



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA ŘEZIVOSTI BŘITOVÝCH DESTIČEK PŘI OBRÁBĚNÍ TITANOVÉ SLITINY

ANALYSIS OF CUTTING INSERT PERFORMANCE WHEN MACHINING OF A TITANIUM ALLOY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Fasora

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jan Fasora**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza řezivosti břitových destiček při obrábění titanové slitiny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor obrobitelnosti titanových slitin, řezivosti a opotřebením řezných nástrojů, návrh technologie obrábění zadané součásti, experimentální obrábění a vyhodnocení získaných výsledků.

Cíle bakalářské práce:

Porovnání řezivosti a opotřebením řezných nástrojů pro danou součást a různé technologie obrábění. Verifikace experimentálním obráběním a technologicko-ekonomické vyhodnocení získaných výsledků.

Seznam doporučené literatury:

LEYENS, Ch., PETERS, M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. 2nd ed., Willet-VCH, Koln, 2005. p. 513. ISBN 3-527-30534-3.

DONACHIE, M. J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004. 381 s. ISBN 08-717-0686-5.

HOVSEPIAN, P. Eh., EHIASARIAN, A. P., PETROV., I. Structure evolution and properties of TiAlCN/VCN coatings deposited by reactive HIPIMS. Surface & Coatings Technology. 2014. 257. pp. 38–47.

GUO, Y., LI, B., W., JAWAHIRI. S. Surface Integrity Characterization and Prediction in Machining of Hardened and Difficult to Machine Alloys: a State-of-Art Research. Review and Analysis Mach. Sci. Technol. 2009. 13. pp. 437–470.

INSPEKTOR, A., SALVADOR, P. A. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review. Surface & Coatings Technology 257, 2014. 138–153.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21.

V Brně, dne 25. 10. 2019

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je rozdělena na dvě části. Teoretická část se zabývá problematikou obrobitelnosti slitin titanu, řezivosti a opotřebením vyměnitelných břitových destiček (VBD) při jejich soustružení. Důležitou část práce tvoří experiment, jehož cílem je vyhodnocení řezivosti a opotřebení vybraných VBD na základě provedení série dílčích experimentů a měření. Naměřené výsledky zdůvodňují mimo jiné pomocí dat z 3D měřicího zařízení a rastrovacího elektronového mikroskopu.

Klíčová slova

Řezivost nástroje, opotřebení řezných nástrojů, obrobitelnost, trvanlivost, slitiny titanu

ABSTRACT

This bachelor thesis is divided into two parts. The theoretical part deals with machinability of titanium alloys, cutting performance and wear of indexable cutting inserts (ICO) when turning. The experimental and very basic part of the work is presented with experiments in several series, where the cutting ability and wear of the selected inserts are assessed. Apart of some other measurements the results are justified with 3D measuring device and a scanning electron microscope analyses.

Key words

Tool cutting, wear, machinability, tool life, titanium alloys

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FASORA, Jan. *Analýza řezivosti břitových destiček při obrábění titanové slitiny*. Brno 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 67 s., 5 příloh. prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Analýza řezivosti břitových destiček při obrábění titanové slitiny** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jan Fasora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Petru Osičkovi ze společnosti Frentech Aerospace s.r.o. za připomínky během práce a zároveň vedení společnosti za umožnění provedení experimentů a

Děkuji dále panu Mgr. Michalu Jílkovi za pomoc a cenné připomínky při měření opotřebení.

