž účelem je odstranit zbytky čisticích lázní. Zároveň ochraňují povrch povlakovaného předmětu proti korozi.
- *Pískování, omílání, kartáčování, magnetické čišťení, ruční honování* - tyto metody, při kterých se odstraňuje z povrchu předmětu nežádoucí povrchová nečistota, lze aplikovat i u mírně pórovitých povrchů. Liší se pracovním médiem.
- *stripping* – jedná se o stahování starých povlaků u nástrojů, které byly přebroušovány. Existují různé technologie, které se odlišují podle toho, z kterého materiálu se tenká vrstva odstraňuje. Pokud se jedná o HSS ocel se využívá peroxidu vodíku (H_2O_2) a vody. Po reakci s horkým peroxidem, teplota okolo $70^\circ C$ je povrch opláchnut vodou. Druhá technologie je odstraňování povlaků z povrchů slinutých karbidů. Tato technologie je složitější, protože musí být vhodně zvolená, tak aby nenarušila povrch substrátu a nevyleptala kobaltové pojivo ze struktury SK. Kobalt je prvek, který je velice citlivý na kyselé či zásadité prostředí. Zde je opět použit peroxid vodíku, ale v nižších koncentracích než u první technologie. Nižší je i pracovní teplota.

Úprava substrátu po povlakování

- *leštění po povlakování* – účelem této operace je odstranění větších částic z povrchu nástroje, které zbyly po povlakování. Zároveň snížit drsnost funkčních ploch a břitů příslušného nástroje. Jako leštící médium se používá například tkanina s abrazivem. Tato úprava má příznivý vliv na životnost nástroje, ale i na tzv. zaběhnutí nástroje. Pozitivně pak ovlivňuje kvalitu obrobenej plochy.

Kontrola povlaků

Nástroje, které jsou již napovlakované se musí před odesláním k zákazníkovi zkontrolovat. Tato mezioperace přichází na řadu i v případě vyvíjení nových tenkých vrstev, kde její účel není zkontrolovat, ale spíše charakterizovat vlastnosti. Do fyzikálních hledisek charakterizujících každou tenkou vrstvu patří: tvrdost, tloušťka, adheze, drsnost a kluzné vlastnosti. U chemických hledisek je to pak odolnost vůči oxidaci, tepelná a chemická stabilita tenké vrstvy.

Fyzikální vlastnosti:

tvrdost	Základní vlastnost ořezovacích vrstev, nejběžnějším opotřebením abrazivní ořez. Hodnoty tvrdosti tenkých vrstev se nejčastěji udávají v GPa.
tloušťka	Nejdůležitější vlastností tenké vrstvy, má přímý vliv na trvanlivost nástroje. Tloušťka tenké vrstvy se různí, podle toho pro jaký typ operace použijeme daný nástroj.
drsnost	Ovlivněna tenkou vrstvou, ale také kvalitou broušení nástroje. Drsnost způsobují makročástice, které zde vznikají následkem procesu technologie povlakování. Drsnost negativně ovlivňuje proces obrábění. Zvyšuje řezné síly → zvyšuje tepelné i mechanické zatížení břitu nástroje. Lze eliminovat následnými technologickými úpravami po nadeponování vrstvy na nástroj.
adheze	Ulpívání vrstvy na nástroj. Aby vrstva pracovala správně, musí se zajistit správná adheze vrstvy k substrátu. Adheze se vyhodnocuje metodou scratch-test.
kluzné vlastnosti	V průběhu procesu obrábění se zhoršují fyzikální a chemické vlastnosti substrátu a to díky vzrůstající teplotě. Tenká vrstva tento jev dokáže potlačovat. Pro změření kluzných vlastností se používá metoda pin-on-disk.
odolnost vůči oxidaci	Rozeznávají se dva různé typy oxidace. Povrchová a hloubková. U povrchové oxidace dochází ke vzniku pasivační vrstvy, která může bránit další oxidaci. U druhého typu oxidace může dojít k destrukci tenké vrstvy. Před destrukcí vrstvy dochází k poklesu její tvrdosti. Každá tenká vrstva má svou maximální teplotu použití, jejíž hodnota je určena odolností proti oxidaci.
chemická stabilita	Udává odolnost tenké vrstvy proti chemické reakci s obráběným materiálem. Tato vlastnost se mění s řeznými podmínkami, pokud se řezné podmínky zvyšují, zvyšuje se i teplota procesu obrábění.
tepelná stabilita	Tenká vrstva je termodynamicky nestabilní, v průběhu obrábění je rovněž vystavena vysokým teplotám, může tak docházet ke změně vnitřní struktury. Výsledkem pak může být změna mechanických vlastností. Tepelná stabilita určuje pak optimální řezné podmínky a vlastnosti tenké vrstvy.

Tenké vrstvy v diplomové práci

Použití tenkých vrstev se neustále rozšiřuje, díky zlepšujícím se vlastnostem. Největší uplatnění mají však v oblasti konvenčního obrábění. Skutečné ověření přináší až porovnání tenkých vrstev neboli zjištění jejich konkurenceschopnosti. V této diplomové práci se porovnává konkurenceschopnost nově vyvinuté tenké vrstvy TiB₂/TiBC s konkurenčními vrstvami. Experimentální část diplomové práce je rozdělena na dva samostatné experimenty:

- pro experiment s VBD byly vybrány vrstvy:
 - IN04S
 - TiB₂/TiBC
 - TiAlN (IN2004)

- pro experiment s monolitními frézami byly vybrány vrstvy:
 - základní substrát
 - TiB₂/TiBC
 - TiAlN
 - Triple-Coating

Vrstva TiAlN

Tenká vrstva TiAlN patří v praxi mezi nejvíce používané, z tohoto důvodu se i hodně laboratorně testuje. Patří mezi ideální vrstvy pro vysokorychlostní obrábění. Samozřejmě z probíhajícího vývoje existuje již mnoho variant této vrstvy. Všechny vrstvy obsahují různé poměry titanu (Ti), hliníku (Al) a dusíku (N). Hliník je v těchto metastabilních tvrdých povlacích obsažen více než 50%. Vrstva se postupně vyvíjela a měnil se především poměr kovů, tedy Ti a Al. Prvně v roce 1989 přišla společnost CemeCoat s vrstvou Ti50Al50N, dále v roce 1999 Metaplas Ionon s vrstvou Al55Ti45N, poté následovala vrstva Al60Ti40N zavedená společností Kobe Steel v roce 1992 a poslední modifikace Al66Ti34N přišla opět od firmy Metaplas v roce 1996. Všechny uvedené vrstvy byly nanášeny fyzikálním principem depoziace (PVD), [23].

Za základní výhody TiAlN jsou považovány:

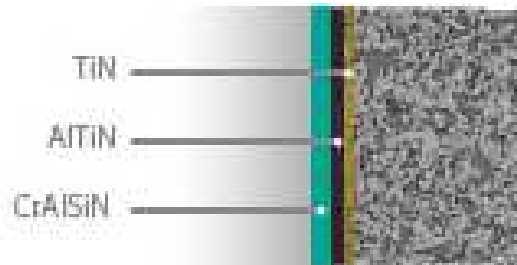
- Zvýšená odolnost vůči oxidaci za zvýšených teplot v důsledku vytvoření oxidační vrstvy hliníku na povrchu
- Zvýšená tvrdost nadeponované vrstvy díky změně mikrostruktury a ztvrdnutí základního substrátu
- Vytvrzení povlaků při pracovních teplotách typických pro obráběcí nástroj z důvodu rozpadu TiAlN na TiN a AlN

Vrstva TiAlN byla vybrána především z důvodu podobných mechanických vlastností jako vrstva TiB₂/TiBC.

Vrstva Triple-Coating

Tato vrstva je použita v experimentu s monolitní kuželovou frézou ze slinutého karbidu. Je vyvinuta firmou SHM, s.r.o., která má sídlo v Šumperku. Jak už samotný název tenké vrstvy napovídá, je složena ze tří tenkých vrstev. Jako první tzv. adhezní povlak přijde na substrát vrstva TiN, jako vrstva středová je napovlakována vrstva AlTiN a jako vrchní pak nanokompozitní vrstva CrAlSiN. Výhoda této vrstvy je především v kombinaci houževnatosti, kterou zajišťuje vrstva AlTiN a vynikající tvrdosti v podobě vrstvy CrAlSiN.

Samotná vrstva je výrobcem doporučena k obrábění tvrdých kalených materiálů, mezi které patří i v experimentu testovaný materiál obrobku, ocel 17021.2, [24].

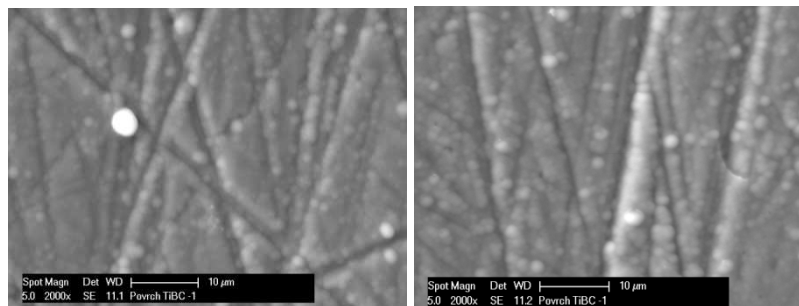


Obr. 2.24. Rozložení vrstev ve vrstvě Triple-Coating od firmy SHM, s.r.o., [24].

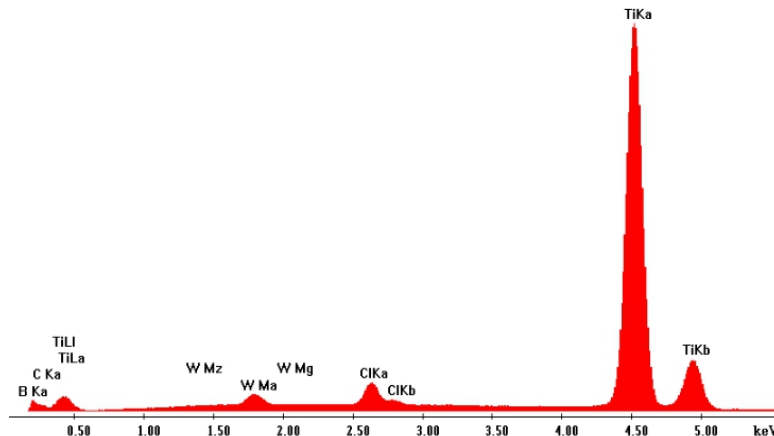
Vrstva TiB_2/TiBC

Tato tenká vrstva je vyvinuta firmou VUHŽ, která sídlí ve Frýdku-Místku. Původně byla aplikována na stříhací části těžkých strojů. Firma VUHŽ se rozhodla tuto vrstvu upravit a prorazit s ní i v oblasti tenkých vrstev, které jsou určeny na obráběcí nástroje. Pochopitelně všechny vlastnosti včetně chemického složení si firma chrání jako svoje know-how. Proto v této práci nejsou uvedeny její bližší vlastnosti. Výrobce této vrstvy předpokládá, že se mechanickými vlastnostmi velmi podobá vrstvě TiAlN. Vrstva TiB_2/TiBC je deponována metodou PA CVD, kdy nejdříve je na substrát nadeponována vrstva TiB_2 a na ní vrstva TiBC.

Vrstva byla pozorována Doc. Dr. Ing. Antonínem Křížem pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu na KMM. Z fotek, které byly pořízeny tímto mikroskopem, jsou patrné stopy po broušení, vrstva má drsný povrch. Výsledky z rozboru vrstvy prokázaly přítomnost prvků substrátu, viz graf 2.2. Z toho vyplývá, že vrstva nemá dostatečnou tloušťku, což může mít negativní vliv na trvanlivost břitu a adhezi systému tenká vrstva-substrát.



Obr. 2.25. Snímky vrstvy TiB_2/TiBC pořízené řádkovacím mikroskopem.

Graf 2.2. Obsah prvků ve vrstvě TiB₂/TiBC.

Vlastnosti tenké vrstvy TiB₂/TiBC

Youngův modul	415 GPa
Koeficient tření (substrát vrstva)	0,7
Teplota oxidace	850°C
Tvrдость HV	45 GPa
Pnutí	-2,1 GPa (kompresní)
Redukovaný modul pružnosti	
Eit	415 GPa
Hit	45 GPa
Tvrдость	4300 HV _{0,025}

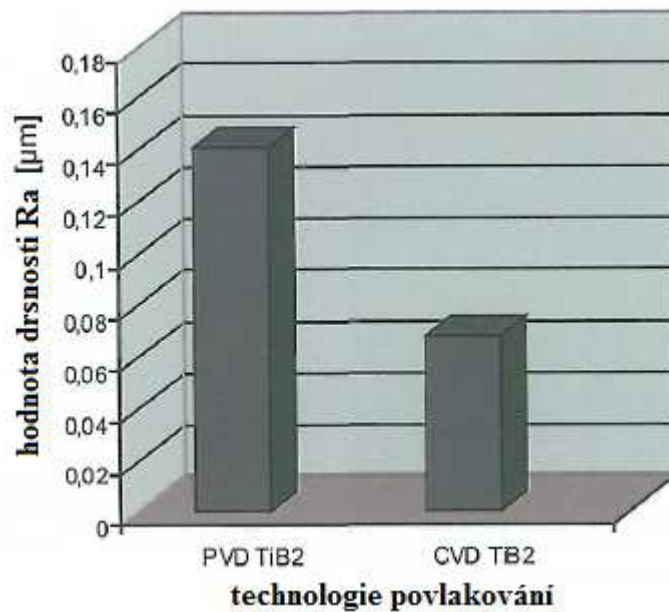
Tabulka 2.2 Vlastnosti vrstvy TiB₂/TiBC.

Pozn.: Eit – efektivní modul pružnosti vtisku

Hit – vtisková tvrдость

Vrstva TiB₂

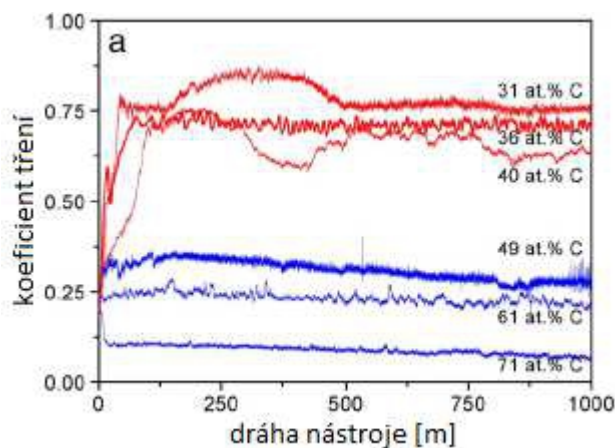
Tato vrstva dosahuje vysoké tvrlosti při vysoké i nízké teplotě, má dobrou tepelnou i chemickou stabilitu. Svými vlastnostmi ji lze přirovnat ke karbidu titanu (TiC). Těchto vlastností je dosaženo především díky přítomnosti boridům. Tato vrstva je na substrát deponována PVD technologií, je tak limitována svojí křehkostí, která vzniká reakcí TiB₂ s kovovými pojivy, vznikají křehké eutektické fáze. Nově bylo dokázáno, že aplikace CVD technologie nanášení tenké vrstvy na substrát vede ke zlepšení struktury a chování vrstvy při obrábění, především titanových slitin. Tvrдость povlaku TiB₂ byla zvýšena o 60% oproti povlaku deponovaného PVD technologií. Drsnost povlaku byla naopak o 60% snížena. Dále bylo docíleno jemnější struktury společně s dobrými adhezními vlastnostmi.



Obr. 2.26. Vliv technologie povlakování na drsnost povrchu nadeponované vrstvy.

Vrstva TiBC

Tato vrstva je houževnatá a odolná proti opotřebení podobně jako vrstva TiC. Oba parametry jsou závislé na tloušťce deponované vrstvy. Nejvyšších hodnot dosahuje vrstva při obsahu uhlíku mezi 40 ÷ 50%. Nicméně na množství uhlíku je závislý i koeficient tření μ , viz graf 2.3, [25].



Graf 2.3. Závislost koeficientu tření μ na obsahu uhlíku C a ujeté dráze nástroje, [23].

Je patrné, že koeficient tření a opotřebení se s nárůstem uhlíku mění. Průměrný koeficient tření se zmenšuje od 0,79 do 0,10. Pokud stoupne koncentrace uhlíku na hodnotu

























mezi 20 ÷ 30 % C, vzroste okamžitě i koeficient tření na hodnotu $\mu = 0,3$. Když obsah uhlíku dosahuje 50% je koeficient tření přibližně $\mu = 0,1$.

Tvrдость HV	22,2 ÷ 30,7 GPa
Youngův modul	171 ÷ 216 GPa
Hit	40 GPa
Eit	398 GPa
Pnutí	0,6 GPa
Oxidační odolnost	750°C
Tloušťka h	2 μm

Tab. 2.3. Vlastnosti vrstvy TiBC , [25].

Vliv povlaku na řezný proces

V současné době je nejpoužívanějším řezným materiálem slinutý karbid. Slinutý karbid začal sloužit jako substrát od roku 1969, kdy byla zavedena výroba VBD s vrstvou TiC. Od té doby se výrobci snaží aplikovat tenkou vrstvou na různé materiály substrátu. Tabulka 2.3 udává různé kombinace materiálů substrát-tenká vrstva. Zelená barva znamená, že daná kombinace se užívá, oranžová barva pak značí, že daná kombinace je ve vývoji, [26].

substrát	tenká vrstva				
	kovy	nitridy	karbidy	oxidy	boridy
keramika, sklo					
slinuté karbidy					
ocelové slitiny					
neželezné slitiny					
uhlík, diamant					
těžkotavitelné kovy					

Tab. 2.4. Kombinace aplikací materiálů na systém substrát-tenká vrstva, [26].

Z tabulky je na první pohled patrné, že největší vývoj zaznamenaly právě slinuté karbidy. Po první aplikaci tenké vrstvy TiC následovaly vrstvy TiN a TiCN. Dnešní generace nástrojů si již nevystačí s několika vrstvami. Výrobci zkoušejí různé typy tenkých vrstev.

Typem vrstvy je myšleno vrstvy různých generací, které byly postupně vyvíjeny podle požadavků trhu. Existuje několik typů tenkých vrstev:

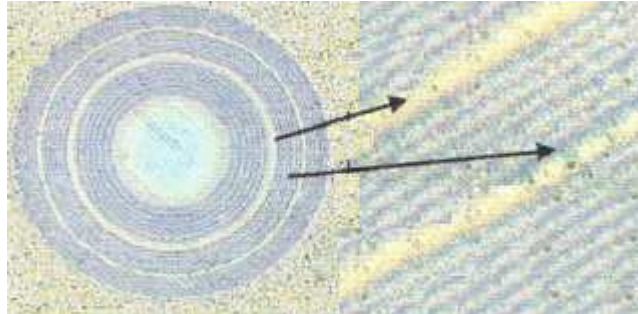
- 1. generace – s touto generací tenkých vrstev je nejčastěji spojována vrstva TiC, která se vyznačovala slabou adhezí substrátu a tenké vrstvy. Špatná adheze byla dána nekvalitní technologií výroby. Při obrábění nástrojem s touto tenkou vrstvou docházelo k odlupování a tím i vyštipování břitu nástroje, [26].
- 2. generace - do této generace se řadí tenké vrstvy TiC, TiCN a TiN. Liší se od předcházející generace, tím, že již nemají eta-karbid na přechodu systému substrát-tenká vrstva. Tím se zabránilo odlupování vrstev a nástroje tak mohly lépe plnit svoji funkci, [26].
- 3. generace – u této generace dochází k postupnému deponování více vrstev. Vícevrstvý povlak představují dvě až tři vrstvy, někdy i více. Každá vrstva má zde svoji funkci a jsou deponovány v přesném pořadí, které je odvozeno od jejich vlastností. Jako první jsou deponovány vrstvy s lepší adhezí k substrátu, které jsou zároveň více náchylné na opotřebení. Naopak poslední vrstva nemusí mít tak dobrou adhezi k substrátu naopak vyznačuje se vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení a oxidaci za vysokých teplot. Samotná adheze poslední vrstvy k vrstvě předchozí vyplývá z procesu povlakování. Mezi vrstvy této generace lze zařadit: TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, [26].
- 4. generace – vrstvy v této generaci lze označit termínem „vícevrstvé“ nebo „multivrstvé“, protože jsou složeny z více než deseti vrstev (mezivrstev), [26].



Obr. 2.27. Multivrstvý povlak TiN/Al₂O₃ povlakovaný metodou PACVD, [26].

Materiály, které se používaly pro výrobu vrstev 3. generace, jsou zde stejné. Metodou CVD jsou multivrstvy vyráběny cíleným řízením atmosféry v svlakovacím zařízení. U metody PVD je pak multivrstvy docíleno odpařováním různých typů targetů. Do této generace patří:

- nanokompozitní vrstvy – jsou složeny ze dvou nebo tří vrstev, které jsou vzájemně nerozpustné a nemísitelné. Jedna z těchto vrstev musí být krystalická. Dále jsou teplotně stabilní i při vysokých teplotách, [26].



Obr. 2.28. Nanokompozitní vrstva MARWIN MT, tmavé vrstvy $(Ti_{1-x}Al_x)N/\alpha-Si_3N_4$ s proměnnou hodnotou x . Světlé vrstvy – TiN. Vzdálenost mezi dvěma vrstvami TiN je asi $1\mu m$, [27].

- gradientní vrstvy – složení této vrstvy se rovnoměrně mění směrem od substrátu k povrchu tenké vrstvy, [26].
- supermřížkové vrstvy – zde je základní vrstva opakována s krátkou periodou, takže tvoří jednotnou mřížku. Podmínkou je, že jednotlivé složky vrstvy nesmí být krystalické, [26].

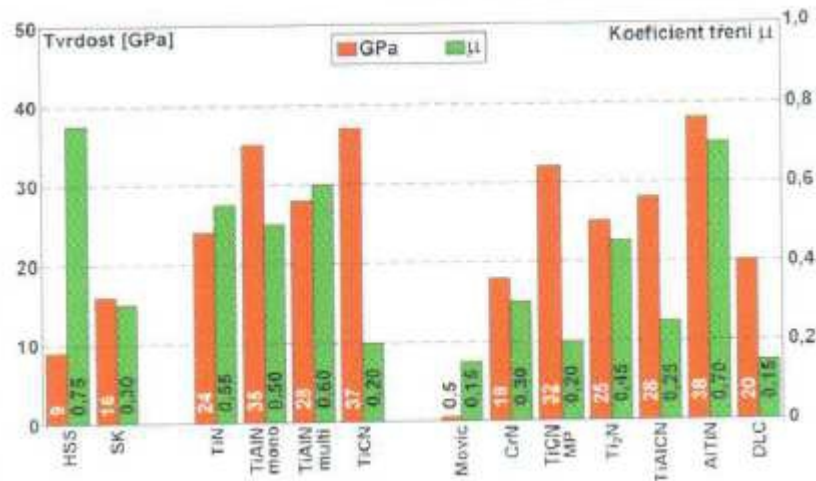
Porovnání vlivu povlaků na řezný proces

V dnešní době se deponují různé typy tenkých vrstev na různé substráty pomocí různých technologií. Každá vrstva má různé fyzikální i mechanické vlastnosti. Kombinace těchto vlastností pak ovlivňuje odolnost tenké vrstvy, která je nadeponována na řezném nástroji, [26].



Obr. 2.29. Fyzikálně-chemické vlastnosti povlakovaných materiálů, [26].

