

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie - technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vývoj a aplikace fréz ze slinutého karbidu pro tvrdé obrábění

Autor: **Bc. Vitali Dziamidau**
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslava Fulemová, Ph.D.**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vitali DZIAMIDAU**
Osobní číslo: **S17N0029K**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu: **Vývoj a aplikace fréz ze slinutého karbidu pro tvrdé obrábění**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

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

1. Úvod do problematiky a cíle řešení
2. Současný stav v oblasti úpravy ostří a použití tenkých vrstev při obrábění ocelí vyšší tvrdosti
3. Návrh a realizace experimentu
4. Analýza a vyhodnocení naměřených výsledků
5. Technicko - ekonomické hodnocení
6. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- Elektronické informační zdroje dostupné z www.knihovna.zcu.cz
- CIRP ANNALS - Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net/>)
- MM Průmyslové Spektrum, dostupné z www.mmspektrum.com
- Strojírenská technologie, dostupné z <http://casopis.strojirenskatechnologie.cz/>
- SANDVIK Coromant, Sandviken: Technická příručka obrábění, dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslava Fulemová, Ph.D.**

Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**

Katedra technologie obrábění

Ostatní konzultanti: **Ing. Josef Fajt, CSc.**

PILSEN-TOOLS , s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 18. října 2018

Garance a vedení diplomové práce

Vedoucí katedry: Ing. Jan Řehoř, Ph.D., ZČU v Plzni, FST-KTO

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslava Fulemová, Ph.D., FST-KTO

Odborný konzultant pro praxi: Ing. Josef Fajt, CSc., PILSEN TOOLS, s.r.o.

Odborný konzultant pro obor depozice tenkých vrstev: RNDr. Ivo Štěpánek

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:.....

.....

Bc. Vitali Dziamidau

Poděkování za pomoc při zpracování diplomové práce:

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli při přípravě a zpracování této diplomové práce, za cenné rady a připomínky.

Jmenovitě bych chtěl poděkovat:

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslavě Fulemové, Ph.D., ZČU v Plzni

Odbornému konzultantovi Ing. Josefu Fajtovi, CSc., PILSEN TOOLS

Vedoucímu dílen RTI Ing. Josefu Skleničkovi, Ph.D.

a obsluze frézovacího stroje Oldřichovi Pavelkovi ml.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Dziamidau	Jméno Vitali		
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Fulemová, Ph.D.	Jméno Jaroslava		
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Vývoj a aplikace fréz ze slinutého karbidu pro tvrdé obrábění			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	65	TEXTOVÁ ČÁST	51	GRAFICKÁ ČÁST	14
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p style="text-align: center;">ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Práce je zaměřena na vývoj fréz ze slinutého karbidu, které se používají pro obrábění zušlechťených ocelí, např. při výrobě zápustek nebo vstřikovacích forem. V práci je sledováno, jak trvanlivost fréz ovlivňují jednotlivé úpravy. Pomocí 4 experimentů s ocelí X37CrMoV5-1 (ČSN 41 9552) v zušlechťeném stavu byl zjištěn pozitivní vliv na jejich trvanlivost při použití takových faktorů jako: aplikace vhodné tenké vrstvy, úpravy břitů, vhodná geometrie a především úhel stoupání šroubovice rezného nástroje. Na konci práce je proveden techniko-ekonomický rozbor, jehož závěrem je zjištění, že aplikovaný vývoj dokázal dvakrát zlevnit proces tvrdého obrábění.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Metalurgie, obrábění, frézování, vývoj, opotřebení, tenká vrstva, ocel</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Dziamidau	Name Vitali	
FIELD OF STUDY	2303T004 Machine industry technology – Machining technology		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Fulemová, Ph.D.	Name Jaroslava	
INSTITUTION	ZČU – FST – KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Development and application of sintered carbide end mills for hard machining		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	65	TEXT PART	51	GRAPHICAL PART	14
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The work is aimed at the development of cemented carbide end mills, which are used for machining of hardened steels, e.g. in the production of dies or injection moulds. The work shows how the individual modifications affect the durability of the mills. While performing 4 experiments with hardened steel X37CrMoV5-1 (ČSN 41 9552), a positive effect on the durability was proved. The development was concerned in application of a suitable thin layer, modification of cutting edge radius, suitable geometry, especially angle of the helix of the cutting tool. At the end of the thesis, a technic-economic analysis was made, which has shown that the applied development can reduce the costs of hard machining process twice.
KEY WORDS	Metallurgy, machining, milling, development, flank wear, thin film, steel

Obsah

1. Úvod do problematiky	9
1.1. Cíle práce.....	11
1.2. Zadávající firma	12
1.3. Firmy-spoluřešitelé.....	12
2. Současný stav v oblasti úpravy ostří a použití tenkých vrstev při obrábění ocelí vyšší tvrdosti	14
2.1. Použití slinutého karbidu a specifika geometrie fréz při tvrdém obrábění.....	14
2.2. Použití tenkých vrstev: vývoj technologie	16
2.3. Výběr tenké vrstvy a optimalizace pro tvrdé obrábění.....	19
2.4. Použití vhodného způsobu úpravy ostří	21
2.5. Druhy opotřebení břitu nástroje a metodika měření.....	23
3. Návrh a realizace experimentů	27
3.1. Příprava a hodnocení materiálu	27
3.2. Popis průběhu zkoušek.....	29
4. Analýza a vyhodnocení naměřených výsledků	30
4.1. Zkouška č. 1 –Výběr optimálního povlaku	31
4.2. Zkouška č. 2. – Výběr vhodného poloměru zaoblení ostří.....	37
4.3. Zkouška č. 3 – Výběr úhlu stoupání šroubovice	40
4.4. Zkouška č. 4 – Doplnková zkouška s frézami s ještě větším úhlem stoupání šroubovice	44
5. Technicko-ekonomické zhodnocení	49
6. Závěr	51

Použité zkratky

EDM	Electric Discharge Machining; elektroerozivní obrábění	
PVD	Physical vapor deposition; fyzikální depozice z plynné fáze	
CVD	Chemical Vapor Deposition; chemická depozice z plynné fáze	
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition; chemická depozice vrstev za asistence plazmatu	
CVA	Chemical Vapor Aluminizing; chemická aluminizace	
CVI	Chemical Vapor Infiltration; chemická infiltrace	
HCP	HARDCUT PLUS; obchodní název tenké vrstvy od firmy IONBOND s.r.o.	
CCP	CROSSCUT PLUS; obchodní název tenké vrstvy od firmy IONBOND s.r.o.	
TiN	tenká vrstva titan nitrid	
TiSiN	tenká vrstva titan křemík nitrid	
TiCN	tenká vrstva titan, karbon, nitrid	
TiAlN	tenká vrstva titan hliník nitrid	
TiAlSiN	tenká vrstva titan hliník křemík nitrid	
AlCr	tenká vrstva hliník chrom	
AlCrN	tenká vrstva hliník chrom nitrid	
VB_{Bmax}	maximální rozměr opotřebení hřbetu bříty	[μm]
v_c	řezná rychlost	[mm/min]
n	otáčky	[mm^{-1}]
f_z	posuv na zub	[mm]
a_p	hloubka řezu (axiální)	[mm]
a_e	hloubka řezu (radiální)	[mm]
T	trvanlivost	[m]

1. Úvod do problematiky

Tvrdé obrábění zahrnuje mechanické obrábění zušlechtěných a kalených ocelí s tvrdostí 45–68 HRC a také tvrzené litiny s tvrdostí 400–600 HB. Podle ISO se tyto materiály značí písmenem H (viz Obrázek 1).



Obrázek 1 Rozdělení obráběných materiálů [4]

Ve své struktuře mají tvrdé karbidické částice především karbidy wolframu a chromu. Vysoké tvrdosti těchto materiálů se dosahuje zušlechtováním. Pod pojmem zušlechtování se rozumí kalení a následné vysokoteplotní popouštění. Při kalení vzniká tvrdý bainit, nebo velmi tvrdý a uhlíkem přesycený martenzit, který má velmi vysoké pnutí v tetragonální mřížce, a výsledkem je velmi vysoká tvrdost celé struktury. Cílem zušlechtování je dosažení optimálního poměru mezi tvrdostí a houževnatostí oceli. Sorbit, martenzit a komplexní karbidy jsou velmi tvrdé, což tvoří velmi vysoký abrazivní účinek při třískovém obrábění.

Použití takových materiálů je velmi různorodé. Mezi typické součásti patří: vložené hřídele, skříně převodovek, pastorky řízení, lisovadla. V této diplomové práci je řešena problematika tvrdého polohrubovacího frézování zušlechtěného materiálu ČSN 41 9552. Aplikační oblastí zvolené technologie obrábění a obráběného materiálu je frézování zušlechtěných zápustek nebo forem pro vstřikování plastů. Proces tvrdého obrábění se obvykle vyznačuje velmi dobrou kontrolou utváření třísky. Řezné síly a požadavky na výkon jsou přitom poměrně vysoké. Tvrdost těchto materiálů je řadí mezi obtížně obrobitelné.

Historický vývoj tvrdého frézování spočíval v tom, že předtím, než se začalo používat vysokorychlostní frézování, obsahovala standardní technologie výroby forem kombinaci konvenčního frézování a EDM obrábění. Na konci 20. století se hrubovací a polohrubovací operace prováděly na konvenčních strojích s materiálem v měkkém stavu, tedy před zušlechtováním. Následně, tedy po tepelném zpracování, byly aplikovány dokončovací operace s použitím vysokorychlostních obráběcích center. K tomu existovaly dva hlavní důvody:

1. Hrubování, které neklade velké požadavky na přesnost, bylo prováděno na strojích, které mají pětínovou hodinovou sazbu vůči moderním, vysokorychlostním strojům. Kromě toho,

opotřeбенí nástroje nebylo významným ovlivňujícím faktorem kvůli nízké tvrdosti materiálu obrobku.

2. Většina vysokorychlostních vřeten, která byla v té době k dispozici, nebyla schopna unést dostatečný točivý moment při otáčkách méně než 1500 otáček za minutu, takže nebylo možno s nimi hrubovat.

V roce 2000 došlo k technickým změnám v řízení vysokorychlostních vřeten, což mělo za následek

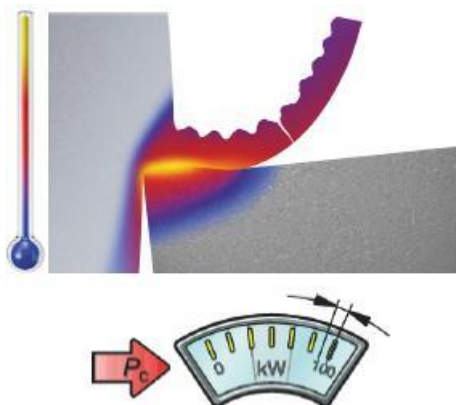
dosažení dostatečného točivého momentu i při nízkých otáčkách. Tímto způsobem bylo možno realizovat hrubování na vysokorychlostních strojích podobným způsobem, jako je tomu na konvenčních strojích. Proto byl definován nový technologický postup, který začíná přímo od polotovaru, který je již v zušlechtěném stavu, a následně se provádějí všechny operace na jednom stroji. Výhody tohoto jednoduššího procesu spočívaly v tom, že bylo zapotřebí méně času na výrobu nové formy, jelikož byly minimalizovány ztráty, které souvisely s časem potřebným pro seřízení a nastavení technologického procesu na jiném stroji. Současně se zvýšila i přesnost a spolehlivost obrábění, protože již nebylo potřeba obrobek mezi operacemi přestavovat.

V současné době je možno volit mezi dvěma technologickými postupy. Jedná se o použití:

- a) vysokorychlostních strojů a obrobku ze zušlechtěné oceli,
- b) konvenčního hrubování oceli s následným zušlechtěním a vysokorychlostním dokončováním.

Volba je závislá na výrobních nákladech a požadovaných dodacích lhůtách. Ve všech případech se však dokončování provádí vysokorychlostním frézováním s použitím kulových fréz.

Při obrábění tvrdých materiálů se velmi často používají nástroje ze slinutého karbidu (frézování, vrtání především při obrábění kalených ocelí), kubického nitridu boru (soustružení kalených ocelí a litin) a řezné keramiky (soustružení šedé, temperované litiny, žárupevných, žáruvzdorných materiálů a kalených ocelí). [1]



Obrázek 2 Rozložení teploty při tvrdém obrábění [4]

Hlavní problémy, které vznikají při obrábění tvrdých materiálů:

- Velký měrný řezný odpor obráběného materiálu (i přes 3000 N/mm²) může způsobit vznik křehkého lomu a rychlé poškození nástroje nebo obrobku (způsobeno vysokou křehkostí tvrdých materiálů).

- Tvrdá martenzitická zrna a karbidické částice v obráběném materiálu mají za následek vysoký abrazivní otěr, a proto vzniká poměrně rychlé opotřebení na hřbetu nástroje VB dle ISO 3685.

- Vznik velkého množství tepla při obrábění, viz Obrázek 2. Při nižších řezných rychlostech se větší podíl tepla odvádí do nástroje. Při horší tepelné vodivosti řezného materiálu to může způsobit tepelný šok, což může vést k vylomení břitů nebo k jejich zvýšenému opotřebení. [8]

Existence výše popsaných problémů tvoří podstatu pro vývoj a zlepšení technologie tvrdého obrábění. Vývoj technologie tvrdého obrábění je zaměřen do oblasti výběru vhodného řezného materiálu a vhodné geometrie řezného nástroje (úhel stoupání šroubovice), výběr vhodného způsobu úpravy ostří řezného nástroje (též nazývaného preparace) a nakonec aplikace vhodné tenké vrstvy na řezném nástroji. Tato opatření musejí zajistit vysokou tvrdost povrchu nástroje, jeho otěruvzdornost, dobré kluzné vlastnosti a tepelnou bariéru mezi oblastí řezu a substrátem řezného materiálu.

Úpravou ostří se dosahuje zlepšení mikrostruktury povrchu, a to především díky odstranění mikrotrhlin a leštění povrchu. Zlepšení kvality povrchu je možno dosáhnout rektifikací rádiusů břitů na 10–20 μm, čímž se řezná část zpevňuje, což je obzvlášť důležité při tvrdém obrábění.

1.1. Cíle práce

Hlavním cílem této práce je shrnutí poznatků v oblasti tvrdého obrábění, jejich zhodnocení (teoretická část) za účelem vývoje technologie tvrdého frézování materiálu ČSN 41 9552, který je velmi často obráběn v zušlechtěném stavu v zadávající firmě. Vývoj technologie bude aplikován prostřednictvím úprav fréz ze slinutých karbidů za účelem zvýšení jejich trvanlivosti (praktická část). Návrhy na vývoj a aplikaci nástrojů budou vycházet ze zjištěných teoretických předpokladů. Bude navrženo a realizováno několik experimentů v režimu tvrdého frézování a každý z nich bude mít své výchozí podmínky a své dílčí cíle. Přitom každý další experiment bude vázán na výsledky předcházejícího.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, bude použita technologie polohrubovacího frézování. Nástrojem pro praktickou aplikaci bude čtyřbřitá stopková fréza o průměru 10 mm. Nákup a tepelné zpracování materiálu budou realizovány zadávající firmou. Technologie úpravy ostří bude navržena

v rámci společných vývojových projektů ve spolupráci s firmami spoluřešitele. Vývoj fréz bude zahrnovat tři základní kroky:

- výběr vhodné tenké vrstvy,
- výběr vhodného způsobu úpravy ostří,
- výběr vhodné geometrie (úhlu stoupání šroubovice).

V závěru budou výsledky shrnuty do ucelené podoby a budou obsahovat popis technologie tvrdého obrábění upravenými nástroji společně s ekonomickým hodnocením.

1.2. Zadávající firma

Společnost PILSEN TOOLS, s.r.o., vychází z dlouhodobé tradice firmy ŠKODA Plzeň, která sahá až do 19. století, kdy bylo navázáno na více než stoletou strojírenskou praxi. Společnost je certifikována dle normy ISO 9001:2015 společností Lloyd's Register. Společnost PILSEN TOOLS, s.r.o., zaměstnává zhruba 160 pracovníků a její aktivity jsou směřovány do následujících oblastí:

Oblast nářadí: vývoj, konstrukce a výroba řezného a upínacího nářadí, závitových měřidel a kalibrů, speciálního nářadí, přípravků, tvrdoměrů, forem pro vysokotlaké vstřikování plastických hmot, tepelné zpracování kovů a alkalické černění, strojní kooperace, laserové značení, výroba přesných strojních součástí, výroba dílů pro energetický průmysl.

Oblast oprav strojů: opravy a modernizace obráběcích strojů (soustruhy, frézky, horizontky), opravy a modernizace jeřábů, montáž dálkových ovládaní, výroba fixačních přepravních zařízení, výroba svařenců, opravy elektrických motorů, strojní kooperace.

Hlavním představitelem sériové výroby společnosti jsou otočné hroty soustruhů, které se vyrábějí v množství přes 15 000 kusů ročně. Tyto výrobky se prodávají do mnoha zemí Evropy a světa včetně USA, Kanady, Číny a jiných států. Celý katalog společnosti je dostupný ze stránek společnosti. [7]

1.3. Firmy-spoluřešitelé

Ústav termomechaniky Akademie věd ČR

Ústav termomechaniky je vědeckovýzkumnou institucí Akademie věd České republiky. Hlavní náplní činnosti ústavu je mezioborový základní výzkum v těchto oblastech: dynamika tekutin, termodynamika, dynamika mechanických systémů, mechanika tuhých těles, interakce tekutin a tuhých těles, aerodynamika životního prostředí, biomechanika, mechatronika, elektrofyzika, elektrické stroje, pohony a elektronika a diagnostika materiálů.

Koordinátorem diplomové práce byl RNDr. Ivo Štěpánek

Ionbond, s.r.o.

Ionbond nabízí služby zakázkového povlakování a provozuje na 39 povlakovacích center v 17 zemích světa. Je částí jedné divize skupiny IHI Group spolu s IHI VTN, která se zabývá službami tepelného zpracování, spolu se společností IHI Bernex zabývající se výrobou CVD, CVA a CVI zařízení, společností Hauzer Techno Coating zabývající se výrobou PVD a PACVD zařízení a se společností IHI Machinery and Furnace vyrábějící zařízení pro tepelné zpracování. Do portfolia společnosti patří technologie PVD, PACVD, CVD, CVA a CVI povlaky. [6]

Západočeská univerzita. Regionální technologický institut (RTI)

RTI je moderní strojírenské a technologické výzkumné centrum Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. Aktivity výzkumného centra RTI jsou realizovány ve čtyřech výzkumných programech, přičemž spolupráce proběhla s Laboratoří technologie obrábění.

2. Současný stav v oblasti úpravy ostří a použití tenkých vrstev při obrábění ocelí vyšší tvrdosti

2.1. Použití slinutého karbidu a specifika geometrie fréz při tvrdém obrábění

Nástroje ze slinutého karbidu také známé jako tvrdokovové nástroje se vyrábějí ze směsi mikročástic karbidu wolframu s kobaltem za vysoké teploty a tlaku. Karbidy tantalu, titanu nebo vanadu se přidávají v malých poměrech.

Proto druh slinutého karbidu definují dva hlavní faktory:

- Poměr karbidu wolframu a kobaltu. Obsah kobaltu se obvykle pohybuje od 6 do 12 % a působí jako pojivo. Kobalt (Co) má relativně nízkou teplotu tání (1493 °C) a tvoří rozpustnou fázi se zrny z karbidu wolframu již při teplotě 1275 °C, což pomáhá snížit pórovitost.

- Velikost zrna, tedy jemný druh SK, zahrnuje částice menší než 1 μm a ultra-jemné, tedy menší než polovina mikrometru. Čím jemnější je zrno, tím tvrdší je slinutý karbid. Tvrdost se zvyšuje se snížením obsahu pojiva a zvětšením velikosti zrna karbidu wolframu a naopak. Tímto způsobem lze měnit tvrdost v rozmezí hodnot od 600 do 2100 HV.

Tvrdokovové nástroje se vyrábějí **ve dvou formách:**

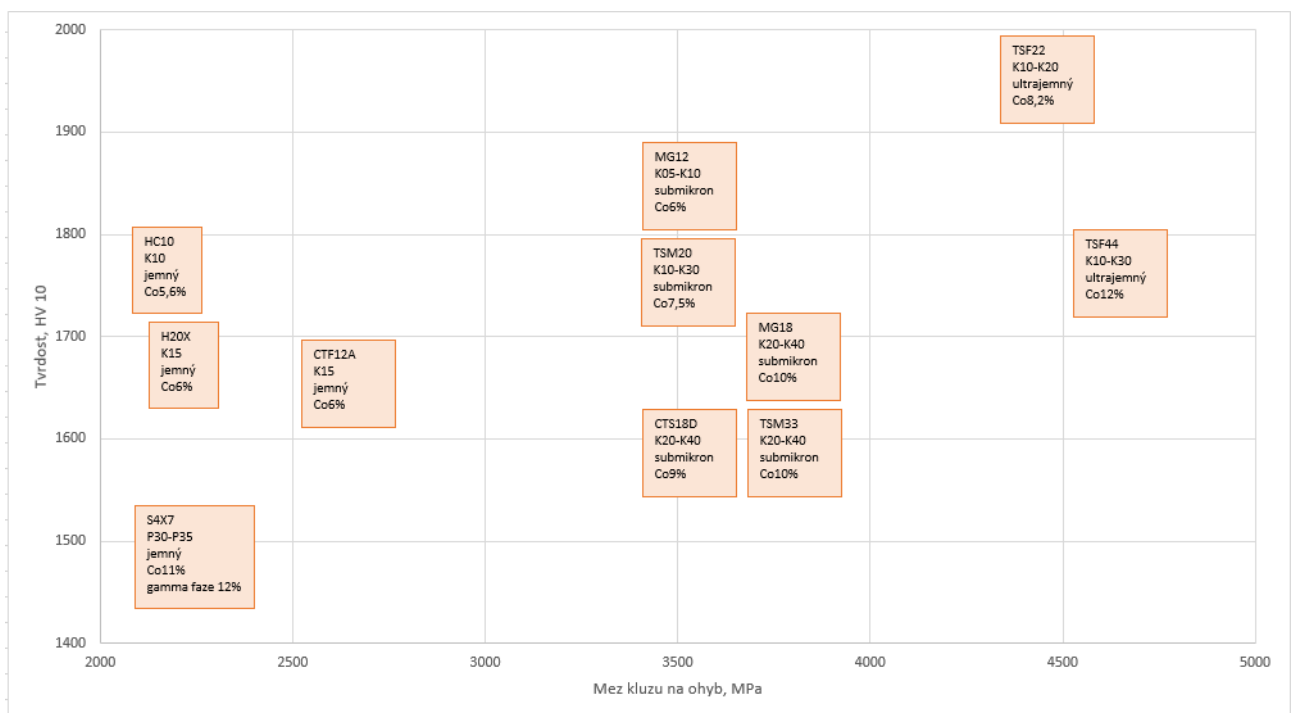
- Integrované nástroje: vyrábějí se broušením surové tyče ze slinutého karbidu. Takto vznikají monolitní nástroje jako stopkové kulové frézy, vrtáky apod. Hlavní výhodou je dokonalá vyváženost těchto rotačních nástrojů, ale zásadní nevýhodou je jejich vysoká cena, přičemž se bere v úvahu, že pouze malá a velmi specifická oblast nástroje je opotřebovávána procesem obrábění. Tyto nástroje lze i přebrušovat.

- Vyměnitelné břitové destičky: malé plátky se speciální geometrií vyrobené z tvrdého kovu, které jsou však upevněny na držácích nástrojů z oceli. Tuto konfiguraci lze využít u soustružnických nástrojů a velkých frézovacích hlav, což znamená rychlou výměnu opotřebovaných destiček. Třídy ze slinutého karbidu jsou klasifikovány podle normy ISO 513 do šesti skupin M, P, K, N, S a H podle číselné stupnice pro každou z nich. V USA se používá měřítko C-x. Původní koncepce obou klasifikací spočívala v hodnocení karbidů wolframu podle druhu práce, která se musela provést. Ve výsledku může mít karbid wolframu od různých výrobců identické označení, ale také výrazný rozdíl ve výkonnosti. [1]

Níže (viz Obrázek 3 a Obrázek 4) jsou uvedeny druhy slinutého karbidu pro tvrdé obrábění od firmy CERATIZIT. Obecně lze stanovit, že při zvýšení obsahu kobaltu (od 6 % do 12 %) se zvyšuje houževnatost a snižuje se tvrdost nástroje. Stejného výsledku lze dosáhnout při zjemnění zrna karbidu wolframu (jemný – submikron – ultrajemný).

Grade	ISO code	Code USA	Grain size	TiC Ta(Nb)C	Binder %	Density g/cm ³	Hardness			Transverse rupture strength TRS		K _{IC} MPa.m ^{1/2}
							HV 10	HV 30	HRA	MPa	P.S.J.	
TUNGSTEN CARBIDE COBALT GRADE												
TSF22	K10-K20	C-2	Ultrafine	-	8.2	14.55	1970	1930	93.7	4400	638,000	7.5
TSF44	K10-K30	C-2	Ultrafine	-	12.0	14.10	1760	1730	92.7	4600	667,000	7.8
MG 12	K05-K10	C-3	Submicron	-	6.0	14.80	1820	1790	93.0	3500	507,500	8.2
TSM20	K10-K30	C-3	Submicron	-	7.5	14.75	1750	1720	92.6	3500	507,500	8.6
TSM33	K20-K40	C-2	Submicron	-	10.0	14.50	1610	1590	91.9	3700	536,500	9.4
MG 18						14.45	1680	1660	92.3	3700	536,500	9.4
CTS18D	K20-K40	C-2	Submicron	-	9.0	14.55	1610	1590	91.9	3600	522,000	10.4
CTF12A	K15	C-2	Fine	-	6.0	15.00	1650	1630	92.1	2600	377,000	10.2
HC10	K10	C-3	Fine	-	5.6	14.95	1760	1730	92.7	2150	311,900	9.2
H20X	K15	C2	Fine	-	6.0	14.95	1670	1650	92.2	2200	333,500	9.9
WC-TiC/TaNbC – COBALT GRADE												
S4X7	P30-P35	C-5	Fine	12.0	11.0	14.95	1490	1470	91.0	2300	333,500	11.6

Obrázek 3 Řada slinutých karbidů pro tvrdé obrábění od firmy CERATIZIT [1]



Obrázek 4 Grafické zhodnocení slinutých karbidů pro tvrdé obrábění od firmy CERATIZIT

Dvoustupňové číslo za písmenem P, M, nebo K od 01 do 40 (50 ve skupině P) definuje tvrdost a houževnatost stupně. Nižší čísla odpovídají tvrdším stupňům. Červená řada K označuje obrábění materiálů tvořících krátkou třísku, jakou jsou např. šedá litina, kalená (zušlechťená) ocel, neželezné materiály.