V neposlední řadě bych rád poděkoval celé mojí rodině a přítelkyni za trpělivost, kterou se mnou měli při psaní mé bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	10
1 TITAN A JEHO SLITINY	11
1.1. Slitiny titanu	11
1.2. Titan jako konstrukční materiál	12
1.2.1. Vlastnosti	12
1.2.2. Vybrané faktory ovlivňující výsledné vlastnosti slitin	12
2 ŘEZNÉ NÁSTROJE ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ	14
2.1. Složení a mechanické vlastnosti.....	14
2.2. Rozdělení do skupin podle ČSN ISO 513	14
2.3. Geometrie nástroje	15
2.3.1. Geometrie pro utváření třísek	16
2.4. Povlakování řezných nástrojů	17
2.4.1. Základní rozdělení metod povlakování.....	17
3 OBROBITELNOST.....	19
3.1. Vliv jednotlivých vlastností materiálu na obrobitelnost	19
3.2. Měření obrobitelnosti	20
3.3. Obrobitelnost titanových slitin.....	21
3.3.1. Porovnání obrobitelnosti jednotlivých slitin titanu.....	21
3.3.2. Tvorba třísek.....	21
3.3.3. Vliv jednotlivých vlastností slitin titanu na proces obrábění.....	22
3.3.4. Pravidla pro efektivní obrábění.....	22
4 OPOTŘEBENÍ.....	24
4.1. Mechanismy opotřebení řezných nástrojů	25
4.1.1. Abrazivní opotřebení	25
4.1.2. Difuzní opotřebení	25
4.1.3. Oxidační opotřebení.....	25
4.1.4. Lom	26
4.1.5. Adhezní opotřebení.....	26
4.2. Klasifikace typů opotřebení břitu nástroje	27
4.2.1. Opotřebení hřbetu nástroje.....	27

4.2.2.	Výmol na čele	28
4.2.3.	Vydrolování ostří	28
4.2.4.	Plastická deformace břitu.....	28
4.2.5.	Hřebenové trhliny	29
4.2.6.	Tvorba nárůstku	29
4.2.7.	Vrubové opotřebení na hřbetu	29
4.2.8.	Lom	30
4.3.	Kriteria opotřebení	31
4.4.	Rozbor opotřebení při obrábění $\alpha - \beta$ slitin titanu	32
4.4.1.	Opotřebení v závislosti na řezné rychlosti	32
4.4.2.	Vznik nárůstku	32
5	ŘEŽIVOST	33
5.1.	Řezivost nástrojů při obrábění $\alpha - \beta$ slitin titanu	33
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	34
6.1.	Vybrané VBD pro testování	34
6.1.1.	Firma Frentech	34
6.1.2.	Podmínky testování.....	34
6.1.3.	Použitý stroj	35
6.1.4.	Zvolené řezné podmínky	35
6.2.	Provedené testy řezivosti vybraných VBD	35
6.2.1.	Trvanlivost VBD za daných podmínek	35
6.2.2.	Opotřebení VBD za daných podmínek.....	35
6.3.	Vyhodnocení řezivosti vybraných VBD	36
6.3.1.	Trvanlivost VBD.....	36
6.3.2.	Porovnání velikosti opotřebení VB_{max} v čase	38
6.3.3.	Vývoj opotřebení v čase u vybraných VBD	39
6.3.4.	Vyhodnocení měření geometrie břitu	50
6.3.5.	Vyhodnocení měření geometrie čela VBD	51
6.3.6.	Tloušťka povlaku	53
6.3.7.	Chemické složení povlaku a podkladového substrátu	54
6.3.8.	Struktura podkladového substrátu	57
6.4.	Ekonomické zhodnocení porovnávaných VBD	57
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	66

SEZNAM PŘÍLOH.....	67
--------------------	----

ÚVOD

Vlivem rychlého technologického pokroku v posledních desetiletích jsou konstruktéři stavění před výzvou snižovat hmotnost navrhovaných součástí a konstrukcí při zachování či zvýšení bezpečnosti. Díky velmi dobrému poměru pevnosti za běžných i zvýšených teplot a měrné hmotnosti nalézají slitiny titanu tradičně uplatnění v leteckém průmyslu, dále díky kombinaci korozní odolnosti a pevnosti v chemickém průmyslu či medicíně. Stále častěji se s tímto kovem setkává každý z nás v běžném životě, cestujeme-li letadlem, vlastníme-li luxusní hodinky, jízdní kolo, golfovou hůl, nebo nám implantát v těle nahrazuje funkci určité části našeho těla.

Jednou z obtíží, kterou je třeba při zpracování titanu překonat je jeho špatná obrobitelnost. Nástroj je při obrábění velmi silně mechanicky i tepelně namáhán. Při volbě správných řezných podmínek, nástrojů a intenzivního chlazení je však možné dosáhnout efektivního obrábění. Tyto zkušenosti jsem době výběru bakalářské práce neměl, ve škole se o obrábění titanu nemluvilo nebo bylo obrábění titanu prezentováno jako v běžných podmínkách téměř nemožné. Proto když jsem přišel do moderní výrobní haly společnosti Frentech Aerospace s.r.o. v Brně a viděl obrábění na vlastní oči, byl jsem ze všech dnes již pro mě běžných věcí překvapen. Věděl jsem, že mě toto téma zajímá a chci tímto směrem ubírat moje vzdělání.