Jak je vidět z obr. 2.30, který porovnává tvrdost a koeficient μ dvou substrátů (HSS a SK) s několika typy tenkých vrstev. Z grafu je patrné, že podkladový substrát ze slinutého karbidu má vyšší tvrdost (16 GPa oproti 9 GPa). Mezi vrstvami má nejvyšší tvrdost vrstva AlTiN a TiCN. Naopak vrstva AlTiN má vysoký koeficient tření, který významným způsobem ovlivňuje odolnost proti opotřebení na nástrojích během obrábění, [26].



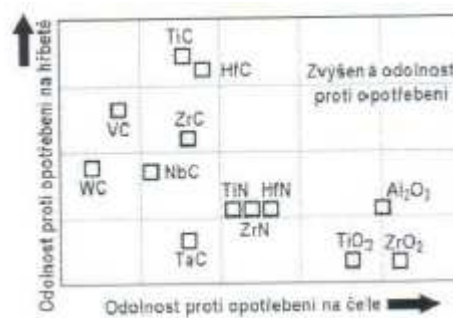
Obr. 2.30. Tvrdost a koeficient tření povlakovaných materiálů, [27].

Tabulka 2.4 porovnává některé tenké vrstvy na základě hodnocení různých vlastností. Mezi hodnocené vlastnosti patří: chemická stabilita, odolnost proti oxidaci, tvrdost a tvrdost za vysokých teplot, [26].

Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
nejlepší	Al_2O_3	Al_2O_3	TiC	Al_2O_3
↑	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN
	TiN	TiN	TiCN	TiN
	TiCN	TiCN	Al_2O_3	TiCN
nejhorší	TiC	TiC	TiN	TiC

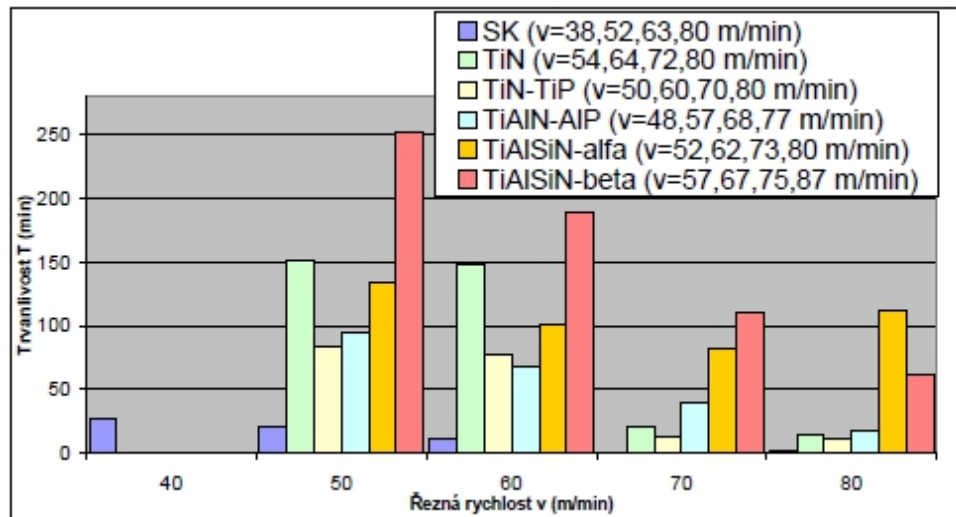
Tab. 2.5. Porovnání tenkých vrstev, [26].

Z tabulky 2.4 je patrné, že největší tvrdost má tenká vrstva TiC, ale s narůstající teplotou ztrácí svou tvrdost. Oproti TiC je TiN měkčí, ale více termodynamicky stabilní tenká vrstva. Tento fakt potvrzuje obr. 2.31, kde je patrné, že TiC je nejvíce odolná proti abrazivnímu otěru oproti TiN, která je měkčí a je tak méně otěruvzdorná. Al_2O_3 má nejvyšší tvrdost za tepla a je také nejvíce chemicky stabilní tenkou vrstvou. Díky těmto vlastnostem se uplatňuje ve vícevrstvé technologii deponování tenkých vrstev na substrát, [26].



Obr. 2.31. Odolnost povlakovaných materiálů proti opotřebení, [26].

Dalším parametrem, který rozhoduje, zda použít při obrábění nástroj s tenkou vrstvou či nikoliv je cena. Z grafu 2.4 je patrné, že nedeponovaný nástroj má několikanásobně menší trvanlivost než nástroje s tenkou vrstvou. V tomto případě při různých v_c porovnávána trvanlivost nástroje ze SK s nástroji povlakovanými vrstvami: TiAlN, TiAlSiN a TiN, [27].

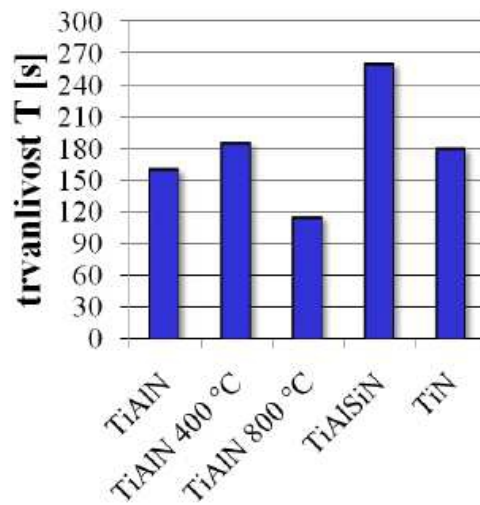


Graf 2.4. Porovnání trvanlivosti nástroje ze SK s nástroji povlakovanými různými vrstvami, [27].

Přínos tenké vrstvy na nástrojích

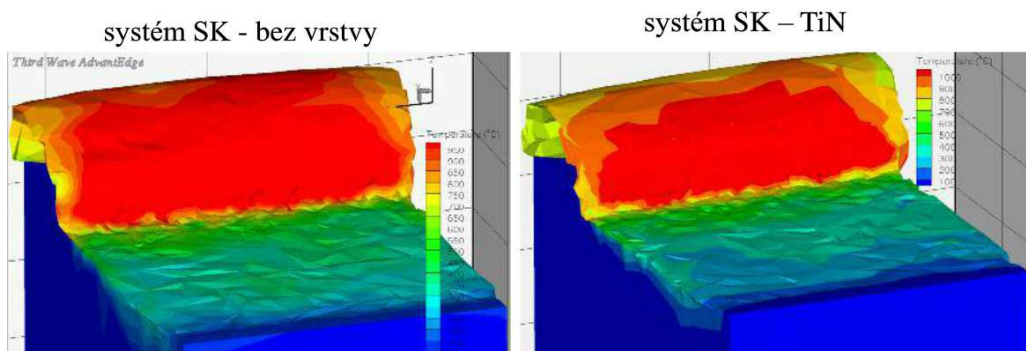
Nanesením tenké vrstvy na nástroj získává nástroj následující výhody:

- otěruvzdornost – prodlužuje se trvanlivost nástroje. Z grafu 2.5 je patrné, že z vybraných vrstev má nejvyšší hodnotu trvanlivosti vrstva TiAlSiN.



Graf 2.5. Srovnání trvanlivosti u vybraných vrstev, [27].

- tepelná odolnost – vrstvy odolávají vysokým teplotám, a zároveň tvoří teplotní bariéru. Tato vlastnost je důležitá u HSC obrábění, kde je značná část vzniklého tepla odváděna třískou. Jak je patrné z obr. 2.32, teplo na povrchu (červené pole cca. 1000°C) má menší rozsah s vrstvou TiN než samotný substrát bez vrstvy.



Obr. 2.32. Rozložení tepelného pole u systému SK-bez vrstvy a systému SK-tenká vrstva

- korozivzdornost – závisí na mikro-pórovitosti a pasivaci prvků, které jsou obsaženy v tenké vrstvě. Obecně se jedná o vrstvy, které obsahují hliník (Al), například vrstva TiAlN.
- snížení řezného odporu – možnost zvýšení řezných parametrů, snížení elektrické energie u obráběcího stroje
- lze obrábět slitiny, které by nástroj bez povlaku neobrobil (těžkoobrobitelné materiály)
- minimalizace procesních kapalin

Tenká vrstva představuje investici okolo 20% z ceny nedeponovaného nástroje, ale přínos v podobě několiknásobného zvýšení produktivity. Je ale nutné dbát na kvalitní přípravu před

depozicí tenké vrstvy a také vrstvy neaplikovat na nekvalitní a zničené nástroje. Tenké vrstvy jsou tak přímým nástrojem ke zvýšení produktivity v obrábění.

3 Experiment

3.1 Charakteristika experimentu

Tato část diplomové práce je věnována experimentům. Podnět ke vzniku této diplomové práce dala firma VÚHŽ a.s., která se rozhodla otestovat svou nově vyvinutou tenkou vrstvou TiB_2/TiBC .

Ze zadání projektu vyplývá podrobit nástroje deponované tenkou vrstvou TiB_2/TiBC testům řezivosti. Dále, že bude vrstva TiB_2/TiBC porovnána s vrstvou TiAlN . Posledním požadavkem bylo opakování testů řezivosti s podmínkou, že si firma VÚHŽ a.s. nástroje po opotřebení sama přeostří (přebrousí) a opět sama nadeponuje.

Úkolem bylo vybrat vhodnou aplikaci a podmínky frézování, konkrétně: stroj, nástroj, obráběný materiál, strategii frézování, řezné podmínky a procesní prostředí. Z tohoto důvodu vznikly dva experimenty.

3.1.1 Experiment s VBD

V tomto experimentu byla sledována řezivost VBD ze slinutého karbidu, které byly deponovány dvěma různými vrstvami a VBD, které nebyly povlakovány žádnou tenkou vrstvou. Tenké vrstvy, kterými byly deponovány, jsou: TiAlN a TiB_2/TiBC . Každá destička byla experimentálně testována při různých řezných podmínkách. Řezné podmínky byly pro každou VBD dvakrát opakovány.

3.1.2 Experiment s monolitními kuželovými frézami

Druhým experimentem v této diplomové práci bylo otestování monolitní kuželové frézy, vyrobené ze slinutého karbidu. Tato fréza má tři břity a v průběhu experimentu byla sledována řezivost. Nástroj byl povlakován třemi tenkými vrstvami: zkoumanou TiB_2/TiBC , TiAlN a vrstvou Triple-Coating. Zde obdobně jako u experimentu s VBD destičkami, je nástroj experimentálně testován při různých řezných rychlostech. Řezné podmínky pro každý nástroj byly opět dvakrát opakovány.

3.2 Experimentální vybavení

Oba experimenty probíhaly v halových laboratořích KTO. Jednotlivé stroje a přístroje, které byly pro tyto experimenty společné, jsou popsány v této kapitole 3.2 vybavení.

Strojní vybavení

Veškeré experimenty, jejichž výsledky jsou uvedeny v této diplomové práci, byly prováděny na tříosém vertikálním obráběcím centru MCV 750A, viz obr. 3.1. Bližší informace o obráběcím stroji jsou v kapitole 7, příloha č. 1.



Obr. 3.1. Vertikální obráběcí centrum MCV 750A.

Materiál obrobku

Pro experimenty byla zvolena korozivzdorná a žáruvzdorná chromová ocel třídy 17, konkrétně 17021.2. Obrobek ve tvaru kvádrů. V dalším kroku bylo nutné definovat řezné podmínky pro obrábění daného typu materiálu obrobku. Dle katalogu dodavatele řezného materiálu spadá ocel 17021.2 do skupiny pro nerezové a žáruvzdorné oceli – třída M a je mu taktéž přiřazeno materiálové číslo 12-13, čímž jí řadí mezi feriticko-martenzitické až martenzitické nerezové oceli. Bližší informace o vlastnostech a použití této oceli jsou k dispozici v kapitole 7, příloha č. 4.

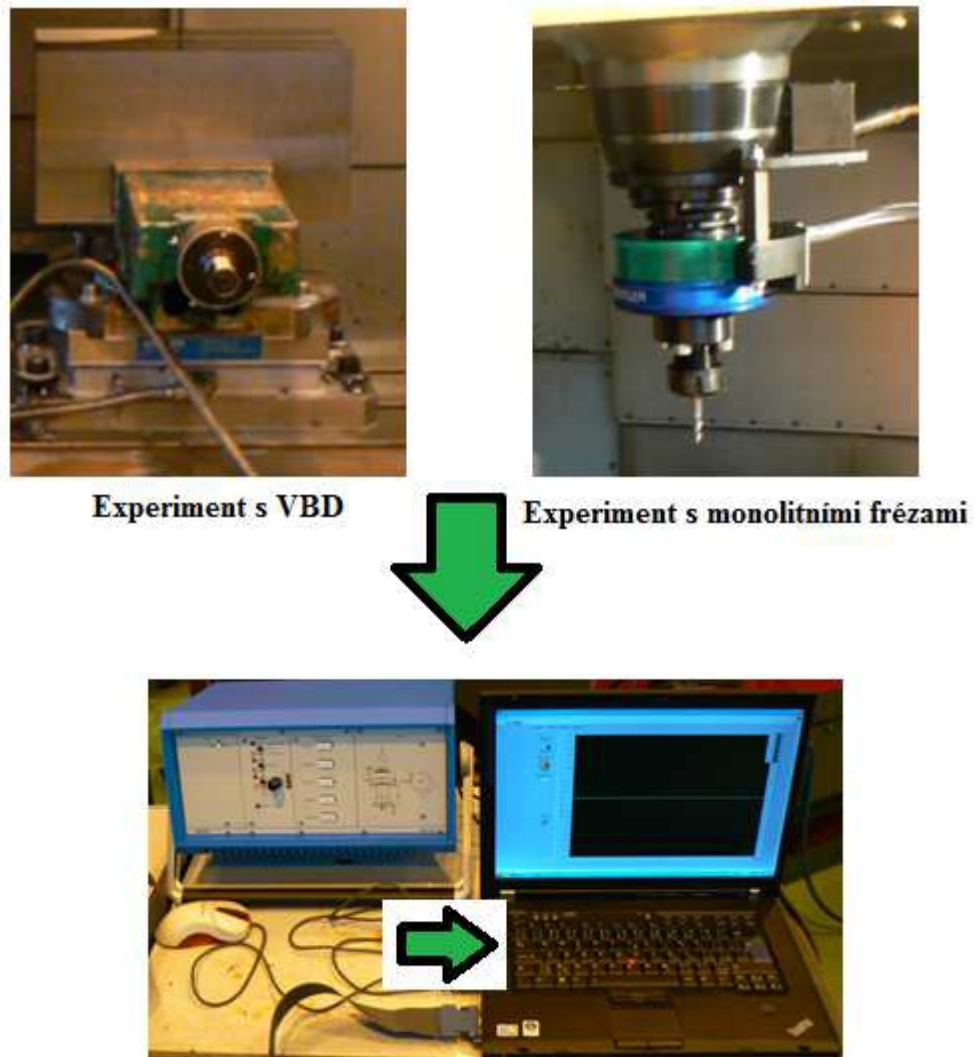
Chemické složení [hm. %]

<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>Cr</u>	<u>P</u>	<u>S</u>
<u>0,09-0,15</u>	<u>max 0,90</u>	<u>max 0,70</u>	<u>12,0-14,0</u>	<u>max 0,040</u>	<u>max 0,030</u>

Tab. 3.1. Chemické složení oceli 17021.

Soustava pro měření řezných sil

Na obr. 3.2 je zobrazena soustava pro měření velikosti řezných sil. Celá soustava je složena z dynamometru (třísložkový u experimentu s VBD nebo čtyř-složkový pro experiment s monolitními frézami), zesilovače a sběrné karty s počítačem. Naměřené síly byly vyhodnocovány v softwaru LabView.



Obr. 3.2. Měření velikosti řezných sil.

Dynamometry

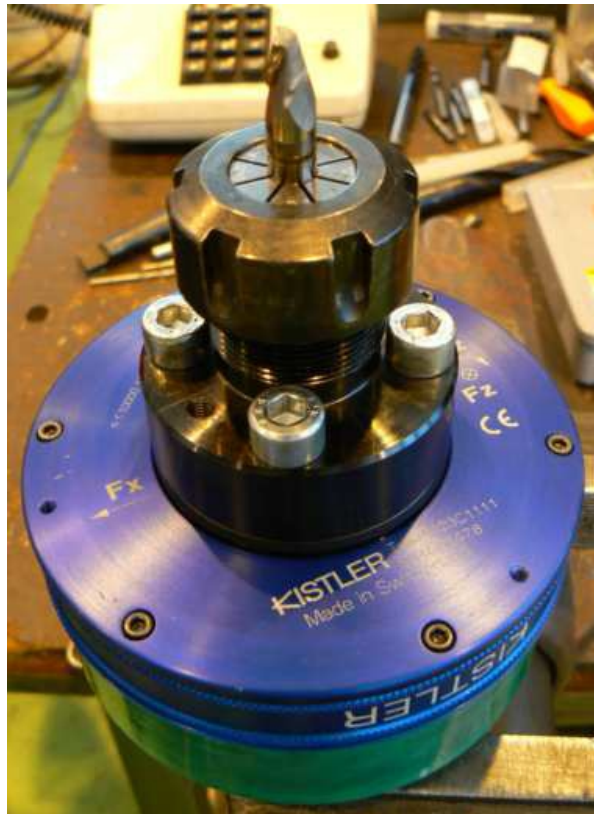
V experimentech se používají dva typy dynamometrů. Pro experiment s VBD je použit tříoskový dynamometr, pro experiment s monolitními kuželovými frézami je použit rotační dynamometr. Oba měří řezné síly, které působí při obrábění.

Dynamometr Kistler 9255 B Sp

Pro měření řezných sil při obrábění byl v experimentu s VBD použit tříoskový dynamometr od švýcarské firmy Kistler, přesněji typ 9255 B Sp. Tento dynamometr měří tři složky řezné síly F_x , F_y a F_z . Dynamometr má velkou tuhost a vysokou vlastní frekvenci. Vysoké rozlišení dává přístroji možnost změřit i nejmenší dynamické změny v průběhu procesu obrábění při působení velkých sil. Technické parametry dynamometru jsou popsány v kapitole 7, příloha č. 5.

Dynamometr Kistler 9123C1111

Rotační dynamometr od švýcarské firmy Kistler měří bezkontaktně řezné síly F_x , F_y a F_z a také moment M_z . Bližší informace o rotačním dynamometru jsou popsány v kapitole 7, příloha č. 6.

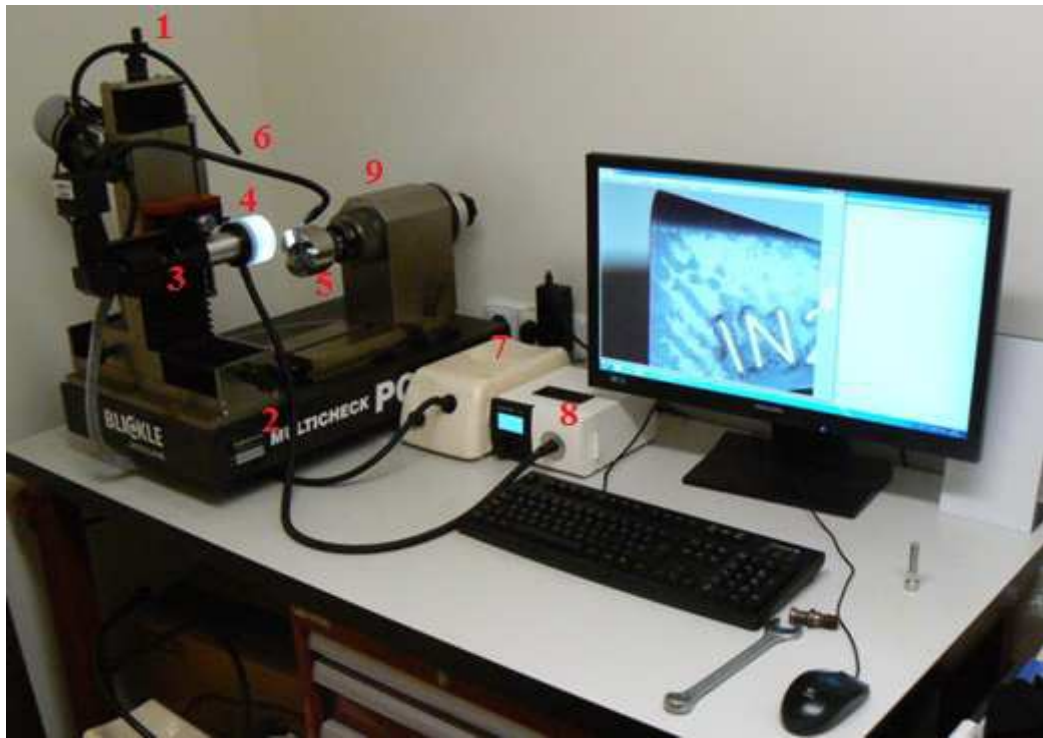


Obr. 3.3. Rotační dynamometr Kistler 9123 C1111.

Mikroskop Multicheck PC500

Pro měření opotřebení na čele břitu a hřbetě břitu VBD byl použit mikroskop Multicheck PC500. Mikroskop je vybaven objektivem, který umožňuje snímat detaily ve velkém rozlišení. Dále je vybaven plynulým pojezdem v osách x a y (0 – 150 mm). Lze měřit opotřebení rotačních i nerotačních nástrojů, které lze ustavit pod různými úhly. K vyhodnocení opotřebení nástroje je využíván software WMS. Nástroj lze tak pomocí objektivu vyfotit a snímek uložit v PC.

Popis pracoviště mikroskopu: 1- posuv v ose y, 2 – posuv v ose x, 3 – zaostřování, 4 – objektiv s hlavním osvětlením, 5 – měřený nástroj, 6 – přídavné bodové osvětlení, 7 – zdroj pro bodové osvětlení, 8 – zdroj pro hlavní osvětlení (regulace intenzity osvětlení), stojan pro nástroj s možností natočení o úhel v rozsahu 0°- 90°.



Obr. 3.4. Pracoviště mikroskopu Multicheck PC500.

Drsnoměr [33]

Pro měření drsnosti obrobeného povrchu byl použit drsnoměr firmy Mitutoyo model SJ 210 SurfTest, viz obr. 3.5. Bližší informace o mikroskopu jsou v kapitole 7, příloha č. 7.



Obr. 3.5. Drsnoměr Mitutoyo SJ 210 SurfTest, [33].

Metodika měření

U experimentu s VBD bylo měřeno:

- opotřebení břitu - na čele břitu KB_n [mm]
- na hřbetě břitu VB_b [mm]
- řezné síly – celkové silové zatížení F [N] a složka F_z [N], která nejvíce ovlivňuje obrobený povrch. Celkové silové zatížení je výslednicí hodnot, které byly naměřeny v průběhu obrábění. Skládá se ze tří dílčích složek, viz rovnice R-1.