K10 až K30 jsou dnes nejpoužívanější, protože mají univerzální použití – jak pro polohrubovací, tak i hrubovací operace.

Při zohlednění všeho výše popsaného můžeme stanovit, že pro polohrubovací obrábění zušlechtěné oceli nižší a střední tvrdosti ($50 \pm 2\text{HRC}$, což odpovídá cca 500HV) bude celkem vhodný slinutý karbid řady K20–K40 s obsahem kobaltu 8–10 % s rozměrem zrn na submikronové úrovni (tvrdost nástroje 1600–1700HV, mez kluzu na ohyb cca 3500 MPa – viz Obrázek 4).

2.2. Použití tenkých vrstev: vývoj technologie

Nástrojová tenká vrstva je vrstva o tloušťce od 2 do 15 μm pevně nanesená a spojená se substrátem tvarově složitého nástroje, jež zlepšuje výkon řezného nástroje. Povlak tvoří tvrdou, chemicky stabilní plochu a tepelnou ochranu nástroje a zlepšuje jeho výkon při obrábění.

Povlaky nanášené fyzikálním způsobem (PVD) jsou keramické materiály, které se obvykle používají v tloušťce 1–15 μm na nástroje vyrobené z oceli a slinutého karbidu. Tato technologie povlakování byla průmyslově vyvinuta v sedmdesátých letech. Jednou z jejích možností je depozice keramických tenkých vrstev na rychlořeznou ocel (RO) nebo slinutý karbid (SK). Keramická vrstva odolává vysokým teplotám, a tím zabraňuje průniku tepla do substrátu. Aplikace technologie povlakování ovlivnila vývoj řezných nástrojů, a to zejména v posledních 30 letech. Od té doby bylo dosaženo velkého zlepšení produktivity řezných nástrojů.

Povlaky s chemickým vylučováním z plynné fáze (CVD) byly již v těchto letech uvedeny na trh pro vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu. Povlaky založené na technologii PVD měly však mnohem větší dopad na trh. Úspěch technologie PVD oproti CVD tkví především v teplotách depozice. Konkrétně se jedná o 400–500 °C pro PVD a 900–1000 °C pro CVD. Nižší pracovní teploty technologie PVD umožňují deponovat nástroje z HSS. Mezi její další výhody patří vytváření vrstev o velmi malé tloušťce, což zaručuje ostřejší břity ve srovnání se CVD vrstvou. Mezi další pozitivní vlastnosti PVD vrstev patří jejich vyšší tvrdost a tlakové zbytkové napětí, které zabraňuje růstu a šíření trhlin na břitech nástrojů, které jsou vystaveny rázům.

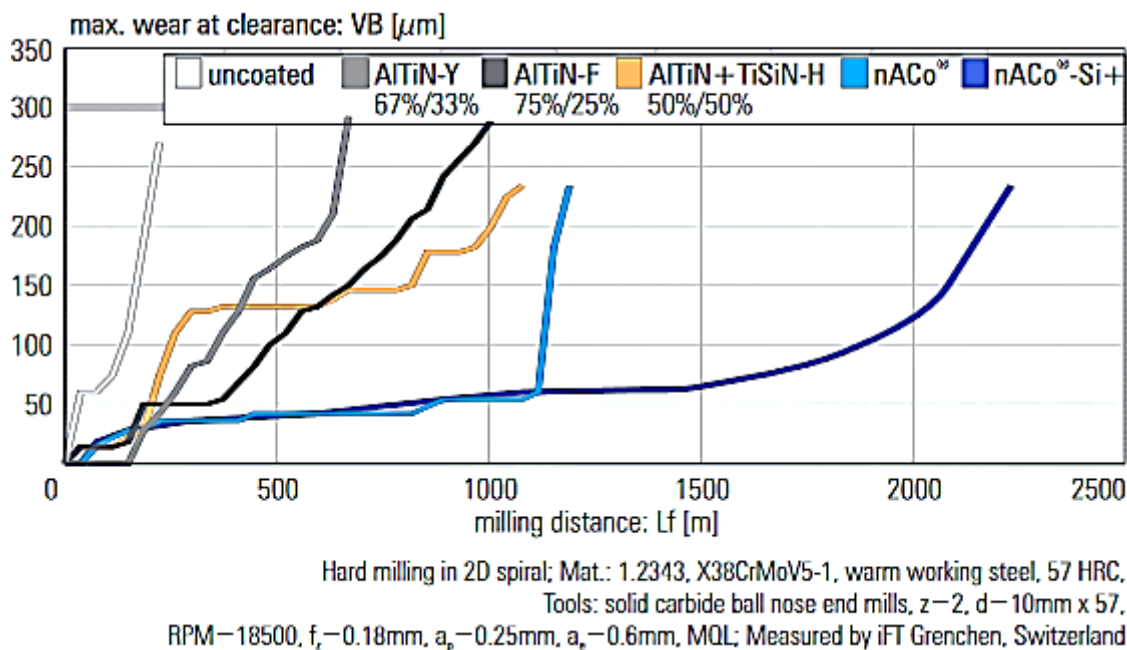
Možnost depozice PVD bez chemické interakce se substrátem je taktéž velkou výhodou, na rozdíl od povlaků CVD, které snadno reagují se substráty a vytvářejí křehké karbidické fáze na rozhraní. Konečně i snadné přepovlakování a přeostření nástrojů deponovaných technologií PVD, oproti nástrojům s CVD tenkými vrstvami, otevřelo další možnosti průmyslového trhu, který byl a stále je velmi citlivý na příležitosti, které snižují náklady.

Prvním komerčním povlakem byl nitrid titanu a od té doby byla většina průmyslových povlaků založena na nitrídech. V roce 1979 začala společnost Oerlikon® vyrábět TiN povlaky založené na technologii iontování elektronovým paprskem a tento zlatý povlak způsobil zvýšení popularity

technologie PVD. Další generace průmyslových povlaků se skládala z nitridu chromu (CrN) a karbonitridu titanu (TiCN), z nichž první se zaměřuje na tvářecí nástroje a obrábění měkkých kovů, což rozšiřuje aplikaci PVD povlaků. Druhý byl zaměřen na zvýšení tvrdosti TiN povlaků z 2300 HV na 3200 HV, což vedlo k celkovému zlepšení výkonu řezných materiálů obvykle deponovaných TiN. To trvalo až do konce devadesátých let 20. století, kdy došlo k zásadní změně v technologii povlakování, a to s vývojem povlaku TiAlN. Přidání hliníku k vrstvě na bázi TiN poskytlo nejen vyšší tvrdost, jako je 3300 HV, ale i pozoruhodné zlepšené chování při vysokých teplotách. Je třeba poznamenat, že při použití povlaku při obrábění musí břit odolávat teplotám několika stovek stupňů Celsia. U obou typů TiN a TiCN dochází při teplotě nad 500 °C ke snížení tvrdosti, což omezuje jejich použití ve vysokorychlostních aplikacích nebo při suchém obrábění. Přidání hliníku vede nejen k vyšší tvrdosti při teplotách do 900 °C, ale také poskytuje mnohem lepší oxidační odolnost až do této teploty. Obě tyto vlastnosti – tvrdost při vysokých teplotách a odolnost proti oxidaci až do teplot 900 °C – otevřely nové možnosti využití nejmodernějších řezných nástrojů, což znamená vyšší řezné rychlosti, obrábění za sucha s trvanlivostí srovnatelnou s řeznými nástroji povlakovanými TiN pracujícími v mírných podmínkách s použitím chladicí kapaliny. Jednalo se o velký skok k úsporám nákladů v pokročilých výrobních procesech. Tyto povlaky byly komercializovány většinou předních výrobců povlakovacích technologií: Platin® s Universal TiAlN, Oerlikon® s Balinit Futura a Cemecon® s Tinaloxem. Na druhou stranu bylo vyvinuto několik nových povlaků pro různé řezné materiály a typy nástrojů a také pro tvářecí nástroje. Tabulka v příloze 5 shrnuje některé ze základních vlastností tenkých vrstev, jež jsou nabízeny českými společnostmi.

Dalším stupněm vývoje povlaků TiAlN jsou ty, které nesou označení AlTiN povlaky. Jedná se o vrstvu s vyšším obsahem hliníku. Jak uvádí vývojáři povlaků, vyšší obsah hliníku znamená lepší tepelný odpor.

Důvodem tohoto chování je nanostrukturalizace povlaku na krystaly TiAlN v krychlové matici na bázi AlN. Tato nanostruktura je při vysokých teplotách stabilnější, a tím umožňuje další zvýšení trvanlivosti fréz ze slinutého karbidu pro vysokorychlostní obrábění. Nejvýznamnějším příkladem vývoje těchto povlaků bylo jejich úspěšné použití na kulových frézách pro obrábění tvrdých zušlechťených ocelí, jako jsou ty, které se používají pro formy ze zušlechťených ocelí. Povlaky s touto nanostrukturou jsou Platin® AlTiN s až 67% hliníkem, Oerlikon® Xceed a Cemecon® Hyperlox. Nicméně nový trend v kontrole nanostruktur při vysokých teplotách byl však stanoven, když Hitachi® odhalil dokončovací frézy povlakované tenkými vrstvami TiAlN-TiSiN a brzy poté společnost Platin® uvedla na trh povlak AlTiSiN s ochrannou známkou nACo™. [1]

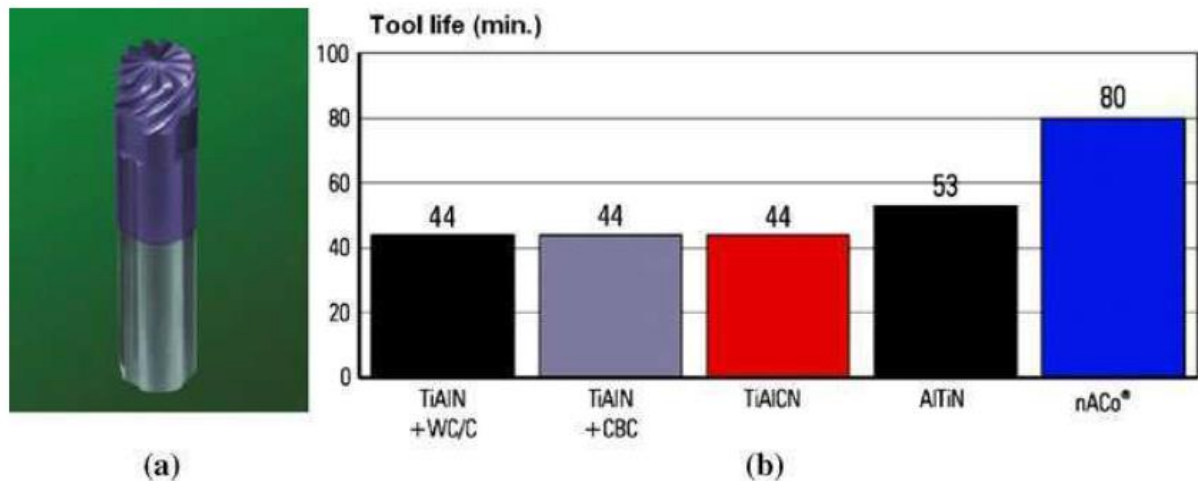


Obrázek 5 Vývoj technologie povlakování řezných nástrojů [2]

Obrázek 5 znázorňuje průběh opotřebení karbidových kulových fréz s různými povlaky v závislosti na ujeté dráze nástroje. Zvýšení odolnosti proti opotřebení u povlaku nACoTM AlTiSiN oproti AlTiN je výrazné. Také je zobrazen výsledek použití tenké vrstvy nACoTM s vyšším obsahem křemíku. Křemík začal být přidáván do tenkých vrstev kvůli jeho pozitivnímu vlivu na trvanlivost nástroje zejména v oblasti tvrdého obrábění.

Úspěch použití legování křemíku zajišťuje, že jemná nanostruktura je zachována až do teplot 1200 °C, a proto je ztráta tvrdosti při vysoké teplotě minimalizována díky přítomnosti křemíku, který obklopuje TiAlN krystaly jako pojivo v podobě nitridu křemíku. Dalším druhem obrábění vyžadujícím tvrdost za vysokých teplot je frézování titanu. Je dobře známo, že při obrábění titanu vzniká velké množství tepla. V tomto případě, jak je ukázáno na obrázku 6, poskytuje přidání křemíku do povlaku nACoTM nejlepší výsledek. Rok po uvedení povlaku AlTiSiN na trh byl firmou Oerlikon uveden nový povlak: Balinit Alcrona. Jedná se o povlak AlCrN určený k rozšíření vlastností povlaků TiAlN, a to zejména tam, kde je vyžadována vysoká oxidační odolnost. Tvrdost povlaku AlCrN je podobná tvrdosti TiAlN, ale to, co dělá tento povlak vynikající, je jeho vysoká oxidační odolnost až do teplot 1200 °C. To je dáno díky růstu stabilního (Al, Cr)₂O₃ oxidu během obrábění namísto oxidů TiO₂ + Al₂O₃, které rostou v TiAlN povlacích. Oblast použití AlCrN povlaků je však omezena na trvanlivost tvrdokovových nástrojů za standardních řezných podmínek. Aby bylo možné toto omezení překonat, vyvinula společnost Platin® nový povlak AlCrN obsahující křemík: nACRoTM. Ten povlak na bázi AlCrSiN byl úspěšně aplikován při výrobě ozubení, vrtání a frézování a všude tam, kde je vyžadována jak odolnost vůči vysoké teplotě, tak oxidační odolnost povlaku. [1]

Současné trendy v technologii povlakování pro tvrdé obrábění je velmi těžké zobecnit, protože vývoj a aplikace povlaků jsou stále více specializovány než kdy jindy. Pro podobné metody obrábění se používají různé přístupy. Z materiálového hlediska otevírá legování TiAlN povlaků různými legovacími prvky nekonečné možnosti: vývoj TiAlCrN, TiAlCrSiN a TiAlCrYSiN složení, a dokonce i přidání prvků jako Zr, V, B nebo O ke složení vrstev, jsou současným trendem, viz Obrázek . [1]



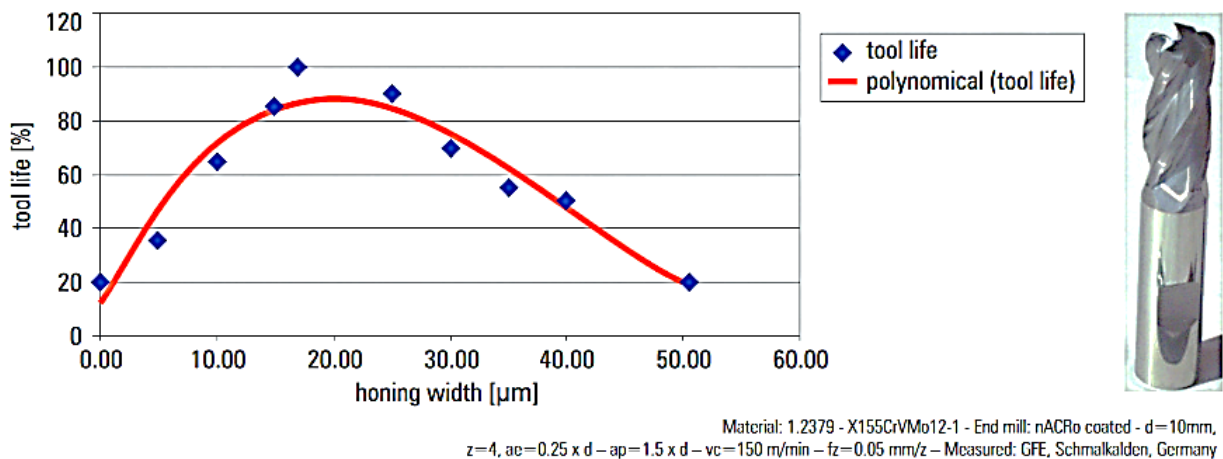
Obrázek 6 (a) Fréza ze slinutého karbidu s povlakem TiAlN, (b) trvanlivost frézy ze slinutého karbidu ($z=12$, rádius zaoblání čela: 1.2-1.9, $\varnothing 20$ mm, $v_c = 250$ m/min, $f_z = 0,11$ mm, $a_p = 0,5$ mm, $a_e = 1,1$ mm). Obrobek: TiAl6V4. [2].

2.3. Výběr tenké vrstvy a optimalizace pro tvrdé obrábění

Jedním z parametrů pro návrh technologie povlakování je správná volba tloušťky vrstvy, při současném zajištění požadavku na dlouhodobou trvanlivost rezného nástroje. Zároveň je nutné zohlednit možnost selhání přilnavosti vrstvy vlivem vnitřních tlakových a tahových pnutí. Výběr vhodné deponované vrstvy zahrnuje kombinaci nejlepších vlastností následujících struktur:

- Monobloková vrstva (monovrstva stejného složení): používá se v případě, že nedochází k rázům nebo jsou rezné síly nízké.
- Binární povlak pro kombinování dobrých vlastností vnitřní vrstvy v blízkosti substrátu a horní vrstvy. Například když je potřeba mít povlak s vysokou tvrdostí a zároveň je potřeba mít horní povlak „kluzký“ pro lepší odvod třísky.
- Vícevrstvý povlak pro zlepšení odolnosti povlaku proti smyku, čímž se zabrání šíření trhlin mezi různými vrstvami.
- Adhezní vrstvy: přidání tenké adhezní vrstvy 0,05–0,2 μm ke zvýšení adheze další vrstvy.
- Trojitá vrstva: nový přístup společnosti Platin® k optimalizaci tenkovrstvých struktur, které se skládají z dobré adhezní vrstvy, houževnaté jádrové vrstvy a tvrdé a teplotně odolné vrchní vrstvy.

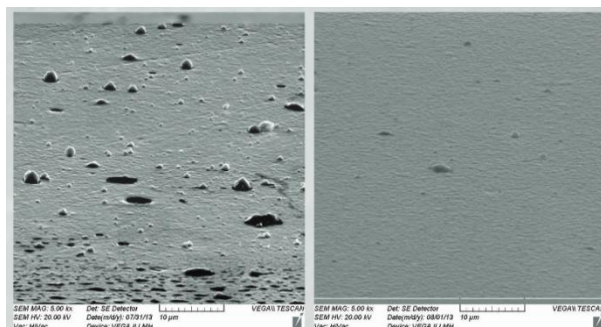
Před a po vlastní depozici tenké vrstvy na substrát je důležité aplikovat technologické postupy, které zvyšují úspěšnost nanesené vrstvy, a tím celkovou trvanlivost řezného břitů nástroje. Jedná se o tzv. před- a po-depoziční úpravy. Čím vyšší trvanlivost nástroje je povlak schopen poskytnout, tím preciznější musí být preparace ostří. Proto byl spolu s vývojem povlaků vyžadován nový přístup ke stabilizaci trvanlivosti povlakovaného nástroje a byly vyžadovány nové preparační postupy pro přípravu břitů. (viz další kapitola)



Obrázek 7 Trvanlivost frézy s povlakem nACRo ($z=12$, r $\text{záblení čela frézy: } 1.2-1.9$, $\varnothing 10$ mm, $v_c = 150$ m/min, $f_z = 0,05$ mm, $a_p = 1,5 \times \varnothing$, $a_e = 0,25 \times \varnothing$). Obrobek: 1.2379. [2]

Obrázek 7 znázorňuje výrazný vliv poloměru zaoblění ostří na trvanlivost dokončovací frézy. Jak je vidět, je velký rozdíl mezi příliš malým nebo příliš velkým poloměrem zaoblění ostří a optimální hodnotou tohoto zaoblění (cca 20 mikrometrů). Rozdíl v trvanlivosti může být cca 1 hodina strojního času.

Průmyslové PVD povlaky jsou vyráběny obloukovou technologií, jsou ekonomičtější a vhodnější pro zajištění stabilní kvality povlaků (viz rešerše tenkých vrstev v příloze 5). Jeho hlavní nevýhodou je však přítomnost kapiček ve vrstvě, které pocházejí z tavení při spalování oblouku. Tyto kapičky jsou spojeny na povrchu povlaku a projevují se na drsnosti povlaku. Drsnost povrchu na řezném břitě negativně ovlivňuje stabilitu nástroje, proto se procesy odstraňování kapiček obvykle provádějí u nástrojů vyšší kvality. Účinek jednoho z těchto procesů je uveden na obrázku (viz Obrázek 8). [1]



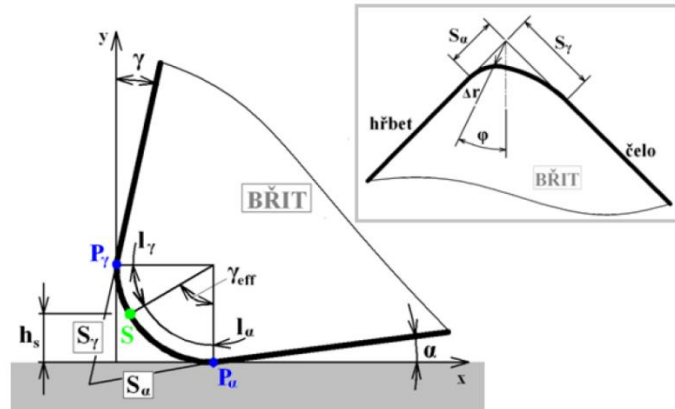
Obrázek 8 Zobrazení tenké vrstvy AlTiN (a) před a (b) po úpravách pro odstranění kapiček [2]

S ohledem na výše uvedené informace vyplývá, že při výběru vhodné technologie tenkých vrstev je na jedné straně důležité vybrat vhodný technologický postup nanášení a na druhé straně vhodnou formu strukturování systému tenkých vrstev. Technologie povlakování zahrnují CVD, PVD a nízkoteplotní CVD. Technologie CVD má výhodu relativně vysoké adheze v důsledku výraznějších difúzních procesů při tvorbě vrstev a vysoké teploty ukládání, která však může být pro některé rezné nástroje příliš vysoká, protože mohou podléhat popouštění. Technologie PVD má výhody spočívající v nižší teplotě nanášení a větší variabilitě vytvořených typů nanesených filmů, jakožto i lepší kontrole procesních možností vytváření jiné kompozice vrstev. Díky technologii PVD existuje možnost volby mezi prachem magnetronu a odpařováním oblouku ve vakuu. Výběr systému substrát – tenká vrstva je určován také požadovanými provozními vlastnostmi nástroje uvedenými výše (tepelná odolnost, ořezuvzdornost atd.). Zvýšení tvrdosti může být dosaženo rovněž díky snížení velikosti zrna ve struktuře substrátu.

2.4. Použití vhodného způsobu úpravy ostří

Vyrobený a vybroušený nástroj ze slinutého karbidu nemá dokonalé ostří, tzn., není možné s ním dosáhnout maximální řezivosti. Řezivost je ovlivněna mikrogeometrií řezného břitu. Mikrogeometrii lze upravovat různými způsoby. Všechny procesy vedoucí ke změně tvaru, rozměru a kvality mikrogeometrie si kladou za cíl jediné, a to zlepšit řezivost nástroje. Mezi tyto metody úprav patří kartáčování, pískování, vlečné omílání, magnetické leštění, nekonvenční způsoby obrábění, jako EDM a laserové úpravy břitu. Úpravy mohou být aplikovány jak před, tak i po povlakování. Úprava břitu před povlakováním má za cíl odstranit vady a stopy vzniklé při broušení nástroje a uvolnit zbytkové tlakové napětí (obzvláště po operacích hrubého broušení a kuličkování). Po-depoziční úpravy mohou vést ke zvýšení přilnavosti tenké vrstvy k substrátu.

Výběr vhodného způsobu úpravy břitu je závislý na způsobu obrábění, obráběcím nástroji, na obráběném materiálu a je stále předmětem výzkumu pro každou konkrétní oblast použití. Každá tato oblast má optimální hodnoty ostrosti břitu nebo poloměru zaoblení ostří. Neexistuje nulový poloměr zaoblení, vždy je to otázka řady mikronů či desítek mikronů. Tvar ostří je definován několika proměnnými (viz Obrázek 9). [9]



Obrázek 9 Geometrie břitu nástroje [9]

S_α – průmět zaoblení ostří do hřbetu

S_γ – průmět zaoblení ostří do čela

r_n – poloměr zaoblení

$K = \frac{S_\gamma}{S_\alpha}$ - faktor symetričnosti

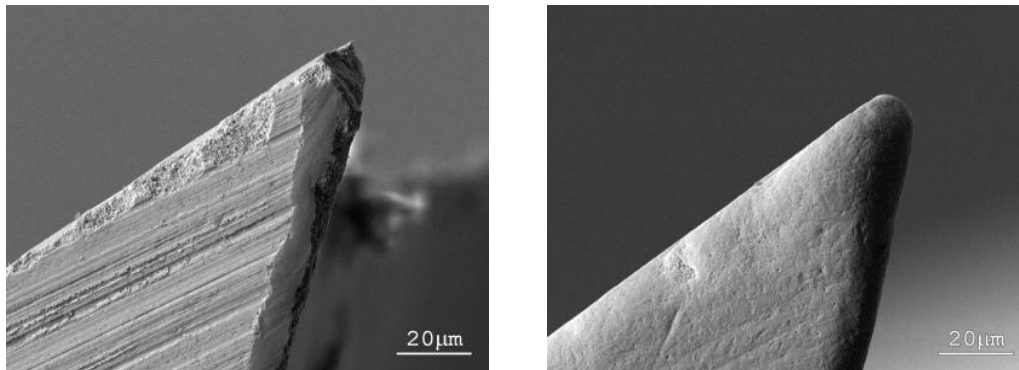
Při výrobě ostrých řezných břitů s poloměrem zaoblení rádiusu méně než 5 μm se používá broušení. Poloměry střední velikosti se zaoblením ostří 5–20 μm mohou být vyrobeny pískováním, vlečným omíláním, leštěním, laserovým nebo elektro-erozivním obráběním. Poloměry větších velikostí s rádiusem více než 20 μm mohou být připravovány kartáčováním. Na rozdíl od výše uvedených technologií úprav ovlivňují různé parametry broušení kvalitu ostří. Faktor symetričnosti K definuje směr spádu profilu ke hřbetu – $K < 1$, nebo k čelu – $K > 1$. Volbu faktoru symetričnosti K je nutné volit vzhledem k realizované technologii. Při nepřerušovaném řezu je doporučováno volit $K < 1$ a naopak při přerušovaném řezu $K > 1$. [9]

Při zohlednění problémů zmíněných v úvodu této práce (velký měrný řezný odpor), lze předpokládat, že příliš ostrý břit (méně než 5 μm) vede ke křehkému lomu břitu nástroje. Naopak příliš tupý břit (více než 20 μm) může přispět ke zhoršení řezivosti prostřednictvím nárůstu řezných sil. Právě proto bude z těchto důvodů použita úprava břitů. Zvolenou technologií je vlečné omílání.