Další motivací pro mě bylo spolupracovat s tak významnou a inovativní firmou v oblasti obrábění jako je Frentech Aerospace s.r.o.

Při výběru bakalářské práce jsem chtěl obrábění poznat v praxi u stroje. K tématu testování řezivosti vyměnitelných břitových destiček jsme došli společně s technologem ve zmíněné firmě při rozhovoru o možnosti navázání spolupráce. S tématem práce jsem přišel za panem prof. Ing. Miroslavem Piškou, CSc., byl jsem příjemně překvapen vřicím přístupem a pochopením z jeho strany.

1 TITAN A JEHO SLITINY

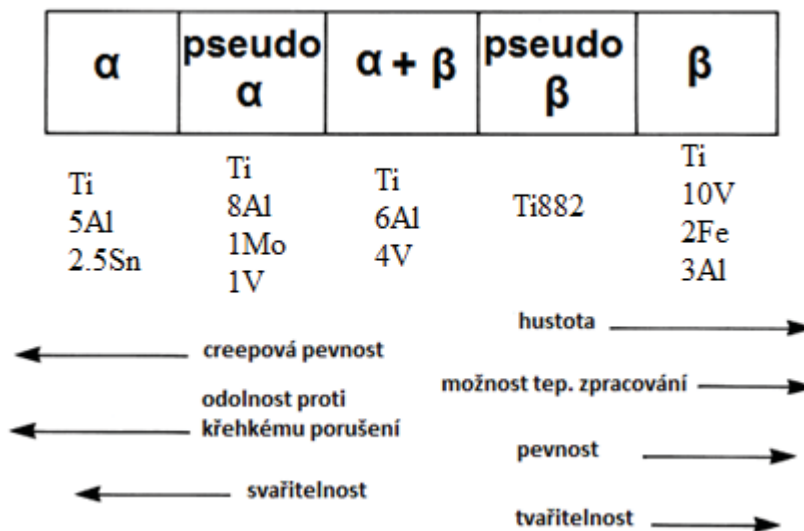
Titan je znám jako prvek od roku 1791, přitom čistý titan izoloval poprvé až v roce 1910 americký chemik Matthew Albert Hunter. V roce 1932 představil Wilhelm Justin Kroll metodu výroby tohoto kovu. Dodnes je tato metoda, známá pod názvem Krollův proces, nejvíce používaným způsobem získávání čistého titanu [1].

Za zdroj titanu slouží rudy tvořené jeho oxidy, zejména rutil a ilmenit [2]. I přes vysoké procentuální zastoupení titanu v zemské kůře je cena titanu oproti běžným kovům vysoká. Tento fakt je způsoben technologickou a energetickou náročností výroby. Výrobu komplikuje vysoká reaktivita titanu s okolními plyny (N_2, O_2, C, H_2) za zvýšených teplot [8].

1.1. Slitiny titanu

Titan se vyskytuje ve dvou krystalových mřížkách, za běžné teploty existuje fáze α s HCP mřížkou, zvýšením teploty nad $882^\circ C$ se vzniká fáze β a mění uspořádání atomů v mřížce na BCC [6]. Vlastnosti čistého titanu nejsou zdaleka dostačující, a proto tvoříme slitiny s různými prvky a měníme tak fyzikální, chemické i mechanické vlastnosti. Slitiny dělíme dle fázového složení do čtyř, popřípadě pěti skupin: α , pseudo α , $\alpha + \beta$, (pseudo β) a β [1].

Volbou přísadového prvku stabilizujeme určitou fázi. α Stabilizátory zvyšují transformační teplotu dané slitiny, mezi α stabilizátory patří zejména Al a nečistoty N_2 a O_2 . Naopak přítomnost β stabilizátorů teplotu transformace snižuje, čímž se zvýší množství stabilní fáze β za normální teploty. Příkladem β stabilizátorů jsou Mo, Fe, V, Nb, Ta a další prvky [1].