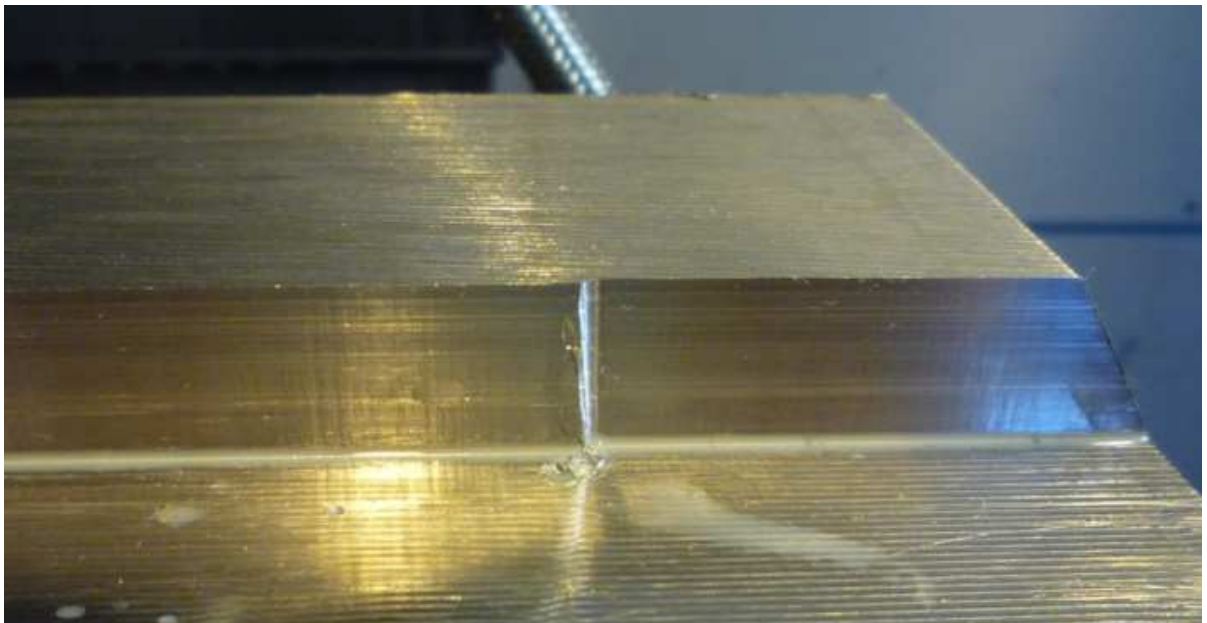
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (R-1)$$

- drsnost obrobeného povrchu R_a [μm]

U experimentu s monolitními kuželovými frézami bylo měřeno:

- opotřebení břitu - na čele břitu VB_b [mm]
- řezné síly – celkové silové zatížení F [N], které bylo opět spočítáno podle rovnice R-1.

U experimentu s monolitními nástroji se drsnost neměřila, neboť nástroj není určen k dokončovacím operacím.



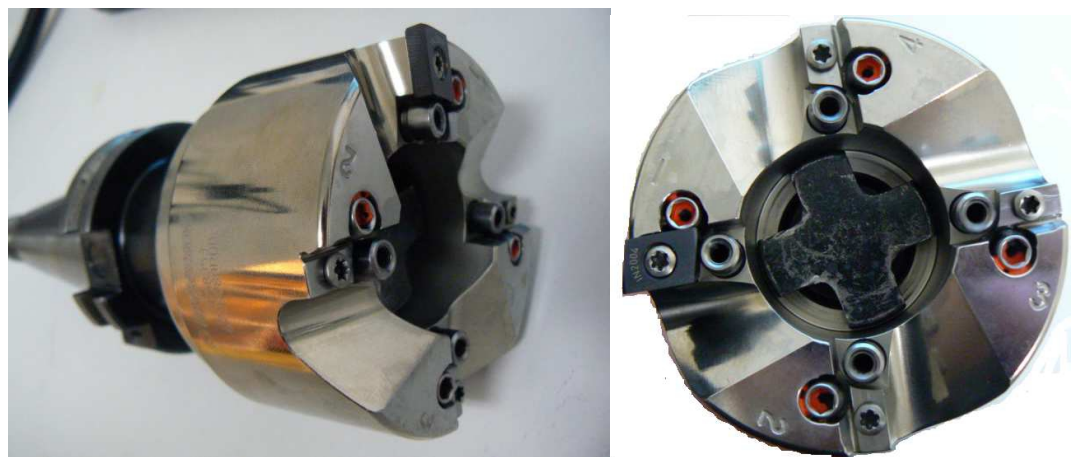
Obr. 3.6. Obrobený povrch monolitní kuželovou frézou.

Bližší informace s podrobnějším popsáním měření jednotlivých veličin jsou v kapitole 7, v příloze č. 8 a 9.

3.3 Aplikace vrstvy $TiB_2/TiBC$ na VBD

3.3.1 Nástroje

U experimentu s VBD byla použita dokončovací fréza od firmy Ingersoll. Důvod proč byla zvolena tato dokončovací fréza je typ použité VBD. Tato frézovací hlava může být osazena až čtyřmi vyměnitelnými břitovými destičkami. V reálném procesu obrábění (frézování rovinných ploch na tělese parní turbíny) se obrábí pouze jednou VBD. Je to z důvodu, že upínací plocha VBD i samotná VBD je vyráběna v určitých výrobních tolerancích. Při obrábění všemi VBD by nemusela být zajištěna dokonalá rovinnost obrobené plochy. Z hlediska požadavků, kladených na parotěsnost dělicí roviny parní turbíny je toto nepřijatelné. Aby došlo k eliminaci těchto faktorů, je proto dělicí rovina obráběna jednou VBD. Z tohoto důvodu i tento experiment probíhal při obrábění s jednou VBD, která byla umístěna v pozici číslo 1 na frézovací hlavě. (viz obr. 3.7). Osazení jednou destičkou má další výhodu v podobě uspořené času. Kdyby byla hlava osazena na všech čtyřech pozicích, experiment by byl nejen časově, ale i finančně náročnější. Bližší informace o použité nástrojové hlavě jsou popsány v kapitole 7, příloha č. 2.



Obr. 3.7. Frézovací hlava od firmy Ingersoll.

VBD byly dodány, podobně jako frézovací hlava, firmou Ingersoll. Jednalo se o tangenciální VBD. V tomto experimentu jsou testovány VBD povlakované tenkými vrstvami a jedna bez vrstvy. VBD bez vrstvy má firemní označení IN04S. První destička s tenkou vrstvou $TiAlN$ má firemní označení IN2004. Druhá destička s tenkou vrstvou $TiB_2/TiBC$. Vrstva $TiB_2/TiBC$ byla deponována metodou PACVD na destičku IN04S. Slinutý karbid IN04S má submikronovou strukturu a je výrobcem doporučen k obrábění hliníku (Al) s vysokým obsahem křemíku (Si) při vysokých řezných rychlostech a pro lehké a středně těžké obrábění šedé litiny. Dále se slinutý karbid IN04S vyznačuje těmito vlastnostmi:

- velmi nízkou odolností proti rázům
- nízkou odolností proti teplotním šokům
- extrémně vysokou odolností proti opotřebení na hřbetě břitu
- mírnou odolností proti tvoření výmolů na čele břitu

Tenká vrstva TiAlN je na VBD ze SK naneseena technologií PVD, získává tak označení IN2004 a je výrobcem označován jako vysoce výkonný širokorozsahový karbid s vysokou odolností proti opotřebení a velkou houževnatostí. Pro frézování legovaných ocelí a litin. Zejména se hodí pro frézování velmi pevné grafitové litiny označované jako CGI (Compacted Graphite Iron) při středních až vysokých řezných rychlostech. Používá se i pro dokončovací operace a lehké hrubování při stabilních podmínkách. Dále se slinutý karbid s vrstvou TiAlN, který má rovněž submikronovou strukturu (stejný základní substrát IN04S), vyznačuje následujícími vlastnostmi:

- nízkou hodnotou odolnosti proti rázům
- vysokou odolností proti teplotním šokům
- vysokou odolností proti opotřebení na hřbetě břitu
- vysokou odolností proti tvoření výmolů na čele břitu

Samotný tvar vyměnitelné břitové destičky s katalogovým označením YDA323L101 je kosočtvercový. Tato tangenciální destička je dvoubřitá s hladicí geometrií (tzv. wiper geometrie) pro dokončování s hodnotou $R=1,0$. Bližší informace o wiper geometrii jsou popsány v kapitole 7, příloha č. 3.



Obr. 3.8. Tangenciální VBD od firmy Ingersoll.

3.3.2 Nastavení experimentu



Obr. 3.9. Nastavení experimentu; 1- obráběcí centrum MCV 750A, 2- dynamometr Kistler, 3- strojní svěrák, 4- obrobek, 5- nástrojová hlava s VBD.

Experiment probíhal při různých řezných podmínkách. Následují tabulky řezných hodnot pro VBD s tenkými vrstvami (TiAlN, TiB₂/TiBC) i VBD bez vrstvy (IN04S). Zelená buňka značí použitou kombinaci řezné rychlosti v_c a VBD, červená buňka značí, že daná kombinace nebyla použita. Dále z tabulky je patrné, že experiment probíhal při konstantních hodnotách $f_z = 4,5$ mm/zub, $a_p = 0,02$ mm a $a_e = 16$ mm.

$v_c \backslash$ VBD	TiAlN	TiB ₂ /TiBC	IN04S
130	x	✓	✓
150	x	✓	x
170	✓	✓	✓
200	✓	✓	x
230	✓	x	x
$f_z = 4,5$ mm/zub $a_p = 0,02$ mm $a_e = 16$ mm			

Tabulka 3.2. Řezné podmínky použité v experimentu s VBD.

Dále byla stanovena kritéria experimentu:

- objem odebraného materiálu $V [\text{cm}^3] \geq 60 \text{ cm}^3$
- drsnost obrobené plochy $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$
- kritériální opotřebení stanoveno na hodnotu $VB_{\text{KRIT}} = 0,15 \text{ mm}$

Objem odebraného materiálu – tento experiment vychází z reálných podmínek obrábění a to dělicí roviny tělesa parní turbíny. Jedna řezná hrana VBD musí obrobit jednu čtvrtinu dělicí roviny, těleso parní turbíny má spodní a horní skříň, tzn. spodní a horní dělicí rovinu. Každá dělicí rovina je tvořena dvěma dosedacími plochami $\Rightarrow \frac{1}{4}$ dělicí roviny.

Drsnost obrobené plochy – na výkrese parní turbíny je předepsaná drsnost obrobené plochy $R_a = 0,8 \mu\text{m}$, tzn., že tato hodnota nesmí být překročena.

Hodnota kritériálního opotřebení VB_{KRIT} - vztažena k opotřebení na hřbetě VB_b neboť právě toto opotřebení ovlivňuje drsnost obrobeného povrchu u tangenciální VBD

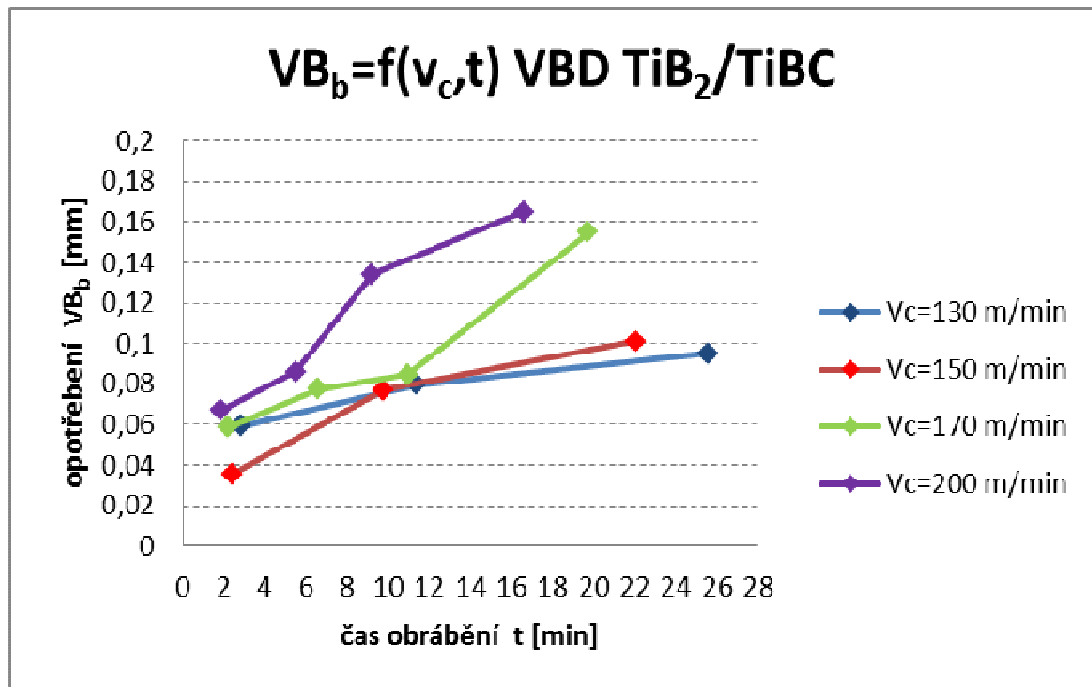
Experiment byl 2x opakován.

3.3.3 Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t

Protože v tomto experimentu se testují tři různé VBD, je vyhodnocení jednotlivých závislostí rozděleno právě do tří částí.

TiB₂/TiBC - Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t

Graf 3.1 zobrazuje závislost opotřebení Vb_b [mm] na čase obrábění t [min]. VBD jsou povlakované vrstvou TiB₂/TiBC. Zde jsou srovnávány čtyři hodnoty řezné rychlosti, přičemž bylo dodrženo objemové kritérium. Jinými slovy nástroje odebraly požadovaný objem materiálu. Z grafu je patrné, že s ohledem na produktivitu je nejvýhodnější řeznou rychlostí pro vrstvu TiB₂/TiBC hodnota $v_c = 200 \text{ m/min}$. Tato rychlost byla zvolena proto, že opotřebení na hřbetě nepřesáhlo kritériální hodnotu $VB_{\text{KRIT}} = 0,15 \text{ mm}$ a také bylo v nejkratším čase dosaženo stanoveného objemu odebraného materiálu.



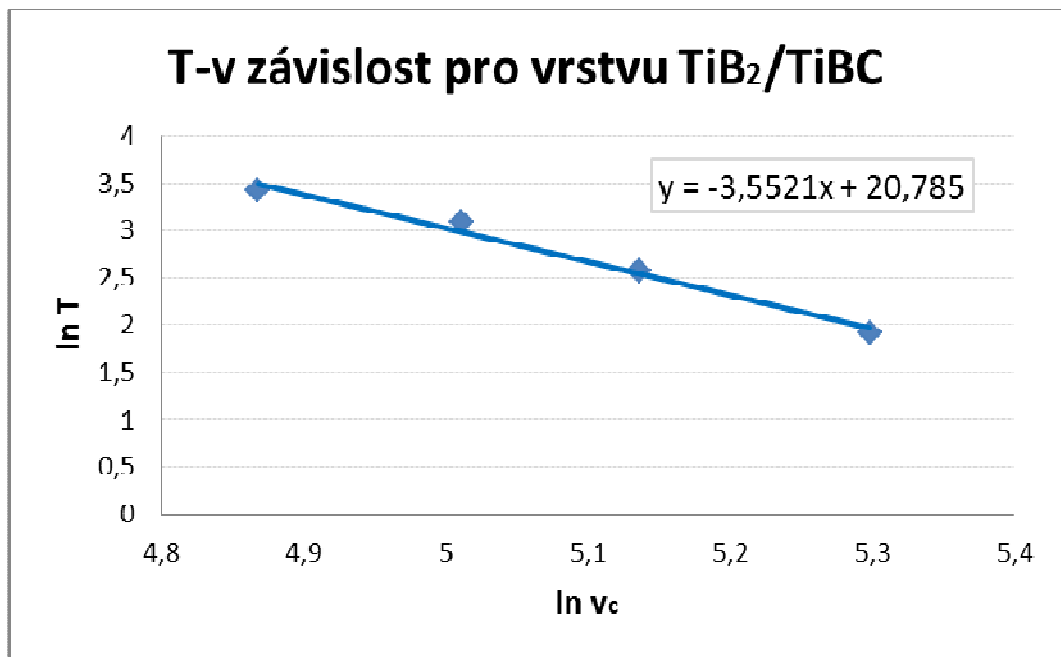
Graf 3.1. Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t při různých řezných rychlostech v_c .

Závislost trvanlivosti břitu T na řezné rychlosti v_c

Závislost trvanlivosti břitu na řezné rychlosti udává Taylorův vztah, který je ve tvaru:

$$T = \frac{C_{TV}}{v_c^m}$$

kde konstanta C_{TV} je dána druhem materiálu břitu, exponent m závisí na rozsahu řezné rychlosti a druhu řezného materiálu. Tato polytropická funkce znázorněná v grafu 3.2 v logaritmických souřadnicích je Taylorova přímka. Exponent m je pak směrnici přímky k ose v_c . Konstanta C_{TV} je pak teoretickou trvanlivostí břitu při řezné rychlosti 1 m/min. Velikost m a C_{TV} je dále ovlivněna i posuvem f , hloubkou řezu a_p , obrobitelností materiálu obrobku, řezným prostředím atd. Tyto faktory ovlivňují intenzitu otupování břitu a tím mají vliv na trvanlivost, [34].

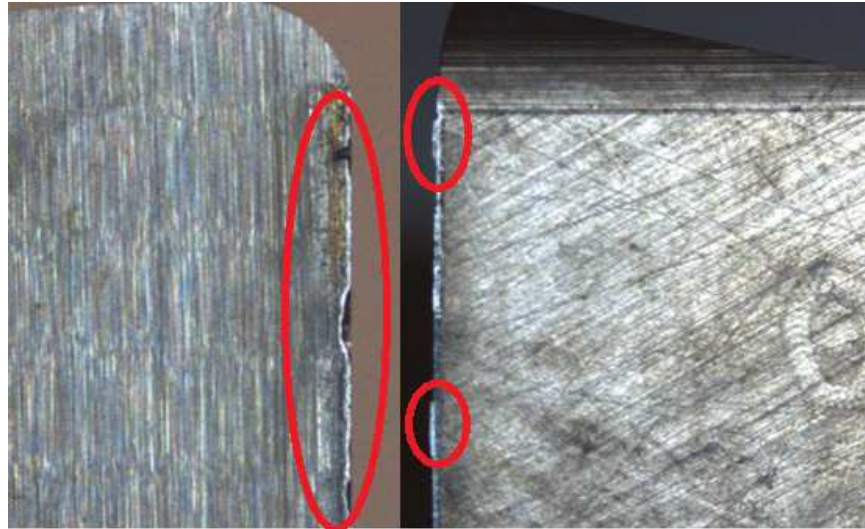
Graf 3.2. T-v závislost pro vrstvu TiB₂/TiBC.

Pokud do vzorce dosadíme zvolenou řeznou v_c, vypočteme tak trvanlivost v minutách.

$$T = \frac{10,65 \cdot 10^8}{v_c^{3,55}}$$

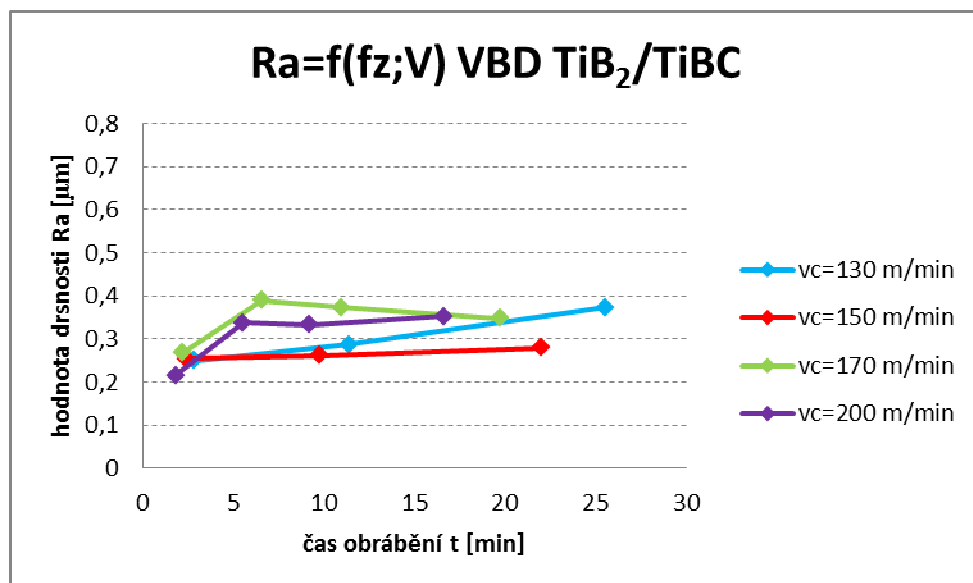
TiB₂/TiBC - Závislost drsnosti obrobeného povrchu Ra na čase obrábění t

Graf 3.2 zobrazuje závislost drsnosti obrobeného povrchu Ra [μm] na čase obrábění t [min]. U této tenké vrstvy nelze říci, že se drsnost zvyšuje se zvyšující hodnotou řezné rychlosti. To je způsobeno především jiným typem opotřebení. V průběhu obrábění docházelo k vydrolování ostří, které se projevilo na různých místech. Dále také docházelo ke vzniku nárůstku, viz obr. 3.10



Obr. 3.10. Fotky čela (vlevo) a hřbetu VBD s vrstvou TiB_2/TiBC .

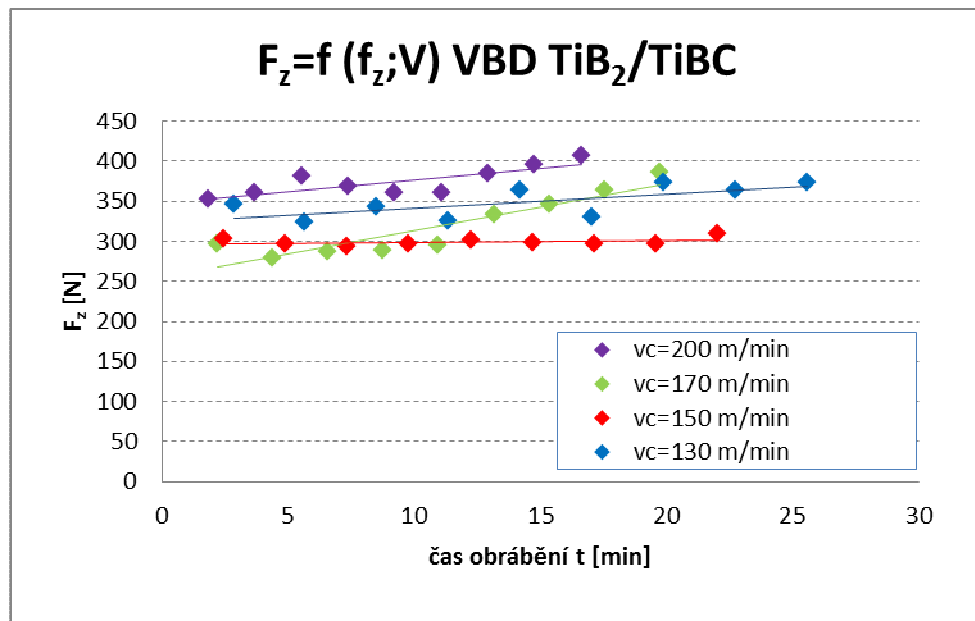
Dále, dle očekávání, se drsnost obrobeneho povrchu R_a zhoršovala s opotřebením. Nebylo dosaženo kritériálního opotřebení $\text{VB}_{\text{KRIT}} = 0,15 \text{ mm}$ a ani hodnota drsnosti $R_a = 0,8 \text{ }\mu\text{m}$. Proto byla jako nejvhodnější zvolena řezná rychlost $v_c = 200 \text{ m/min}$



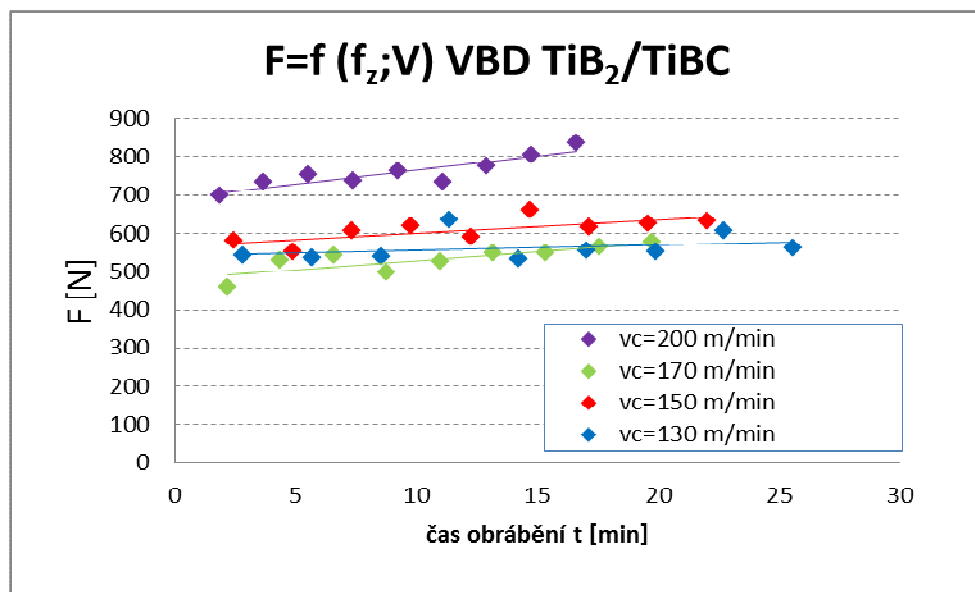
Graf 3.2. Závislost drsnosti obrobeneho povrchu R_a na čase obrábění t při různých řezných rychlostech v_c pro vrstvu TiB_2/TiBC .