Jedním z dílčích cílů této práce je stanovit vhodný poloměr zaoblení ostří nástroje při obrábění zušlechťených materiálů s tvrdostí 50 HRC. Poloměr zaoblení ostří pro danou oblast je odhadován mezi 5 a 15 μm a preparace ostří byla realizována na omílacím zařízení firmy OTEC. Před a po vlečném omílání je zobrazen výchozí a konečný stav ostří na opticko-skenovacím zařízení ALICONA (viz Obrázek 10). Protokoly měření vzorků jsou součástí přílohy 6.

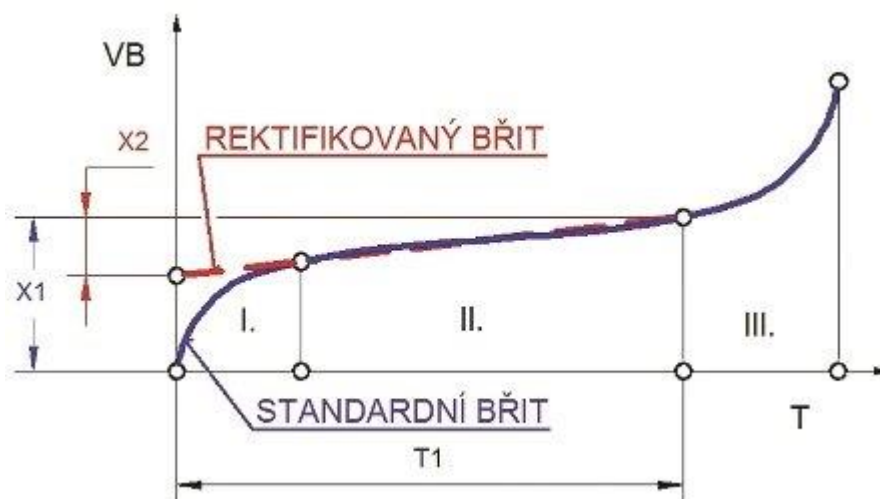
Technologie vlečného omílání je charakterizována ponořením omílaných nástrojů do omílacího média a pohybem nástrojů po planetární dráze. Přitom jsou proměnlivými faktory technologie rychlost a čas omílání, hloubka ponoření a samotné abrazivní médium. Pro omílání nástrojů ze slinutých karbidů a HSS se standardními vrstvami se používají skořápky vlašských ořechů s příměsí

karbidu křemíku (SiC). Výhodami tohoto procesu jsou spolehlivost, vysoká opakovatelnost (dodržením stejných proměnlivých parametrů jako čas, rychlost, hloubka ponoření, směr rotace, abrazivní médium). Dále musí být dodržována pevnost upínacího systému.



Obrázek 10 Eliminace odlupování povlaku na ostrých přerušovaných hranách se dosahuje omíláním břitů nástrojů před jejich vlastním povlakováním. [10]

Při omílání břitů nástrojů však dochází k úmyslné „degradaci“ ostří a zároveň k vyrovnání křivky opotřebení mezi primární a sekundární oblastí, jak je znázorněno na obr. 11.



Obrázek 11 Rozdíl průběhu opotřebení mezi standardním a rektifikovaným břitem [11]

2.5. Druhy opotřebení břitu nástroje a metodika měření

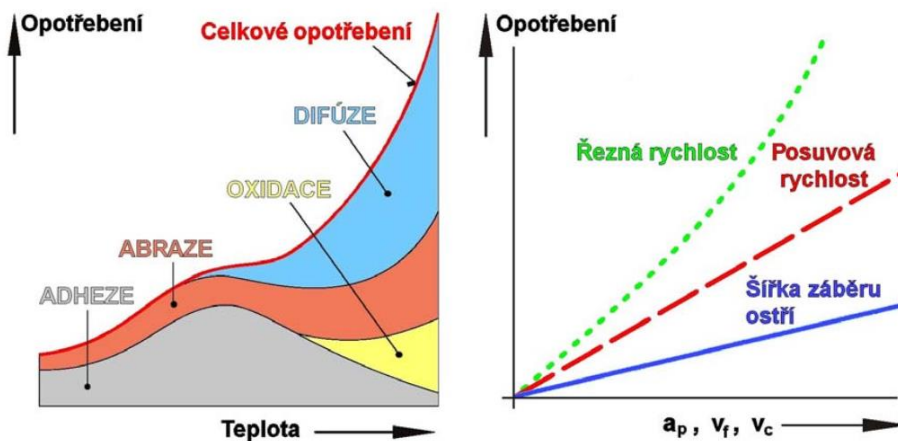
Opotřebení břitu nástroje je proces, ke kterému dochází v průběhu obrábění a je charakterizován změnou geometrie a rozměru funkčních ploch nástroje (čela a hřbetu). Příčinou opotřebení jsou fyzikální a chemické děje mezi nástrojem a obrobkem.

Působením zatěžujících faktorů vznikají následující mechanismy opotřebení:

- abrazivní opotřebení,
- adhezní opotřebení,
- difuzní opotřebení,
- oxidační opotřebení,

- statický nebo dynamický lom.

Schopnost nástroje komplexně odolávat těmto mechanismům určuje jeho *trvanlivost* neboli dobu, kterou je břit schopen vydržet v řezu. Trvanlivost se nejčastěji vyjadřuje v minutách, ale lze ji taktéž vyjádřit například pomocí objemem odebraného materiálu nebo dráhy ujeté nástrojem. V této práci bude použit poslední způsob vyjádření trvanlivosti. Každý mechanismus opotřebení má své předpoklady vzniku. Dále je každý z nich stručně popsán (viz Obrázek 12).



Obrázek 12 Vliv teploty a řezných podmínek na jednotlivé mechanismy a průběh opotřebení [3]

Abrazivní opotřebení vzniká při působení tvrdých abrazivních částic v materiálu obrobku na materiál nástroje, přitom vzniká mechanické zatížení hřbetu nástroje. Z toho důvodu musí být materiál řezného nástroje mnohem tvrdší než materiál obrobku.

Adheze vzniká hlavně za nízkých a středních teplot na čele nástroje. U tohoto jevu se vytváří nárůstek mezi třískou a břitem. Předpokladem pro vznik tohoto druhu opotřebení je jednak afinita neboli chemická příbuznost mezi řezným nástrojovým materiálem a materiálem obrobku, jednak vysoký tlak v místě řezu.

Difuzní opotřebení vzniká působením chemických vlivů při procesu obrábění. Důležitými faktory vzniku jsou chemické vlastnosti řezného materiálu a jeho afinita vůči obráběnému materiálu. Za relativně vysokých teplot dochází k difuzi uhlíku z materiálu s jeho vyšší koncentrací (slinutý karbid) do materiálu s nižší koncentrací (nizkouhlíková ocel). Na nástroji vzniká opotřebení ve tvaru žlábků.

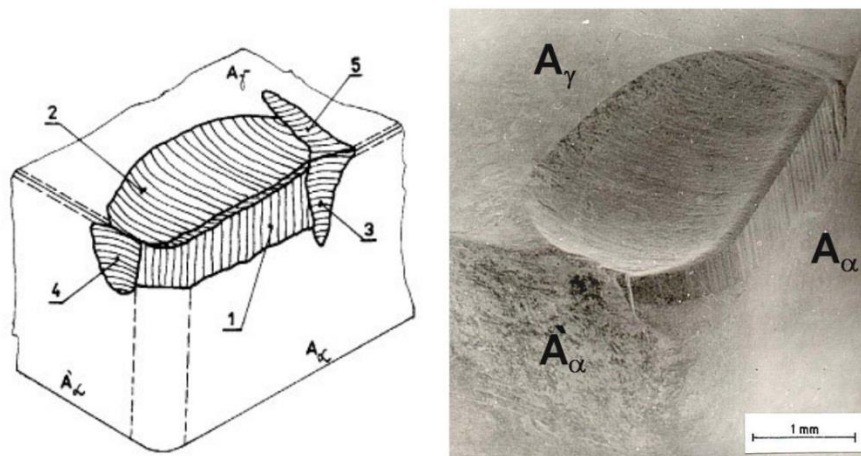
Oxidační procesy probíhají za přítomnosti kyslíku (okolní vzduch, nebo vzdušný proud) a za vyšších teplot. Ve struktuře slinutého karbidu tvoří wolfram a kobalt porézní filmy oxidů, které jsou snadno odebírány třískou. Velké riziko oxidačního opotřebení je v místě, kudy proniká vzduch do oblasti obrábění. V tomto místě vznikají typické vruby. [Zdroj: příručka obrábění]

Lom nebo vydrolování řezného nástroje může vzniknout za náhlých změn buď teplotních, nebo tlakových, případně obojích. Jinými zdroji vzniku lomů jsou únava řezného materiálu, relativně

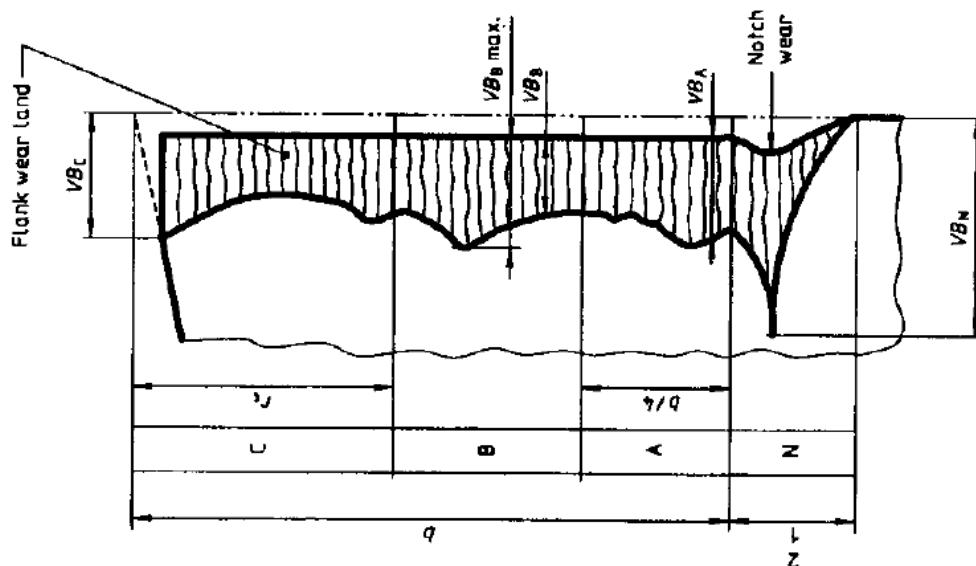
měkký materiál nástroje vůči obráběnému, ale také i plastická deformace nástroje, při níž vznikají zvýšené řezné síly.

Výsledkem opotřebení může být zvýšení řezných sil a zátěž kladená na obrábějíci stroj, zhoršení kvality obrobené plochy a rychlé poškození nástroje nebo obrobku. Proto, aby nedošlo k těmto jevům, je kontrola opotřebení nástroje obzvlášť důležitá.

Měření opotřebení v průběhu experimentů probíhalo po určitých cyklech pomocí dílenského mikroskopu Multichack PC 500. Měřenou veličinou byla šířka opotřebení na hřbetě VB_{Bmax} dle ISO 3685 (viz Obrázek 13 a Obrázek 14). Měření se provádělo při zvětšení $120\times$ na každé fréze u každého ze 4 břitů. Výsledky měření byly průměrovány.



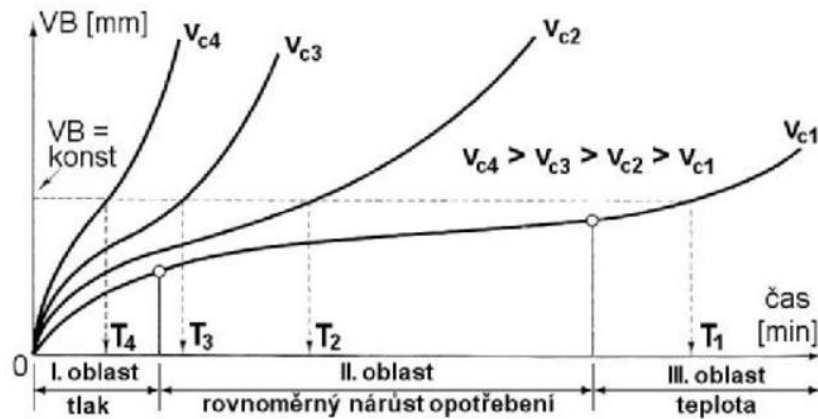
Obrázek 13 Formy opotřebení břitu nástroje z SK a foto opotřebeného břitu z mikroskopu [3]



Obrázek 14 Oblasti opotřebení břitu a jejich značení dle ISO. [5]

Teoretický průběh opotřebení na čase obrábění je na obrázku (Obrázek 15), skládá se z 3 oblastí a matematicky nejpřesněji odpovídá polynomu 3 stupně. V I. oblasti opotřebení narůstá poměrně rychle, protože je zde břit vystaven velkému měrnému tlaku a dochází k velice rychlému opotřebení hřbetu. Tato fáze je taktéž nazývána jako „zařezávání“ nástroje. V II. oblasti probíhá

rovnoměrný nárůst opotřebení a stabilizace řezného ostří. Průběh je lineární. V III. oblasti dochází k lavinovitému opotřebení, kdy intenzita opotřebení je největší vlivem naakumulovaného tepelného zatížení nástroje. [3]



Obrázek 15 Závislost opotřebení na čase při různých řezných rychlostech [3]

V průběhu experimentálního měření bylo porovnáváno opotřebení na hřbetě řezného břitu v předem stanovených krocích, tak aby bylo možno naměřené body proložit křivkou a následně průběhy opotřebení porovnat s teoretickými podklady. Výsledky vlastního měření jsou uvedeny v závěru této práce.

PRAKTICKÁ ČÁST

3. Návrh a realizace experimentů

Vývoj a následná aplikace fréz spočívaly ve výběru vhodného povlaku (zkouška 1), vhodného poloměru zaoblení ostří (zkouška 2) a výběru frézy s nejvhodnějším úhlem stoupání šroubovice (zkouška 3 a 4). Před provedením vlastních zkoušek byla změřena tvrdost materiálu a vyhodnocen způsob upnutí obrobku.

3.1. Příprava a hodnocení materiálu

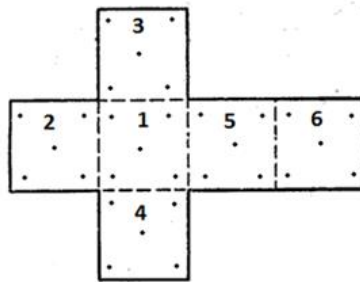
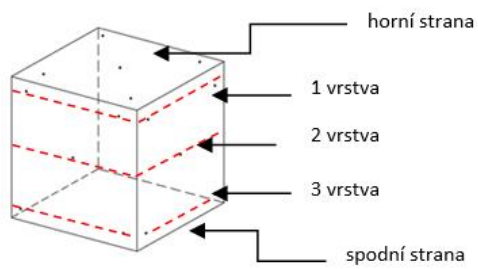
Jako jeden z nejčastěji používaných materiálů v zušlechťeném stavu ve spol. PILSEN TOOLS, s.r.o., je materiál X37CrMoV5-1 (ČSN 41 9552), který se často používá při výrobě zápuštěk, forem atd. Jedná se o nástrojovou středně legovanou Cr-Mo-V ocel pro práci za tepla, která se vyznačuje vysokou prokalitelností, poměrně dobrou kalitelností, houževnatostí, dobrou pevností při práci za tepla a odolností proti tvorbě trhlin za tepla. Je málo citlivá na prudké změny teploty. Jako kalicí médium může být použita voda. Po kalení je jen málo rozměrově deformovaná. Obrobitelnost této oceli je rovnoměrná a poměrně dobrá. Nástrojová ocel X37CrMoV5-1 se používá ve stavu po zušlechťení.

Za účelem provedení zkoušek byl materiál zušlechťen na tvrdost 50 ± 2 HRC. Chemické složení je uvedeno dále, viz Tabulka 1.

Tabulka 1 Chemická analýza (hm %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	W	Co
0,38	0,97	0,37	0,01	0,001	5,28	0,00	1,32	0,00	0,00	0,36	0,00	0,00

Před zkouškou bylo provedeno měření tvrdosti na každé straně zkoušeného materiálu ve tvaru krychle v 5 bodech, jak je zobrazeno na obrázku 16. Každá strana byla označena 1 až 6. Následně byl vytvořen model popisující tvrdost po vrstvách na povrchu krychle. Cílem tohoto měření bylo posoudit průběh ochlazování materiálu při kalení s tím, aby byla nalezena taková pozice upnutí kostky materiálu do svěráku stroje, při které by byl rozdíl tvrdostí na každé straně minimální. Velký rozdíl tvrdostí by mohl způsobit nerovnoměrné zatížení nástroje, a tím pádem i nepřesné výsledky. Směr vláken materiálu přitom nebyl uvažován.



Obrázek 16 Body měření tvrdosti materiálu

Po měření tvrdosti ve všech bodech 6 stran bylo provedeno hodnocení tvrdosti v jednotlivých vrstvách. Pro analýzu byly uvažovány 3 hlavní směry (viz Obrázek 16):

- směr kolmý ke straně 6 (nebo 1),
- směr kolmý ke straně 5 (nebo 2),
- směr kolmý k straně 4 (nebo 3).

Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce naměřených hodnot (tabulka 2). Zpracování výsledků je uvedeno v následujících tabulkách (viz Tabulka 2 a Tabulka 3).

Tabulka 2 Průměrné hodnoty tvrdosti na hladinách [HRC]

popis hladin	horní strana	1. vrstva	2. vrstva	3. vrstva	spodní strana
od 6 do 1 kolmo	44,4	48,6	48,2	48,9	47,4
od 5 do 2 shora dolů	48,2	47,5	46,9	47,5	48,7
od 4 do 3 zleva doprava	49,3	47,0	46,8	47,6	48,4

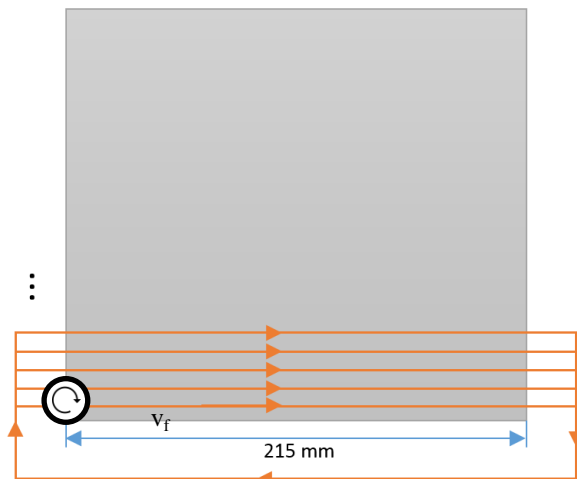
Tabulka 3 Rozdíly tvrdostí (max. – min. hodnoty) na hladinách [HRC]

popis hladin	horní strana	1. vrstva	2. vrstva	3. vrstva	spodní strana	průměr
od 6 do 1 kolmo	3,2	3,5	2,9	3,7	4,1	3,48
od 5 do 2 shora dolů	2,1	8	6,4	5,7	2,9	5,02
od 4 do 3 zleva doprava	3,4	5,7	5,1	6,9	3,9	5

Průměrná hodnota rozdílů na hladině 6–1 je nejmenší, tudíž nejvýhodnější způsob upnutí je ten, při kterém je strana 1 nahoře a 6 dole. To znamená, že rozměry horní strany byly 215 × 215 mm a přejezdy byly po 215 mm.

3.2. Popis průběhu zkoušek

Pro experimentální obrábění bylo zvoleno nesousledné frézování. Při tomto způsobu obrábění je tloušťka třísky nejmenší na začátku záběru zubu a největší na konci záběru. Obrobená plocha je poněkud nerovná, a to tím více, čím je menší průměr frézy a větší posuv na zub. Obrábění bylo prováděno po cyklech, v každém z nich bylo několik přejezdů. Na konci každého cyklu bylo provedeno měření opotřebení. První 4 cykly byly po 5 přejezdech. Následné 4 cykly byly po 10 přejezdech. Od 9 cyklu dále bylo po 20 přejezdech.



cyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
počet přejezdů	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10	20
přejezdů celkem	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	100
strojní čas, [min]	2,69	2,69	2,69	2,69	5,38	5,38	5,38	5,38	5,38	5,38	10,75
strojní čas celkem, [min]	2,69	5,38	8,06	10,75	16,13	21,50	26,88	32,25	37,63	43,00	53,75
dráha nástroje, [mm]	1075	1075	1075	1075	2150	2150	2150	2150	2150	2150	4300
dráha nástroje celkem, [mm]	1075	2150	3225	4300	6450	8600	10750	12900	15050	17200	21500

Tabulka 4 Přejezdy a strojní časy dle cyklů pro $n=2500 \text{ min}^{-1}$ (obráběný materiál s šířkou 215 mm) – zk. č. 1 a 2

cyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
počet přejezdů	5	5	5	5	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20	20	20	10	10
přejezdů celkem	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200	220	230	240
strojní čas, [min]	1,60	1,60	1,60	1,60	3,20	3,20	3,20	3,20	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	3,20	3,20
strojní čas celkem, [min]	1,60	3,20	4,80	6,41	9,61	12,81	16,02	19,22	25,63	32,03	38,44	44,84	51,25	57,66	64,06	70,47	73,67	76,88
dráha nástroje, [mm]	1025	1025	1025	1025	2050	2050	2050	2050	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100	2050	2050
dráha nástroje celkem, [mm]	1025	2050	3075	4100	6150	8200	10250	12300	16400	20500	24600	28700	32800	36900	41000	45100	47150	49200

Tabulka 5. Přejezdy a strojní časy dle cyklů pro $n=4000 \text{ min}^{-1}$ (obráběný materiál s šířkou 205 mm) pro zkoušku č. 3

Jednotkový strojní čas Δt jednoho cyklu s 5 přejezdy pro otáčky $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ se spočte dle vzorce (1):

$$\Delta t = \frac{L}{v_f} = \frac{L}{n \cdot f_z \cdot z} \cdot i = \frac{215 \text{ mm}}{2500 \cdot 0,04 \cdot 4} \cdot 5 = 2,68 \text{ min nebo } 2 \text{ min } 41 \text{ s (1)}$$

4. Analýza a vyhodnocení naměřených výsledků

Dále je uveden stručný popis postupu úpravy fréz ze slinutého karbidu (SK) a provedených experimentů. V další kapitole následuje podrobný popis a výsledek každé zkoušky.

ZKOUŠKA 1

Frézy hlavní: *nepovlakované* stopkové frézy ze slinutého karbidu Ø10 mm od výrobce fréz SCT [12] – FLC4L10030S s úhlem stoupání šroubovice 30°.

Frézy referenční (provedení druhé části zkoušky): stopkové frézy ze SK Ø10 mm s povlakem TiAlN (označení BLC4L10038V) s proměnným úhlem stoupání šroubovice 35–38°.

Cíl: výběr vhodného povlaku ze sortimentu firmy-spoluřešitele IONBOND, s.r.o., [6] pro tvrdé obrábění, porovnání povlaku na bázi AlCrN CROSSCUT PLUS a povlaku na bázi TiSiN HARDCUT PLUS.

ZKOUŠKA 2

Frézy hlavní: *nepovlakované* stopkové frézy ze SK Ø10 mm od výrobce fréz SCT – FLC4L10030S s úhlem stoupání šroubovice 30°, následná aplikace povlaku HARDCUT PLUS, následná úprava poloměru zaoblení ostří na hodnoty 7 až 13 µm s odstupňováním (viz Tabulka 9).

Frézy referenční: stopkové frézy ze SK Ø10 mm s povlakem AlCrN PLSC4L10045V s úhlem stoupání šroubovice 45°.

Cíl: vybrat vhodný poloměr zaoblení ostří.

ZKOUŠKA 3

Frézy hlavní: *nepovlakované* stopkové frézy ze SK Ø10 mm SCT – FLC4L10030S s úhlem stoupání šroubovice 30°, následná aplikace povlaku HARDCUT PLUS, následná úprava poloměru zaoblení ostří na 10–12 µm,

stopkové frézy ze SK ø10 mm SCT PLSC4L10045V s úhlem stoupání šroubovice 44–45° + HARDCUT PLUS + úprava poloměru zaoblení ostří na 10–12 µm,

Frézy referenční: nepovlakované stopkové frézy ze SK ø10 mm SCT FLC4L10030S bez úpravy poloměru zaoblení ostří s úhlem stoupání šroubovice geometrií 30°

Cíl: vybrat nejvhodnější geometrii.

ZKOUŠKA 4

Frézy hlavní: nepovlakované 4břité stopkové frézy ze SK Ø10 mm PLANICKA TOOLS – SVX10B4SR55BPV19 s úhlem stoupání šroubovice 55°, následná aplikace povlaku HARDCUT PLUS, následná úprava poloměru zaoblení ostří na 10–12 µm,

Cíl: prokázat účelnost použití geometrie s úhlem stoupání šroubovice 55°.

4.1. Zkouška č. 1 –Výběr optimálního povlaku

Cíl zkoušky, část 1: vybrat lepší povlak pro daný druh obrábění a pro daný materiál obrobku na zvolených frézách.

Cíl zkoušky, část 2: porovnat vybraný povlak z části 1 s povlakem a frézou, jež byly doporučeny obchodním zástupcem firmy SCT v ČR – VARIOTOOL, s.r.o.