Obr. 1 Rozdělení slitin titanu podle fázového složení [2]

Fázové složení významně ovlivňuje výsledné vlastnosti dané slitiny. Na obrázku výše vidíme základní rozdělení skupin slitin, typickou slitinu pro danou skupinu a graficky znázorněný trend co se týká jejich mechanických a fyzikálních vlastností. Grafické znázornění je nutné brát pouze informativně, pravidla nelze je aplikovat s jistotou všechny slitiny.

1.2. Titan jako konstrukční materiál

Využití slitin titanu jako konstrukčního materiálu se i přes vysokou cenu neustále zvyšuje. Materiály, které byly doménou speciálních aplikací, se dostávají do odvětví průmyslu, kde se s nimi denně setkáváme. Důvodem je velmi dobrý poměr hmotnosti a užitých vlastností. Mezi tyto vlastnosti patří zejména vysoká pevnost a korozní odolnost, to vše při měrné hmotnosti pouze kolem $4500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [1].

1.2.1. Vlastnosti

Pevnost

Pevnostní charakteristiky slitin titanu závisí na chemickém složení (legujících prvcích a čistotě), technologii zpracování polotovaru a přidání kompozitních materiálů. Nejvyšší pevnosti dosahují slitiny β po tepelné úpravě a stárnutí rozpadem nerovnovážné fáze β , současně však při procesu dochází ke snížení houževnatosti. Slitiny $\alpha+\beta$ po vytvrzení dosahují srovnatelných hodnot pevnosti, při ponechané plasticitě [1].

Korozní odolnost

Slitiny titanu disponují i přes vysokou reaktivitu titanu vynikající korozní odolností. Důvodem je vznik pasivační vrstvy oxidu na povrchu součásti, [2, 6] nejčastěji se jedná o TiO_2 , Ti_2O_3 nebo TiO . Tloušťka pasivační vrstvy je obvykle tenčí než 10nm, pouhým okem je nerozeznatelná. Pasivační vrstva odolává velkému množství chemických látek, výjimku tvoří horké, koncentrované HF , HCl , H_2SO_4 nebo NaOH [2]. Vynikající korozní odolnost a mechanické vlastnosti předurčují slitiny titanu k použití jako biokompatibilního materiálu v lékařství [6].

Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot

Komerční slitiny titanu jsou použitelné do teplot okolo 538-595 °C. Použití při vyšších teplotách limituje náchylnost titanu k oxidaci. Použitím slitin na bázi TiAl s vysokou odolností proti korozi jsme však schopni dosáhnout stability za zvýšených teplot srovnatelné s používanými vysokoteplotními slitinami [1].

1.2.2. Vybrané faktory ovlivňující výsledné vlastnosti slitin

Obsah nečistot

Při výrobě titanu je nutné zajistit nízký obsah nečistot, v opačném případě může dojít již nízké koncentraci k výraznému snížení mechanických vlastností. Kyslík a dusík mohou tvořit velmi tvrdé a křehké sloučeniny, jejich výskyt významně zvyšuje náchylnost materiálu ke křehkému porušení. Obsažený uhlík snižuje svařitelnost slitin a křemík houževnatost výsledného materiálu [2].

Obsah nečistot je možné snížit na přijatelnou mez pomocí moderní technologie výroby. Pro nejznámější slitinu titan grade 5 (Ti6Al4V) jsou uváděny následující mezní hodnoty obsahu nečistot ($\text{Fe} = 0,4\%$, $\text{O} = 0,2\%$, $\text{C} = 0,08\%$, $\text{N} = 0,05\%$ a $\text{H} = 0,015\%$) [2, 50].

Tepelné zpracování

Teplené zpracování slitin titanu představuje významnou část technologie výroby dílců. Konkrétní tepelná úprava závisí na chemickém složení a požadovaných vlastnostech,

obecně však u slitin s obsahem nerovnovážné fáze β lze dosáhnout významného zvýšení mechanických vlastností [2].

Mezi metody tepelného zpracování slitin titanu patří žihání a vytvrzování [7]. Žihání dělíme podle použití na více druhů, pomocí změny teploty a výdrže dosáhneme zvoleného efektu. Obecně žiháním zvyšujeme houževnatost, obrobitelnost a strukturní stabilitu [2]. Vytvrzování využíváme jako finální úpravu zejména ke zvýšení pevnosti [7].