TiB_2/TiBC - Průběhy řezných sil

V grafech 3.3 a 3.4 je znázorněn vliv řezné rychlosti v_c [m/min] na velikost řezné síly F_z [N] a celkového zatížení F [N]. Oba grafy mají podobný průběh, s rostoucím opotřebením rostly velikosti řezné síly F_z i celkového zatížení F . Dle předpokladu nejvyšší síly působily při obrábění řeznou rychlostí $v_c = 200 \text{ m/min}$.



Graf 3.3. Závislost složky silového zatížení F_z na změně řezné rychlosti v_c a čase obrábění t pro vrstvu $TiB_2/TiBC$.

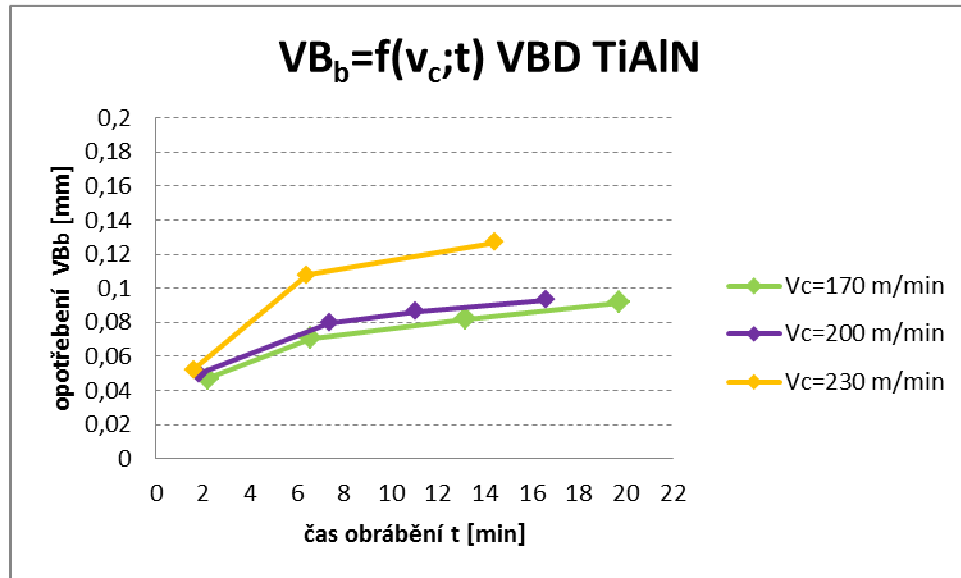


Graf 3.4. Závislost silového zatížení F na změně řezné rychlosti v_c a čase obrábění t pro vrstvu $TiB_2/TiBC$.

TiAlN (IN2004) - Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t

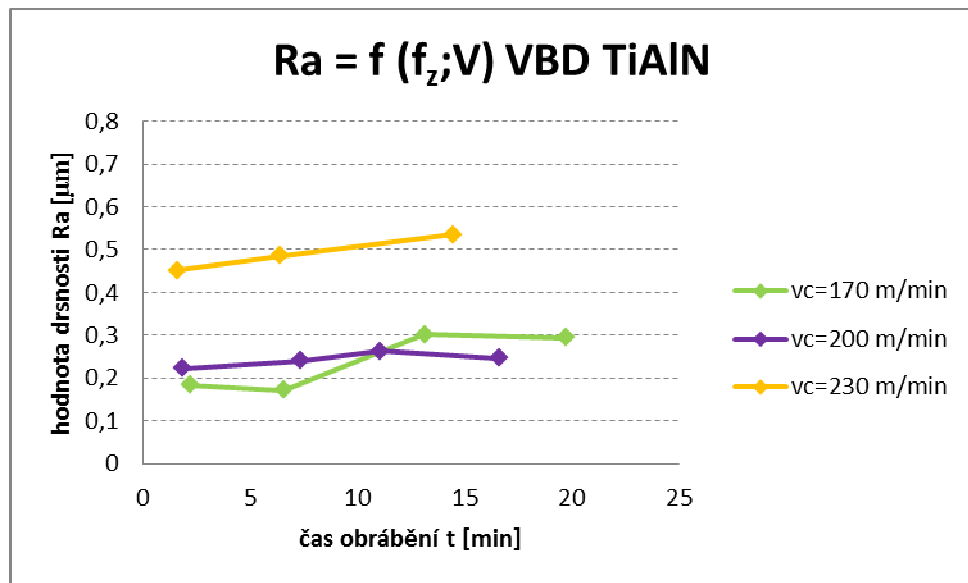
Na grafu 3.5 je znázorněna závislost vzrůstajícího opotřebení VB_b [mm] na čase t [min] pro VBD povlakovanou tenkou vrstvou TiAlN (IN2004). Opotřebení se s narůstajícím časem obrábění zvyšuje. Čas obrábění odpovídá stanovenému objemu odebraného materiálu (v tomto případě $V = 62 \text{ cm}^3$) tím pádem bylo dosaženo stanoveného kritéria. Dále je vidět, že se vzrůstající řeznou rychlostí v_c se zvyšuje i opotřebení na hřbetě VB_b . Při dalším zvyšování řezné rychlosti ($v_c > 230 \text{ m/min}$) se řezný proces stával nestabilním. Především se měnil typ

opotřebení, destička se začala vyštipovat. Proto lze doporučit, s ohledem na produktivitu obrábění, pro VBD s vrstvou TiAlN řeznou rychlost $v_c = 230$ m/min.



Graf 3.5. Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t při různých řezných rychlostech v_c pro vrstvu TiAlN.

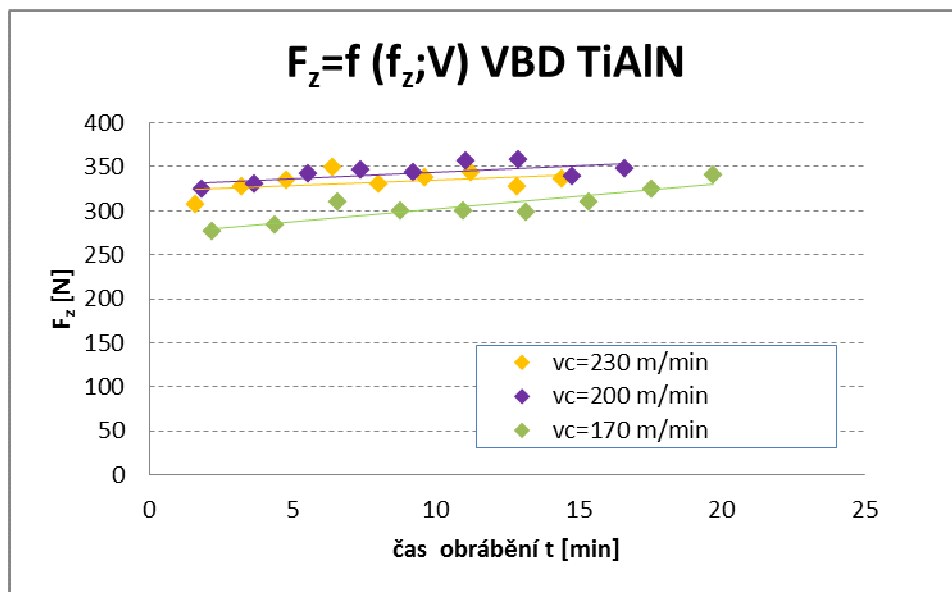
Graf 3.6 zobrazuje závislost drsnosti obrobeného povrchu R_a [μm] na čase obrábění t [min]. Je vidět, že se zvyšující se řeznou rychlostí roste hodnota drsnosti obrobeného povrchu. Pro všechny řezné rychlosti platí tři kritéria experimentu. Protože po obrobení stanoveného objemu materiálu nebyla překročena hodnota kritériálního opotřebení $VB_{KRIT} = 0,15\text{mm}$ a drsnost se pohybovala pod hodnotou $R_a = 0,8 \mu\text{m}$, byla jako nejvýhodnější v_c pro vrstvu TiAlN s ohledem na produktivitu, zvolena řezná rychlost 230 m/min.



Graf 3.6. Závislost drsnosti obrobeneho povrchu Ra na čase obrábění t při různých řezných rychlostech v_c pro vrstvu TiAlN.

TiAlN (IN2004) - Průběhy řezných sil

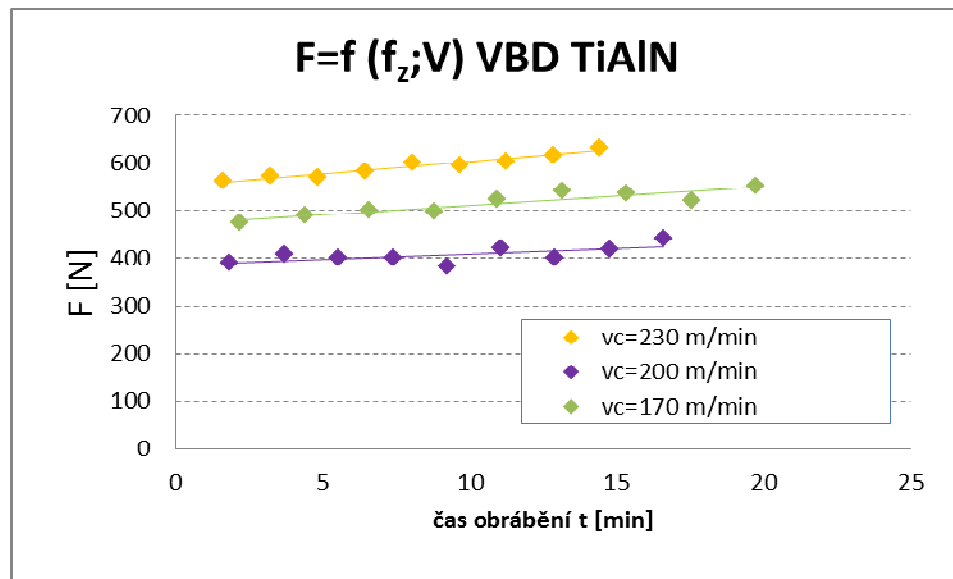
V grafech 3.7 a 3.8 je znázorněn vliv řezné rychlosti v_c [m/min] na velikost řezné síly F_z [N] a celkového silového zatížení F [N].



Graf 3.7. Závislost složky silového zatížení F_z na změně řezné rychlosti v_c a čase obrábění t pro vrstvu TiAlN.

Z grafu 3.8 je patrné, že hodnota celkového silového zatížení F [N] se zvyšuje se zvyšující se řeznou rychlostí v_c . Nejvyšší silové zatížení je při řezné rychlosti $v_c = 230$ m/min, to odpovídá i závislosti opotřebení VB_b na čase obrábění t (graf 3.5), kde nejvyšší opotřebení

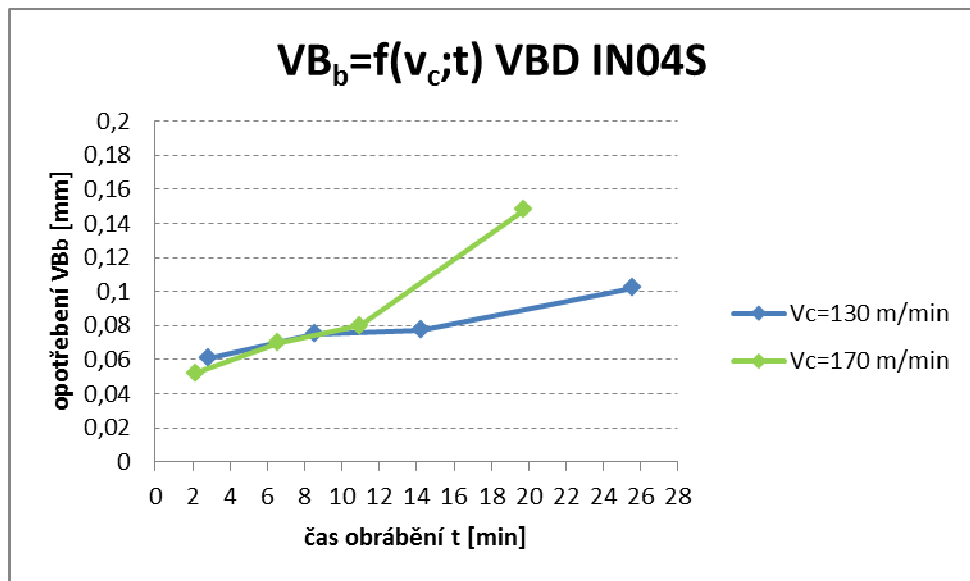
je právě při této rychlosti. Podobně tomu je i u grafu 3.6, kde nejvyšší drsnost obrobeneho povrchu R_a je při $v_c = 230$ m/min.



Graf 3.8. Závislost silového zatížení F na změně řezné rychlosti v_c a čase obrábění t pro vrstvu TiAlN.

IN04S - Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t

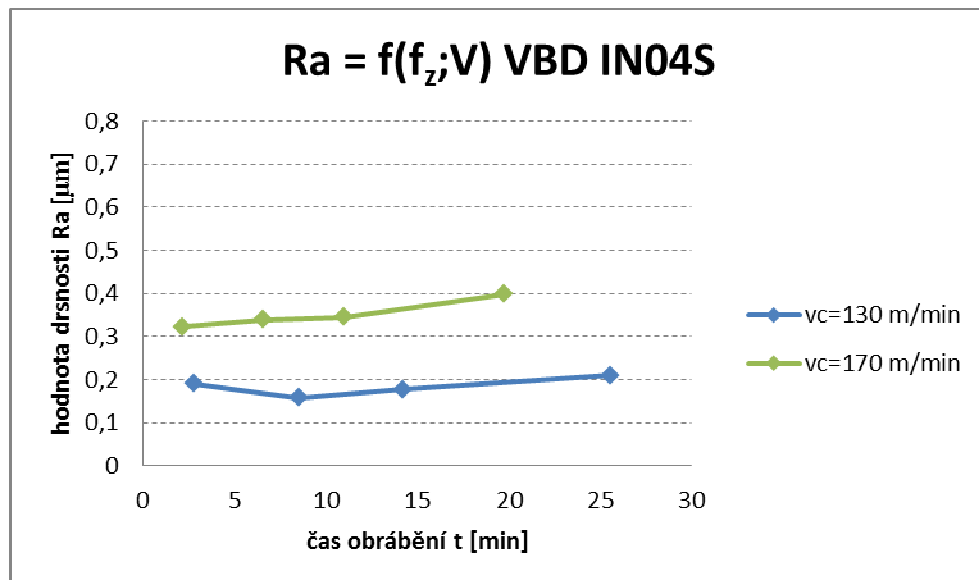
Graf 3.9 zobrazuje závislost opotřebení Vb_b [mm] na čase obrábění t [min]. VBD jsou bez vrstvy, jedná se tedy o samotný substrát ze SK. Jsou srovnávány dvě hodnoty řezné rychlosti, přičemž bylo dodrženo objemové kritérium. Jinými slovy nástroje odebraly požadovaný objem materiálu. Z grafu je patrné, že s ohledem na produktivitu je výhodnější zná rychlost $v_c = 170$ m/min. Tato rychlost byla zvolena proto, že opotřebení na hřbetě nepřesáhlo kritériální hodnotu $VB_{KRIT} = 0,15$ mm a také bylo v nejkratším čase dosaženo stanoveného objemu odebraného materiálu.



Graf 3.9. Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t při různých řezných rychlostech v_c pro VBD bez vrstvy.

IN04S - Závislost drsnosti obrobeneho povrchu R_a na čase obrábění t

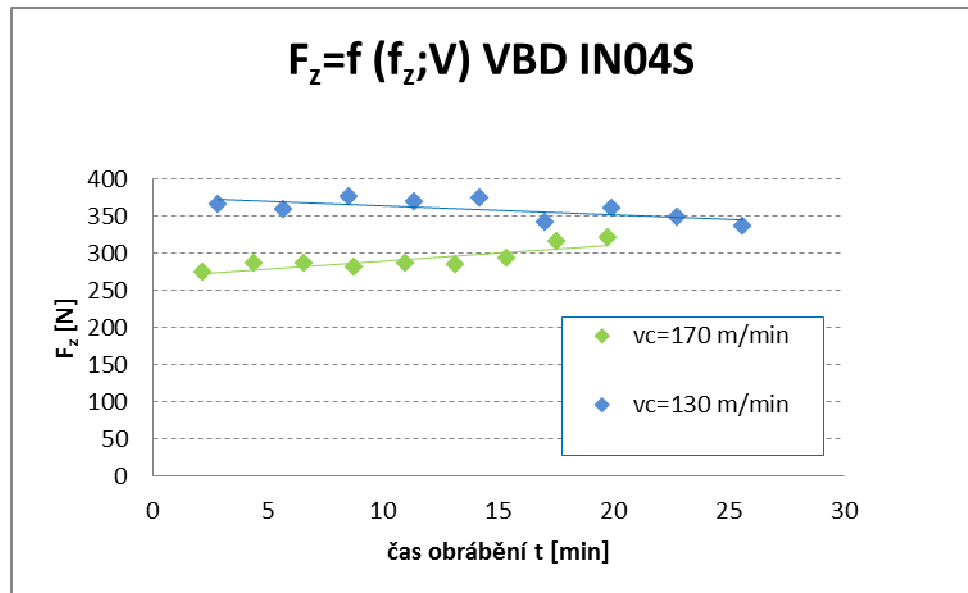
V grafu 3.10, kde byla porovnávána závislost drsnosti obrobeneho povrchu R_a [μm] a času obrábění t [min], byly experimentálně testovány VBD bez tenké vrstvy při dvou řezných rychlostech. Z grafu je vidět, že hodnota drsnosti obrobeneho povrchu roste se zvyšující se řeznou rychlostí, protože se zvyšuje opotřebení VB_b [mm]. V průběhu obrábění docházelo k postupnému vydrolování ostří, které může mít vliv také na zvyšující se hodnotu drsnosti povrchu v průběhu obráběcího procesu.



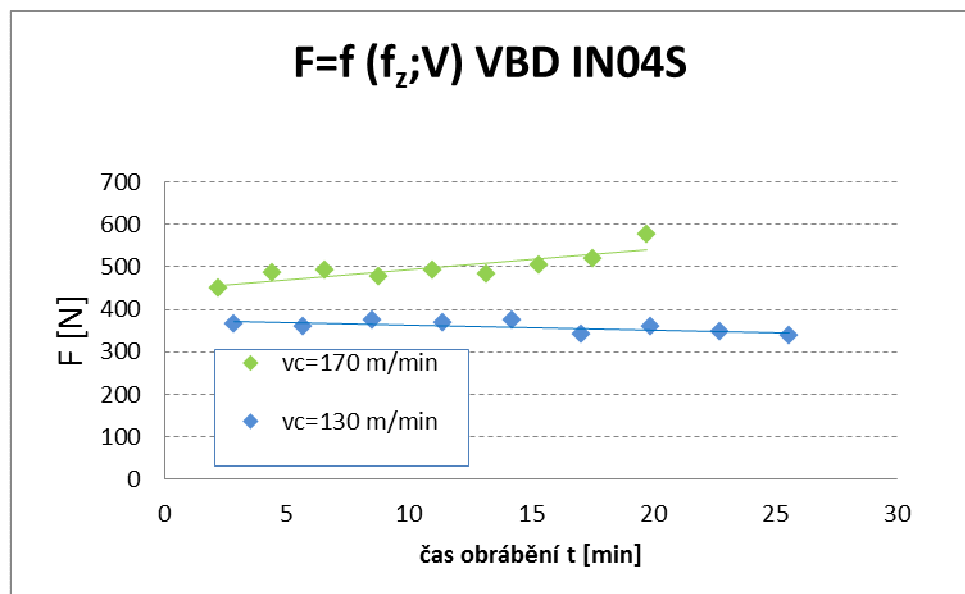
Graf 3.10. Závislost drsnosti obrobeneho povrchu R_a na čase obrábění t při různých řezných rychlostech v_c pro VBD bez vrstvy.

IN204S - Průběhy řezných sil

V grafech 3.11 a 3.12 je znázorněn vliv řezné rychlosti v_c [m/min] na velikost řezné síly F_z [N] a celkového zatížení F [N]. Z grafu 3.12 je patrné, že vyšší celkové silové zatížení působí F [N] působí při vyšší řezné rychlosti $v_c=170$ m/min. To odpovídá i opotřebení VB_b , které je rovněž vyšší při této řezné rychlosti, jak je patrné z grafu 3.9.



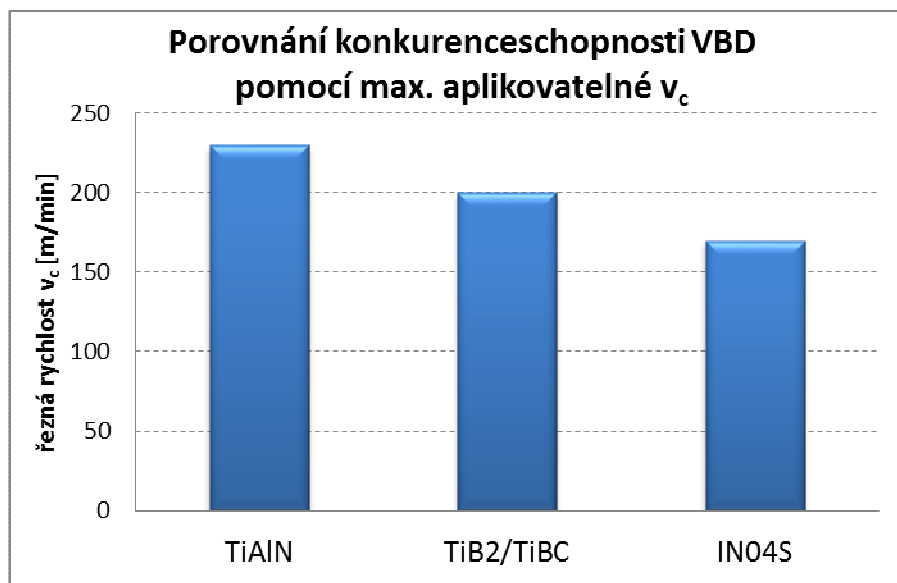
Graf 3.11. Závislost složky silového zatížení F_z na změně řezné rychlosti v_c a čase obrábění t pro VBD bez vrstvy.