Popis zkoušky: zkouška byla rozdělena na dvě části. V rámci první části zkoušky bylo provedeno porovnání dvou povlaků od firmy IONBOND aplikovaných na frézy od firmy SCT: povlak na bázi AlCrN (obchodní název povlaku CROSSCUT PLUS) a na bázi TiSiN (obchodní název povlaku HARDCUT PLUS). Byly napovlakovány dva vzorky pro každý druh povlaku, celkem tedy 4 frézy ze slinutého karbidu od výrobce fréz (holandská firma SCT). Následně byly v rámci druhé části zkoušky porovnány 2 frézy – nově napovlakované frézy s lepším povlakem z 1. části zkoušky s frézou s originálním povlakem TiAlN od výrobce fréz SCT. Toto bylo uděláno z důvodu ověření účelnosti provedení optimalizačních opatření. Kdyby nastala situace, při které by výsledky zkoušky fréz doporučených výrobcem včetně povlaku byly lepší, provedené optimalizační pokyny by byly zbytečné, a tím by mohl být výběr povlaku ukončen.

Stroj: frézka Intos FNG 40 CNC (viz Obrázek 18).

Nástroj: nepovlakované stopkové frézy ze slinutého karbidu 10% Co, K20-K30F, Ø10mm, označení dle katalogu SCT: FLC4L10030S s následným povlakováním AlCrN (CROSSCUT PLUS) a TiSiN (HARDCUT PLUS).

V rámci 2 části zkoušky byla doporučena obchodním zástupcem (firma VARIOTOOL, s.r.o.) stopková fréza ze slinutého karbidu 10% Co, K20-K30F Ø10mm s povlakem TiAlN, označení dle katalogu SCT: BLC4L10038V, viz Obrázek 17.

Podmínky obrábění:

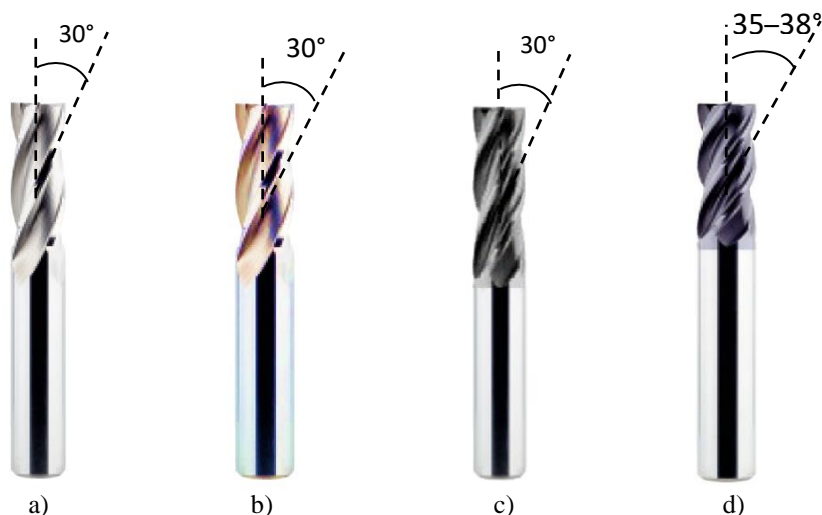
- otáčky vřetene stroje: $n = 2500 \text{ min}^{-1}$
- řezná rychlost $v_c = 78,5 \text{ m/min}$
- posuv na zub: $f_z = 0,04 \text{ mm}$
- posuvová rychlost: $v_f = 400 \text{ mm/min}$
- hloubka řezu: $a_p = 5 \text{ mm}$
- boční přísuv: $a_e = 3 \text{ mm}$

řezná emulze: 5% Blascout BC35 Kombi

Předpoklady výsledků: nejmenší opotřebení by mělo být u nástroje s povlakem, který odolává větším teplotám, tedy **HARDCUT PLUS** (viz Tabulka 6).

Tabulka 6 Tabulka porovnání vlastností povlaků

	HARDCUT PLUS	CROSSCUT PLUS	MAXIMIZER PLUS¹
Materiál	TiSiN	AlCrN	TiAlN
Tloušťka	2–4 μm	2–4 μm	2–4 μm
Mikrotvrdost (HV 0.02)	3800	3200	3100
Max. provozní teplota	1100 °C	1050 °C	850 °C
Depoziční teplota	450–500 °C	450–500 °C	450–500 °C
Součinitel tření vůči oceli	0,4	0,55	0,6
Barva	měděná	šedá	purpurově černá



Obrázek 17 Použité řezné nástroje: a) FLC4L10030S bez povlaku (výchozí), b) FLC4L10030S s povlakem **HARDCUT PLUS**, c) FLC4L10030S s povlakem **CROSSCUT PLUS**, d) BLC4L10038V s povlakem **TiAlN**



Obrázek 18 Frézka Intos FNG 40 CNC

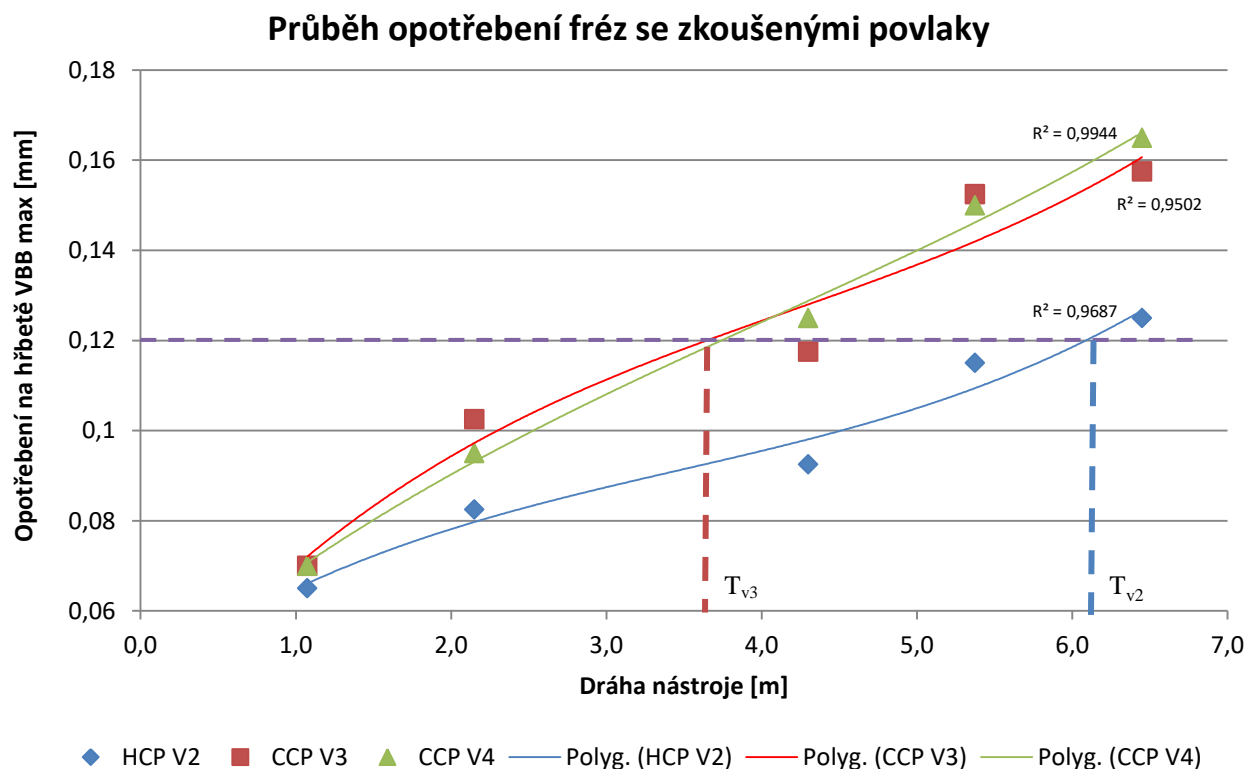
¹ Výrobce fréz SCT neuvádí podrobný popis a vlastnosti deponovaných tenkých vrstev, proto byly vlastnosti převzaty pro obdobný povlak z portfolia IONBOND, s.r.o., za účelem porovnání

Průběh zkoušky

Výsledky měření 1. část

Pro vytipované řezné podmínky byla jako první testována fréza s povlakem **HARDCUT PLUS** (s dohodnutým označením V1). Jelikož ještě nebyly pevně nastaveny řezné podmínky (viz str. 30), docházelo k prvotnímu ladění, tak posuvová rychlost byla zvolena 800 mm/min při zachování otáček ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$). Za těchto podmínek ujela fréza 750 mm (odpovídá 6,45 min v řezu) a následně praskla. Na základě těchto skutečností byla posuvová rychlost snížena na polovinu, tedy 400 mm/min, při zachování otáček vřetene stroje. S ohledem na skutečnost, že od každé varianty byl k dispozici pouze jeden nástroj, byl pro další průběh zkoušky použit jenom 1 vzorek (druhá fréza) s povlakem **HARDCUT PLUS** (s dohodnutým označením V2).

Stejným způsobem a za stejných podmínek byl otestován nástroj s povlakem **CROSSCUT PLUS**. Tyto nástroje nesly interní označení V3 a V4, které bylo laserově popsáno na upínací části nástroje. S každou frézou bylo uděláno 5 cyklů po 5, 5, 10, 5 a 5 přejezdech. Na konci každého cyklu bylo měřeno opotřebení na hřbetě VB_{Bmax} . Výsledky byly zpracovány do tabulky (Tabulka 7a) a jsou uvedeny v příloze č. 1 a zároveň znázorněny na Obrázek 19. Jelikož po zapíchnutí byly nástroje opotřebeny na cca 50–60 μm , bylo rozhodnuto, že kritériální opotřebení VB_{Bkrit} v rámci této zkoušky bude rovněž navýšeno do 120 μm .

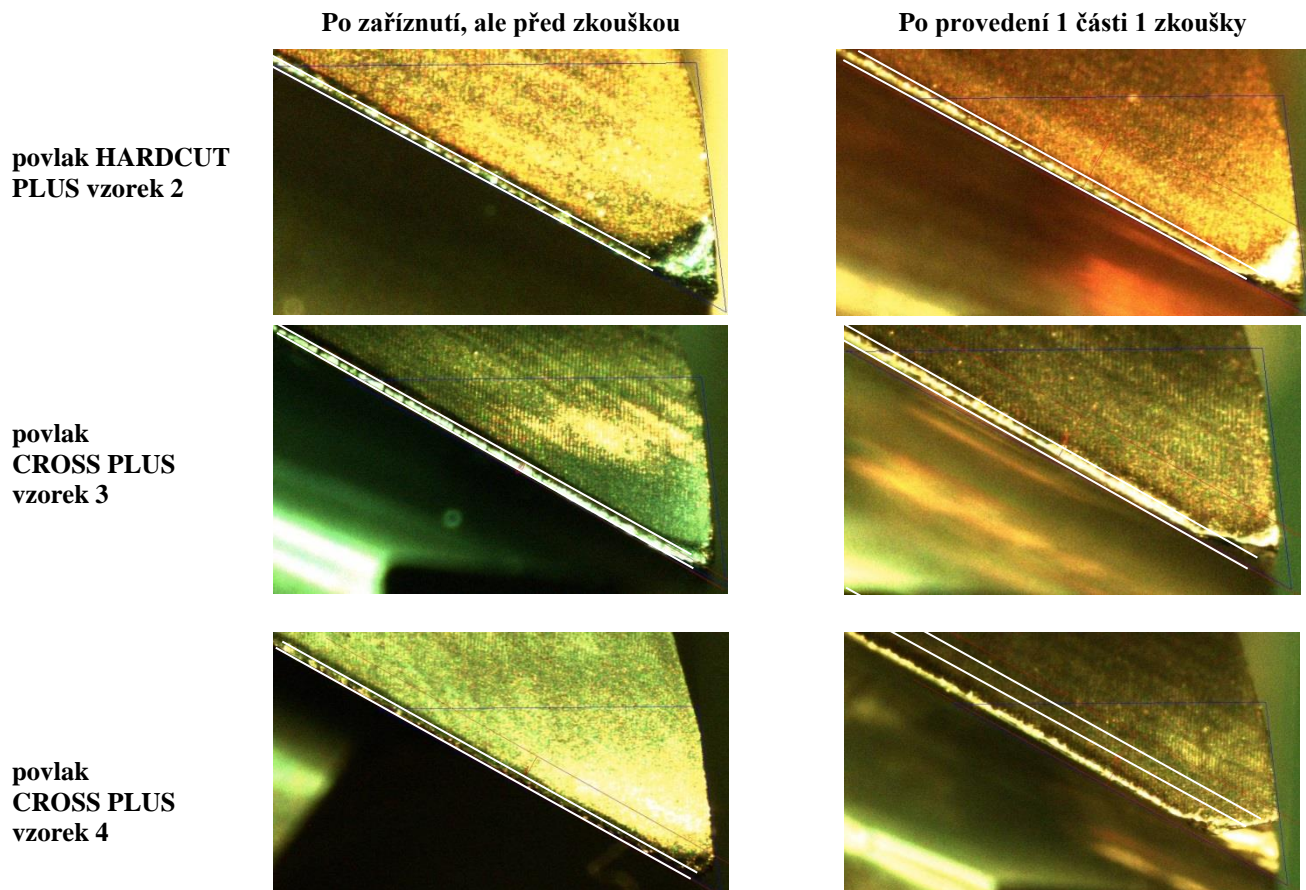


Obrázek 19 Průběh opotřebení fréz se zkoušenými povlaky (HCP – **HARDCUT PLUS**, CCP – **CROSSCUT PLUS**, POLYN – polynom 3. stupně, proložený automaticky s důvěryhodností R^2)

Tabulka 7 Výsledky zkoušky č. 1

Vzorek	Trvanlivost T_v , [m]	Strojní čas, [min]
1	prasknul	-
2	$T_{v2} = 6,2$	15,5
3	$T_{v3} = 3,6$	7,8
4	$T_{v4} = 3,7$	8,0

V tabulce 7 jsou uvedeny výsledky odečtené z grafu trvanlivosti fréz. Vzorek č. 2 s povlakem **HARDCUT PLUS** vydržel zhruba 2krát větší čas než vzorky č. 3 a č. 4 (**CROSSCUT PLUS**).



Obrázek 20 Výsledek 1. části zkoušky č. 1.

Výsledek

U frézy s označením V2 a povlakem TiSiN (**HARDCUT PLUS**) bylo naměřeno nejmenší opotřebení na hřbetě při obrábění uvažovaného tvrdého materiálu ČSN 41 9552 s tvrdostí 50HRC. Jak bylo předpokládáno na začátku, tenká vrstva TiSiN s nejvyšší tvrdostí a s vyšší provozní teplotou – (mikrotvrdość 3800 HV 0.02) působila pro obrábění příznivěji než vrstva AlCr (mikrotvrdość 3200 HV 0.02). Rovněž lze předpokládat, že obsah křemíku ve struktuře tenké vrstvy TiSiN (**HARDCUT PLUS**) působí příznivě, protože se za vyšších teplot tvoří tvrdá ochranná oxidická vrstva SiO_2 , která představuje tepelnou bariéru mezi povrchem nástroje, kde jsou nejvyšší teploty a substrátem. Tím se zpomaluje destrukce vrstvy v čase. Výsledek zkoušky je vidět na

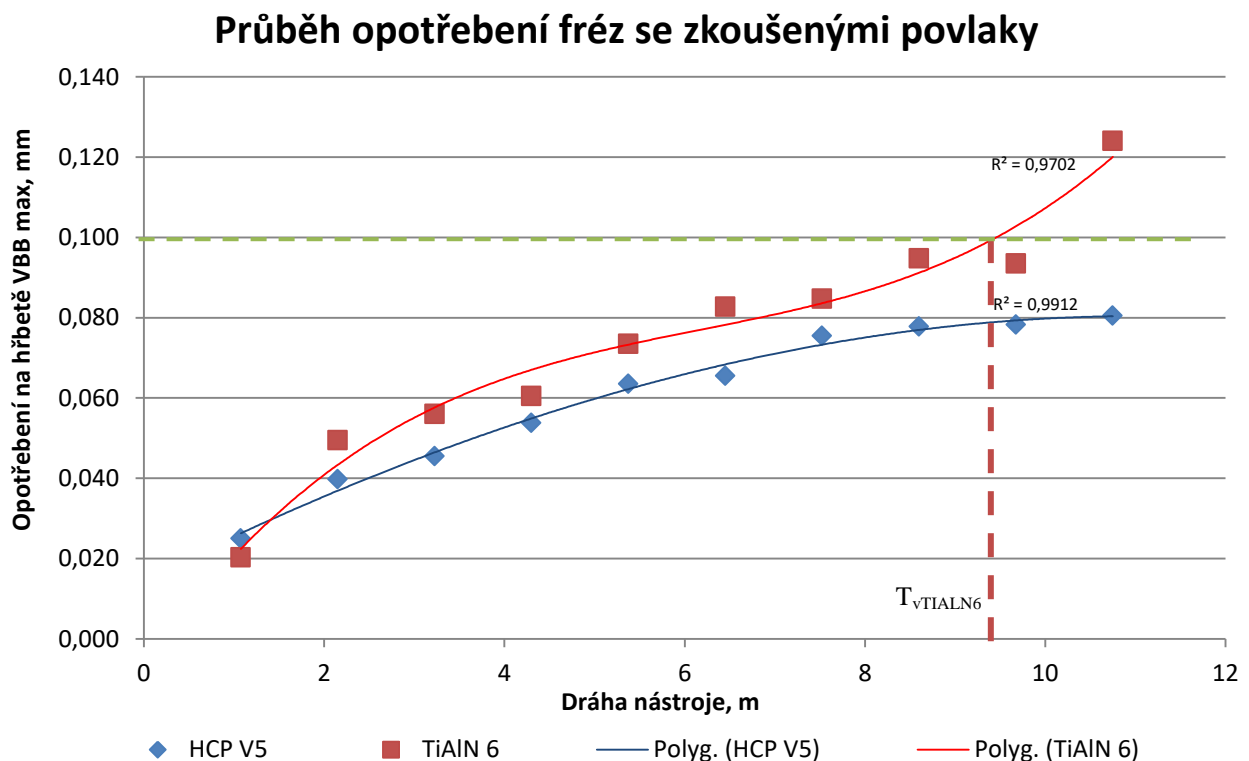
obrázku (viz Obrázek 20). Zde jsou zobrazeny fotografie břitů, vytvořené pomocí dílenského mikroskopu MULTICHECK 500.

2. část – Porovnání s doporučením od výrobce

Obchodním zástupcem výrobce fréz bylo doporučeno použít pro tvrdé obrábění nástroj s originálním povlakem TiAlN.

V první části experimentu bylo zjištěno, že povlak TiSiN (HARDCUT PLUS) ukazuje lepší výsledky při obrábění tvrdého materiálu. Proto byla pro porovnání s doporučením od výrobce ve druhé části zkoušky použita fréza s tímto povlakem. Druhou porovnávanou frézou byla fréza doporučená výrobcem s povlakem TiAlN. Podmínky obrábění zůstaly stejné jako v první části zkoušky. S každou frézou bylo realizováno 10 cyklů po 5 přejezdech v každém cyklu. Na konci každého cyklu bylo měřeno opotřebení na hřbetě VB_{Bmax} . Výsledky byly zpracovány do tabulky a jsou uvedeny v příloze č. 1 a znázorněny na Obrázek 21 a Obrázek 22.

Jak je vidět na obrázku (viz Obrázek 21), byl rozdíl opotřebení v průběhu celého experimentu cca 10–20 μm ve prospěch povlaku TiSiN. Na konci zkoušky se tento rozdíl ještě zvětšil. Z důvodu časového omezení při experimentu nebylo dosaženo kritériálního opotřebení u vzorku V5, ale lze předpokládat, že ujetá dráha při tomto kritériu by byla v rozmezí 12-15 m. V každém případě, výsledek bude lepší než u vzorku TiAlN6.

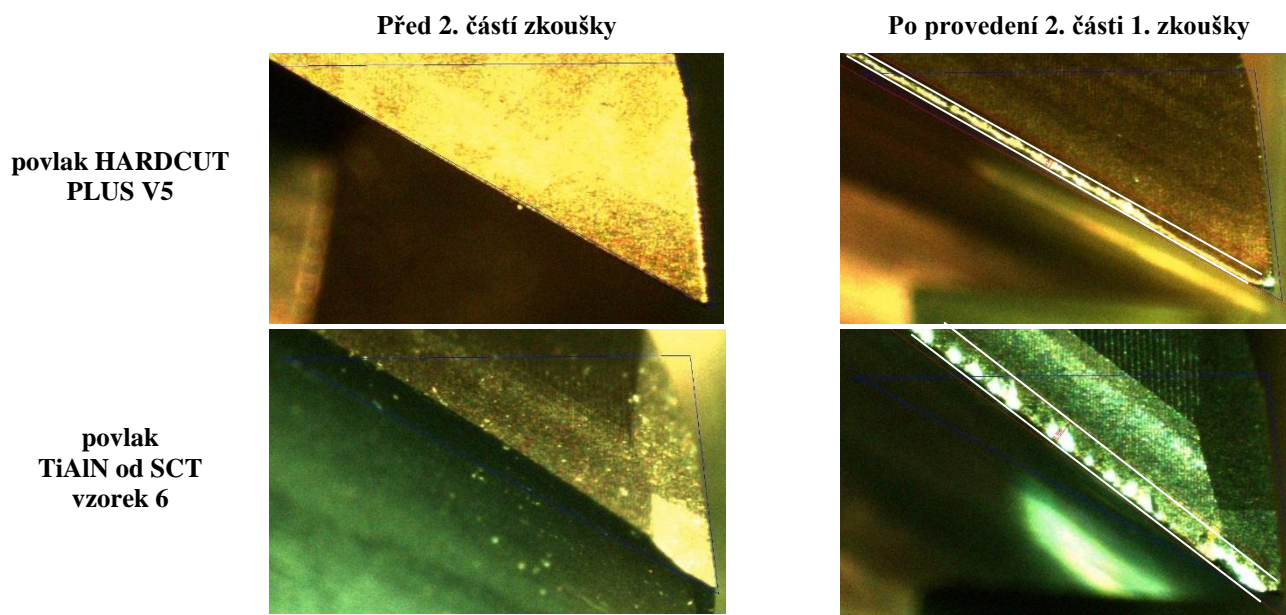


Obrázek 21 Průběh opotřebení fréz se zkoušenými povlaky.

V Tabulce 8 jsou uvedeny výsledky odečtené z grafu trvanlivosti fréz. Vzorek č. 5 s povlakem HARDCUT PLUS vydržel zhruba 60 % času do opotřebení $VB_{Bkrit} = 100 \mu\text{m}$ více než vzorek s povlakem doporučeným výrobcem (TiAlN).

Tabulka 8 Výsledek 2 části zkoušky č. 1

Vzorek	Trvanlivost T_v , m	Strojní čas, min
TiAlN6	$T_{TiAlN6} = 7$	17,5
V5	$T_{V5} = 12-15$	30-37,5



Obrázek 22 Výsledek 1. části zkoušky č. 2.

Závěr 1. zkoušky

Dle výsledků provedených zkoušek lze stanovit, že povlak TiSiN od výrobce IONBOND je pro tento druh obrábění vhodnější než ostatní povlaky, a to celkem souhlasí s teoretickým předpokladem uvedeným na začátku experimentu. Pro provedení dalších vývojových činností bude použit povlak TiSiN (HARDCUT PLUS) od firmy IONBOND, s.r.o.

4.2. Zkouška č. 2. – Výběr vhodného poloměru zaoblení ostří

Cíl zkoušky: experimentálním způsobem stanovit vhodný poloměr zaoblení ostří pro tvrdé obrábění.

Popis zkoušky: v rámci zkoušky bylo provedeno porovnání fréz s předdepoziční úpravou břitů na 7,1 až 13,4 μm – viz Tabulka 9.

Stroj: frézovací centrum MAS MCU 450 (viz Obrázek 23).

Nástroj: nepovlakované stopkové frézy ze slinutého karbidu, slinutý karbid 10% Co, K20-K30F, Ø10mm dle katalogu SCT: FLC4L10030S s deponováním povlaku TiSiN (HARDCUT PLUS) následnou rektifikací rádisu břitů, viz Tabulka 9.

Podmínky obrábění:


- otáčky vřetene: $n = 2500 \text{ min}^{-1}$
- řezná rychlost $v_c = 78,5 \text{ m/min}$
- posuv: $f_z = 0,04 \text{ mm}$
- posuvová rychlost: $v_f = 400 \text{ mm/min}$
- hloubka řezu: $a_p = 5 \text{ mm}$
- boční přísvuv: $a_e = 3 \text{ mm}$
- řezná emulze: 5% Blascout BC35 Kombi

Obráběný materiál: ČSN 41 9552 (X37CrMoV5-1) v zušlechtěném stavu na $50 \pm 2 \text{ HRC}$

Měřicí přístroj: dílenský mikroskop MULTICHECK PS500

Předpoklady výsledků: Nejmenší opotřebení by mělo být u nástrojů s poloměrem zaoblení ostří 10–15 μm . Ostrý břit by byl vhodnější pro obrábění měkkých materiálů (hliník, kompozity, plasty apod.). Příliš velký rádius (15–20 μm) také není vhodný, protože vytváří již „otupený“ břit, způsobující velký nárůst řezných sil a teploty na řezném břitu.