Tváření při výrobě polotovaru

Zpracování slitin titanu pomocí tváření se hojně se využívá pro dobré získané mechanické vlastnosti a produktivitu výroby. Tvářením lze zvýšit pevnost v tahu, odolnost vůči creepu, únavovou pevnost a houževnatost. Vlivem popsáných mechanickým vlastností je tváření slitin titanu náročné například oproti tváření oceli [2].

2 ŘEZNÉ NÁSTROJE ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ

V minulém století zažily řezné nástroje ohromný vývoj. Vlivem zvýšení řezných rychlostí a příchodem moderních těžkoobrobitelných materiálů, již nedostačovali používané nástroje zejména z rychlořezné oceli. Bylo zjištěno, že řezné vlastnosti rychlořezných ocelí jsou dány obsaženými tvrdými karbidy. Hledal se proto způsob výroby nástroje s vyšším obsahem těchto částic, při zachování dostatečné houževnatosti. Úspěchem se později ukázala být metoda slinování práškové směsi tvořené částicemi karbidů a kovového pojiva [5]. Nástroje ze slinutých karbidů (SK) čekala dlouhá cesta, než se dostaly do dnešní podoby. Mezi ty nejvýznamnější vývojové stupně bezpochyby patří systém vyměnitelných břitových destiček rozvoj povlakovacích technologií [11,5].

SK se staly nejběžnějším řezným materiálem. Používají se pro jemné obrábění i těžké hrubování téměř všech materiálů. Vlastnosti jednotlivých nástrojů se mohou velmi lišit, pro úspěšné obrábění je nutné správně si vybrat dle konkrétní aplikace. Obecně však nástroje z SK vynikají poměrem tvrdosti a houževnatosti, úspěšně odolávají vysokým teplotám a disponují vysokou tepelnou vodivostí [5].

2.1. Složení a mechanické vlastnosti

Slinuté karbidy se skládají z tvrdých karbidických částic WC a popřípadě TiC spojených pojivem z kobaltu. Mechanické vlastnosti určuje především chemické složení, obsah pojiva, velikost částic karbidů a přítomné defekty [10].

Rozhodující vliv na mechanické vlastnosti má obsah pojícího kovu. S rostoucím obsahem kobaltu tvrdost SK klesá při nárůstu houževnatosti a pevnosti v ohybu [9]. Dále tvrdost roste s klesající velikostí zrna [11].

Za zvýšené teploty tvrdost a pevnost SK podobně jako u ostatních materiálů významně klesá, stálost při zvýšených teplotách lze zajistit přidáním karbidu TiC [11].

Pevnost v ohybu u SK se zvyšuje s rostoucím podílem pojiva. Velikost karbidických částic ovlivňuje zmíněné typy SK odlišným způsobem. U SK typu WC-Co roste do určité míry pevnost a houževnatost s velikostí zrna, naopak u SK s obsahem karbidu TiC tyto charakteristiky klesají s velikostí zrna. Důvodem je odlišné místo pravděpodobné iniciace trhliny. U SK typu WC-Co je tomu tak na hranicích zrn a u SK typu WC-CO-TiC v karbidické části [9].

Tímto způsobem lze spolu s vyšším stupněm kontaktu zrn karbidu u SK typu WC-CO-TiC zdůvodnit obecně nižší houževnatost SK s obsahem TiC [9].

2.2. Rozdělení do skupin podle ČSN ISO 513

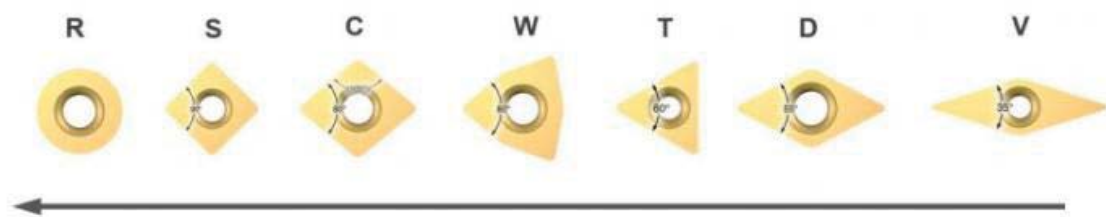
SK dělíme dle normy ČSN ISO 513 do šesti skupin podle doporučeného použití. Dále dělíme jednotlivé skupiny na podskupiny přidáním dvojčíslí za písmenem označujícím danou skupinu. Dvojčíslí vyjadřuje množství pojícího kovu, s jeho rostoucím množstvím roste houževnatost daného nástroje na úkor tvrdosti. SK označené vyššími čísly jsou vhodné pro hrubovací operace [10].