Graf 3.12. Závislost silového zatížení F na změně řezné rychlosti v_c a čase obrábění t pro VBD bez vrstvy.

3.3.1 Konkurenceschopnost vrstvy TiB₂/TiBC při aplikaci na VBD

Graf 3.13 porovnává konkurenceschopnost jednotlivých vrstev na VBD při nevhodnějších řezných rychlostech v_c [m/min]. Řezné rychlosti byly vybrány s ohledem na produktivitu obrábění a splnění kritérií dané experimentem. Pro vrstvu TiB₂/TiBC byla na základě experimentu zvolena jako vhodná řezná rychlost $v_c = 200$ m/min. V grafu 3.13 tato hodnota představuje 100%. Pro vrstvu TiAlN byla stanovena řezná rychlost $v_c = 230$ m/min, což oproti VBD s vrstvou TiB₂/TiBC znamená nárůst o +15%. Pro VBD bez vrstvy byla vybrána $v_c = 170$ m/min, která představuje oproti VBD s vrstvou TiB₂/TiBC pokles o -15%.



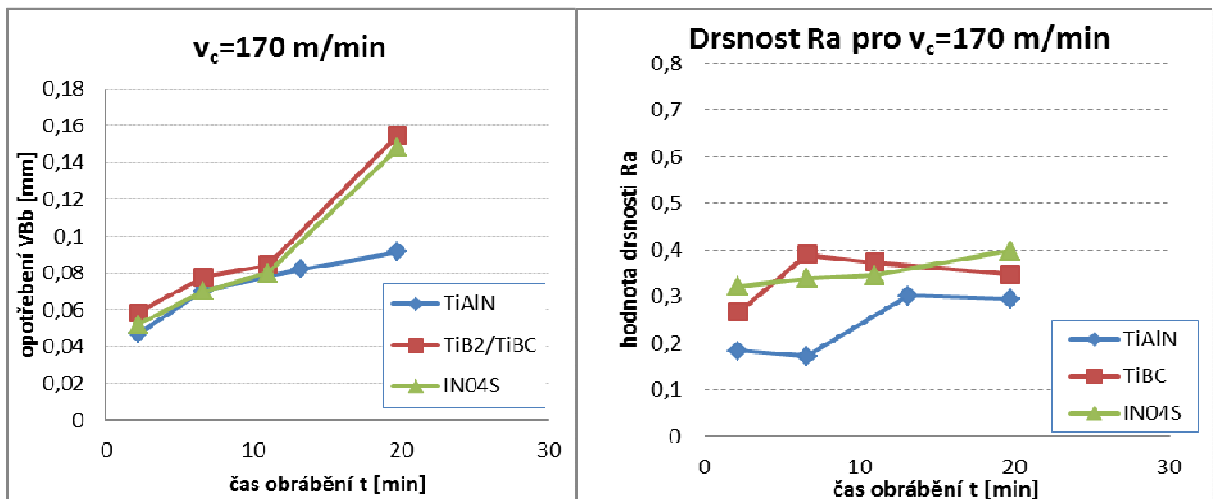
Graf 3.13. Porovnání konkurenceschopnosti VBD.

Srovnání opotřebení VBD při konstantních řezných rychlostech v_c

V následujících grafech je porovnáváno opotřebení na hřbetě VB_b [mm] na VBD s rozdílnou povrchovou úpravou.

Porovnání VBD IN04S s VBD s vrstvou TiB₂/TiBC

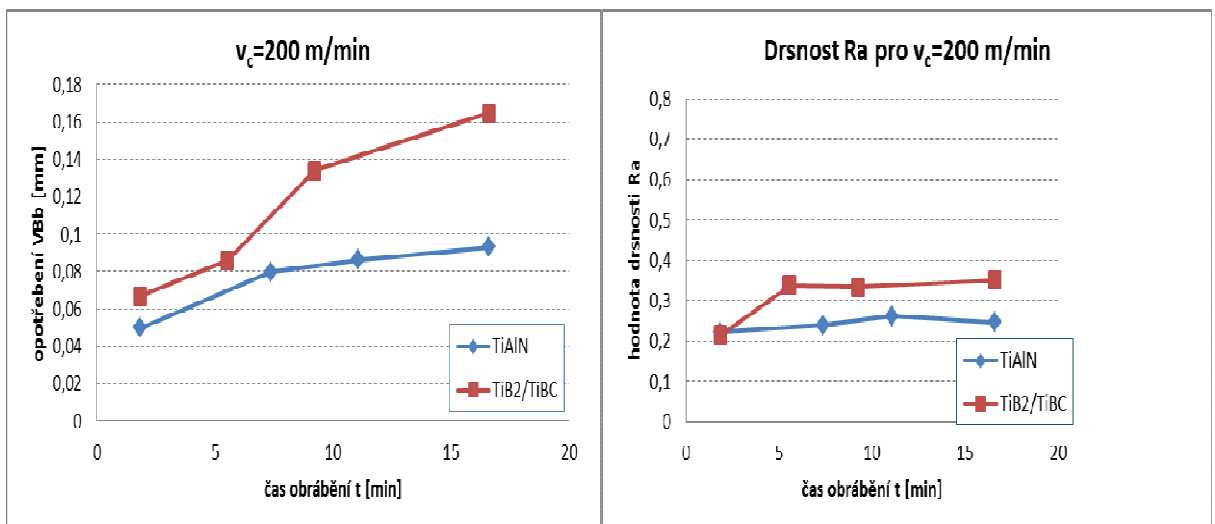
VBD bez vrstvy a VBD s vrstvou TiB₂/TiBC byly porovnány při řezné rychlosti $v_c=170$ m/min. Z grafu 3.14 vyplývá, že nejmenšího opotřebení při dané řezné rychlosti bylo naměřeno na VBD s vrstvou TiAlN. VBD s touto vrstvou by mohla při dané v_c obrábět cca s dvakrát delší životností než zbylé VBD. Není tak zcela využit její potenciál. Hodnota řezné rychlosti $v_c=170$ m/min je pro VBD bez vrstvy (IN04S) mezní hodnotou. Při dalším zvyšování v_c by se obrábění s touto VBD stávalo nestabilním, tzn. projevem vyštipování řezného břitu VBD. Z grafu je dále patrné, že VBD s vrstvou TiB₂/TiBC při této $v_c=170$ m/min přínos nemá, neboť opotřebení dosahuje podobných hodnot jako VBD bez vrstvy (IN04S). Z grafu 3.15, který znázorňuje závislost opotřebení hodnoty obrobeného povrchu R_a na čase obrábění t je patrné, že hodnota řezné rychlosti nemá výrazný vliv na drsnost obrobeného povrchu, neboť rozdíly u VBD jsou v řádu 0,1 μm .



Grafy 3.14 a 3.15. Porovnání opotřebení VB_b a drsnosti obrobeneho povrchu Ra pro VBD IN04S a VBD s vrstvou TiB₂/TiBC.

Porovnání VBD s vrstvou TiB₂/TiBC s VBD s vrstvou TiAlN

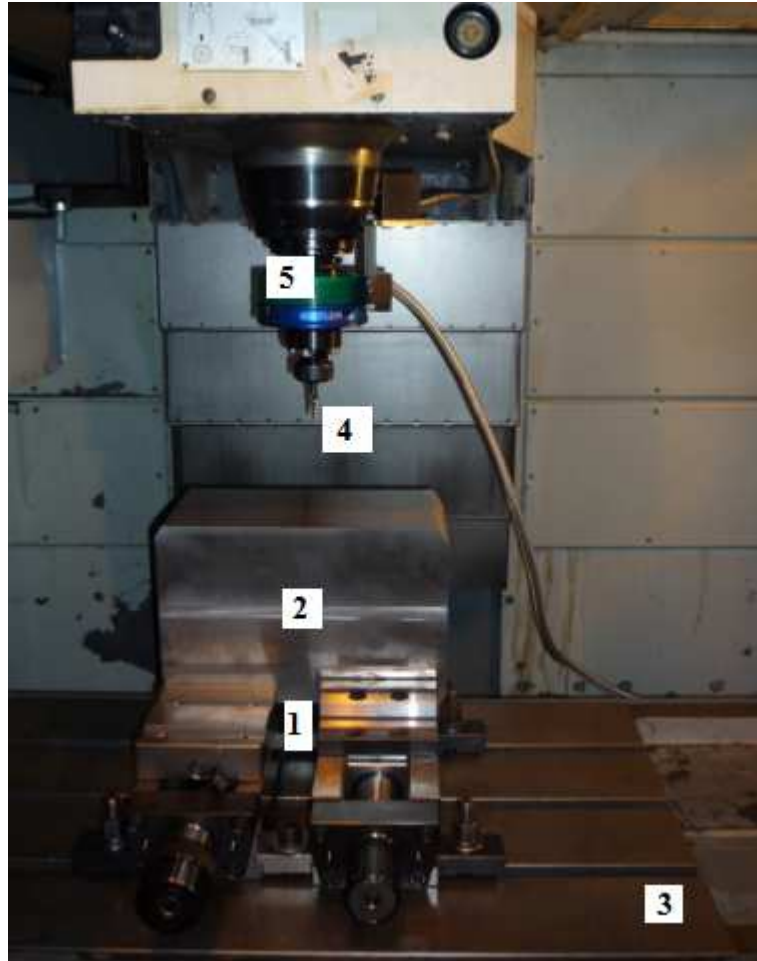
Tyto dvě VBD byly porovnány při řezné rychlosti $v_c=200$ m/min. Z grafu 3.16 je patrné, že nižšího opotřebení VB_b bylo dosaženo s vrstvou TiAlN, která, jak bylo napsáno výše, má vyšší potenciál než ostatní VBD. Pro vrstvu TiB₂/TiBC je řezná rychlost $v_c=200$ m/min limitní. Při jejím dalším zvyšování se řezný proces stával nestabilním a docházelo k prudkému opotřebení VBD. Oproti VBD bez vrstvy (IN04S) je zde nárůst řezné rychlosti o 15% (ze 170 m/min na 200 m/min). Vhodnou řeznou rychlostí pro TiAlN je $v_c=230$ m/min. V porovnání s TiB₂/TiBC je to nárůst o dalších 15%. Hodnoty obrobeneho povrchu se příliš navzájem neliší, neboť jsou v rozsahu 0,1 μ m, jak je znázorněno v grafu 3.15.



Grafy 3.16 a 3.17. Porovnání opotřebení VB_b a drsnosti obrobeneho povrchu Ra pro VBD s vrstvou TiAlN a VBD s vrstvou TiB₂/TiBC.

3.4 Aplikace vrstvy $TiB_2/TiBC$ na monolitním nástroji

Nastavení experimentu



Obr. 3.11. Nastavení experimentu; 1- upnutí obrobku do dvou svěráků, 2- obrobek, 3- upínací plocha pracovního stolu stroje, 4- nástroj, 5- rotační dynamometr Kistler.

Experiment, při kterém se testovala trvanlivost tenkých vrstev na monolitní kuželové fréze, probíhal při různých řezných podmínkách. V průběhu obrábění bylo sledováno opotřebení na testovaných nástrojích, které byly nadeponovány třemi různými tenkými vrstvami: $TiAlN$, Triple-Coating a $TiB_2/TiBC$. Úkolem experimentu bylo nalézt vhodné podmínky pro obrábění frézou, která bude nadeponována tenkou vrstvou $TiB_2/TiBC$. Dále budou otestovány nástroje s tenkou vrstvou $TiAlN$ a vrstvou Triple-Coating při těchto vhodných podmínkách pro vrstvu $TiB_2/TiBC$. Tímto způsobem budou naměřeny hodnoty, které poslouží k porovnání konkurenceschopnosti jednotlivých tenkých vrstev. Měření proto probíhalo postupně:

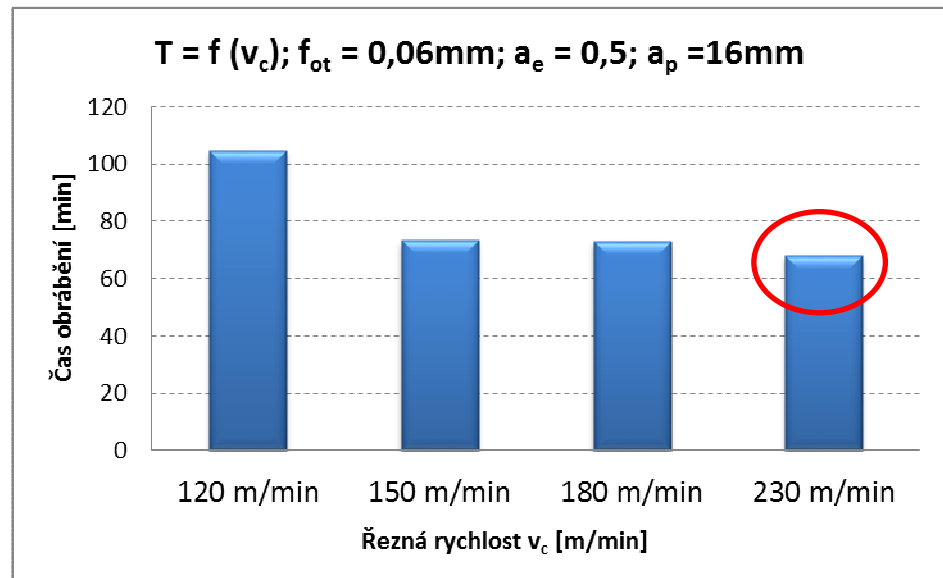
- řezná rychlost v_c (od 120 m/min do 230 m/min)
- posuv f_{ot} (od 0,06 mm/ot do 0,1 mm/ot)
- radiální hloubka řezu a_e (0,5 mm a 1 mm)

Pozn.: V průběhu obrábění byla volena hodnota axiální hloubky řezu $a_p = \text{konst.} = 16 \text{ mm}$

a_e [mm]	0,5				1
v_c [m/min]	120	150	180	230	230
f_{ot} [mm/ot]	0,06				
				0,08	
				0,1	0,1
a_p [mm]	16				16

Tabulka 3.3. Použité řezné podmínky při frézování monolitními frézami s vrstvou TiB₂/TiBC.

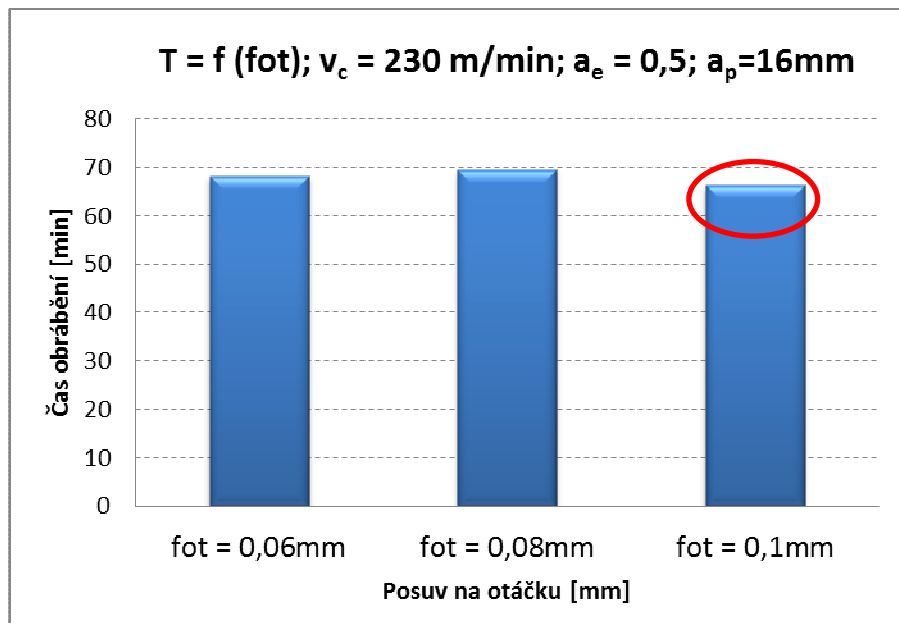
Úkolem první části této části experimentu bylo úkolem nalézt vhodnou řeznou rychlost v_c . Ta byla postupně zvyšována od hodnoty 120 m/min až po hodnotu 230 m/min. Obrábění probíhalo při konstantní hodnotě posuvu $f_{ot} = 0,06 \text{ mm}$. Dále byla konstantní hloubka řezu $a_p = 16 \text{ mm}$ a radiální hloubka řezu $a_e = 0,5 \text{ mm}$. Nástroj byl upnut v kleštině rotačního dynamometru. Maximální otáčky rotačního dynamometru jsou 10 000 ot/min. Z tohoto důvodu nedocházelo k navyšování řezné rychlosti nad hodnotu $v_c > 230 \text{ m/min}$. S ohledem na parametry rotačního dynamometru byla zvolena řezná rychlost $v_c = 230 \text{ m/min}$, viz graf 3.14.



Graf 3.14. Použité řezné rychlosti v_c [m/min] při frézování s monolitními kuželovými frézami.

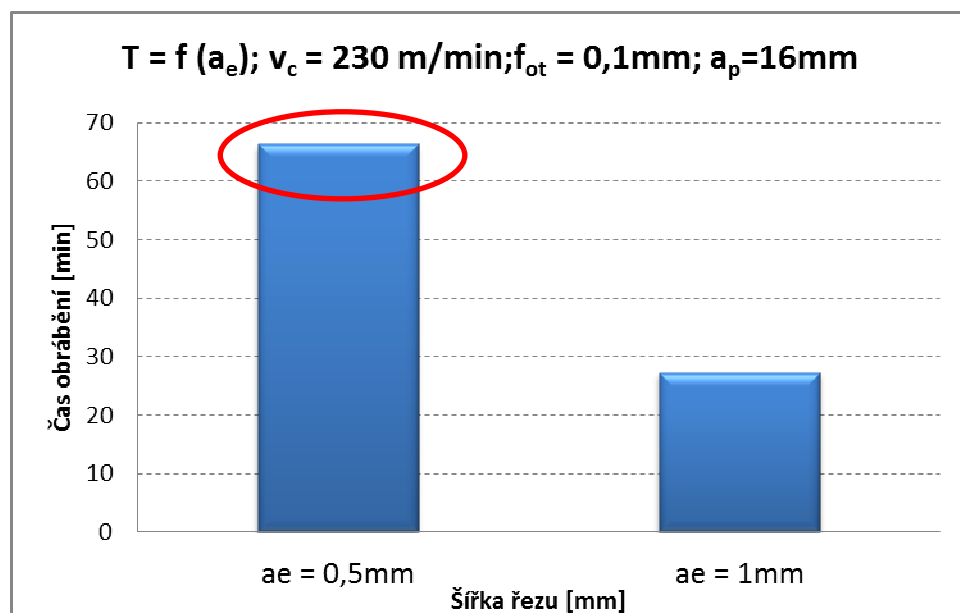
Poté co byla stanovena řezná rychlost, bylo úkolem najít vhodný posuv f_{ot} . Ten byl postupně měněn z hodnoty 0,06 mm/ot přes hodnotu 0,08 mm/ot na 0,1 mm/ot. Při dalším

zvyšování hodnoty posuvu začala prudce klesat trvanlivost řezného břitu. Z tohoto rozsahu byla proto vybrána s ohledem na produktivitu hodnota posuvu $f_{ot} = 0,1$ mm/ot, viz graf 3.15.



Graf 3.15. Použité posuvy f_{ot} [mm] při frézování s monolitními kuželovými frézami.

Jako poslední proměnnou byla radiální hloubka řezu a_e . Zde experiment probíhal nejprve při hodnotě $a_e = 0,5$ mm a poté při hodnotě $a_e = 1$ mm. Jelikož při hodnotě $a_e = 1$ mm nástroj vykazoval pokles trvanlivosti o 50 %, byla zvolena jako vhodná radiální hloubka řezu $a_e = 0,5$ mm, viz graf 3.16.

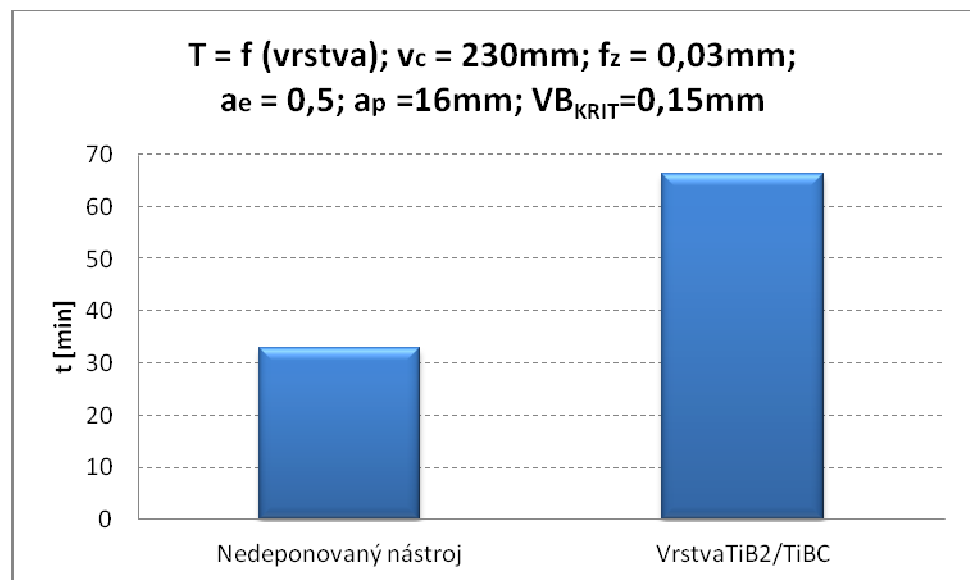


Graf 3.16. Použité radiální hloubky řezu a_e [mm] při frézování s monolitními kuželovými frézami.

Ve druhé fázi experimentu byly otestovány zbylé nástroje s tenkými vrstvami TiAlN a Triple-Coating. Také byl otestován nedeponovaný nástroj. Všechny nástroje byly porovnány s nástrojem s tenkou vrstvou TiB₂/TiBC.

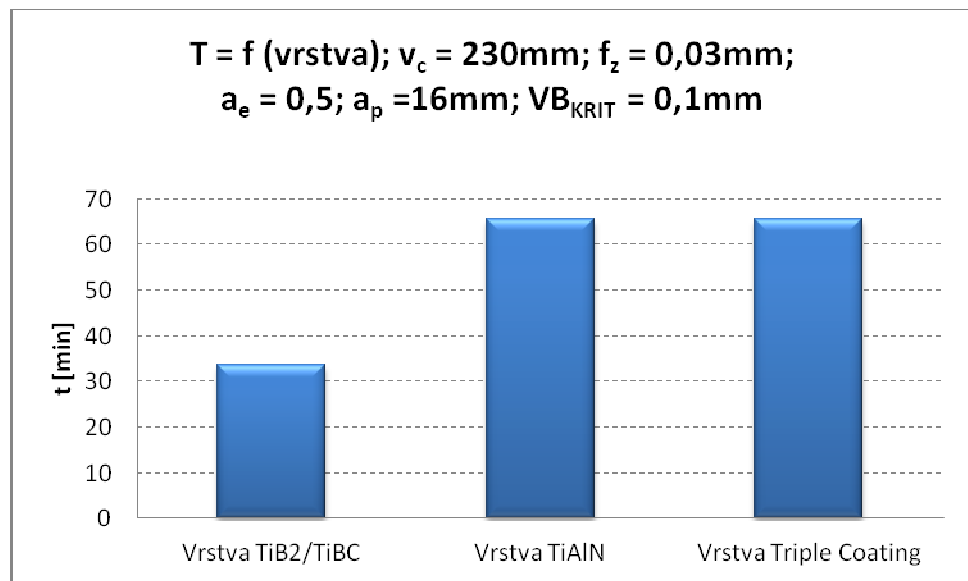
3.4.1 Konkurenceschopnost vrstvy TiB₂/TiBC při aplikaci na monolitním nástroji

Nedeponovaný nástroj byl v řezném procesu značně nestabilní, nebylo možno u něj zopakovat naměřené výsledky. Byla pouze vyhodnocena trvanlivost, která, jak je vidět z grafu 3.17, odpovídá polovině trvanlivosti nástroje s tenkou vrstvou TiB₂/TiBC.