Tabulka 9 Charakteristiky fréz, použitých ve zkoušce č. 2

Označení vzorku	Katalogové číslo	Výchozí rádius břitu [μm]	Rádius břitu po úpravě [μm]	Povlak	Úhel stoupání šroubovice	Doporučená oblast využití	
V6	FLC4L10030S	2,8	7,1	HARDCUT PLUS	30°	P, M, K, S	
V7	FLC4L10030S	2,5	8,2	HARDCUT PLUS	30°	P, M, K, S	
V8	FLC4L10030S	2,8	9,5	HARDCUT PLUS	30°	P, M, K, S	
V9	FLC4L10030S	2,6	11,8	HARDCUT PLUS	30°	P, M, K, S	
V10	FLC4L10030S	2,9	13,4	HARDCUT PLUS	30°	P, M, K, S	



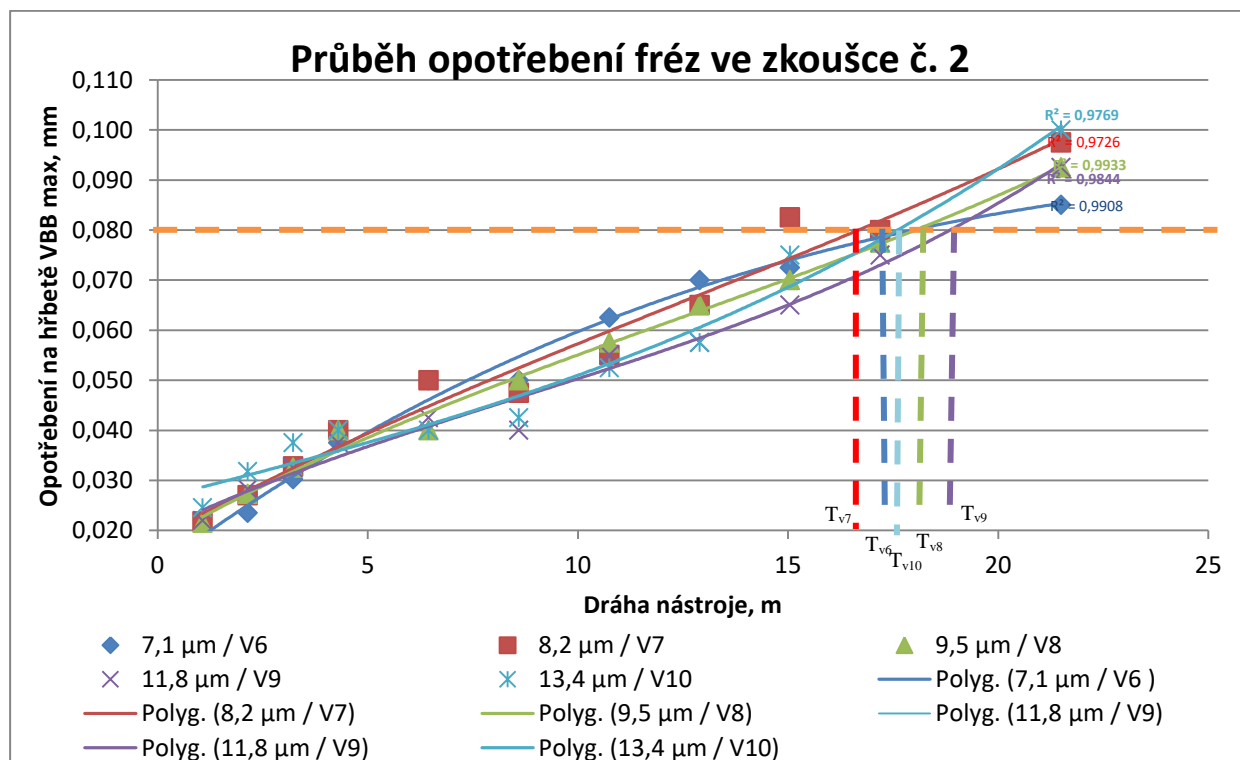
Obrázek 23 Frézovací centrum MAS MCU 450

Průběh zkoušky

V průběhu této zkoušky byly použity stejné řezné podmínky jako v předchozí zkoušce. Experiment byl realizován s 5 nástroji. U každého nástroje byla provedena rektifikace břitu a následné povlakování. Byl změřen výchozí rádius břitu a rádius po úpravách.

Zkouška byla provedena na určitý, předem stanovený počet cyklu. Celkem bylo provedeno 11 cyklů. První 4 cykly byly po 5 přejezdech, následných 6 cyklů po 10 přejezdech, poslední cyklus měl 20 přejezdů.

Na konci každého cyklu bylo prováděno měření opotřebení na hřbetě VB_{Bmax} . Za účelem porovnání výsledků může být použit kritériální opotřebení $VB_{Bmax} = 80 \mu m$. (viz. Obrázek 24)



Obrázek 24 Průběh opotřebení fréz ve zkoušce č. 2.

Tabulka 10 Výsledky zkoušky č. 2

Vzorek	Poloměr zaoblení ostří, [μm]	Trvanlivost T_v , [m]	Strojní čas, [min]
7	8,2	$T_{V7} = 16,5$	41,2
6	7,1	$T_{V6} = 16,8$	42,0
10	13,4	$T_{V10} = 17,5$	43,8
8	9,5	$T_{V8} = 18$	45
9	11,8	$T_{V9} = 19$	47,5

Výsledky zkoušek jsou uvedeny na obrázku (Obrázek 24) a jsou zpracovány v tabulce 10. Průběhy opotřebení jsou velmi blízké a výsledek zkoušky je poněkud odlišný od jejího průběhu. Například fréza V6 s poloměrem zaoblení ostří 7,1 μm v průběhu zkoušky vykazovala horší výsledky než ostatní frézy, ale po ujetí 20 metrů bylo naměřeno nejmenší opotřebení ze všech nástrojů. Proto lze za důvěryhodné výsledky přijmout data pro frézu V8 s $r_n = 9,5 \mu\text{m}$ a V9 s $r_n = 11,8 \mu\text{m}$, u kterých bylo naměřeno téměř stejné opotřebení na konci zkoušky. U fréz V7, V6 a V10 s poloměrem zaoblení ostří 8,2, 7,1 a 13,4 μm byla naměřena menší trvanlivost. Z toho lze vyvodit, že vhodný poloměr zaoblení ostří by měl být mezi 10 a 12 μm . Pro další vývoj fréz byl stanoven poloměr zaoblení ostří na experimentálně potvrzené hodnoty 10–12 μm . Tento poloměr zaoblení ostří celkem souhlasí s teoretickým předpokladem, který byl stanoven v rozmezí 10–15 μm . Výsledky zkoušky jsou uvedeny v příloze 2.

4.3. Zkouška č. 3 – Výběr úhlu stoupání šroubovice

Cíl zkoušky: experimentálním způsobem stanovit vhodný úhel stoupání šroubovice u fréz pro tvrdé obrábění.

Popis zkoušky: zkouška byla provedena na 14 frézách, z nichž 10 bylo napovlakováno ve firmě IONBOND povlakem na bázi TiSiN (HARDCUT PLUS). Dále bylo provedeno omílání uvažovaných 10 vzorků před povlakováním s využitím zařízení OTEC. Poloměr zaoblení ostří po omílání byl v rozmezí 10–12 μm (výsledky měření poloměru zaoblení ostří před a po rektifikaci jsou uvedeny v příloze 6). 1 fréza byla od výrobce fréz SCT s originálním povlakem TiAlN a byla použita pro porovnání výsledků optimalizace procesu tvrdého obrábění. Sloužila tedy jako referenční nástroj. Další 3 frézy byly nepovlakované a byly použity v rámci této zkoušky pro znázornění zlepšení vývoje fréz.

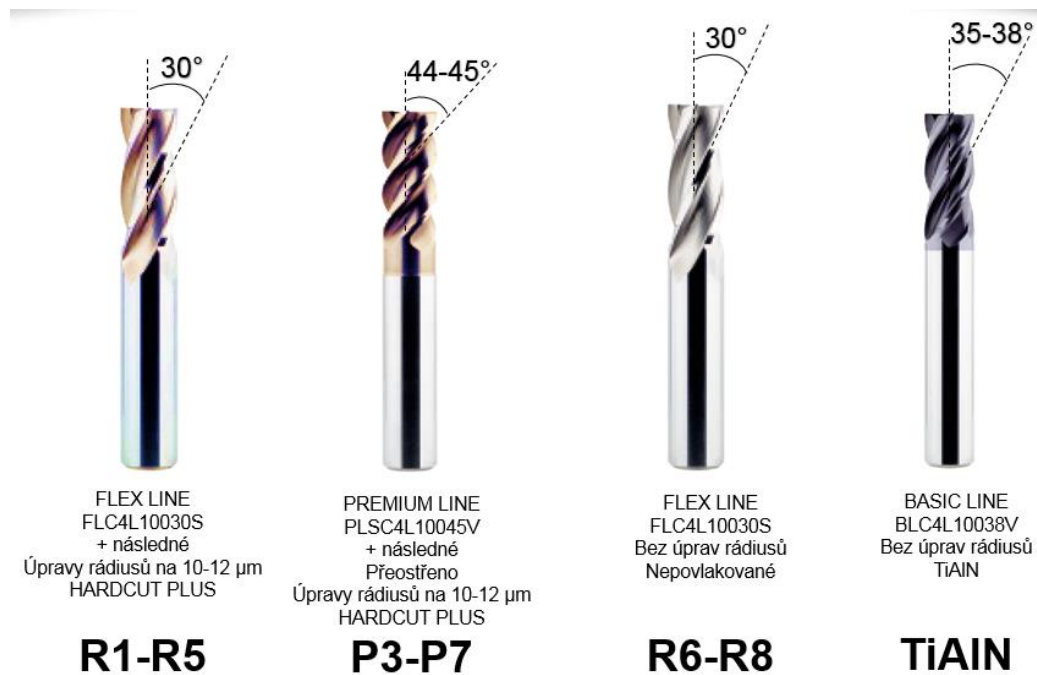
Dále vypadala struktura nástrojů následujícím způsobem: 8 fréz standartní řady s úhlem stoupání šroubovice 30° (označené R1–R8) a 5 fréz prémiové řady s proměnným úhlem stoupání 44–45° (označené P3–P7). Fréza doporučená výrobcem s proměnným úhlem stoupání šroubovice 35–38° byla označena TiAlN. Tímto způsobem byly vyzkoušeny 3 druhy fréz se stoupáním šroubovice 30°, 35–38° a 44–45°.

Stroj: frézovací centrum MAS MCU 450 (viz Obrázek 23).

Nástroj: Ø10mm 4zubé frézy ze slinutého karbidu 10% Co, K20-K30F (podrobný popis zkoušených nástrojů viz Tabulka 11, Obrázek 25).

Tabulka 11 Popis použitých nástrojů u zkoušky č. 3

Označení vzorku	Katalogové číslo	Úprava rádiusu ostří na omílače OTEC	Povlak	Úhel stoupání šroubovice	Doporučená oblast využití původní
R1	FLC4L10030S	Úpravy na 10–12 μm	HARDCUT PLUS	30°	P, M, K, S
R2	FLC4L10030S	Úpravy na 10–12 μm	HARDCUT PLUS	30°	P, M, K, S
R3	FLC4L10030S	Úpravy na 10–12 μm	HARDCUT PLUS	30°	P, M, K, S
R4	FLC4L10030S	Úpravy na 10–12 μm	HARDCUT PLUS	30°	P, M, K, S
R5	FLC4L10030S	Úpravy na 10–12 μm	HARDCUT PLUS	30°	P, K, S, H
P3	PLSC4L10045V	Přeostření a úpravy na 10–12 μm	HARDCUT PLUS	44° – 45°	P, K, S, H
P4	PLSC4L10045V	Přeostření a úpravy na 10–12 μm	HARDCUT PLUS	44° – 45°	P, K, S, H
P5	PLSC4L10045V	Přeostření a úpravy na 10–12 μm	HARDCUT PLUS	44° – 45°	P, K, S, H
P6	PLSC4L10045V	Přeostření a úpravy na 10–12 μm	HARDCUT PLUS	44° – 45°	P, K, S, H
P7	PLSC4L10045V	Přeostření a úpravy na 10–12 μm	HARDCUT PLUS	44° – 45°	P, K, S, H
R6	FLC4L10030S	Bez úprav rádiusů	nepovlakované	30°	P, M, K, S
R7	FLC4L10030S	Bez úprav rádiusů	nepovlakované	30°	P, M, K, S
R8	FLC4L10030S	Bez úprav rádiusů	nepovlakované	30°	P, M, K, S
TiAlN	BLC4L10038V	Bez úpravy	TiAlN	35 – 38°	P, M, K, S, H



Obrázek 25 Použité frézy od firmy SCT s úpravou povlaku a břítu

Podmínky obrábění: otáčky vřetene: $n = 4000 \text{ min}^{-1}$
řezná rychlost: $v_c = 125,6 \text{ m/min}$
posuv: $f_z = 0,04 \text{ mm}$
posuvová rychlost: $v_f = 640 \text{ mm/min}$
hloubka řezu: $a_p = 5 \text{ mm}$
boční přísuv: $a_e = 3 \text{ mm}$
řezná emulze: 5% od fy OLEA CZ s.r.o.

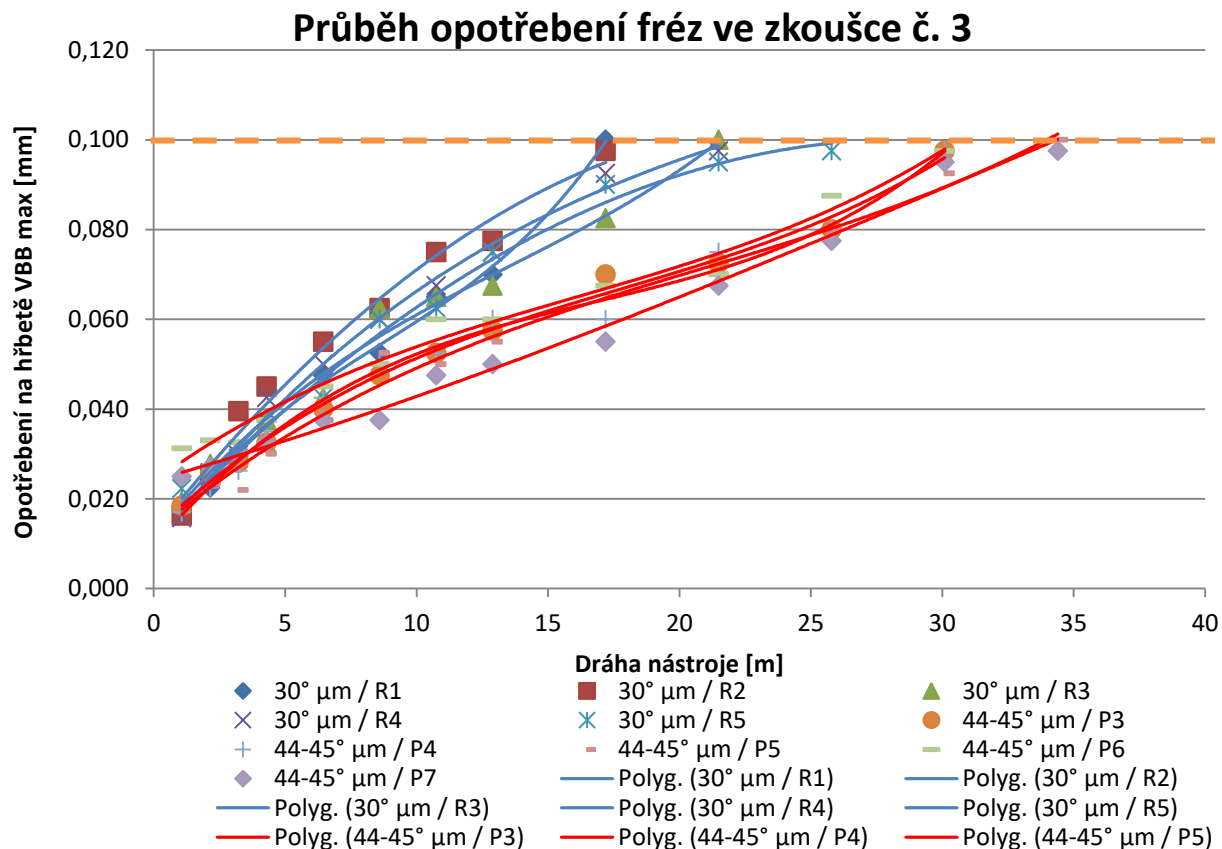
Obráběný materiál: ČSN 41 9552 (X37CrMoV5-1) v zušlechtném stavu na $50 \pm 2 \text{ HRC}$

Měřicí přístroj: dílenský mikroskop MULTICHECK PS500

Předpoklady výsledků: nejmenší opotřebení by mělo být u nástrojů s větším úhlem stoupání šroubovice ($44-45^\circ$), a to z důvodu příznivějšího rozkladu axiální a radiální složky hlavní řezné síly a také více plynulého vstupu břítu do řezu.

Průběh zkoušky:

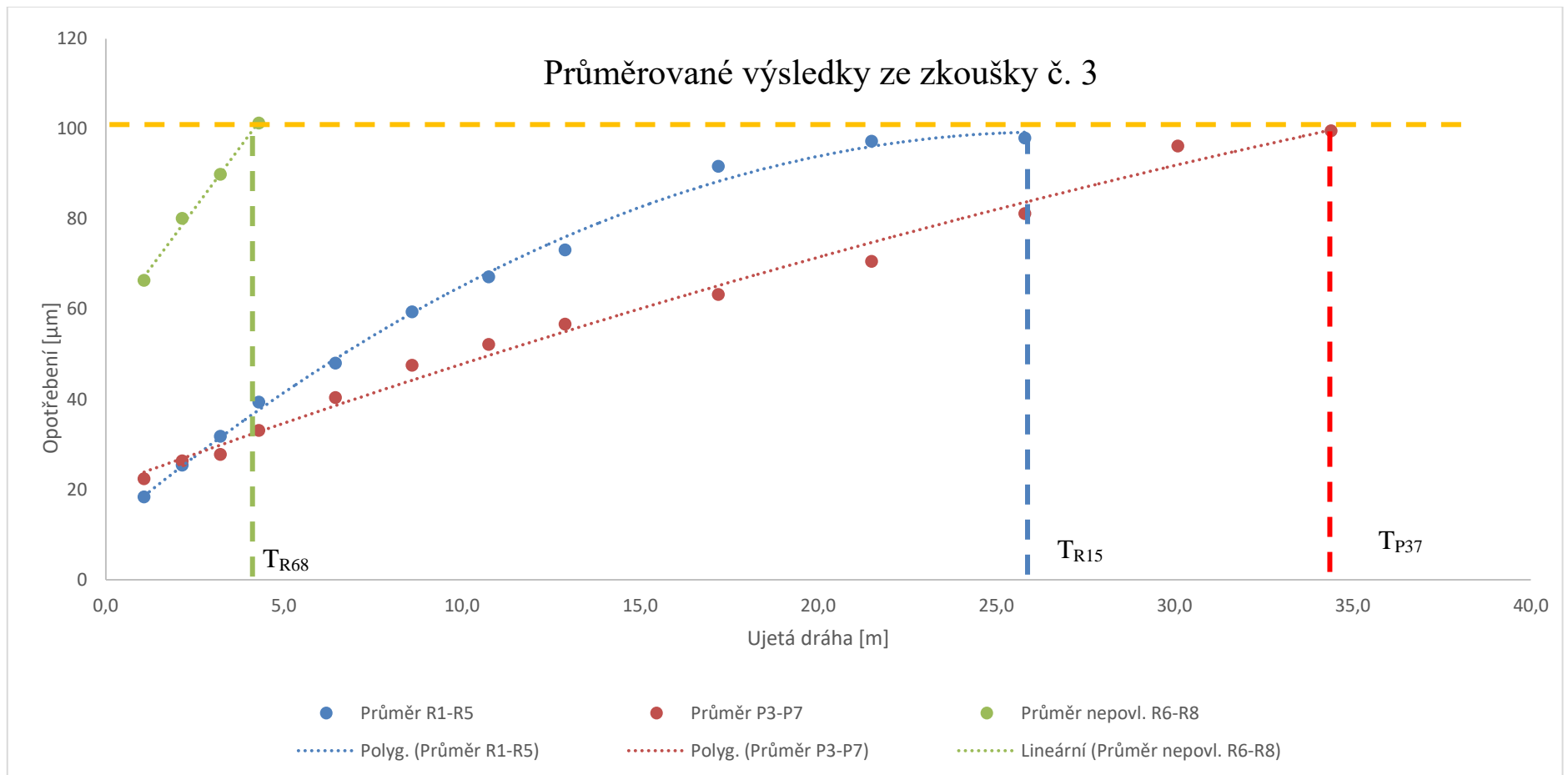
První 4 cykly byly po 5 přejezdech. Následné 4 cykly byly po 10 přejezdech. Od 9. cyklu byly cykly po 20 přejezdech. Na konci každého cyklu bylo prováděno měření opotřebení na hřbetě nástroje VB_{Bmax} . Kritérium pro ukončení zkoušky bylo opotřebení na hřbetě v hodnotě, $VB_{\text{Bmax}} = 100 \mu\text{m}$.



Obrázek 26 Průběh opotřebení fréz ve zkoušce č. 3.

Výsledky zkoušky jsou uvedeny na obrázku (Obrázek 26). Modré polynomické křivky odpovídají průběhům opotřebení fréz s úhlem stoupání šroubovice 30°, červené průběhům opotřebení fréz s úhlem stoupání šroubovice 44 – 45°. Všechny červené křivky leží pod modrými, to znamená, že všechny frézy s úhlem stoupání šroubovice 44 – 45° měly při stejné ujeté dráze menší opotřebení VB_{Bmax} . Z toho lze usoudit, že jak bylo předpokládáno na začátku, působí úhel stoupání šroubovice 44 – 45° příznivě při tomto druhu obrábění, a proto byly při další experimentální činnosti použity tyto frézy. Průměrované výsledky s názorným uvedením příslušných fréz ke každému průběhu opotřebení jsou uvedeny na dalším obrázku (viz Obrázek 27).

Průběh opotřebení nepovlakovaných fréz bez úprav břitů s úhlem stoupání šroubovice 30° je v levém horním rohu grafu. U nepovlakovaných fréz opotřebení 100 mikrometrů u nich bylo dosaženo během necelých 5 minut neboli cca 4,1– 4,2 m ujeté dráhy. Nejlepší výsledky byly naměřeny u fréz P3 až P7 (červená křivka opotřebení).



Obrázek 27 Průměrované výsledky ze zkoušky č. 3

Tabulka všech naměřených dat je vedena v příloze č. 3.

4.4. Zkouška č. 4 – Doplnková zkouška s frézami s ještě větším úhlem stoupání šroubovice

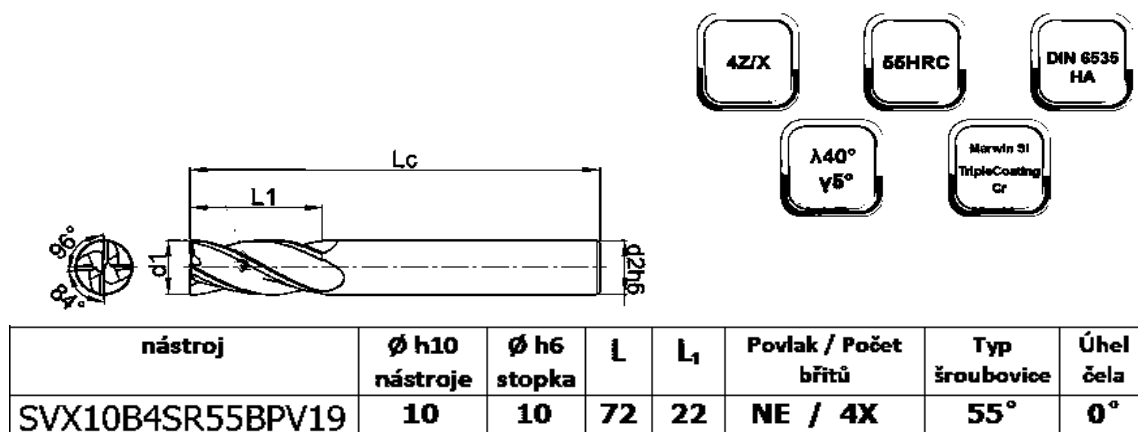
Cíl zkoušky: experimentálním způsobem ověřit, zda zvětšení úhlu stoupání šroubovice (na 55°) bude mít vliv na zvětšení řezivosti nástroje u fréz pro tvrdé obrábění.

Popis zkoušky: zkouška byla provedena na 5 frézách, na nichž byl aplikován vývoj založený na výsledcích předchozích zkoušek. Nástroje byly povlakovány společností IONBOND povlakem na bázi TiSiN (HARDCUT PLUS). Dále bylo provedeno omílání uvažovaných 5 vzorků před povlakováním s využitím zařízení OTEC. Poloměry zaoblení ostří po omílání byly v rozmezí 10–12 μm.

Stroj: frézovací centrum MAS MCU 450

Nástroje: Ø10mm 4zubé frézy ze slinutého karbidu 10% Co, K20-K30F s úhlem stoupání šroubovice 55° s označením M1–M5 od výrobce PLANICKA TOOLS (popis fréz viz Obrázek 28).

Antivibrační do 55 HRC



Obrázek 28 Popis frézy 55° od výrobce PLANICKA TOOLS (Zdroj: z katalogu výrobce)

Podmínky obrábění: otáčky vřetene: $n = 4000 \text{ min}^{-1}$
 řezná rychlost: $v_c = 125,6 \text{ m/min}$
 posuv: $f_z = 0,04 \text{ mm}$
 posuvová rychlost: $v_f = 640 \text{ mm/min}$
 hloubka řezu: $a_p = 5 \text{ mm}$
 boční přísuv: $a_e = 3 \text{ mm}$
 řezná emulze: 5 % od fy OLEA CZ, s.r.o.

Obráběný materiál: ČSN 41 9552 (X37CrMoV5-1) v zušlechtěném stavu na 50±2 HRC

Měřicí přístroj: dílenský mikroskop MULTICHECK PS500

Předpoklady výsledků: frézy s větším úhlem stoupání šroubovice (55°) mohou ujet delší dráhu z důvodu více příznivého rozkladu velikosti axiální a radiální složky hlavní řezné síly a také ještě plynulejšího vstupu břitu do řezu.