Graf 3.17. Porovnání trvanlivosti nedeponovaného nástroje a nástroje s vrstvou TiB₂/TiBC.

Tenké vrstvy TiAlN a Triple Coating byly otestovány za vhodných řezných podmínek pro vrstvu TiB₂/TiBC. Zde však naměřené výsledky byly vztaženy k hodnotě kritériálního opotřebení, které bylo sníženo na hodnotu $VB_{KRIT} = 0,1$ mm. Ke snížení kritéria došlo proto, že tenké vrstvy TiAlN a Triple Coating vykazovali nízkou hodnotu opotřebení a při stanovených řezných podmínkách nebyl tak zcela využit jejich potenciál. Vrstva TiB₂/TiBC dosáhla hodnoty (sníženého) kritéria VB_{KRIT} o polovinu dříve. Pokud by se pokračovalo a nedošlo ke snížení hodnoty kritéria, experiment by se nejen časově protáhl, ale hlavně by došlo k jeho finančnímu nárůstu, zejména za nákup dalšího polotovaru.

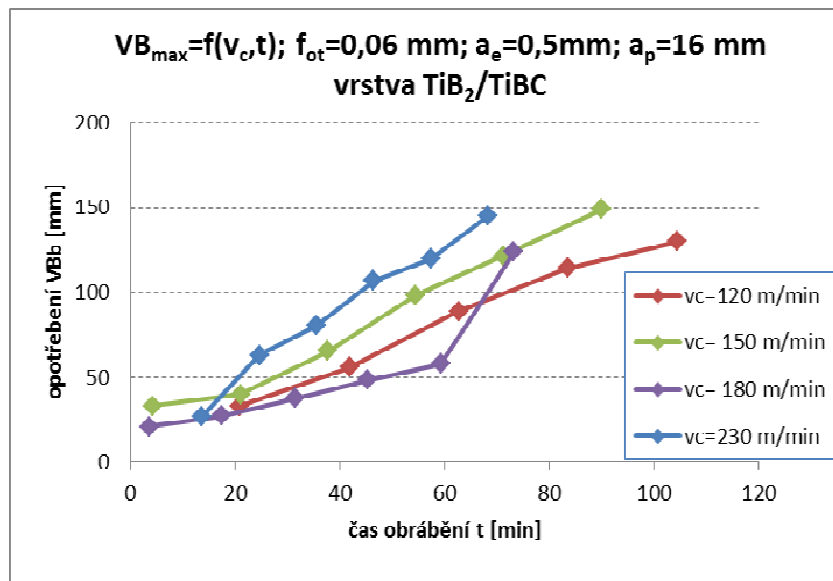


Graf 3.18. Porovnání trvanlivosti nástroje s vrstvou TiB₂/TiBC s nástroji s vrstvami TiAlN a Triple Coating.

Z grafu 3.18 vyplývá, že vrstva TiB₂/TiBC má poloviční hodnotu trvanlivosti oproti vrstvám TiAlN a Triple-Coating, které byly doporučeny jako nejlepší vrstvy současnosti.

TiB₂/TiBC - Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t

Jak již bylo zmíněno výše, experiment s monolitními kuželovými frézami začal hledáním vhodné řezné rychlosti v_c . Z grafu 3.19 jsou znázorněny jednotlivé průběhy opotřebení VB_b v závislosti na čase obrábění t. v_c byla měněna v rozsahu 120 m/min ÷ 230 m/min. Z grafu vyplývá, že nejrychleji se nástroj opotřeboval při řezné rychlosti $v_c = 230$ m/min.



Graf 3.19. Závislost opotřebení VB_b na čase t při různých řezných rychlostech v_c .

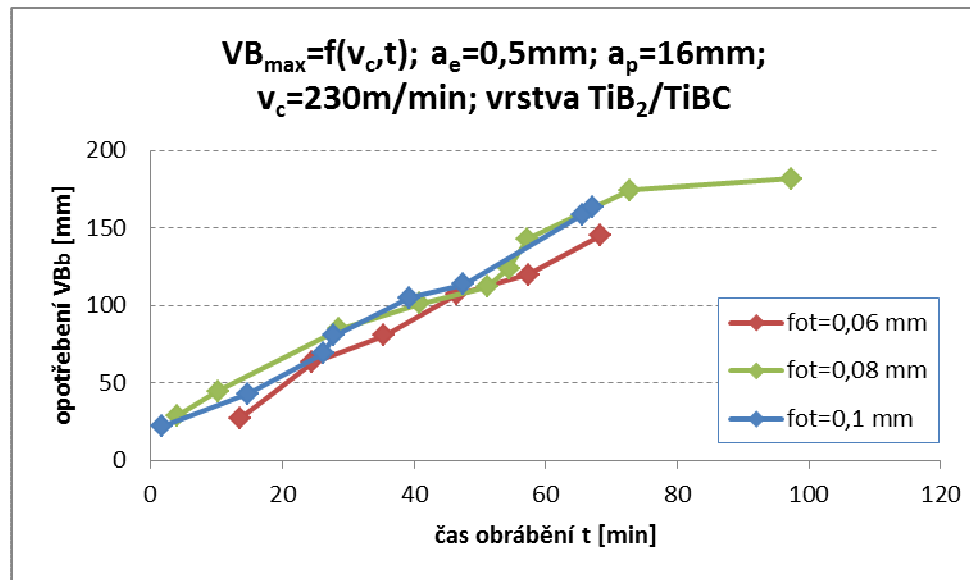
Dále je z grafu 3.19 vidět zlom u řezné rychlosti $v_c = 180 \text{ m/min}$, ke kterému dochází v poslední části k prudkému nárůstu opotřebení VB_b . Tento nárůst může být nejspíše způsoben vyštípnutím břitu u lamače třísky. Vyštípnutí může být důsledkem špatné adheze systému substrát - tenká vrstva, nebo důsledkem nedostatečné tloušťky vrstvy, viz obr. 3.12.



Obr. 3.12. Vyštípnutí břitu u lamače třísky při $v_c=180 \text{ m/min}$.

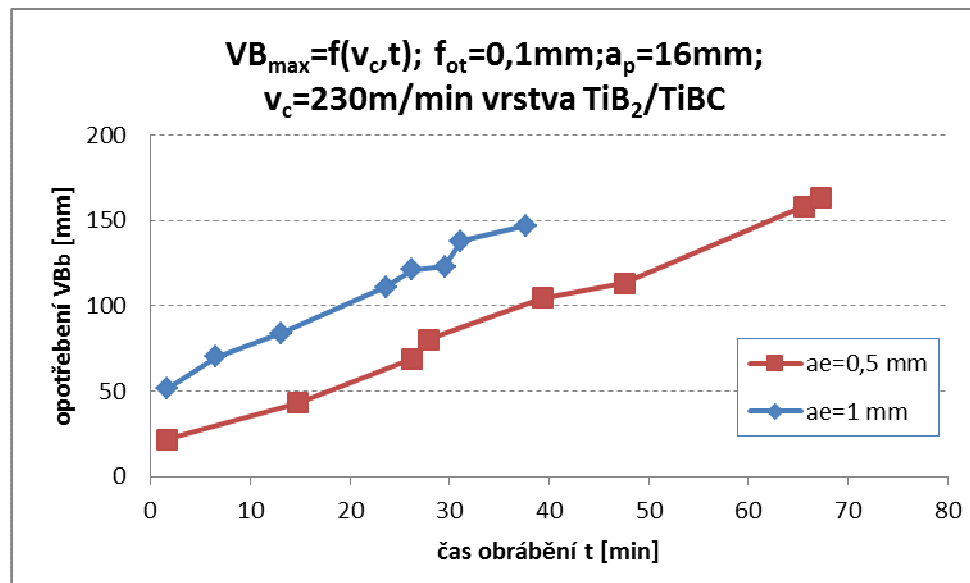
Poté co byla zvolená vhodná řezná rychlost $v_c = 230 \text{ m/min}$ bylo úkolem stanovit vhodný posuv f_{ot} [mm], ten se zvyšoval v rozsahu od $0,06 \text{ mm} \div 0,08 \text{ mm}$. Z grafu 3.20 je patrné, že všechny tři posuvy splnili kritériální hodnotu opotřebení $VB_{KRIT} = 0,15 \text{ mm}$. Dále

je vidět, že průběhy opotřebení jsou velice podobné. Proto, vzhledem k produktivitě byl zvolen posuv $f_{ot} = 0,1$ mm.



Graf 3.20. Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t a proměnlivém posuvu f_{ot}.

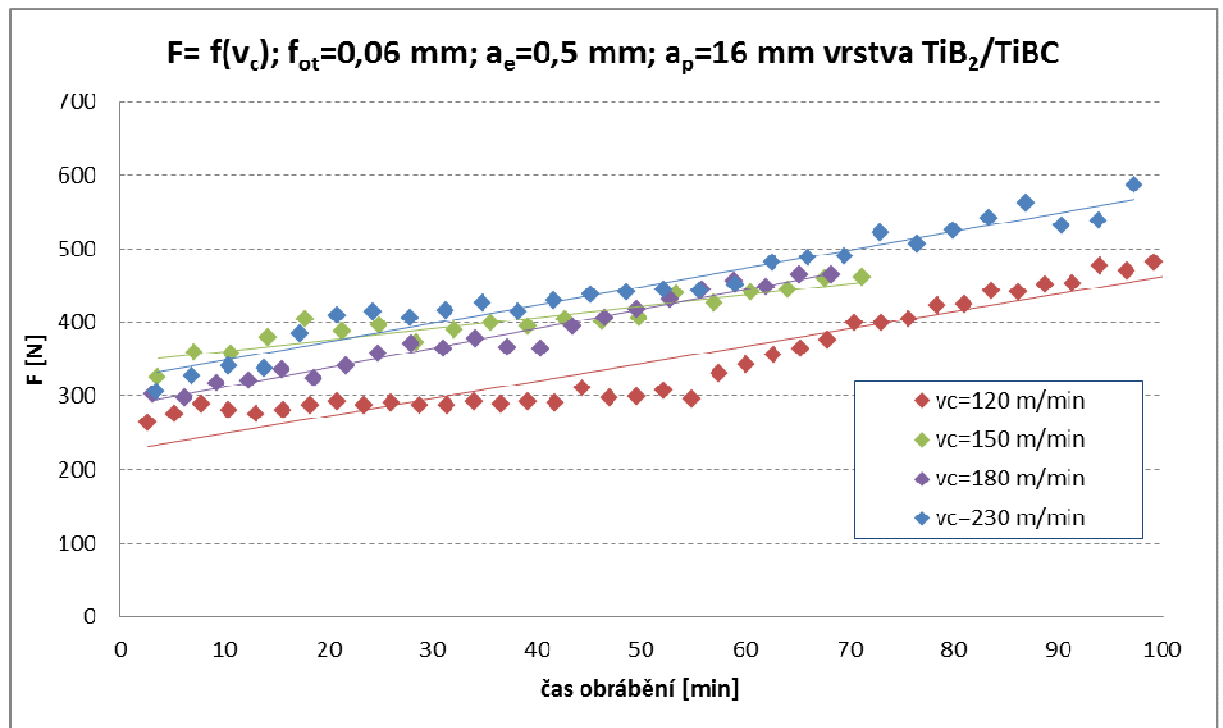
Poté co byly stanovena vhodná řezná rychlost v_c i vhodný posuv f_{ot}, bylo posledním úkolem nalézt vhodnou radiální hloubku řezu a_e. Z grafu 3.21 je patrné, že pro obě hodnoty radiální hloubky řezu a_e bylo dosaženo hodnoty kritériálního opotřebení. Avšak u hodnoty a_e = 1 mm došlo k výraznému poklesu trvanlivosti. Proto byla jako vhodnější vybrána hodnota a_e = 0,5 mm.



Graf 3.21. Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t a proměnlivé radiální hloubce řezu a_e .

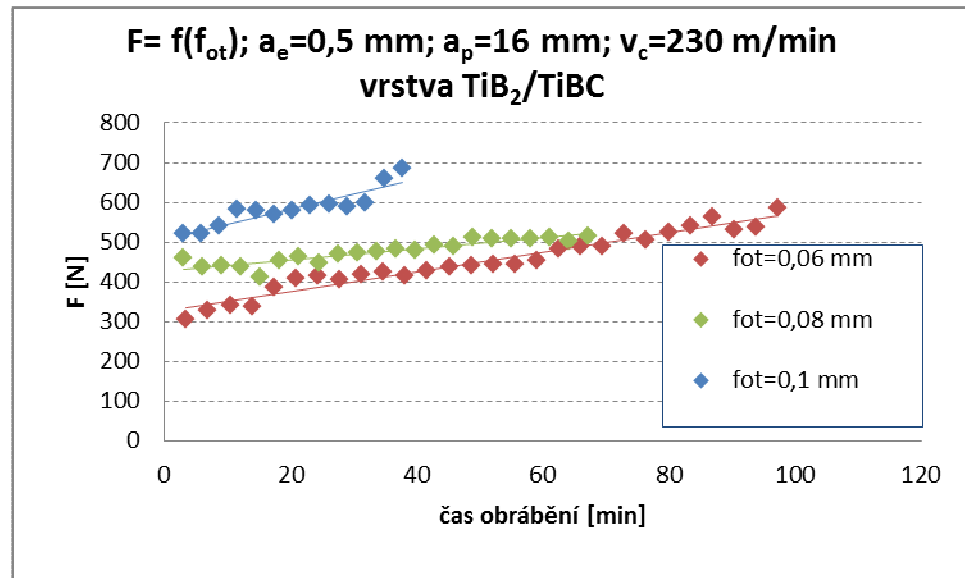
$TiB_2/TiBC$ - Průběhy celkového silového zatížení u různých řezných podmínkách

V grafu 3.22 jsou znázorněny průběhy celkového silového zatížení F [N] v závislosti s narůstajícím časem obrábění t [min]. Celkové silové zatížení F narůstá se zvyšujícím se opotřebením nástroje. Nejvyšší silové zatížení působí při řezné rychlosti $v_c = 230$ m/min. To také odpovídá grafu 3.19, kde nejvyššího opotřebení VB_b je dosaženo při $v_c = 230$ m/min.



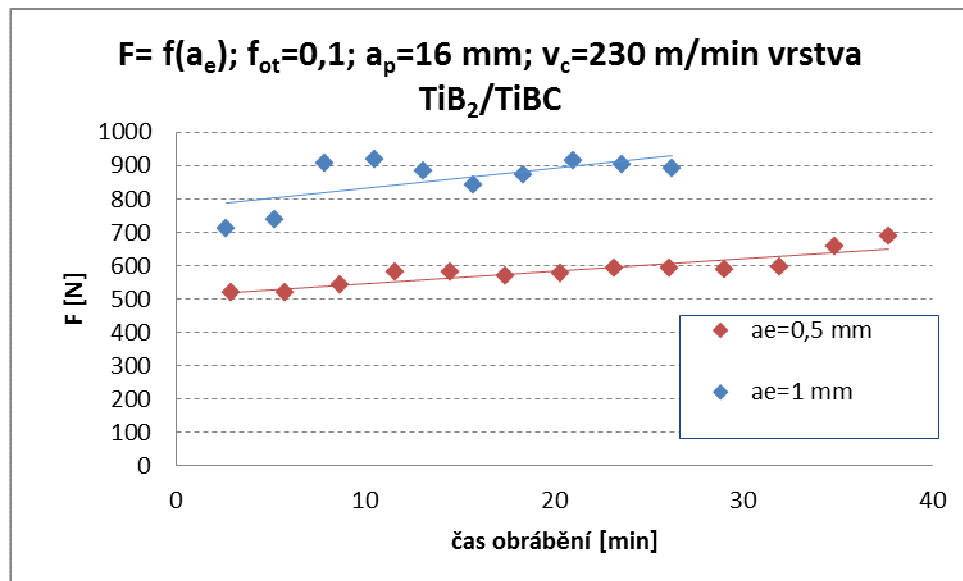
Graf 3.22. Závislost silového zatížení F na čase obrábění t při proměnlivé řezné rychlosti v_c .

Graf 3.23 zobrazuje závislost celkového silového zatížení F [N] na čase obrábění t [min] při různých posuvech f_{ot} [mm]. Posuv se zvyšoval v rozsahu od 0,06 mm ÷ 0,1 mm. Z grafu 3.27 je patrné, že největší silové zatížení působí při posuvu $f_{ot}=0,1$ mm. S ohledem na produktivitu obrábění byl tento posuv vybrán jako nejvhodnější.



Graf 3.23. Závislost silového zatížení F na čase obrábění t při proměnlivém posuvu f_{ot} .

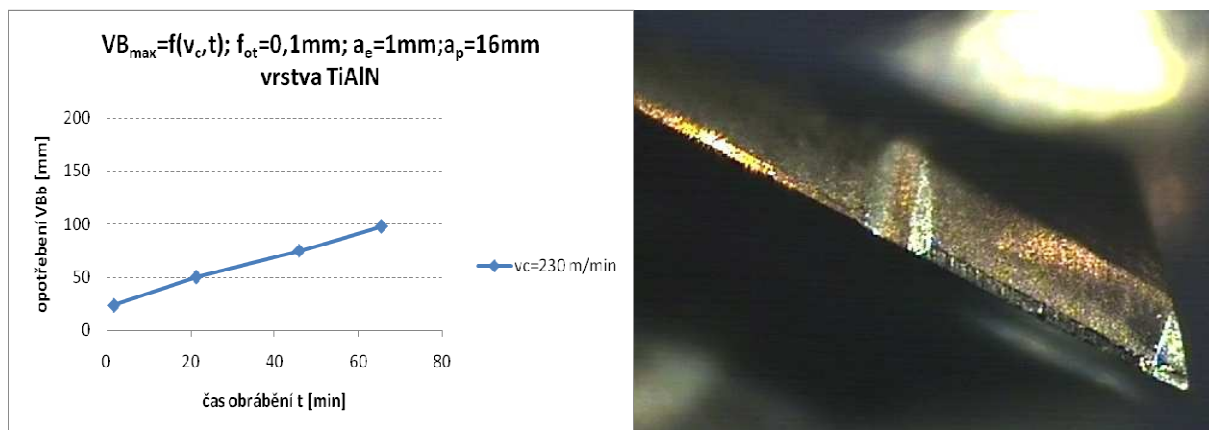
V poslední fázi stanovení vhodných řezných podmínek pro vrstvu TiB_2/TiBC byla stanovována radiální hloubka řezu a_e [mm]. Ta byla měněna z hodnoty $a_e = 0,5$ mm na hodnotu $a_e = 1$ mm. Výhodnější je hodnota $a_e = 0,5$ mm, protože graf 3.21 prokázal, že při této hodnotě má nástroj vyšší trvanlivost. To může být způsobeno i nižšími hodnotami celkového silového zatížení F [N], jak je patrné z grafu 3.24.



Graf 3.24. Závislost silového zatížení F na čase obrábění t při proměnlivé radiální hloubce řezu a_e .

TiAlN - Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t

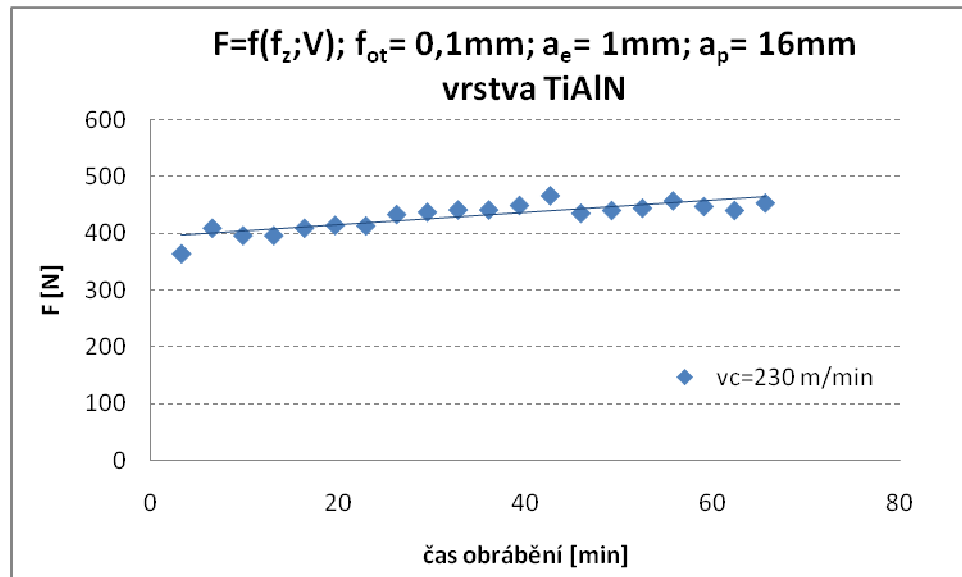
V grafu 3.25 je sledováno opotřebení tenké vrstvy TiAlN při řezných podmínkách, které byly zvoleny jako nejvhodnější pro vrstvu $TiB_2/TiBC$. Je na první pohled patrné, že všechny tři břity nástroje byly opotřebovávány rovnoměrně, viz obr. 3.13. Zároveň, nebylo dosaženo hodnoty kritéria $VB_{KRIT} = 0,15 \text{ mm}$. Z hlediska porovnání s vrstvou $TiB_2/TiBC$ a úspory času i obráběného materiálu bylo toto kritérium sníženo na hodnotu $VB_{KRIT} = 0,1 \text{ mm}$.



Graf 3.25. Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t při řezné rychlosti $v_c=230 \text{ m/min}$ pro vrstvu TiAlN a obr. 3.13 zobrazující opotřebení na břitu nástroje.

TiAlN - Průběh celkového silového zatížení

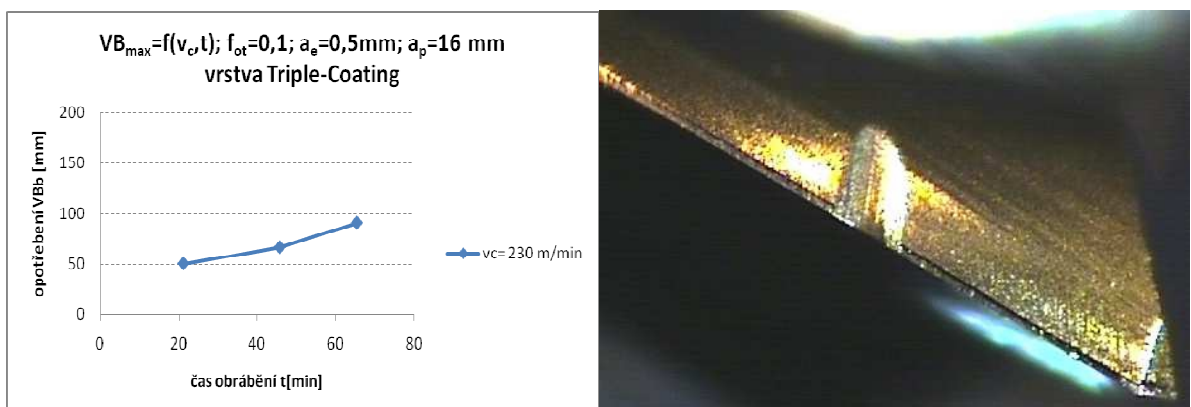
Graf 3.26 znázorňuje průběh silového napětí F [N] u nástroje s vrstvou TiAlN. Z grafu je patrné, že síla F roste jen mírně neboť i rovnoměrné opotřebení nepřesáhlo $VB_{KRIT} = 0,1$ mm.



Graf 3.26. Závislost silového zatížení F na čase obrábění t při řezné rychlosti $v_c=230$ m/min pro vrstvu TiAlN.

Triple-Coating - Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t

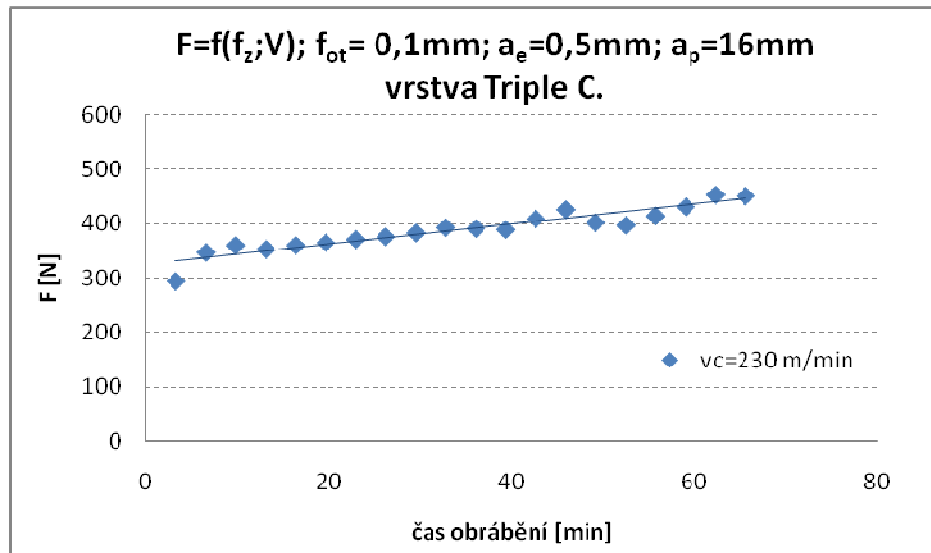
Vrstva Triple-Coating byla podobně jako vrstva TiAlN testována při řezných podmínkách vhodných pro vrstvu $TiB_2/TiBC$. Protože zde opět nebylo dosaženo $VB_{KRIT} = 0,15$ mm muselo být opět sníženo kritérium na hodnotu $VB_{KRIT} = 0,1$ mm. Opotřebení na všech břitech bylo opět rovnoměrné a jeho hodnoty obdobné jako u vrstvy TiAlN jak je patrné z grafu 3.27 a obr. 3.14.



Graf 3.27. Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t při řezné rychlosti $v_c=230$ m/min pro vrstvu Triple-Coating a obr. 3.14 zobrazující opotřebení na břitě nástroje.

Triple-Coating - Průběh celkového silového zatížení

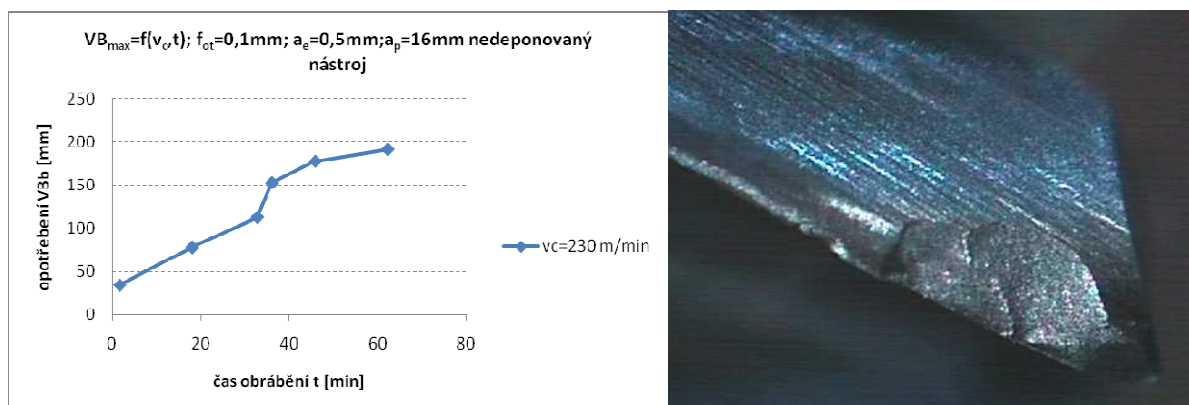
Graf 3.28 znázorňuje průběh silového napětí F [N] u nástroje s vrstvou Triple - Coating. Z grafu je patrné, že síla F roste jen mírně, jako tomu bylo u nástroje s vrstvou TiAlN. Je to z důvodu rovnoměrného opotřebení, které zároveň nepřesáhlo $VB_{KRIT} = 0,1$ mm.



Graf 3.28. Závislost silového zatížení F na čase obrábění t při řezné rychlosti $v_c=230$ m/min pro vrstvu Triple-Coating.

Referenční nástroj - Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t

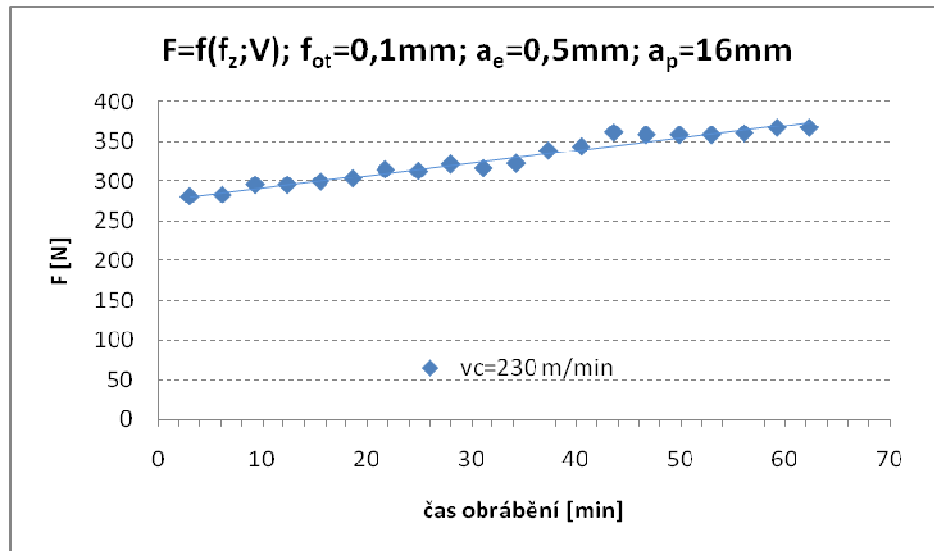
Při řezných podmínkách, které byly společné pro vrstvu TiAlN a vrstvu Triple-Coating a zároveň byly vybrány jako vhodné pro obrábění vrstvou $TiB_2/TiBC$, byl otestován i nepovlakovaný nástroj. Jak je patrné z grafu 3.29 došlo k prudkému nárůstu opotřebení na druhém břitu, což bylo způsobeno odštípnutím části břitu nástroje, viz obr. 3.15. Při těchto podmínkách, nebylo možné opakovat naměřené hodnoty opotřebení VB_b , protože nástroj byl značně nestabilní, docházelo k vyštípování břitu.



Graf 3.29. Závislost opotřebení VB_b na čase obrábění t při řezné rychlosti $v_c=230$ m/min pro nástroj bez vrstvy a obr. 3.15 zobrazující vyštípnutí břitu nástroje.

Referenční nástroj - Průběh celkového silového zatížení

Graf 3.30 udává průběh silového napětí F [N]. Je patrné, že zde působí vyšší hodnoty celkového silového napětí.



Graf 3.30. Závislost silového zatížení F na čase obrábění t při řezné rychlosti $v_c=230\text{ m/min}$ pro nástroj bez vrstvy.

4 Technicko-ekonomické hodnocení

V této části diplomové práce je provedeno technické a ekonomické hodnocení naměřených výsledků na základě provedené experimentální činnosti.

4.1 Technické hodnocení

4.1.1 Hodnocení experimentu VBD

V tomto experimentu byla sledována řezivost VBD ze slinutého karbidu, které byly deponovány dvěma různými vrstvami a VBD, které nebyly povlakovány žádnou tenkou vrstvou. Tenké vrstvy, kterými byly deponovány, jsou: TiAlN a TiB₂/TiBC. Každá destička byla experimentálně testována při různých řezných podmínkách. Zároveň při těchto řezných podmínkách nesměla být překročena kritéria stanovená experimentem, neboť samotný experiment vychází z reálných podmínek obrábění dělicí roviny tělesa parní turbíny. Hodnotícím parametrem je v tomto experimentu použitelná řezná rychlost v_c [m/min].

Pro VBD s vrstvou TiB₂/TiBC je vhodná řezná rychlost stanovena na hodnotu $v_c=200$ m/min. Pro VBD bez vrstvy je vhodná řezná rychlost stanovena na hodnotu $v_c=170$ m/min. Rozdíl v těchto hodnotách je 15% ve prospěch vrstvy TiB₂/TiBC. Do hodnoty řezné rychlosti $v_c=170$ m/min nemá vrstva TiB₂/TiBC žádný přínos oproti VBD bez vrstvy (IN04S).

Pro VBD s vrstvou TiAlN je vhodná řezná rychlost stanovena na hodnotu $v_c=230$ m/min. Oproti VBD s vrstvou TiAlN tato hodnota řezné rychlosti představuje nárůst o 15% ve prospěch vrstvy TiAlN. Proto lze konstatovat, že vrstva TiB₂/TiBC není v tomto případě konkurenceschopná. Svůj přínos má, ale pouze oproti VBD ze samotného substrátu.

4.1.2 Hodnocení experimentu s monolitními kuželovými frézami

V tomto experimentu byla testována trvanlivost tenkých vrstev na monolitní kuželové fríze, při různých řezných podmínkách. V průběhu obrábění bylo sledováno opotřebení na nástrojích, které byly deponovány třemi vrstvami (TiB₂/TiBC, TiAlN a Triple-Coating).

Prvním úkolem bylo nalezení vhodných podmínek pro obrábění frézou s vrstvou TiB₂/TiBC. Druhým úkolem bylo otestování nástrojů s vrstvami TiAlN a Triple-Coating při řezných podmínkách vhodných pro vrstvu TiB₂/TiBC. Tímto způsobem byly naměřeny hodnoty, které sloužily k porovnání konkurenceschopnosti jednotlivých vrstev.

Vhodné řezné podmínky pro vrstvu TiB₂/TiBC jsou: $v_c=230$ m/min; $f_{ot}=0,1$ mm; $a_e=0,5$ mm. Při experimentu byla zachována konstantní hodnota hloubky řezu $a_p=16$ mm. Při těchto hodnotách proběhlo porovnání s vrstvami TiAlN a Triple-Coating. Jak bylo v experimentu dokázáno, nástroj s vrstvou TiB₂/TiBC má poloviční trvanlivost oproti nástrojům s vrstvami TiAlN a Triple-Coating. Tento fakt může být důsledkem špatného nanesení vrstvy na substrát nebo její nedostatečnou tloušťkou, jak bylo prokázáno pomocí řádkovacího mikroskopu. Dále byly na povrchu vrstvy patrné stopy po broušení, tzn. vrstva má drsný povrch. Tyto faktory ovlivnily trvanlivost vrstvy TiB₂/TiBC.

Dále byl nástroj s vrstvou $TiB_2/TiBC$ porovnán s nedeponovaným nástrojem. Nedeponovaný nástroj má oproti nástroji s vrstvou $TiB_2/TiBC$ poloviční trvanlivost.

4.2 Ekonomické hodnocení

Ekonomické hodnocení naměřených výsledků nemůže být provedeno, protože se jedná o experimentální vrstvu, která je ve fázi vývoje. Výrobce této vrstvy, firma VÚHŽ a.s. neposkytl bližší informace ohledně cen deponování této vrstvy jak na VBD tak monolitní nástroje. Zároveň je nutné zmínit, že vrstva přínos může mít, pokud selepší její nanášení na substrát. Poté, pokud firma VÚHŽ a.s. uvede vrstvu na trh, bude ekonomické hodnocení možné.

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala nově vyvinutou tenkou vrstvou TiB_2/TiBC . Jejím cílem bylo zjistit konkurenceschopnost vrstvy TiB_2/TiBC oproti vrstvám používaných na současném trhu. Výsledky, z kterých bylo stanoveno hodnocení konkurenceschopnosti tenké vrstvy, vycházelo z experimentálního obrábění feriticko-martenzitických ocelí.

Součástí diplomové práce je popsání současného stavu obrábění korozivzdorných ocelí, způsobů nanášení tenké vrstvy na substrát a popsání úprav, které probíhají před nanášením tenké vrstvy na substrát.

Přínos této diplomové práce je především v její experimentální části. Jelikož byla tenká vrstva TiB_2/TiBC nanášena na VBD a na monolitní kuželovou frézu, vznikly z tohoto důvodu dva samostatné experimenty, jejichž úkolem bylo nalezení vhodných podmínek pro frézování s nástroji s nově vyvinutou vrstvou.

V prvním experimentu byla vrstva TiB_2/TiBC aplikována na VBD. Pro vyhodnocení konkurenceschopnosti byla na VBD nanášena vrstva TiAlN . Třetí VBD byla bez vrstvy, čili se jednalo o samotný substrát, a to především z důvodu zjištění samotného přínosu vrstvy. Hodnotícím kritériem byla maximálně použitelná řezná rychlost v_c [m/min]. Experiment prokázal, že pro frézování s VBD, které jsou deponované vrstvou TiB_2/TiBC je limitní řezná rychlost $v_c=200$ m/min. Pro VBD bez vrstvy je limitní hodnotou řezná rychlost $v_c=170$ m/min. Přínos vrstvy oproti samotnému substrátu je tedy v navýšení řezné rychlosti v_c o 15%. Oproti VBD s vrstvou TiAlN , pro kterou je limitní $v_c=230$ m/min. Tato hodnota v_c představuje nárůst řezné rychlosti v_c o 15% oproti VBD s vrstvou TiB_2/TiBC a proto lze konstatovat, že za současných podmínek deponování a složení tenké vrstvy je přínos vrstvy TiB_2/TiBC pouze oproti základnímu substrátu.

V druhém experimentu byla vrstva TiB_2/TiBC nanášena na kuželovou monolitní frézu. V první části byly nalezeny vhodné řezné podmínky pro tento nástroj s vrstvou TiB_2/TiBC . Při těchto podmínkách byly odzkoušeny i zbylé konkurenční vrstvy TiAlN a vrstva Triple-Coating. Aby byl patrný přínos vrstvy TiB_2/TiBC , byl rovněž otestován i nedeponovaný nástroj. Hodnotícím kritériem druhého experimentu byla trvanlivost. Experiment prokázal, že oproti nedeponovanému nástroji má nástroj s vrstvou TiB_2/TiBC o polovinu vyšší trvanlivost. Dále také prokázal, že oproti nástrojům s vrstvami TiAlN a Triple-Coating má nástroj s vrstvou TiB_2/TiBC trvanlivost o polovinu nižší. Tento fakt může být způsoben nedostatečnou tloušťkou tenké vrstvy nebo její špatnou adhezí k základnímu substrátu. Výsledky z řádkovacího mikroskopu potvrdily nedostatečnou tloušťku vrstvy. Snímky pořízené řádkovacím mikroskopem, které jsou součástí diplomové práce, rovněž ukázaly její drsný povrch.

Na základě těchto výsledných informací se firma VÚHŽ a.s. rozhodla pro určité změny v technologii nanášení tenké vrstvy na substrát. Byly provedeny změny v čištění základního substrátu před nanášením tenké vrstvy, což by mělo přinést výsledný efekt

v podobě vyšší adheze vrstvy k substrátu. Dále také pozměnili chemické složení příslušné vrstvy. Bohužel detailní informace o technologii nanášení ani změny v chemickém složení firma neprozradila. Dále proto proběhl experiment s kuželovými frézami s nově upravenou tenkou vrstvou $TiB_2/TiBC$, který není součástí této diplomové práce z důvodu jejího odevzdání. Podstatný je však výsledek experimentu, který prokázal, že nové složení vrstvy $TiB_2/TiBC$ je konkurenceschopné vrstvám $TiAlN$ a Triple-Coating.

6 Použitá literatura

- [1] HUMÁR, CSC., Doc. Ing. Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. 2008. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [2] KŘÍŽ, Dr. Ing. Antonín. KMM ZČU V PLZNI. [Http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf) [online]. 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf
- [3] PEŠINA, Jan. Hystorie vývoje žáruvzdorných oceli a superslitin. VUTBR. [Https://dspace.vutbr.cz](https://dspace.vutbr.cz) [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: [ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/3SV/04B-3SV.ppt](https://dspace.vutbr.cz/files/vyuka/3SV/04B-3SV.ppt)
- [4] Řada reaktivity kovů. VUTBR. *ZSChemie* [online]. 2012 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.zschemie.euweb.cz/redox/redox9.html>
- [5] Beketovova řada kovů. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Beketovova_řada_kovů
- [6] Pasivace korozivzdorných ocelí. www.euro-inox.org [online]. 2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://www.euro-inox.org/pdf/map/Passivating_of_steel.pdf
- [7] Korozivzdorna ocel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Korozivzdorná_ocel
- [8] Moření korozivzdorných ocelí. www.euro-inox.org [online]. 2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://www.euro-inox.org/pdf/map/Pickling_of_steel.pdf
- [9] Žárové pozinkování. *TZB.CZ* [online]. 2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://voda.tzb-info.cz/materialy-voda-kanalizace/8493-zarove-pozinkovane-ocelove-potrubi-a-koroze>
- [10] Štěrbínová koroze. *VŠCHT* [online]. 2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze
- [11] Vlastnosti materiálů. MACHÁČEK, Josef. *ČVUT* [online]. 2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNerez/Nerez-2.pdf>
- [12] Metalografie. *ZČU v Plzni* [online]. 2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/metalografie.html>
- [13] *Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břítu* [online]. VUT Brno, 2009 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12898/2009_DP_BUKACEK_ZDENEK_8587_2.pdf?sequence=1. Diplomová práce. VUTBR. Vedoucí práce doc. Ing. JAROSLAV PROKOP, CSc.

- [14] Korozivzdorné oceli. ZČU v Plzni [online]. 2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: Info: http://www.ateam.zcu.cz/korozivzdorne_oceli_3.pdf
- [15] *Obrábění tvrdých materiálů* [online]. VUT Brno, 2007 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11231/12235/2007_DP_KRÁTKÝ_ZDENEK_85872.pdf?sequence=1. Diplomová práce. VUTBR. Vedoucí práce doc. Ing. JAROSLAV PROKOP, CSc.
- [16] Ocel odolná korozi. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Ocel_odolna_korozi
- [17] MACHÁČEK, DRSC., Prof. Ing. Josef. *Materiály a jejich charakteristiky* [online]. 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNerez/Nerez-2.pdf>
- [18] DAĐOUREK, Doc. Ing. Karel. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Precipitační vytvrzování* [online]. Liberec, 2007 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/TTZ
- [19] SVANDAWEB. *Vliv legovacích prvků na vlastnosti ocelí* [online]. 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>
- [20] SANDVIK COROMANT. *Korozivzdorné oceli* [online]. 2011 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/
- [21] SANDVIK COROMANT. *Opotřebení břitu* [online]. 2011 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/
- [22] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Příručka pro technology* [online]. 2012 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [23] A-TEAM. *Tenké vrstvy* [online]. ZČU v Plzni, 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
- [24] Titanium-aluminium-nitride. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_aluminium_nitride
- [25] SHM S.R.O. *TripleCoating Cr* [online]. Šumperk, 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoatings-cr/>
- [26] ABAD, Manuel David, CÁCERES a Yury S. POGOZHEV. *Bonding structure and mechanical properties of Ti-B-C coatings* [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppap.200930403/pdf>

- [27] HUMÁR, CSC., Doc. Ing. Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. 2008. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [28] KŘÍŽ, Antonín. *Mechanické vlastnosti PVD vrstev* [online]. ZČU v Plzni [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Vztah_mezi_mechanickymi..pdf
- [29] Katalog Ingersoll: Cutting Tools [online]. 2011 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.ingersoll-imc.com/en/index.htm>
- [30] KATEDRA TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ. *Moderní metody obrábění: zvyšování řezivosti nástroje* [online]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2010 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.belgeler.com/blg/33zz/plzen-kto-prez>
- [31] KŘÍŽ, Antonín, Petr BENEŠ, Martina SOSNOVÁ a Jiří HÁJEK. *KMM ZČU V PLZNI. Vlastnosti tenkých vrstev při vyšších teplotách* [online]. 2011 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/kriz_vrstvy.pdf
- [32] SHM S.R.O. *Vývoj a praktické aspekty povlakování řezných nástrojů technologií PVD* [online]. Šumperk, 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.vakspol.cz/lsvt06/zindulka_lsvt06_1.pdf
- [33] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Současnost a trendy povlakování technologií PVD* [online]. 2003 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologiei-pvd.html>
- [34] Mitutoyo [online]. 2008 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.omnitech-sales.com/>
- [35] TU LIBEREC. *NAVRHOVÁNÍ HOSPODÁRNÝCH ŘEZNÝCH PODMÍNEK PŘI OBRÁBĚNÍ* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_nhrp.pdf
- [36] KOVOSVIT MAS. *MCV 750* [online]. 2011 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz/cz/mcv-750/>
- [37] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Hladicí geometrie řezných břitů* [online]. 2001 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hladici-geometrie-reznych-bitu.html>
- [38] SANDVIK COROMANT. *Dokončování s použitím hladicích břitových destiček* [online]. 2007 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/face_milling/finishing_with_wiper_inserts/
- [39] SECO TOOLS: Destičky Secomax Wiper [online]. 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/cs/Global/Products/Advanced-cutting-materials/PCBN/Secomax-Wiperinserts/>
- [40] Drsnoměr Surftest SJ-210 [online]. 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/vyroba/>

7 Přílohy

PŘÍLOHA č. 1

Frézovací centrum MCV 750A [35]

Tento stroj se nachází v halových laboratořích KTO ZČU v Plzni. Byl vyroben firmou KOVOSVIT MAS, a.s. sídlící v Sezimovo Ústí. Je postaven na nosném rámu ve tvaru písmene C. Uspořádání a tvar odlitých nosných částí rámu splňuje požadavek na jeho vysokou tuhost, pevnost a stabilitu. Stroj má lineární vedení ve všech třech souřadnicových osách, čímž je garantována přesnost samotného obrábění. Jako jeho další výhodu lze uvést možnost automatické výměny nástrojů ze zásobníku, což umožňuje obrábění v automatickém cyklu. Tento zásobník může být zaplněn až 20 nástroji.