Průběh zkoušky:

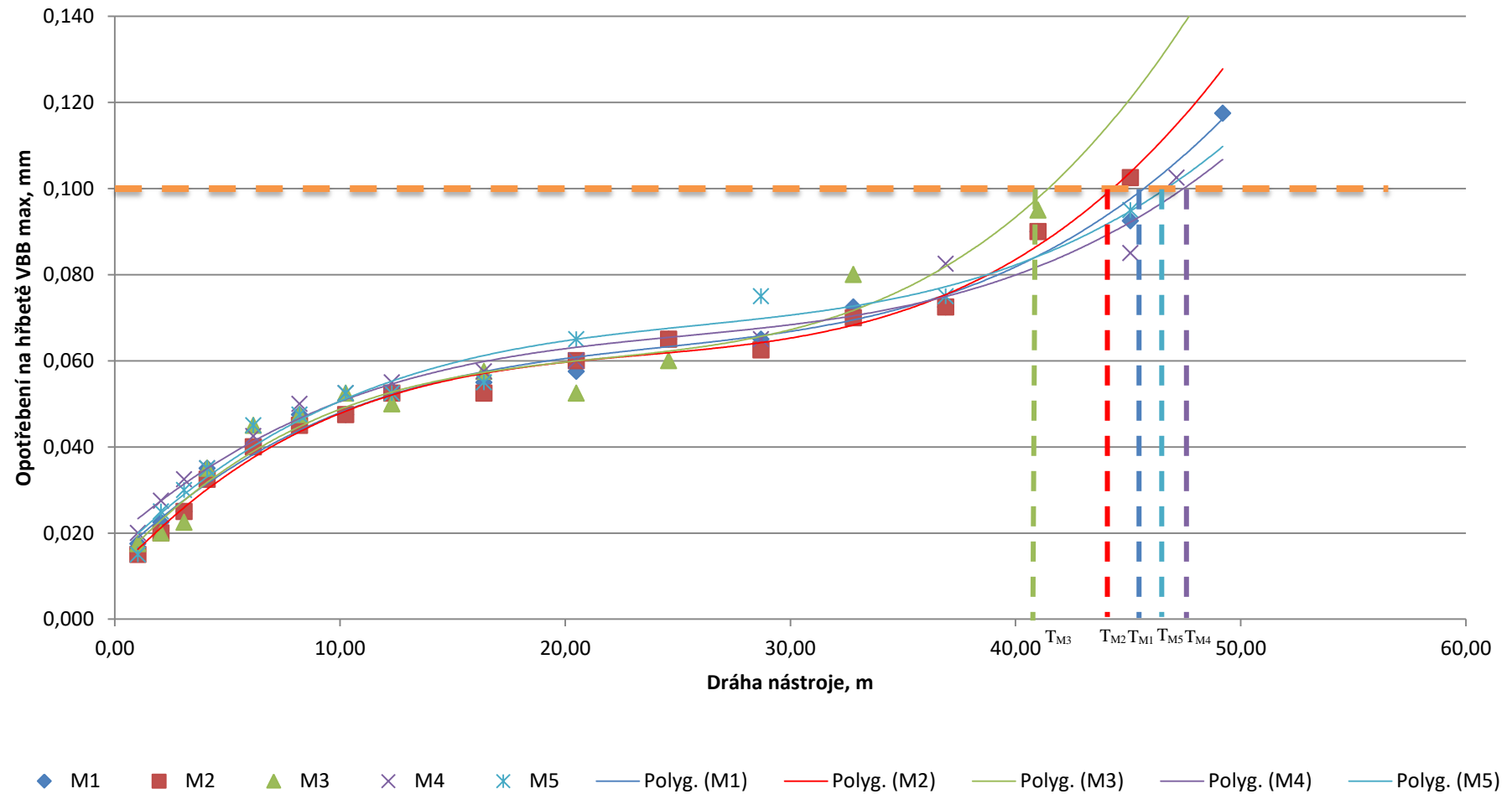
Tato zkouška byla provedena za stejných řezných podmínek jako všechny předchozí. První 4 cykly byly po 5 přejezdech. Následné 4 cykly byly po 10 přejezdech. Od cyklu č. 9 dále byl počet přejezdů v každém cyklu 20. Na konci každého cyklu bylo prováděno měření opotřebení na hřbetě VB_{Bmax} . Kriteriaální hodnota opotřebení na hřebě byla vybrána $VB_{Bmax} = 100 \mu m$ (III oblast teoretického průběhu opotřebení, viz. Obrázek 15). Výsledky zkoušky jsou uvedeny na obrázku (Obrázek 29). Vzorky M1 až M5 jsou identické frézy.

Na základě výsledků lze stanovit, že frézy s úhlem stoupání šroubovice 55° dosáhly kriteriačního opotřebení $100 \mu m$ na ujeté dráze v rozmezí 45–50 metrů, což odpovídá 70–78 min strojního času (viz Tabulka 12). V porovnání s předchozí zkouškou, kde frézy s úhlem stoupání šroubovice $44 - 45^\circ$ dosáhly kriteriačního opotřebení cca 30–35 m, jde zhruba o 50 % větší produktivitu. Tím pádem, lze stanovit, že bylo změnou úhlu stoupání šroubovice fréz o 10° dosaženo zlepšení výkonnosti o cca 50 %.

Tabulka 12 Výsledky zkoušky č. 4

Vzorek	Trvanlivost T_v , [m]	Strojní čas, [min]
3	$T_{v3} = 42$	65,6
2	$T_{v2} = 45$	70,3
1	$T_{v1} = 47$	73,4
5	$T_{v5} = 48$	75
4	$T_{v4} = 49$	76,5

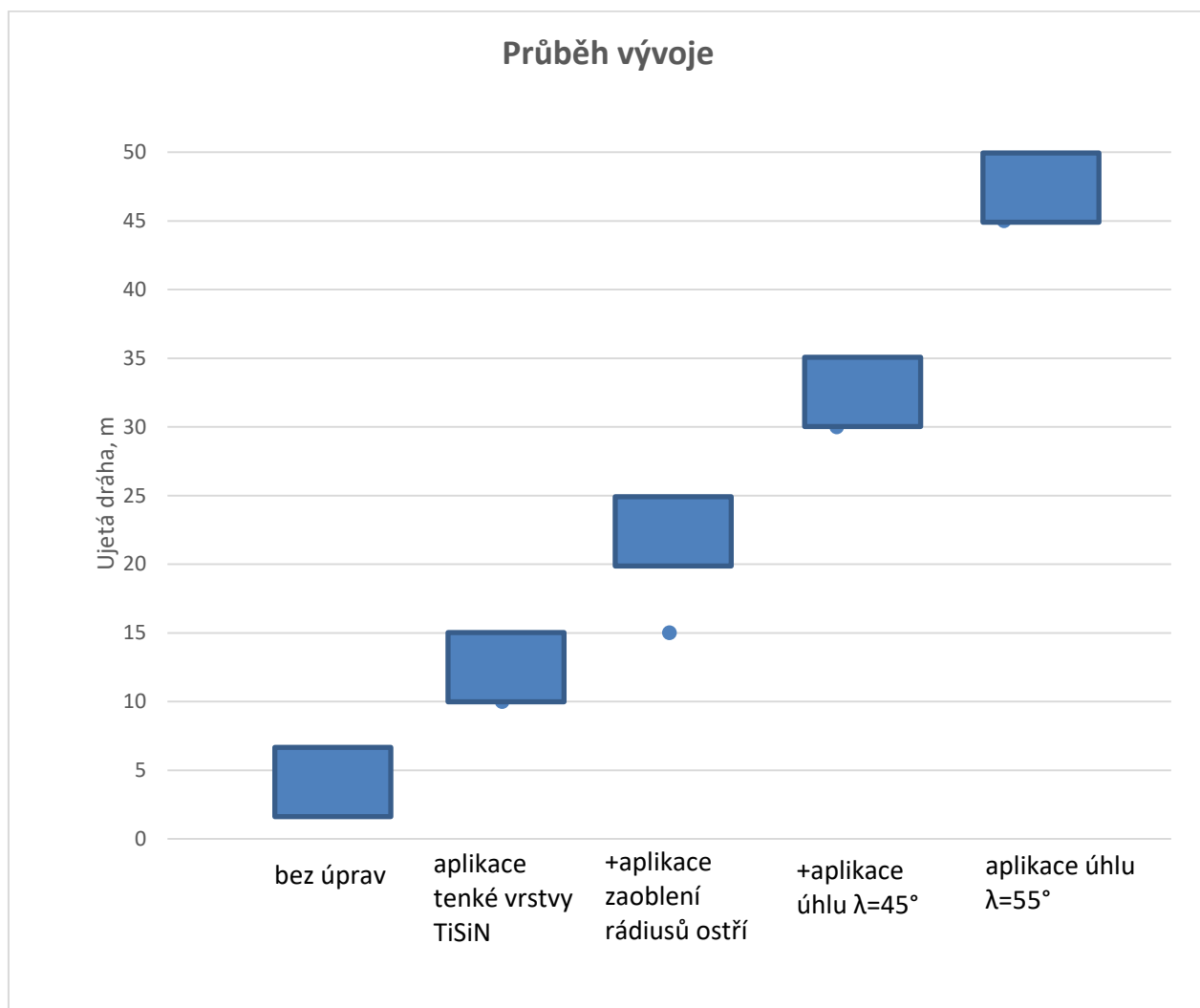
Průběh opotřebení fréz ve zkoušce č. 4



Obrázek 29 Průběh opotřebení fréz ve zkoušce č. 4

Závěrečné porovnání.

Na základě výsledků provedených zkoušek lze dojít k závěru, že aplikací vhodné tenké vrstvy, deponované správnou technologií, v tomto případě se jedná o PVD vrstvy, a také aplikací úpravy břítu na správnou hodnotu poloměru zaoblení ostří lze výrazně zvýšit trvanlivost fréz a rovněž i produktivitu celého procesu obrábění. Za účelem porovnání v rámci zkoušky č. 4 byly na začátku vyzkoušeny základní frézy od výrobce SCT bez úprav, tj. bez aplikace tenkých vrstev a omílání břitů. Ve výsledku u těchto fréz bylo dosaženo kritériálního opotřebení $VBB_{max} = 100 \mu m$ na hřbetě již po několika minutách, neboli do 5 metrů ujeté dráhy (viz Obrázek 27). Postupné úpravy povrchu a úhlu λ v průběhu vývoje dovolily zvýšit trvanlivost. Aplikace jenom tenké vrstvy na bázi TiSiN (HARDCUT PLUS) dovolily zvýšit trvanlivost zhruba na 10-15 metrů ujeté dráhy neboli + 50 % k výsledkům předchozí zkoušky. Následně, pomocí úprav rádiusu břítu, bylo dosaženo ještě větší produktivity. Frézy ve výsledku této zkoušky ujely do cca 20-25 metrů dráhy neboli + 30 % k výsledku předchozí zkoušky (Obrázek 24). Třetím zlepšením, tj. výběrem frézy s větším úhlem stoupání šroubovice ($44 - 45^\circ$ oproti 30° u základní řady) bylo dosaženo trvanlivosti zhruba 30-35 metrů, což odpovídá zlepšení produktivity o 50-75 % v porovnání s výsledky předchozí zkoušky. Toto zlepšení bylo nejvýznamnějším, a proto bylo rozhodnuto použít ještě větší úhel λ . Od výrobce PLANICKA TOOLS byly nabízeny frézy s úhlem stoupání šroubovice 55° , proto byla provedena ještě jedna zkouška s těmito frézami. Jak bylo možno očekávat, výsledky byly ještě uspokojivější, protože frézy tentokrát vydržely v řezu cca 45-50 metrů, což odpovídá zlepšení produktivity o dalších 30-60 % vzhledem k výsledkům předchozí zkoušky. Tím pádem lze konstatovat, že provedený vývoj celkem prokazuje svou opodstatněnost pro zlepšení trvanlivosti řezných nástrojů (viz Obrázek 30).



Obrázek 30 Průběh vývoje

Na obrázku je vidět skoro lineární průběh zlepšení výkonu vyvíjených fréz.

5. Technicko-ekonomické zhodnocení

Pro provedení porovnání ekonomické výhodnosti vyvíjených nástrojů bylo provedeno technickoekonomické zhodnocení. Budeme předpokládat, že se bude obrábět součást a pro její obrábění je potřeba ujet nástrojem 100 m dráhy.

Pro efektivní posouzení spočteme strojní hodinovou sazbu (SHS). Výpočet je uveden v tabulce (viz Tabulka 13). Strojní hodinová sazba 5osé frézky s CNC řídicím systémem činí dle výpočtu 1862 Kč/hod. Spolu s hodinovou sazbou obsluhy, která se odhaduje kolem 300 Kč/hod, předpokládáme celkové náklady na strojní čas 2162 Kč/hod.

Tabulka 13 Výpočty sazeb

Ukazatel	Zkratka	Hodnota
Výpočty časových fondů		
Počet směn	S	1
Počet pracovních dnů v roce	D	220
Počet pracovních hodin v 1 směně	H	7,5
Nominální časový fond	$T_n = S \times D \times H$	1650
Časové ztráty, % od T_n	Ztráty	0,25
Využitelný časový fond, [hod]	$T_v = T_n - \text{Ztráty}$	1237,5
Výpočty SHS		
5-osý stroj		
Cena stroje, [Kč]	C	13 000 000,-
Doba životnosti stroje, [let]	Ž	10
Kalkulované odpisy, [Kč]	$KA = C/\bar{Z}$	1 300 000,-
Roční úroková sazba	ÚS	7%
Kalkulované úroky, [Kč]	$KZ = (C/2) \cdot \bar{U}S$	455 000,-
Základní plocha, [m ²]	ZP	30
Náklady na 1 m ² na rok, [Kč]	NP	1 200,-
Prostorové náklady, [Kč]	KR	36 000,-
Náklady na energii [Kč/hod]	NE	100,-
Roční náklady na energii [Kč]	$KE = T_v \cdot NE$	123 750,-
Faktor náklad na opravy	f	0,3
Náklady na opravy, [Kč]	$KI = KA \cdot f$	390 000,-
Strojní hodinová sazba, [Kč/hod]	$SHS = KA + KZ + KR + KE + KI$	1 862,-
Hodinová sazba obsluhy, [Kč/hod]		300,-
Celkové náklady na výrobu, [Kč/hod]		2 162,-

Dále provedeme analýzu ekonomické efektivnosti dvou variant – základní varianty, která spočívá v použití neupravené, nepovlakované frézy od výrobce SCT s úhlem stoupání šroubovice 30° („Základní technologie“) a vyvíjené technologie: frézy od výrobce PLANICKA TOOLS s úhlem stoupání 55° s provedením povlakování TiSiN (HARDCUT PLUS) a rektifikací poloměru zaoblení ostří na 10–12 μm („Vyvíjená technologie“). Výpočty jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 14).

Tabulka 14 Výpočet technickoekonomického hodnocení

	jednotka	základní technologie	vyvíjená technologie
Otáčky vřetene stroje	min ⁻¹	4000	
Posuv na otáčku	mm/ot	0,16	
Posuvová rychlost	mm/min	640	
Čas obrábění 100 m	min	156	
Náklady na obrábění 100 m dráhy	Kč	5631,-	
Ujetá dráha frézy do $VB_{Bmax} = 100 \mu\text{m}$	m	4,2 ²	45 ³
Cena 1 frézy SK (FLC4L10030S)	Kč/ks	437,-	
VÝVOJ TECHNOLOGIE:			
Aplikace povlaku	Kč/ks		+ 80,-
Rektifikace bříty	Kč/ks		+ 200,-
Cena frézy s úhlem stoupání 55°	Kč/ks		878,-
Cena 1 frézy SK (vyvíjená technologie)	Kč/ks		1158,-
Počet výměn nástrojů na 100 m ujeté dráhy		22,8	1,2
Náklady na nástroje	Kč	9 968,-	1 415,-
Čas na výměnu 1 frézy	min	3	3
Celkový čas výměny nástrojů, min	min	68	4
Ztráty, způsobené výměnou nástrojů	Kč	2 466,-	132,-
Celkové náklady na obrábění:	Kč	18 065,-	7 179,-
Ušetřeno na 100 m dráhy:	Kč		10 886,-

Při analýze bylo provedeno několik zjednodušení. Prvním byla skutečnost, že při dosažení kritériálního opotřebení 100 μm se nástroj vymění, což ve skutečnosti bývá málokdy, a to kvůli tomu, že při tomto opotřebení je ještě zachována dostatečná řezivost. Dalším předpokladem bylo to, že základní technologie nebyla určena přímo na tvrdé obrábění, ale jednalo se pouze o aplikaci vývoje. Nicméně experimentálním způsobem byla stanovena trvanlivost základní frézy při kritériálním opotřebení 100 μm .

Výsledkem srovnání jsou celkové náklady, které u základní technologie činí cca 18 tisíc Kč oproti 7 tisícům Kč v případě vyvíjené technologie. Když porovnáme jenom náklady na nástroje, dostaneme, že u vyvíjené technologie jsou tyto náklady cca 7krát nižší než u základní technologie. Také je nutno uvést, že častá výměna nástrojů v případě základní technologie způsobuje více než 1 hodinu časových ztrát, což taktéž významně prodražuje výrobu.

² Viz. Obrázek 27

³ Viz. Obrázek 29

6. Závěr

V průběhu této práce bylo dosaženo výsledků, které lze charakterizovat jako významné zlepšení existující technologie tvrdého obrábění. Na základě teoretických předpokladů byly navrženy optimalizační postupy pro vývoj uvažovaného druhu obrábění. Následně byly experimentálně prokázány postupy, zvyšující trvanlivost řezných nástrojů. Po řadě byly provedeny zkoušky, jichž výsledkem byly: aplikace tenké vrstvy TiSiN – rektifikace poloměru zaoblení ostří na 10–12 μm – výběr úhlu stoupání šroubovice frézy 55 stupňů.

Dále bylo v technickoekonomické analýze prokázáno, že aplikace návrhu uvedeného v této diplomové práci umožňuje snížit náklady na obrábění více než 2krát. Toho lze dosáhnout díky výraznému zvýšení trvanlivosti nástroje (40–45 metrů ujeté dráhy po aplikaci vývoje oproti 5–10 metrům dráhy ujeté bez aplikace vývojových opatření) menšímu počtu výměn nástroje, které také způsobují časové ztráty. V přepočtu na 1 metr dráhy ujeté frézou lze náklady snížit na cca 72 Kč/metr z původních 180 Kč/metr. To odhaluje obrovský potenciál pro výrobu a obrábění zušlechťených polotovarů, např. zápustek, nebo vstřikovacích forem v zadávající firmě.

Na tuto práci by mohl být navázán i další vývoj. Například při aplikaci tenkých vrstev by bylo možno dosáhnout dalšího zlepšení volbou ne ternárních, ale kvarterních tenkých vrstev (např. TiAlSiN) a strukturování též vrstvením, tj. prokládáním dalšími typy tenkých vrstev v multivrstvém systému. Při rektifikaci břitů nástroje lze také aplikovat různé způsoby úpravy poloměrů zaoblení ostří konkrétně pro tvrdé obrábění neboli změnou tzv. faktoru symetričnosti (K). Například $K > 1$ je používán na nástroje pro větší tloušťky odřezávané vrstvy a hrubovací operace, a tím i pro stabilizaci břitu při větších řezných silách, což je případ tvrdého obrábění.

Seznam použité literatury

- [1] J. PAULO DAVIM. *Machining of hard materials*. London: Springer, 2011. ISBN 9-781-84996-449-4
- [2] *Platite. Compendium. 57th edition*. DR. TIBOR CSELLE (editor). Dostupné z <https://www.platit.com/en/downloads/Compendiums>
- [3] DOC. ING ANTON HUMÁR, CSc. *Technologie 1. Technologie obrábění – 1 část*. Dostupné z http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [4] AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky 1. vydání*. Praha: Scientia, 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [5] ISO 8688-2(1989) *Tool life testing in milling, part 1 and part 2; end milling*.
- [6] IONBOND. *Portfolio, informace o společnosti [online]*. Dostupné z <https://www.ionbond.com/coating-services/cutting-tools/coating-portfolio/>
- [7] PILSEN TOOLS. *Katalog výrobků [online]*. Dostupné z <http://www.pilsentools.cz/o-nas-2/katalogove-listy/>.
- [8] DEMIDOV VITALI. *Hard Machining Tests Using End-Mills with TiSiN, AlCrN and TiAlN Thin Films*. METAL 2018. 27th International Conference on Metallurgy and Materials. Conference proceedings.
- [9] FULEMOVÁ J. *Studie problematiky zvyšování řezivosti nástroje při frézování feriticko-martenzitické oceli P91*. Disertační práce. Plzeň 2017.
- [10] RNDr. MICHAL ŠÍMA, ROMAN JANKŮ. *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky*. MM Průmyslové spectrum: 2007 / 4, 25.04.2007 Trendy / Povrchové úpravy, Strana 72
- [11] PROF. ING. MIROSLAV PÍŠKA, CSc. *Konkurenceschopná výroba začíná kvalitním rezným nástrojem*. MM Průmyslové spectrum: 2015 / 5, 06.05.2015 v Trendy / Povrchové úpravy, Strana 62
- [12]. SCT. *Katalog výrobků [online]*. Dostupné z <http://www.sct-tools.com/en-en/downloads.html>

Seznam příloh

- Příloha č. 1 Zkouška č. 1 Průběžné výsledky měření opotřebení VB_{Bmax} v 1 a 2 části zkoušky.
- Příloha č. 2 Zkouška č. 2 Průběžné výsledky měření opotřebení VB_{Bmax}
- Příloha č. 3 Zkouška č. 3 Průběžné výsledky měření opotřebení VB_{Bmax}
- Příloha č. 4 Zkouška č. 4 Průběžné výsledky měření opotřebení VB_{Bmax} .
- Příloha č. 5 Rešerše nabízených tenkých vrstev od různých firem-povlakoven na českém trhu.
- Příloha č. 6 Vstupní protokol vzorků P3-P7 z mikroskopu ALICONA v rámci zkoušky č. 3
Výstupní protokol vzorků P3-P7 po omílání na zařízení OTEC z mikroskopu ALICONA v rámci zkoušky č. 3
Vstupní protokol vzorků R1-R5 z mikroskopu ALICONA v rámci zkoušky č. 3
Výstupní protokol vzorků R1-R5 po omílání na zařízení OTEC z mikroskopu ALICONA v rámci zkoušky č. 3
- Příloha č. 7 Popis tenké vrstvy HARDCUT PLUS z katalogu IONBOND s.r.o.
Popis tenké vrstvy CROSSCUT PLUS z katalogu IONBOND s.r.o.

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1 Zkouška č. 1 Průběžné výsledky měření opotřebení VB_{Bmax} v 1 a 2 části zkoušky

Číslo vzorku:		Číslo bříty	Strojní čas, [min]							
			2,69	5,38	10,75	13,44	16,13			
			Dráha nástroje, [m]							
			1,08	2,15	4,30	5,38	6,45			
			Opotřebení VB_{Bmax} [mm]							
HARDCUT PLUS	HCP V1	č. 1	praskla na 750 mm							
		č. 2								
		č. 3								
		č. 4								
	HCP V2	č. 1	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11			
		č. 2	0,05	0,08	0,08	0,09	0,12			
		č. 3	0,06	0,09	0,1	0,14	0,14			
		č. 4	0,08	0,08	0,1	0,13	0,13			
	Průměr ze 4 břitů		0,065	0,0825	0,0925	0,115	0,125			
	CROSSCUT PLUS	CCP V3	č. 1	0,06	0,1	0,11	0,14	0,14		
č. 2			0,08	0,11	0,14	0,16	0,17			
č. 3			0,07	0,1	0,1	0,15	0,15			
č. 4			0,07	0,1	0,12	0,16	0,17			
Průměr 4 břitů		0,07	0,1025	0,1175	0,1525	0,1575				
CCP V4		č. 1	0,08	0,1	0,14	0,16	0,17			
		č. 2	0,08	0,09	0,13	0,14	0,16			
		č. 3	0,06	0,1	0,12	0,15	0,15			
		č. 4	0,06	0,09	0,11	0,15	0,18			
Průměr 4 břitů		0,07	0,095	0,125	0,15	0,165				

Aplikovaný povlak číslo vzorku	Břit	Strojní čas, min									
		2,69	5,38	8,06	10,76	13,45	16,14	18,83	21,52	24,21	26,9
		Dráha nástroje, [m]									
		1,08	2,15	3,23	4,30	5,38	6,45	7,53	8,60	9,68	10,75
		Opotřebení VB_{Bmax} mm									
HCP V5	č. 1	0,03	0,05	0,05	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,09
	č. 2	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,10	0,09	0,08
	č. 3	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07
	č. 4	0,01	0,05	0,04	0,05	0,06	0,06	0,09	0,07	0,08	0,09
	Průměr	0,025	0,040	0,046	0,054	0,064	0,066	0,076	0,078	0,078	0,081
TiAlN V6	č. 1	0,02	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,09	0,09	0,13
	č. 2	0,02	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,11	0,09	0,11
	č. 3	0,02	0,06	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	0,09	0,14
	č. 4	0,02	0,04	0,07	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12
	Průměr	0,020	0,050	0,056	0,061	0,074	0,083	0,085	0,095	0,094	0,124

PŘÍLOHA 2 Zkouška č. 2 Průběžné výsledky měření opotřebení VB_{Bmax}

Rádius zaoblení ostří/ číslo vzorku	cyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	počet přejezdů	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10	20
	přejezdů celkem	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	100
	strojní čas, min	2,69	2,69	2,69	2,69	5,38	5,38	5,38	5,38	5,38	5,38	10,75
	strojní čas celkem, min	2,69	5,38	8,06	10,75	16,13	21,50	26,88	32,25	37,63	43,00	53,75
	dráha nástroje, m	1,08	1,08	1,08	1,08	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	4,30
	dráha nástroje celkem, m	1,08	2,15	3,23	4,30	6,45	8,60	10,75	12,90	15,05	17,20	21,50
	Břit	Opotřebení VB_{Bmax} mm										
7,1 μm /V6	č. 1	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09
	č. 2	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08
	č. 3	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09
	č. 4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08
	Průměr	0,020	0,024	0,030	0,038	0,050	0,050	0,063	0,070	0,073	0,080	0,085
8,2 μm /V7	č. 1	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,07	0,10
	č. 2	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,10
	č. 3	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,09
	č. 4	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05	0,05	0,07	0,08	0,08	0,10
	Průměr	0,022	0,027	0,033	0,040	0,050	0,048	0,055	0,065	0,083	0,080	0,098
9,5 μm /V8	č. 1	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,09
	č. 2	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09
	č. 3	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,10
	č. 4	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09
	Průměr	0,022	0,027	0,033	0,040	0,040	0,050	0,058	0,065	0,070	0,078	0,093
11,8 μm /V9	č. 1	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	0,07	0,08	0,10
	č. 2	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,06	0,09
	č. 3	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09
	č. 4	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08	0,09
	Průměr	0,022	0,028	0,033	0,038	0,043	0,040	0,055	0,058	0,065	0,075	0,093
13,4 μm /V9	č. 1	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,07	0,10
	č. 2	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,08	0,08	0,10
	č. 3	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,07	0,08	0,10
	č. 4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,07	0,08	0,10
	Průměr	0,025	0,032	0,038	0,040	0,040	0,043	0,053	0,058	0,075	0,078	0,100