Parametry stroje:

- rozměry (délka x šířka x výška) [mm] 3700 x 2200 x 2735
- hmotnost [kg] 5100
- výkon vřetene [kW] 11,5
- řídicí systém Heidenhein 426
- max. otáčky [ot/min] 13000

Pracovní stůl:

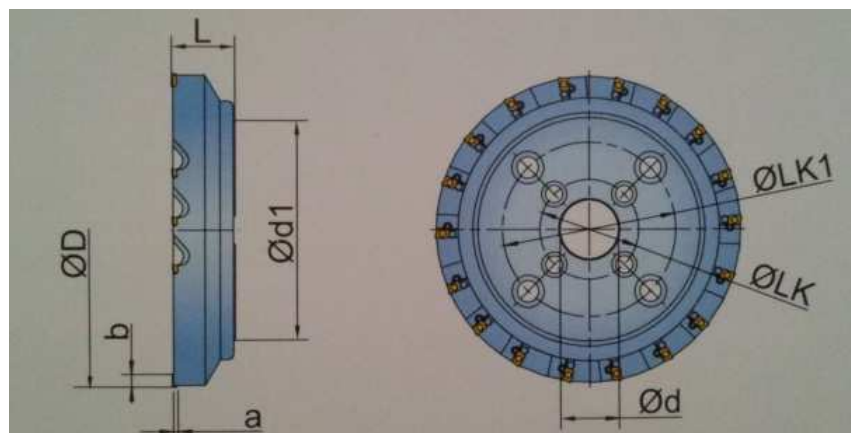
- upínací plocha stolu [mm] 1000 x 640
- maximální zatížení stolu [kg] 650
- pracovní rozsah X,Y, Z [mm] 750 x 500 x 500

PŘÍLOHA č. 2

Frézovací hlava

Samotná frézovací hlava s firemním označením 6F2B080R00 má následující parametry, viz obr. P-1:

- nominální průměr D 80 [mm]
- vnější průměr d_1 70 [mm]
- upínací průměr d 27 [mm]
- pracovní délka nástroje L_1 50 [mm]
- max. délka řezu a (a_p) 0,5 [mm]
- max. šířka řezu kotoučové frézy b (a_e) 10 [mm]
- počet destiček 4
- hmotnost m 1,5 [kg]



Obr. P-1. Parametry frézovací hlavy.

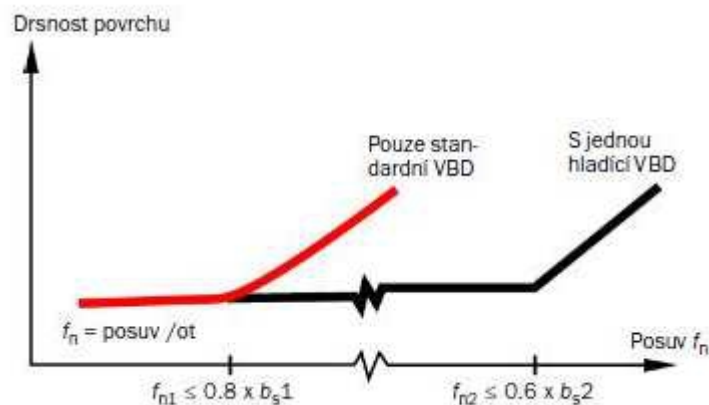
PŘÍLOHA č. 3

VBD s hladicí geometrií (wiper geometrie) [36,37,38]

Samotné VBD od firmy Ingersoll, které jsou použity pro experimentální obrábění, jsou určeny k dokončovacím operacím. Využívají tzv. „Wiper geometrie“, která byla vyvinuta firmou Iscar kolem roku 1991. Nejdříve firma aplikovala hladicí geometrii na své Grip nástroje a dokázala ekonomicky snížit náklady na třískové obrábění. Po tomto pozitivním přínosu přidala specifikaci hladicí geometrie označenou WG (Wiper Geometry). V současnosti je tato geometrie rozšířena na standardně používané materiály jako je řezná keramika nebo kubický nitrid boru (CBN).

Destičky s touto geometrií zjednodušují obrábění kalených a tvrdých ocelí a litin. Jak již bylo zmíněno výše, tato geometrie snižuje náklady. Konkrétně pokud je požadována vysoká kvalita obrobeneho povrchu, je potřeba zařadit do technologického postupu broušení. Destičky s hladicí úpravou břitu tuto dokončovací technologii ve většině případů nahrazují.

Dnes již všichni výrobci nabízejí VBD destičky s hladicí geometrií. Výrobce Sandvik Coromant na svých webových stránkách přidává i „metodické pokyny, jak docílit zrcadlového lesku při vysokých rychlostech posuvu“.



Obr. P-2. Výhody hladicí VBD při použití vyššího posuvu.

Na obr. P-2 je znázorněn graf, který upřednostňuje hladicí VBD. Pokud u standardní VBD dostaneme hodnotu vyšší než je $f_n \leq 80 \times b_s$ pak je z hlediska dosáhnutí kvalitnějšího obrobeneho povrchu vhodné použít VBD s hladicí geometrií. Dále se zvyšujícím se průměrem frézy, roste počet zubů, proto se zvyšuje i posuv na otáčku. Docílení kvalitního povrchu a dobré drsnosti je možné pouze s hladicími destičkami.

Obecně by se daly výhody použití VBD s hladicí geometrií shrnout do několika bodů:

- vysoce stabilní proces obrábění
- snížení rizika výskytu vibrací
- vysoká kvalita obrobeneho povrchu

- umožňuje vyšší posuv
- ekonomický přínos v podobě snížení výrobních nákladů
- delší životnost břitu
- nižší řezné radiální síly
- zvýšení tlakových napětí

PŘÍLOHA č. 4

Materiál obrobku ocel 17021.2

Materiál obrobku je ocel třídy 17, přesněji 17 021. Oceli této třídy se rozdělují podle:

- chemického složení
- struktury

Tato ocel obsahuje podle materiálového listu 12–14 hmotnostních % chromu (Cr) což ji řadí mezi chromové korozivzdorné a žáruvzdorné oceli. Obsah chromu je u těchto ocelí zvlášť důležitý, protože je podmínkou k vytváření pasivační vrstvy. Přítomnost pasivační vrstvy na povrchu oceli má za následek jeho odolnost proti korozi. Samozřejmě kromě chromu ocel obsahuje další prvky.

Podle strukturního složení lze ocel 17 021 zařadit k martenzitickým ocelím. I výrobce VBD firma Ingersoll přiřazuje oceli materiálovou skupinu 12-13, čímž jí řadí mezi feriticko-martenzitické až martenzitické nerezové oceli.



Obr. P-3. Materiál obrobku ocel 17 021.

Tato ocel se používá na součásti, které se využívají v tepelně-energetickém průmyslu. Například: hřídele, turbokompresorové lopatky, lopatky parních turbín. Dále na součásti a armatury na páru, vodu a kapaliny, které nejsou chemicky agresivnější než voda. Lze ji však využít i v textilním, papírenském nebo potravinářském průmyslu nebo na zařízení pro domácnost.

Ocel 17 021 lze sehnat v různých polotovarech: tyč, plech, výkovek nebo bezešvou trubku. Dále si lze zvolit rozměr a tepelné zpracování polotovaru. Kvádr v diplomové práci byl vykovan a má tepelné zpracování 2, což znamená že je žíhaný. Takto upravený materiál má:

Katedra technologie obrábění

Bc. Jakub Kovařík

• mez kluzu R_e	[MPa]	275
• mez pevnosti R_m min	[MPa]	460
• tažnost A_5 min	[%]	20
• tvrdost HB		200
• modul pružnosti E	[GPa]	219
• hustota ρ	[kg*m ³]	7870
• měrná tepelná kapacita C_p	[J*Kg ⁻¹ *K ⁻¹]	460
• teplotní souč. roztažnosti α	[K ⁻¹]	10*10 ⁻⁶
• tepelná vodivost λ_t	[W*m ⁻¹ *K ⁻¹]	29,2
• rezistivita ρ	[Ω *m]	560*10 ⁻⁹

Při svařování této oceli je nutný přehřev na 200°C – 300°C. Po svařování musí následovat žíhání při 700°C – 760°C. Svařitelnost se udává jako zaručeně podmíněná.

PŘÍLOHA č. 5

Dynamometr Kistler 9255 B Sp

Samotný přístroj se skládá ze čtyř tří-složkových silových snímačů, které jsou umístěny mezi základní a horní deskou. Každý snímač obsahuje tři páry křemičitých destiček. Jedna destička zachycuje tlak ve směru osy X, zbylé dvě destičky reagují na smyk ve směru osy X a Y. Tyto složky síly se měří prakticky bez posunutí. Výstupy z těchto čtyř zabudovaných silových snímačů jsou spojeny uvnitř dynamometru způsobem, který dovoluje vícesložkové měření sil a momentů. Dále jsou tyto čtyři snímače izolované a uzemněné. Dynamometr je korozivzdorný a je chráněn nátěrem proti řezným a chladicím kapalinám.

Základní technická data tří-složkového dynamometru Kistler 9255 B Sp

rozsah měření	F_x, F_y	kN	$-20 \div 20$
	F_z	kN	$-10 \div 40$
dílčí kalibrační rozsah	F_x, F_y	kN	$0 \div 2$
	F_z	kN	$0 \div 4$
přetížení	F_x, F_y	kN	$-24/24$
	F_z	kN	$-12/48$
hmotnost		kg	52
citlivost	F_x, F_y	pC/N	~ -8
	F_z	pC/N	$\sim -3,7$
tuhost	C_x, C_y	kN/ μm	> 2
	C_z	kN/ μm	> 3
odchylka		N	$< 0,01$
vlastní frekvence	$f_o(x,y,z)$	kHz	~ 3

Tabulka P-1. Technická data třínožkového dynamometru Kistler 9255 B Sp.

PŘÍLOHA č. 6

Rotační dynamometr Kistler 9123C1111 [39]

Používá se pro frézovací a vrtací operace. Dynamometr se skládá ze čtyř snímačů, které jsou umístěny mezi základní a horní deskou. Tyto čtyři snímače měří zatížení, bez toho aniž by docházelo k jejich pohybu. Je třeba vzít v úvahu, že kombinované excentrické zatížení těchto snímačů může snížit jejich měřicí rozsah. Pro každou měřenou složku existuje dvoukanálový miniaturní nábojový zesilovač, který je integrován v dynamometru. Výstupní napětí náboje je digitalizováno a přenášeno telemetrií. Dálkové ovládání volitelných rozsahů umožňuje optimálně přepnout měřicí kanál i měřicí rozsah a lze tak měřit optimálním způsobem. Nulový bod identifikace je k dispozici jako doplněk, který umožňuje korelovat síly signálů s břitem nástroje.

Dynamometr se používá k vyšetřování opotřebení a řezných procesů blízko břitu nástroje během frézování a vrtání. U nástroje s jedním břitem je možno vektor síly přímo měřit. Rotační dynamometr je vhodný zejména pro vysokorychlostní jemné obrábění.

Technická specifikace rotačního dynamometru 9123C1111:

Měřicí rozsah	F_x, F_y	kN	-5÷5
	F_z	kN	-20÷20
	M_z	Nm	-200÷200
Provozní teplota	T	°C	0÷60
Max. rychlost vřetene		min ⁻¹	10000
Max. průměr dynamometru		mm	115
Citlivost	F_x, F_y	mV/N	~2
	F_z	mV/N	~0,5
	M_z	mV/Nm	~50
Vlastní frekvence	f_n	kHz	~2,0
Hmotnost	m	kg	~3
Měřené jednotky	metrické nebo imperiální (britské, americké)		

Tabulka P-2. Technická specifikace rotačního dynamometru 9123C1111.

PŘÍLOHA č. 7

Drsnoměr Mitutoyo model SJ 210 Surftest

Tento přístroj ose x dovoluje vysunutí v měřicím rozsahu až 17,5 mm, u příčného snímání je tato hodnota 5,6 mm. Drsnoměr má vysoký stupeň přesnosti měření, výrobce uvádí rozlišení až 0,002 μm .

Výhody a přednosti drsnoměru Mitutoyo SJ 210 surftest:

- různé grafické funkce obsažené v kompaktní základní jednotce
- jednoduché rozvržení funkčních kláves
- je vybaven pamětí dat, která usnadňuje získávání hodnot téměř okamžitě (archivace až 500 podmínek měření, 10000 naměřených hodnot a až 500 grafických dat)
- možnost měření drsnosti na náročnějších a těžko přístupných míst, které je dané především mobilitou přístroje a integrovanou baterií
- možnosti měření měřicího snímače v různých směrech (drahách), viz obr. P-4



Obr. P-4. Zde je vidět zleva: standardní posuv měřicí jednotky, R-posuv měřicí jednotky a S-posuv měřicí jednotky.

- měření se zapne pomocí jednoho tlačítka
- vysoká kapacita baterie (až 10000 měření bez dobíjení)
- přístroj je vybaven funkcí automatické kalibrace

PŘÍLOHA č. 8

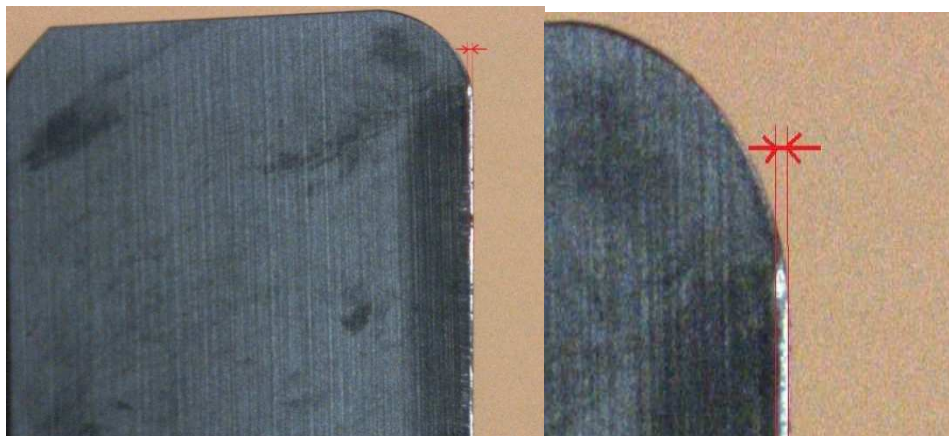
Metodika měření u experimentu s VBD

V tomto experimentu probíhalo měření a vyhodnocování:

- opotřebení na hřbetě a čele břitu VBD
- řezné síly
- drsnost obrobeneho povrchu

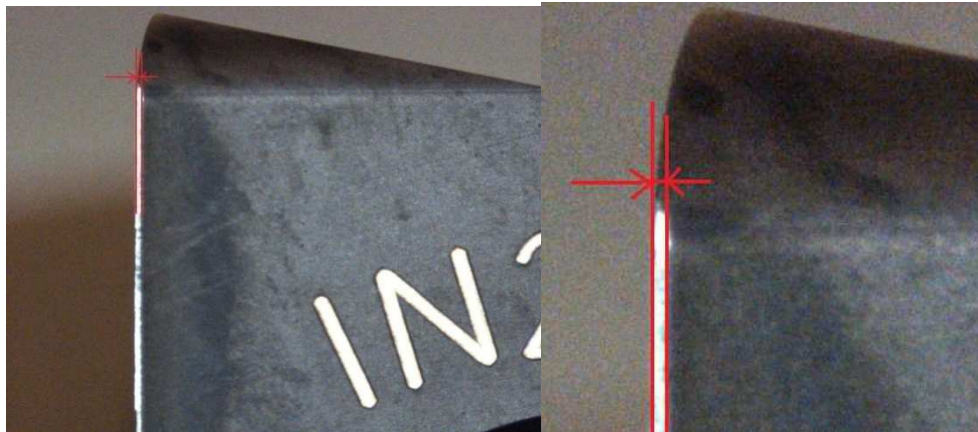
Měření opotřebení VBD

Měřicí zařízení, na kterém bylo měření opotřebení VBD prováděno je dílenský mikroskop Güehring Machinebau, který je umístěn v halových laboratořích KTO na ZČU v Plzni. Bližší informace o samotném mikroskopu jsou popsány níže. Samotné měření opotřebení čela a břitu VBD na mikroskopu probíhalo vždy ve stejných krocích a při stejných intervalech. Interval se rozumí množství přejezdů frézy (nebo lze také uvést množství odebraného materiálu, příp. čas obrábění). Na obr. P-5 je vidět opotřebení na čele VBD, označované jako KB_n .



Obr. P-5 Detail opotřebení na čele VBD.

Následující obr. P-6 zobrazuje opotřebení na hřbetě VBD označované jako VBb.



Obr. P-6 Detail opotřebení na hřbetě VBD.

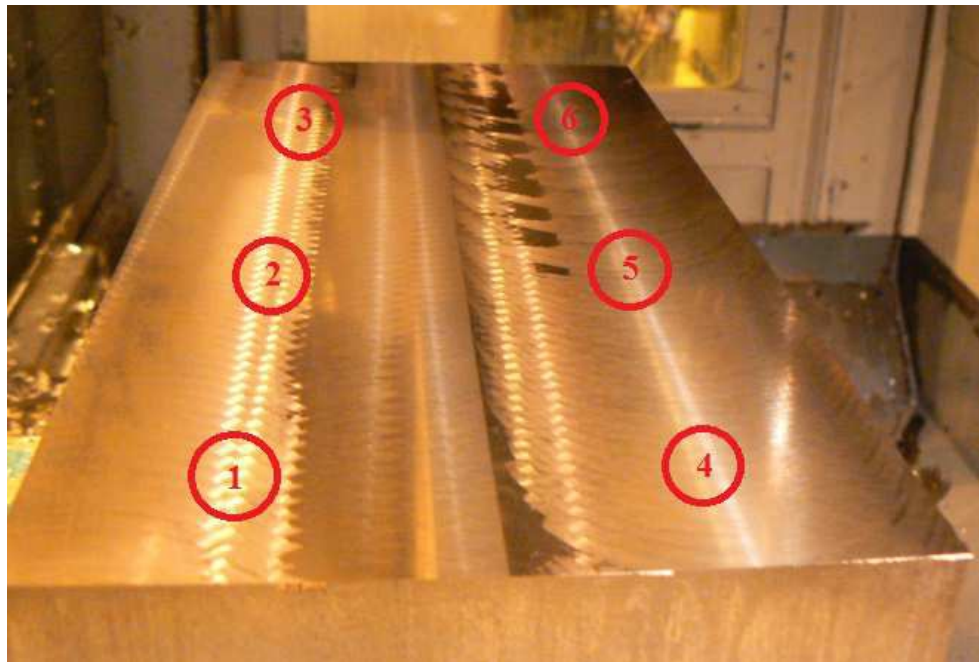
Před samotným experimentálním měřením byla proměřena nová řezná hrana a zároveň byla vytvořena na novém nástroji maska. Tato maska sloužila k opakovanému ustavení nástroje do stejné polohy, neboť v průběhu obrábění dochází k opotřebení jak čela, tak hřbetu nástroje, tzn., řezná hrana ustupuje. Maska tedy sloužila jako pomocný obrys, ke kterému bylo měřeno opotřebení. Po odměření příslušné hodnoty opotřebení, která byla zaznamenána do tabulky, byla ještě pořízena fotka.

Měření řezných sil

V průběhu experimentu byly rovněž měřeny řezné síly. Síly byly měřeny pomocí třísložkového dynamometru (specifikace 9255 B Sp) od firmy Kistler. Samotné měření řezných sil probíhalo vždy ve stejných pracovních cyklech. Dynamometr měří tři složky řezné síly (F_x , F_y a F_z). Jelikož každý měřený obráběcí cyklus trval vždy několik sekund, byly síly vyhodnocovány vždy z určitého časového úseku, který byl samozřejmě pro věrohodnost velikosti řezných sil stejný pro všechny obráběcí cykly. Byl sledován vliv opotřebení VBD a řezných podmínek na velikost řezných sil.

Měření drsnosti obrobeneho povrchu

Posledním měřeným faktorem, na který byl použit měřicí přístroj, byla drsnost obrobeneho povrchu. Pro měření drsnosti byl použit drsnoměr Mitutoyo SJ 210 SUFRTEST, pomocí něhož byly měřeny hodnoty drsnosti R_a , R_q a R_z . Drsnost se měřila celkem na šesti místech, jak ukazuje obr. P-7 níže.



Obr. P-7 Schéma míst měření drsnosti obrobeneho povrchu ve vzájemném pořadí

Na všech šesti místech bylo každé měření prováděno celkem třikrát, z důvodu věrohodnosti výsledků. Dále byly tyto tři naměřené hodnoty drsnosti zprůměrovány. Měření proběhlo po 21 pracovních cyklech. Stejným způsobem byla drsnost měřena po 63, 105 a 189 přejezdech. Tabulka níže obsahuje zprůměrované hodnoty z 1. místa měření po 21 přejezdech. Obdobně se postupovalo a počítalo s hodnotami drsnosti naměřených při dalších cyklech a různých řezných podmínkách.

PŘÍLOHA č. 9

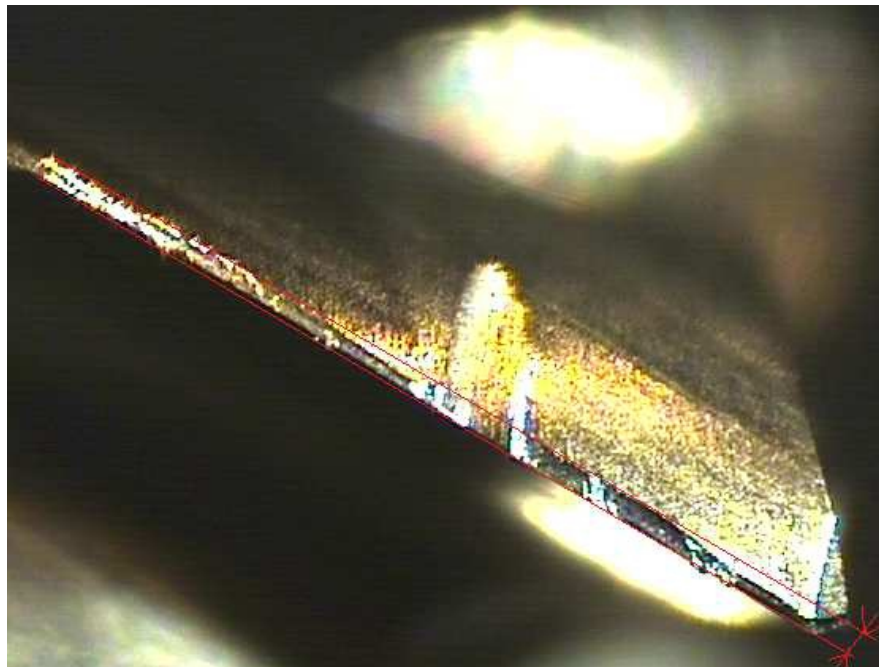
Metodika měření u experimentu s monolitními kuželovými frézami

V průběhu experimentu s kuželovými frézami probíhalo měření:

- opotřebení na břitu frézy
- měření řezných sil

Měření opotřebení břitu kuželové frézy

Fréza má tři břity a opotřebení bylo sledováno u každého z nich. Hodnota kritériálního opotřebení VB_{KRIT} byla stanovena na hodnotu 0,15 mm. Opotřebení bylo měřeno v určitých intervalech, které odpovídali objemu odebraného materiálu. Na obr. P-8 je vidět opotřebení na břitu VB_b .



Obr. P-8. Opotřebení řezného břitu kuželové frézy VB_b .

Měření řezných sil

Druhým měřeným parametrem v průběhu experimentu byli řezné síly a krouticí moment M_z . K měření těchto parametrů byl použit rotační dynamometr od firmy Kistler, typ 9123C1111. Tento dynamometr měří tři složky řezné síly (obdobně jako dynamometr u experimentu s VBD) a dále měří moment M_z . Vzhledem k množství přejezdů, které musel nástroj vykonat, než bylo dosaženo kritériálního opotřebení, byly řezné síly měřeny pouze v určitých úsecích. Tyto úseky byly vždy stejné pro každý nástroj. Dále byl vyhodnocen vliv opotřebení a řezných podmínek na jejich velikost.