PŘÍLOHA 3 Zkouška č. 3 Průběžné výsledky měření opotřebení VB_{Bmax}

Stoupání šroubovice/ číslo vzorku	cyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	14	15	
	počet přejezdů	5	5	5	5	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20
	přejezdů celkem	5	10	15	20	30	40	50	60	60	80	100	120	140	160
	strojní čas, min	1,68	1,68	1,68	1,68	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	6,72	6,72	6,72	6,72	6,72
	strojní čas celkem, min	1,68	3,36	5,04	6,72	10,08	13,44	16,80	20,16	26,88	33,59	40,31	47,03	53,75	
	dráha nástroje, m	1,08	1,08	1,08	1,08	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30
	dráha nástroje celkem, mm	1,075	2,15	3,23	4,30	6,45	8,60	10,75	12,90	17,20	21,50	25,80	30,10	34,40	
	Břit	Opotřebení VB _{Bmax} mm													
30°/R1	č. 1	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,06	0,07	0,10					
	č. 2	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07	0,07	0,09					
	č. 3	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,06	0,07	0,07	0,10					
	č. 4	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,11					
	Průměr	0,018	0,023	0,030	0,038	0,048	0,053	0,065	0,070	0,100					
30°/R2	č. 1	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,10					
	č. 2	0,03	0,02	0,03	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,10					
	č. 3	0,01	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09					
	č. 4	0,02	0,03	0,05	0,04	0,05	0,06	0,08	0,08	0,10					
	Průměr	0,016	0,025	0,040	0,045	0,055	0,063	0,075	0,078	0,098					
30°/R3	č. 1	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07	0,07	0,08	0,10				
	č. 2	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,07	0,09	0,09				
	č. 3	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,08	0,11				
	č. 4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,07	0,06	0,07	0,08	0,10				
	Průměr	0,019	0,028	0,031	0,038	0,043	0,063	0,065	0,068	0,083	0,100				
30°/R4	č. 1	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10				
	č. 2	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,08	0,09	0,10				
	č. 3	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,09				
	č. 4	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,07	0,10	0,10				
	Průměr	0,016	0,026	0,030	0,043	0,050	0,060	0,068	0,075	0,093	0,098				
30°/R5	č. 1	0,02	0,03	0,02	0,04	0,04	0,07	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10			
	č. 2	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,06	0,06	0,08	0,09	0,10	0,10			
	č. 3	0,03	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,06	0,08	0,10	0,09	0,09			
	č. 4	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,09	0,10	0,10			
	Průměr	0,022	0,026	0,029	0,033	0,043	0,060	0,063	0,075	0,090	0,095	0,098			
44-45° / P3	č. 1	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,06	0,08	0,10		
	č. 2	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,06	0,09	0,10		
	č. 3	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,09	0,08	0,09		
	č. 4	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08	0,07	0,10		
	Průměr	0,019	0,026	0,028	0,033	0,040	0,048	0,053	0,058	0,070	0,073	0,080	0,098		
44-45° / P4	č. 1	0,02	0,03	0,02	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,10		
	č. 2	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05	0,06	0,07	0,06	0,08	0,08	0,10		
	č. 3	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05	0,06	0,05	0,08	0,07	0,09		
	č. 4	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,10		
	Průměr	0,017	0,023	0,026	0,035	0,043	0,050	0,053	0,060	0,060	0,075	0,080	0,098		
44-45° / P5	č. 1	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,09	0,11	
	č. 2	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,10	
	č. 3	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,09	
	č. 4	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,05	0,05	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	
	Průměr	0,020	0,024	0,022	0,030	0,038	0,053	0,050	0,055	0,065	0,070	0,080	0,093	0,100	
44-45° / P6	č. 1	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,09	0,10		
	č. 2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,09	0,09		
	č. 3	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,09	0,10		
	č. 4	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,07	0,06	0,07	0,07	0,08	0,10		
	Průměr	0,031	0,033	0,033	0,038	0,045	0,050	0,060	0,060	0,068	0,070	0,088	0,098		
44-45° / P7	č. 1	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	
	č. 2	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,07	0,08	0,10	0,09	
	č. 3	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05	0,05	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	
	č. 4	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,07	0,07	0,07	0,10	0,10	
	Průměr	0,025	0,027	0,030	0,033	0,038	0,038	0,048	0,050	0,055	0,068	0,078	0,095	0,098	

PŘÍLOHA 4 Zkouška č. 4 Průběžné výsledky měření opotřebenosti VB_{Bmax}

Stoupání šroubovice/ číslo vzorku	cyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	počet přejezdů	5	5	5	5	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20	20	20	10	10
	přejezdů celkem	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200	220	230	240	
	strojní čas, min	1,60	1,60	1,60	1,60	3,20	3,20	3,20	3,20	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	3,20	3,20
	strojní čas celkem, min	1,60	3,20	4,80	6,41	9,61	12,81	16,02	19,22	25,63	32,03	38,44	44,84	51,25	57,66	64,06	70,47	73,67	76,88	
	dráha nástroje, m	1,03	1,03	1,03	1,03	2,05	2,05	2,05	2,05	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	2,05	2,05
	dráha nástroje celkem, m	1,03	2,05	3,08	4,10	6,15	8,20	10,25	12,30	16,40	20,50	24,60	28,70	32,80	36,90	41,00	45,10	47,15	49,20	
	Břit	Opotřebenost VB _{Bmax} mm																		
M1	zub 1	0,02	0,03	0,02	0,04	0,04	0,05	0,04	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,1	0,12		0,11	
	zub 2	0,01	0,01	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,09	0,08		0,12	
	zub 3	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,07	0,09	0,08		0,15	
	zub 4	0,02	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,07	0,05	0,08	0,08	0,08	0,09		0,09	
	průměr	0,018	0,023	0,025	0,035	0,040	0,048	0,048	0,053	0,055	0,058	0,065	0,065	0,073	0,073	0,090	0,093		0,118	
M2	zub 1	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,11	0,11			
	zub 2	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,1			
	zub 3	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,09	0,1			
	zub 4	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,1			
	průměr	0,015	0,020	0,025	0,033	0,040	0,045	0,048	0,053	0,053	0,060	0,065	0,063	0,070	0,073	0,090	0,103			
M3	zub 1	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06		0,08		0,07				
	zub 2	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06		0,07		0,12				
	zub 3	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06		0,09		0,07				
	zub 4	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06		0,08		0,12				
	průměr	0,018	0,020	0,023	0,035	0,045	0,048	0,053	0,050	0,058	0,053	0,060		0,080		0,095				
M4	zub 1	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06		0,08		0,12		0,13	0,14		
	zub 2	0,02	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05	0,05		0,06		0,07		0,08	0,09		
	zub 3	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06		0,05		0,07		0,06	0,09		
	zub 4	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07		0,07		0,07		0,07	0,09		
	průměr	0,020	0,028	0,033	0,035	0,043	0,050	0,053	0,055	0,058	0,060		0,065		0,083		0,085	0,103		
M5	zub 1	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07		0,09		0,07		0,10			
	zub 2	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07		0,08		0,06		0,08			
	zub 3	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05		0,06		0,10		0,12			
	zub 4	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,06	0,06	0,05	0,07		0,07		0,07		0,08			
	průměr	0,015	0,025	0,030	0,035	0,045	0,048	0,053	0,053	0,055	0,065		0,075		0,075		0,095			

PŘÍLOHA 5 Rešerše nabízených tenkých vrstev od různých firem-povlakoven na českém trhu

	Název povlaku	TYP	TL, μm	TVRDOST	Ra/f-ocel	*C _{rad} ábita	*C _{povlakování}	BARVA	POVLAK				Substrat	PMKNSH	Oblast	Poznámka	
SHM ŠUMPERK	VANADIN	PVD	-	-	-	-	-		vysoký obsah CrVN	TiAlSiN	TiN	S			Tlakové liti hliníku	vysokeplotní kluzná vrstva	
	TripleCoating Si	PVD	-	-	-	-	-		nanokompozit Si	AlTiN	TiN	S	H			nad 60HRC, intenzivní podmínky	
	TripleCoating Cr	PVD	-	-	-	-	-		nanokompozit CrAlSiN	AlTiN	TiN	S	M, H			nejmodernější povlak, náročné aplikace	
	MARWIN Si	PVD	2-3	45GPa (4500 HV)	0,1-0,2	>1000				AlTiSiN	TiAlSiN	TiN	S		Fr, Vr, Vystr	universální povlak	
	MARWIN G	PVD	2-3	38GPa (3800 HV)	0,1-0,2	>900			gradient TiAlN - AlTiN		TiN	S		Fr, Vrt, Tvař, Střih		universální povlak	
	ALWIN	PVD	2-4,5	35GPa (3500 HV)	0,15-0,2	>1000			CrAlSiN		CrN	S		Fr, Vrt, Odval, Tvař, Střih		odolnost proti oxidaci a nalepování	
	TiN	PVD	2-3	25GPa (2500 HV)	0,1-0,2	550				TiN						méně náročné aplikace, nízké vc	
	DARWIN	PVD	1-6	43GPa (4300 HV)	0,05-0,10	>900						AlTiN	S		Vrt, Záv, Fr, Vystr	velmi hladký povrch	
	TiCN MP	PVD	1-4	34GPa (3400 HV)	0,2-0,25	400						gradient TiCN	TiN	S		Fr, Záv, Střih, Tvař	
	LUBRIK G	PVD	-	-	-	-	-	-	oxidy + C	TiAlN - AlTiN		TiN	S	N (barevné kovy)	Zav		jako poslední - kluzná vrstva s obsahem oxidů a uhlíku
Ionbond	Hardcut	PVD arc	2-4	3500 HV005	f<0,4	<1100	450-550		TiSiN (nanokristaly Si3N4 + matice TiN)				S	H, S(+Ni, +Ti)	Odval	může být i dokončení vc100-300 mmin	
	Hardcut Plus	PVD arc	2-4	3500 HV002	f<0,4	<1100	450-500		TiSiN (nanokristaly Si3N4 + matice TiN)				S	S(+Ni, +Ti)	Fr, odval	bez mazání, nasucho	
	Crosscut	PVD arc	2-4	3000 HV005	f<0,55	<1050	450-500		AlCrN				S		Fr za vyšších vc, odval	žárovzdorné, otěruvzdorné	
	Crosscut Plus	PVD arc	2-4	3200 HV002	f<0,55	<1050	450-500		AlCrN				S	P, M, K, S(+Ni, +Ti)	Vrt, Fr, odval	universální povlak, středně - vysoké vc	
	Maximizer	PVD arc	2-4	3500 HV005	f<0,6	<850	450-550		Si - DLC				S	P, M, S(+Ni)	Vrt, Fre, Odval	střední rychlosti 50-150mmin, až50HRC	
	Maximizer Plus	PVD arc	2-4	3100 HV002	f<0,6	<850	450-550		AlTiN				S	P, M, K	Vrt, Fre	žárovzdorné, otěruvzdorné	
	Tetrabond	PVD Arc	0,5-2	5000 HV005	f<0,15	<750	300		ta-C (DLC)				S	N(Si12+), S, kompozity	všechny	non-ferrous, ostré hrany,	
	Tetrabond Plus	PVD Arc	0,5-1,5	5000+ HV005	f<0,1	<500	180		ta-C (DLC)				S	N(Si12+), S, kompozity	všechny	plasty, lepkavé materiály. Velmi dobrá přilnavost	
	Ionbond 01	PVD Arc	2-4	2800 HV005	f<0,5	<500	450-550		TiN				S	P	Vrt, Fre, Soustr	nízké a střední vc<100mmin	
	Gühring	TiN	PVD	1,5-4	2400 HV005	f<0,5	<600	500		TiN				S	P, M, K, N, plast	Vrt, Záv, Fr, Vystr	univerzální povlak
TiAlN		PVD	1,5-4	3300 HV005	f<0,5	<800	500		TiAlN				S	P, M, K	Vrt, Fr, Záv, Vystr	tvorba regenerativu Al2O3 za vyšších teplot	
Super A		PVD	1,5-4	3800 HV005	f<0,6	<900	500		AlTiN				S	S, H	Vrt, Fr, Vystr	shodný s TiAlN, ale větší obsah Al (+50%)	
Molyglide		PVD	1,0	na	f<0,1	<800	150				MoS2	TiAlN	S	K, N	Vrt, Záv, Vystr	suché obr., samomazný povlak	
Firex		PVD	1,5-4	3300 HV005	f<0,5	<800	500	multi	TiN	TiAlN	TiN	TiAlN	TiN	S	P, K, S(+Ni)	Vrt, Záv, Fr, Vystr, odval, prot	universální použití
TiCN		PVD	1,5-5	3000 HV005	f<0,25	<450	500		gradient-layer TiCN				S	P, M, N, plasty	Fr, Záv, Vystr, prot	zvlášť pro zavitování, menší teploty	
nano-Firex		PVD	1,5-4	3300 HV005	f<0,5	<800	500	multi	TiN	TiAlN	TiN	TiAlN	TiN	S	P, K, S(+Ni)	Vrt, Záv, Fr, Vystr, odval, prot	firex + 20-50% životnost
nano-Si		PVD	3-5	5500 HV005	f<0,5	<800	500		nano-layer TiAlSiN				S	K, S, H, kompozity	Fr, Vrt		
nano A		PVD	1,5-4	3800 HV005	f<0,6	<900	500		AlTiN				S	M, S(+Ni)			
TiN		PVD	1-4	2400 HV005	f<0,55	<600	220-240		TiN				S	P		univerzální použití	
LISS	TiCN	PVD	1-4	3500 HV005	f<0,2	<400	480		TiCN				S	P, N	Střih, záv, tvář	odolnost vůči abraze při běžných T s nízkým f	
	TiCN MP	PVD	1-4	3200 HV005	f<0,2	<400	480		TiCN				S	P, N	Tvař, lemování, kalibr.	vhodná tvrdost/houževnatost	
	ZrN	PVD	1-4	2000 HV005	f<0,4	<550	480		ZrN				S	N, Al (málo Si), plast, Cu		korozní odolnost, odolnost vůči adhezi N-kovů	
	CrN	PVD	1-7	1800 HV005	f<0,3	<700	220-480		CrN				S	N, měkké materiály	vstříkování lepidel, plastů	otěruvzdornost, odolnost vůči studených svárů	
	TiAlCN	PVD	2-4	3300 HV005	f<0,3	<500			TiAlCN				S	P	Fr, Záv, tvař.	universální povlak, vysoká houževnatost, nízký f	
	TiAlN	PVD	1-4	2800 HV005	f<0,6	<700	480		TiAlN				S	P	Fr, Vrt, Zahřub	universální povlak	
	AlTiN	PVD	1-4	3300 HV005	f<0,7	<850	480		AlTiN				S	P	Vrt, Fr, odval	vyšší výkon pro vyšší pevnost a tvrdost, pro malé chlazení	
	AlTiN G	PVD	1-4	3800 HV005	f<0,7	<900	480		AlTiN				S	formy pro plasty	Vrt, Fr	vyšší výkon pro vyšší pevnost a tvrdost, pro malé chlazení	
	nACo	PVD	1-4	4500 HV005	f<0,45	<1200	480		nanokompozit AlTiN + Si3N4				S	P, K, H, M	střihání P s vysokou pevností	obr. Zásucha, extrémně vysoká tep. Odolnost	
	nACRo	PVD	1-4	4000 HV005	f<0,35	<1100	480		nanokompozit AlCrN + Si3N4				S	P, houž + těžkoobr. Mat		odolnost proti abraze. Poškození +vys. tepelná odolnost	
	nACo3	PVD	1-4	4500 HV005	f<0,45	<1200	480		nanokompozit TiN+AlTiN+nACo				S	P, K, H	vhodná i pro střihání	obr. Zásucha	
	nACRo4	PVD	2-4	4000 HV005	f<0,35	<1100			novinka 2015				S	S, N, Al tlakové liti		4generace, houževnatý, odolný vůči abrazi, vysoké T	
	FeinAl	PVD	2-4	3500 HV005	f<0,6	<1000	480		Feintool A.G.				S		přesné střihání	odolnost vůči abraze	
	AIXN3	PVD	1-4	3200 HV005	f<0,4	<900	480		AlCrN				S		Odval, střihání pevných mat.	odolnost vůči abraze při vysokých T	
	Duplex TiCN	PVD	1-4	3700 HV005	f<0,2	<400	480		plazmová nitrídace + TiCN				S		tvař, střih	zvýšení životnosti i při náročných aplikacích	
	TiXCo	PVD	1-4	4400 HV005	f<0,55	<1200	480		novinka 2014				S	H>60HRC	soustr, fr, zav, vrt		
	MOVIC	PVD	0,5-2	-	f<0,1	<400	150		na bazi MoS2				S		Zav, tvaření zastudena	samomazný, suché maz., možnost kombinace s jinými vrst.	
	DLC	PVD	1-4	2500 HV005	f<0,15	<400	250		na bazi C ke snížení tření				S		pohyb. Části forem a strojů		
BALINIT	ALCRONA	PVD		36 GPa		<1100			AlCrN				S	P, K	Fr, Vrt, odval, střih, tlak. liti	univers. povlak za vyšších vc nasucho a namokro	
	ALDURA	PVD		34 GPa		>1100			AlCrN				S	H 65HRC	Fr	stabilní, odolnost proti oxidaci	
	ALNOVA	PVD		38 GPa		>1100			AlCrN				S	P, M, K, S(+Ti), H 45-52HRC	Fr	stabilní při náhle změně teploty, pro namáhavá ostří	
	ALTENZA	PVD		40 GPa		>1100			AlCrN				S	P	odval	vyroba ozubení, snížení tepeln. rázů na substrat	

OERLIKON balzers	BALINIT FUTURA N	PVD		33 GPa		900			TiAlN	S	P, M	tváření, přesné komponenty	ochrana proti abrazi a erozi, také pro vstřík. plastu	
	BALINIT LATUMA	PVD		35 GPa		1000			TiAlN	S	M, K, H	Vrt, Fr, soustr	namokro, nasucho. Odolnost proti opotř. a o oxidaci	
	BALINIT LUMENA	PVD		33 GPa	f0,3-0,35	900			TiAlN	S	P	vstříkací formy	vyšší tvrdost, ochrana proti opotř., lepší tok taveniny	
	BALINIT PERTURA	PVD		35 GPa		1000			TiAlN	S	P, K, M	vysokovýkonné vrt	hladký povrch, stabilita, odolnost proti otěru	
	BALINIT C	PVD		8-12 / 12-15 GPa	f0,1-0,2	300			a-C:H:Me (WC/C)	S		odval, stříhání, vstřík. Plástů	nízká adhezivní opotř., nízký f i nasucho	
	BALINIT C STAR	PVD		8-12 / 12-15 GPa	f0,1-0,2	300			CrN + a-C:H:Me (WC/C)	S	P, N, M		pro vysoké tlaky, potravinářský průmysl, komponenty	
	BALINIT CAVIDUR	PVD		25-35 GPa	f0,1-0,2				a-C:H (DLC)	TiN	S		auto komponenty a díly	snížení f
	BALINIT DLC	PVD		15-25 GPa	f0,1-0,2	300			a-C:H (DLC)		S		auto komponenty	snížení f, pro vysoké rychlosti, ochrana proti otěru
	BALINIT DLC STAR	PVD		15-25 GPa	f0,1-0,2	300			CrN + a-C:H (DLC)		S		komponenty motorů	ještě lepší tribologické vlastnosti než u DLC
	BALINIT DIAMOND	PVD	6,8,12	80-100 GPa		600			C (sp3) - nanokrystalický		S	FRP/GFRP, Al+Si, kompozit	Vrt, Fre	pro vysoce abrazivní materiály
	BALINIT DYLYN	PAVD		15-20 GPa	f<0,2	350			a-C:H:Si		S	plasty a polovodiče	Vrt, Fre	pro vysoce abrazivní materiály
	BALINIT HARD CAR	PVD		40-50 GPa		500			ta-C (DLC)		S	FRP/GFRP, Al, Ag, Au, dřev	Vrt, Fre	ostřejší břity, stabilita při změně teploty
	BALINIT TRITON	PVD		15-25 GPa	f0,1-0,2	300			a-C:H		S		stříhání, vstříkávání plastů	vhodné pro systémy bez mazání
BALINIT A	PVD		30 GPa	f0,6	600			TiN		S		Vrt, Fr, Záv, Odval	univerzální povlak	
BALINIT B	PVD		37 GPa		400			TiCN		S	P, M	Záv, Lis, Tvař	vysoká tvrdost, dobrá houževnatost	
VUHŽ	BASICCOMP	PVD	1-6	2500 HV0025	f0,4	600	150-600		TiN	S	P	děrování a tvař zastudena	zpracování mat. s nízkou tvrdostí	
	STADARDCOMP	PVD	1-4	3000 HV0025	f0,4	600	do 600		TiCN	S		žezné, střížné, lisovací nástroje		
	ALUCOMP	PVD	1-6	2500-3500 HV0025	f0,4	900	do 600		AlTiN	S		vrt, soustr zasucha	univerzální povlak, vyšší oxid. odolnost než u TiAlN	
	SPEEDCOMP	PVD	1-8	2500-3500 HV0025	f0,4	800	do 600		TiAlN	S	P, K	Fr, vrt, vstřík. Plástů, lis. plechů	vysoké Vc, T. Vynikající houževnatost	
	PRESSCOMP	PVD	1-10	1500-2500 HV0025	f0,4	700	150-450		CrN	S		tváření, vstříkávání, lisování, díly		
	ANTICOROCOMP	PVD	10-30	1500-2500 HV0025	f0,5	700	150-450		CrN	S			antikorozní povlak	
	MULTICOMP	PVD	2-6	2500-3500 HV0025	f0,4	800	do 600		TiN	TiAlN	S		povlakování ořezávacích matic	
	DLC COMP	PVD/PACVD	1-3	2000-4000 HV0025	f0,05-0,15	350	160-300		a-C:H (DLC)		S		lis. Gumy,	potravinářský průmysl,
	DLC SILLCOMP	PVD/PACVD	1-5	1500-2500 HV0025	f0,02-0,1	450	160-300		Si - DLC		S		auto díly, kluzné elementy	
	DLC HARDCOMP	PVD	1-3	4000-7000 HV0025	f0,05-0,15	300	80-200		ta-C		S	graft, N	nástroje z tvrdokovu	
	HLF COMP	PVD	1-5	2300 HV0025	f0,2	350	500		DLC		S	N	kluzné a valivé elementy	
	MAXCOMP	PVD	1-5	2300 HV0025	f0,2	350	150-300		W-C:H		S		kluzné a valivé elementy	
	HOTCOMP	PVD	1-6	3500 HV0025	f0,5	1500	do 600		TiSiN		S	H		pro velmi tvrdé materiály
	UNICOMP	PVD	1-6	3000 HV0025	f0,35	1100	do 600		AlCrN		S	Al, H	Tlakové liti hliníku	vysokopevnostních materiálů
ZIRCOMP	PVD	1-4	1800 HV0025	f0,5	550	500		ZrN		S	Al, Cu, plasty	Obrábění a tváření		
böhrler udeholm	TiN	PVD	1-4	2300 HV	f<0,6	<500			TiN	S	P	Vrt, tvař, odval	nízké a střední vc	
	TiCN	PVD	1-4	3500 HV	f<0,2	<400			TiCN	S	P	Fr, Vrt, Soustr, Záv	vysoká tvrdost, přilnavost, tep. Vodičnost, nízké f	
	EXXTRAL – plus	PVD	2-5	3300 HV	f<0,7	<800			AlTiN + Cr	S	P, N	Vrt	zasucha, dobrá kvalita povrchu	
	SISTRAL	Eifeler Arc	1-4	3400 HV	f<0,7	<900				S	H	Fr		
	EXXTRAL – silver		2-4	3300 HV	0,4vs100C	<800			vícevrstvá AlTiCrN	S	N, K	Fr	odolnost proti oxidaci	
	VARIANTIC		2-4	3500 HV	0,2vs100C	<800			TiCN	TiAlN	S	P, M		omezení tření, odolnost proti otěru, houž. Tvrdý
	Supral	Eifeler Arc	2-5	3500 HV	f<0,5	<800			základ - TiAlN		S	P, K	Fr, Vr, Soustr, odval	vysoká rychlost, min chlazení, nasucho
	CrN		1-6	2000 HV	f<0,3-0,4	<600			CrN		S	N (slitný Ti a Cu)	Tlakové liti Al, Mg	odolnost proti otěru, chem odolnost, nízký f
	FORMATIC	PVD	2-5	3900 HV	f<0,2	<350			TiC	TiN	S	M	tažení, vysek, lisov, tvař zastudena	pro vysoce pevné plechy, malé nalepování
	DUMATIC	PVD	35	3700 HV	f<0,2	<400			TiC kompozit		S	M	tažení, stříh, lisov,	omezené nalepování, varianta FORMATIC
	TOPMATIC	PVD	5-10	2800 HV	f<0,6	<700			TiAlN		S	P	tváření plechů, kování zastud.	přilnavost, houževnatost
	TIGRAL	PVD	3-5	3300 HV	f<0,6	<900			AlCrTiN		S	P, M	Soustr, fréz., kování	odolnost proti oxidaci a otěru
	ZrCN	Eifeler Arc	1-4	3100 HV	f<0,5	<600			ZrCN		S	N (Al-Si8%) , polymery	Fr	korozí-, otěruvzdornost, odoln. Proti nalepování
	SUCASLIDE	Eifeler Arc	0,5-2,0	1900 HV0,01	<0,1vsCarb	<200			amorfnní karbonové a-C:Me		S		tváření	velmi nízký f, nízká adheze
	MoST	hagnetz rozst	1,0	<1000 HV	0,08vs100Cr	<400			na bázi MoS2		S	P, M	tváření, stříhání, kování	zlepšení třecích sil CVD nebo PVD povlaku
	TiC	CVD	až9	<4000 HV	f<0,2	<300			TiC		S	P, M	tažení, lisování, tváření	dobrá přilnavost, vysoká tvrdost
	TiN-TiC	CVD	až9	<3000 HV	f<0,2	<450			TiC	TiN	S	P, M	tažení, lisování, tváření	zpracování silných ocelových plechů při vyšších tlacích
TiC-TiN	CVD	až9	2700 HV	f<0,6	<500			TiC	TiN	S	P pokoveno Al,Zn, H	tažení, lisování, tváření	zpracování silných ocelových plechů při vyšších tlacích	

Příloha 6 Vstupní protokol vzorků P3-P7 z mikroskopu ALICONA v rámci zkoušky č. 3

Ionbond Czechia s.r.o.
Dolní Bečva 20
75655 Dolní Bečva

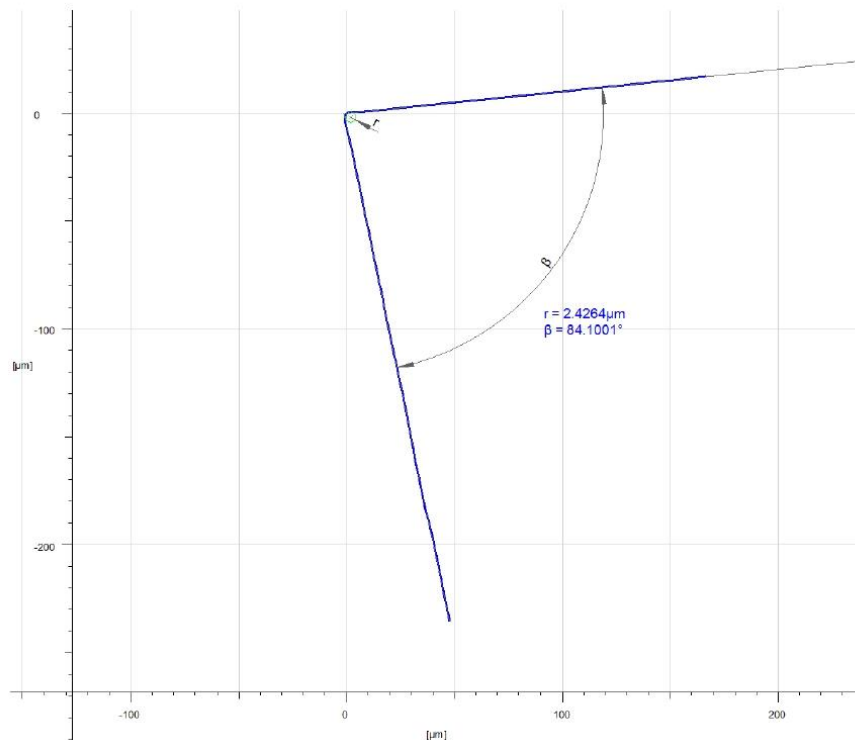
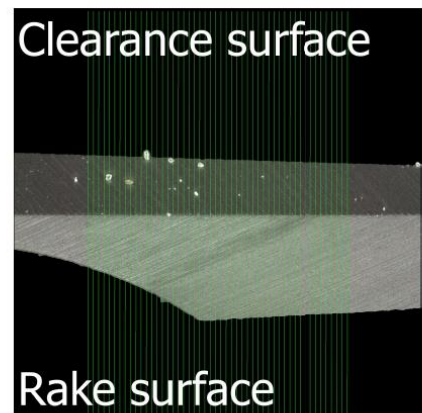


EdgeMasterModule Measurement Report

Cutting Edge Measurement

ReferenceType:	Edge Break Measurement 20x
Number of extracted profiles:	50
Edge profile type:	No Bevel
Date of measurement:	15.10.2018 13:29:00
Operator:	Administrator

Name	Value	[u]	Status	Nom.	Lower	Upper	Description
r	2.4264	µm	NOK	10.0000	8.0000	12.0000	Mean radius of mean edge
β	84.1001	°	NOK	90.0000	89.0000	91.0000	Wedge angle
Sc	4.5518	µm	OK	10.0000	0.0000	20.0000	Dist. apex to end of clearance roundness
Sy	1.8883	µm	OK	10.0000	0.0000	20.0000	Dist. apex to end of rake roundness
K	0.4148	µm	NOK	1.0000	0.5000	1.5000	Symmetry of cutting edge
Lr	1.2140	µm	NOK	5.0000	4.0000	6.0000	Min. dist. of edge to apex
WAr	2.1708	µm	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Edge width
Fc	-	n.a.		0.5000	0.0000	1.0000	Indicates whether the shape of the edge is like a circle (Fc=1) or like a line (Fc=0)
x1 negative	0.0000	µm	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Distance from exitpoint 2 to corridor 1 (conform to Bosch N42AP 620)
x2 negative	0.0000	µm	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Distance from exitpoint 1 to corridor 2 (conform to Bosch N42AP 620)
B1	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak normal length 1 (conform to ISO 13715)
B2	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak normal length 2 (conform to ISO 13715)
B1p	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak projected length 1
B2p	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak projected length 2
Bd	0.0000	µm	NOK	70.0000	40.0000	100.0000	Edgebreak width
Bd1	0.0000	µm	OK	0.0000	-10.0000	10.0000	Average deviation of the profile to the breakline
Bda	0.0000	µm	OK	0.0000	-10.0000	10.0000	Average absolute deviation of the profile to the breakline
Bf	0.0000	µm	NOK	0.5000	0.0000	1.0000	Robust characterization of the edge roundness
β1	-	n.a.		120.0000	-3.3393e-6	240.0000	Edgebreak angle 1
β2	-	n.a.		120.0000	-3.3393e-6	240.0000	Edgebreak angle 2
γB	45.0000	°	OK	120.0000	2.0000	238.0000	Angle between edge break line and rake surface reference direction
Esq	0.0442	µm	OK	0.0000	0.0000	1.0000	Form deviation of circle (RMS)
Ftype	Waterfall	OK					Estimated Curvature



Measurement performed by Alicona EdgeMasterModule, 15.10.2018 13:29:01

Výstupní protokol vzorků P3-P7 po omílání na zařízení OTEC z mikroskopu ALICONA
v rámci zkoušky č. 3

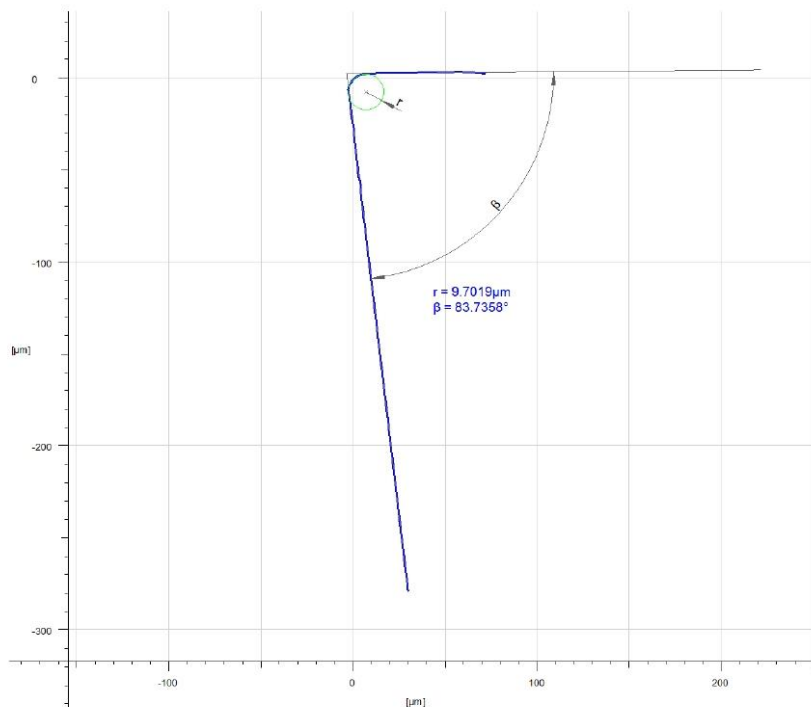
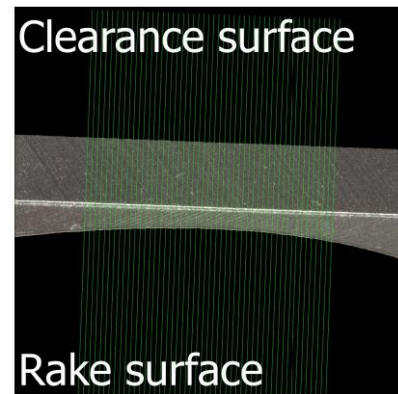
Ionbond Czechia s.r.o.
Dolní Bečva 20
75655 Dolní Bečva



EdgeMasterModule Measurement Report Cutting Edge Measurement

ReferenceType: Edge Break Measurement 20x
Number of extracted profiles: 50
Edge profile type: No Bevel
Date of measurement: 15.10.2018 14:20:15
Operator: Administrator

Name	Value	[u]	Status	Nom.	Lower	Upper	Description
r	9.7019	µm	OK	10.0000	8.0000	12.0000	Mean radius of mean edge
β	83.7358		NOK	90.0000	89.0000	91.0000	Wedge angle
Sa	10.2072	µm	OK	10.0000	0.0000	20.0000	Dist. apex to end of clearance roundness
Sy	11.3065	µm	OK	10.0000	0.0000	20.0000	Dist. apex to end of rake roundness
K	1.1694	OK	1.0000	0.5000	1.5000	Symmetry of cutting edge	
Ar	4.8118	µm	OK	5.0000	4.0000	6.0000	Min. dist. of edge to apex
Wdr	8.6495	µm	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Edge width
Fc	-	n.a.	0.5000	0.0000	1.0000	Indicates whether the shape of the edge is like a circle (Fc=1) or like a line (Fc=0)	
x1 negative	0.0000	µm	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Distance from exitpoint 2 to corridor 1 (conform to Bosch N4ZAP 620)
x2 negative	0.0000	µm	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Distance from exitpoint 1 to corridor 2 (conform to Bosch N4ZAP 620)
S1	9.2000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak normal length 1 (conform to ISO 13715)
B2	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak normal length 2 (conform to ISO 13715)
B1p	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak projected length 1
B2p	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak projected length 2
Bw	0.0000	µm	NOK	70.0000	40.0000	100.0000	Edgebreak width
bd	0.0000	µm	OK	0.0000	-10.0000	10.0000	Average deviation of the profile to the breakline
Bda	9.3000	µm	OK	0.0000	-10.0000	10.0000	Average absolute deviation of the profile to the breakline
Bf	0.0000	NOK	0.5000	0.0000	1.0000	Robust characterization of the edge roundness	
β1	-	n.a.	120.0000	-3.3393e-6	240.0000	Edgebreak angle 1	
β2	-	n.a.	120.0000	-3.3393e-6	240.0000	Edgebreak angle 2	
vB	45.0000	OK	120.0000	2.0000	238.0000	Angle between edge break line and rake surface reference direction	
Eqq	0.0740	µm	OK	0.0000	0.0000	1.0000	Form deviation of circle (RMS)
Type	Trumpf	OK					Estimated Curvature



Measurement performed by Alicona EdgeMasterModule, 15.10.2018 14:20:16

Vstupní protokol vzorků R1-R5 z mikroskopu ALICONA v rámci zkoušky č. 3

Ionbond Czechia s.r.o.
Dolní Bečva 20
75655 Dolní Bečva

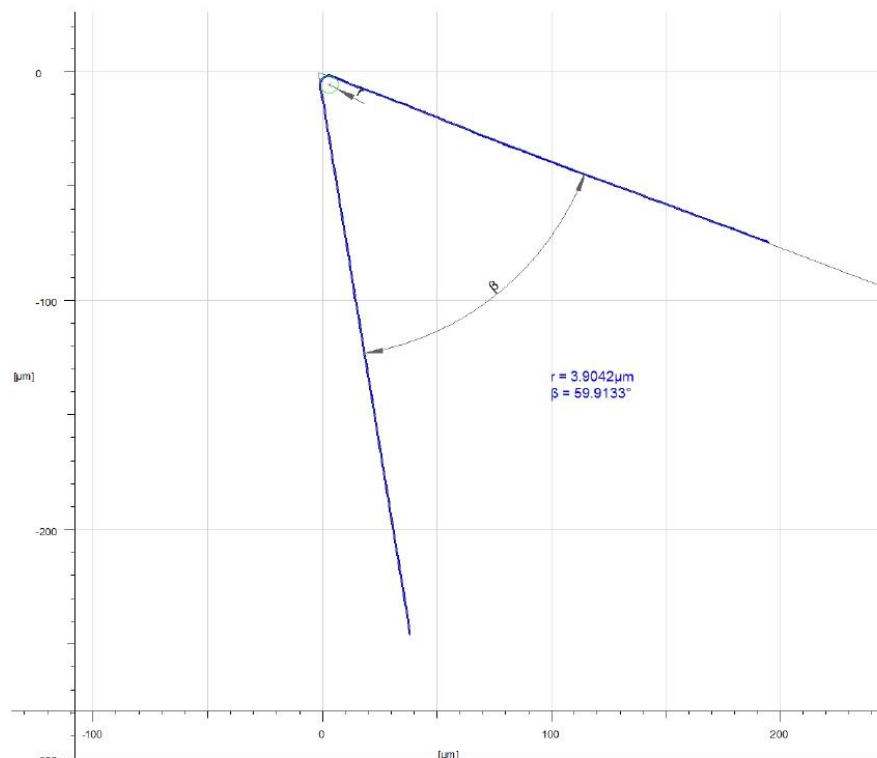
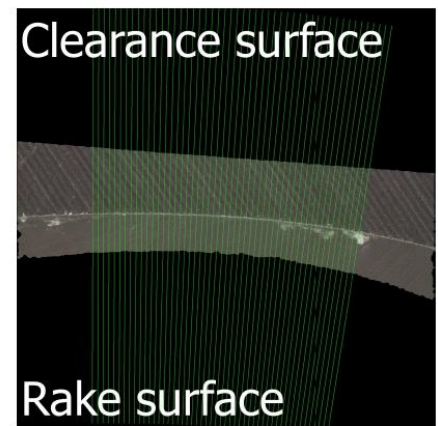


EdgeMasterModule Measurement Report

Cutting Edge Measurement

ReferenceType: **Edge Break Measurement 20x**
 Number of extracted profiles: **50**
 Edge profile type: **No Bevel**
 Date of measurement: **15.10.2018 14:26:08**
 Operator: **Administrator**

Name	Value	[u]	Status	Nom.	Lower	Upper	Description
r	3.9042	um	NOK	10.0000	8.0000	12.0000	Mean radius of mean edge
β	59.9133	°	NOK	90.0000	89.0000	91.0000	Wedge angle
Sc	6.8510	um	OK	10.0000	0.0000	20.0000	Dist. apex to end of clearance roundness
Sy	6.0621	um	OK	10.0000	0.0000	20.0000	Dist. apex to end of rake roundness
K	0.8849	um	OK	1.0000	0.5000	1.5000	Symmetry of cutting edge
Δr	4.0211	um	OK	5.0000	4.0000	6.0000	Min. dist. of edge to apex
WΔr	4.5525	um	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Edge width
Fc	-		n.a.	0.5000	0.0000	1.0000	Indicates whether the shape of the edge is like a circle (Fc=1) or like a line (Fc=0)
x1 negative	0.0000	um	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Distance from endpoint 2 to corridor 1 (conform to Bosch N42AP 620)
x2 negative	0.0000	um	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Distance from endpoint 1 to corridor 2 (conform to Bosch N42AP 620)
B1	0.0000	um	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak normal length 1 (conform to ISO 13715)
B2	0.0000	um	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak normal length 2 (conform to ISO 13715)
B1p	0.0000	um	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak projected length 1
B2p	0.0000	um	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak projected length 2
Bw	0.0000	um	NOK	70.0000	40.0000	100.0000	Edgebreak width
Bd	0.0000	um	OK	0.0000	-10.0000	10.0000	Average deviation of the profile to the breakline
Bda	0.0000	um	OK	0.0000	-10.0000	10.0000	Average absolute deviation of the profile to the breakline
Bf	0.0000	um	NOK	0.5000	0.0000	1.0000	Robust characterization of the edge roundness
β1	-		n.a.	120.0000	-3.3393e-6	240.0000	Edgebreak angle 1
β2	-		n.a.	120.0000	-3.3393e-6	240.0000	Edgebreak angle 2
γB	45.0000	°	OK	120.0000	2.0000	238.0000	Angle between edge break line and rake surface reference direction
Ecq	0.0205	um	OK	0.0000	0.0000	1.0000	Form deviation of circle (RMS)
Ftype	Waterfall		OK				Estimated Curvature



Measurement performed by Alicona EdgeMasterModule, 15.10.2018 14:26:09

Výstupní protokol vzorků R1-R5 po omílání na zařízení OTEC z mikroskopu ALICONA
v rámci zkoušky č. 3

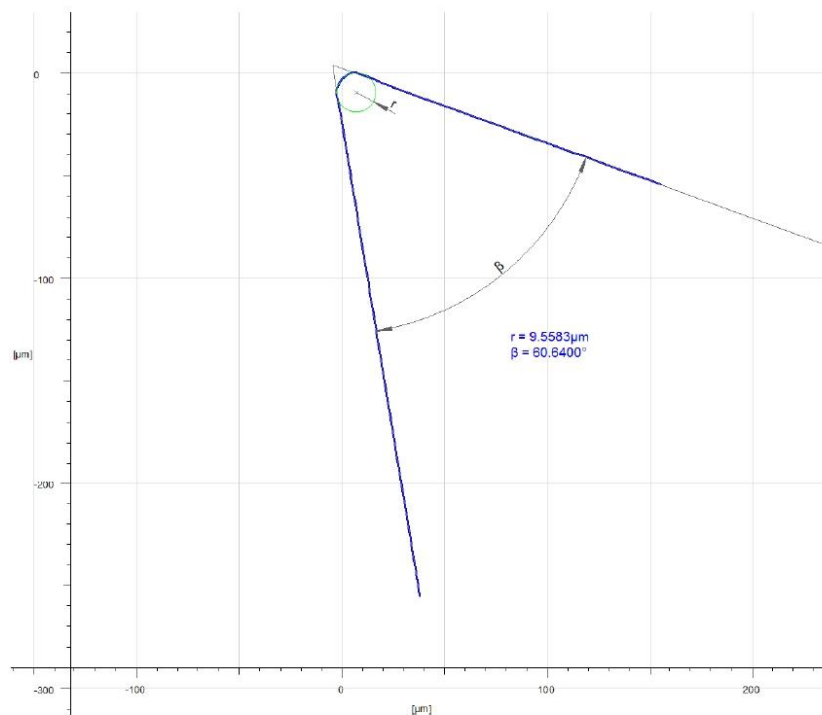
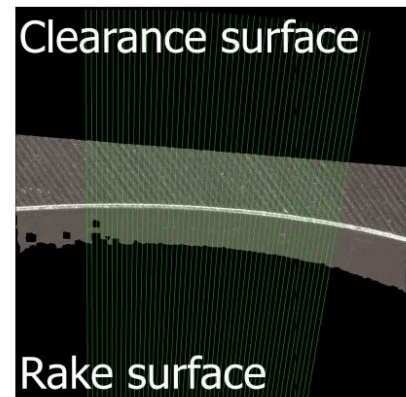
Ionbond Czechia s.r.o.
Dolní Běcva 20
75655 Dolní Běcva



EdgeMasterModule Measurement Report
Cutting Edge Measurement

ReferenceType: Edge Break Measurement 20x
Number of extracted profiles: 50
Edge profile type: No Bevel
Date of measurement: 15.10.2018 15:03:57
Operator: Administrator

Name	Value	[u]	Status	Nom.	Lower	Upper	Description
r	9.5583	µm	OK	10.0000	8.0000	12.0000	Mean radius of mean edge
β	60.6400	°	NOK	90.0000	89.0000	91.0000	Wedge angle
Sa	17.0488	µm	OK	10.0000	0.0000	20.0000	Dist. apex to end of clearance roundness
Sy	14.8727	µm	OK	10.0000	0.0000	20.0000	Dist. apex to end of rake roundness
K	0.8724	µm	OK	1.0000	0.5000	1.5000	Symmetry of cutting edge
Lr	9.9190	µm	NOK	5.0000	4.0000	6.0000	Min. dist. of edge to apex
Wdr	11.1732	µm	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Edge width
Fc	-		n.a.	0.5000	0.0000	1.0000	Indicates whether the shape of the edge is like a circle (Fc=1) or like a line (Fc=0)
x2 negative	0.0000	µm	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Distance from exitpoint 2 to corridor 1 (conform to Bosch N42AP 620)
x1 negative	0.0000	µm	NOK	40.0000	20.0000	60.0000	Distance from exitpoint 1 to corridor 2 (conform to Bosch N42AP 620)
B1	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak normal length 1 (conform to ISO 13715)
B2	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak normal length 2 (conform to ISO 13715)
B1p	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak projected length 1
B2p	0.0000	µm	NOK	50.0000	30.0000	70.0000	Edgebreak projected length 2
Bw	0.0000	µm	NOK	70.0000	40.0000	100.0000	Edgebreak width
Bd	0.0000	µm	OK	0.0000	-10.0000	10.0000	Average deviation of the profile to the breakline
Bda	0.0000	µm	OK	0.0000	-10.0000	10.0000	Average absolute deviation of the profile to the breakline
Bf	0.0000	µm	NOK	0.5000	0.0000	1.0000	Robust characterization of the edge roundness
β1	-		n.a.	120.0000	-3.3398e-6	240.0000	Edgebreak angle 1
β2	-		n.a.	120.0000	-3.3398e-6	240.0000	Edgebreak angle 2
γB	45.0000	°	OK	120.0000	2.0000	238.0000	Angle between edge break line and rake surface reference direction
Eq	0.1640	µm	OK	0.0000	0.0000	1.0000	Form deviation of circle (RMS)
Ftype	Waterfall		OK				Estimated Curvature



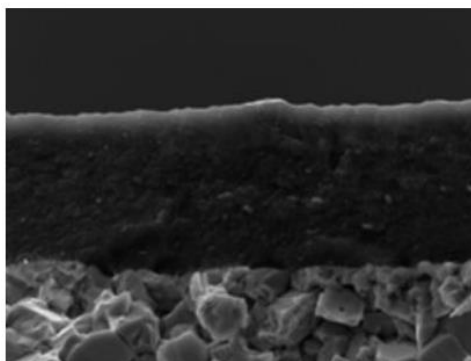
Measurement performed by Alicona EdgeMasterModule, 15.10.2018 15:03:57

Příloha 7. Popis tenké vrstvy **HARDCUT PLUS** z katalogu **IONBOND s.r.o.**



Hardcut

Ionbond Hardcut Facts - TiSiN coating



Povlak TiSiN pro obrábění za extrémních podmínek

Hardcut TiSiN je navržen pro vysokorychlostní obrábění tvrdých materiálů pouze s nulovou či minimální přítomností maziva. Teplota bříty nástroje s tímto povlakem může dosahovat až 1100 °C.

Charakteristickým rysem povlaku Hardcut je jeho složení: vícevrstvý povlak s nano-kompozitní svrchní vrstvou obsahující nanokrystaly Si_3N_4 v krystalické TiN matici. Tato matrice je určena k ochraně bříty před přenosem tepla, oxidací a abrazí.

Vysokorychlostní obrábění obrobků z tvrdých materiálů

Mezi typické materiály, které lze velmi kvalitně obrábět nástroji s povlakem Hardcut, patří oceli až do 60 HRC, slitiny s vysokým obsahem niklu a titan. Hardcut je zejména vhodný pro frézy ze slinutého karbidu a nástroje pro výrobu ozubených kol užívané k částečnému či plnému dokončení obrábění, což zahrnuje vysoké teploty na rozhraní tříska/bříty. Řezné rychlosti se obecně pohybují v rozmezí od 100 do 300 m/min, v závislosti na obráběcích podmínkách a materiálu obrobku.

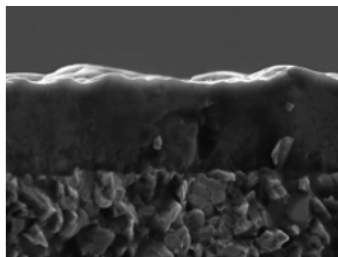


Parametry povlaku	
Materiál povlaku	TiSiN
Mikrotvrdość (HV 0.02)	3800
Max. teplota použití	1100 °C
Depoziční teplota	450 - 500 °C
Barva	měděná
Tloušťka povlaku	2 - 4 μm
Depoziční teplota	PVD Arc

Popis tenké vrstvy CROSSCUT PLUS z katalogu IONBOND s.r.o.



Ionbond Crosscut facts | AlCrN coating



Povlak AlCrN pro frézování a výrobu ozubených kol

Povlak AlCrN Crosscut™, nejnovější přírůstek do rodiny povlaků společnosti Ionbond určených pro obráběcí nástroje, je výjimečný unikátní nanostrukturou, jež umožňuje podstatné snížení vnitřního prnutí. Crosscut™ odolává řezným teplotám až do 1050 °C a umožňuje tak perfektní výkon i ve velmi náročných podmínkách.

Charakteristickým přínosem povlaku Crosscut™ je zvýšená odolnost bříty nástroje proti opotřebení. Další jeho výhodou je rovnoměrné rozdělení mechanických sil v blízkosti bříty. Díky této vlastnosti je Crosscut™ vynikající i v aplikacích, kde obdobné AlCrN povlaky poskytují pouze skromné zlepšení životnosti nástroje. Crosscut™ výrazně zvyšuje výkon nástroje při obráběcích podmínkách s mazivem a i bez maziva.



Vynikající výkon a zvýšení produktivity

Použití povlaku Crosscut™ vede ke zvýšení produktivity obráběcích nástrojů napříč širokou škálou obráběných materiálů a obráběcích podmínek. Vzhledem k tomu, že povlak odolává tvorbě třísek a zdrsnění, zůstává kvalita povrchu obrobku mimořádně vysoká po celou dobu životnosti nástroje.

Crosscut™ zlepšuje vlastnosti široké řady nástrojů, ale vyniká zejména v aplikacích s často přerušovaným obráběním jako je frézování a výroba ozubených kol.

Technické údaje	
Materiál	AlCrN
Tloušťka vrstvy	2 - 4 μm
Max. provozní teplota	1050 °C
Depoziční teplota	450 - 500 °C
Tvrdość HV 0,05	3000
Depoziční metoda	PVD Arc
Koef. tření vs ocel, bez maziva	< 0.55
Barva	Šedá