Rozbor jednotlivých skupin SK zde nebudu provádět z důvodu dodržení tématu mé bakalářské práce, jejich nalezení je však snadné ve velkém množství zdrojů.

2.3. Geometrie nástroje

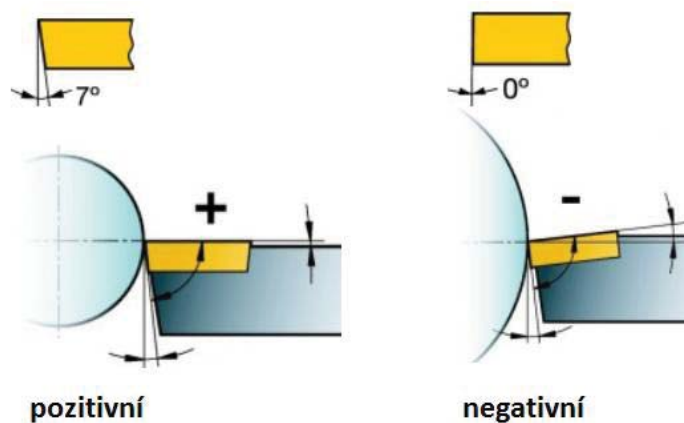
Správná geometrie nástroje je důležitou podmínkou úspěšného obrábění. Geometrie nástroje přímo ovlivňuje průběh vzniku třísky a v důsledku velikost zatížení řezného nástroje. Vhodnou volbou je možné zmíněné zatížení efektivně snížit a prodloužit tak životnost nástroje.

Základním požadavkem pro výběr nástroje je dostatečná pevnost, nejvyšší hodnoty dosáhneme volbou maximálního úhlu špičky a poloměru zaoblení. Tyto parametry je však nutné přizpůsobit prováděné aplikaci [13].



Obr. 2 Porovnání pevnosti VBD v závislosti na tvaru [12]

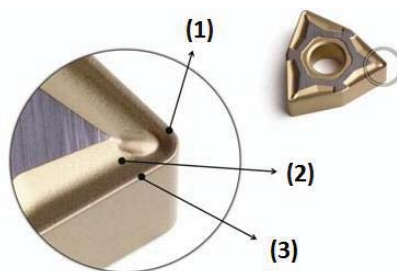
Rozlišujeme geometrii VBD negativní a pozitivní, spořádání se liší polohou řezné hrany vůči obrobku. Pozitivní geometrie způsobuje nižší pevnost nástroje a VBD jsou pouze jednostranné, mezi výhody patří nižší řezné síly a lepší odvod třísek [14]. VBD s pozitivní geometrií je vhodné použít pro obrábění materiálů vyžadující ostrou hranu břitu nástroje [13]. Negativní geometrie zaručuje vyšší pevnost břitu a umožňuje využít při obrábění obě strany VBD. musíme však brát v úvahu zmíněné nevýhody [14].



Obr. 3 Schéma pozitivní/negativní geometrie [12]

2.3.1. Geometrie pro utváření třísek

Geometrie VBD pro utváření třísek se skládá ze tří částí – geometrie řezné hrany (3), fazetky (1) a utvařeče třísek (2) [14]. Geometrie zmíněných oblastí řezné hrany nástroje má vliv na velikost řezné síly působící na nástroj, sklon k uplívání materiálů na břitu nástroje [14] a pevnost řezné hrany. V určitém smyslu jsou tyto parametry zároveň protiklady, pevná hrana bez zbytečného oslabení v podobě ostré části bude vykazovat vysoké řezné síly a naopak. Je proto nutné volit geometrii po zvážení konkrétního procesu obrábění [13].



Obr. 4 Geometrie řezné hrany [14]

Geometrie řezné hrany může být ostrá, zaoblená nebo zkosená. Ostrá řezná hrana zajišťuje nižší řezné síly při snížené pevnosti, hrozí proto vyštípnutí části ostří. Zaoblená a zkosená hrana disponuje vyšší pevností. Ostrá hrana je vhodná pro obrábění tvárných materiálů, naopak obrábění oceli vyžaduje pevnost hrany břitu [13].

Geometrie fazetky pojednává o oblasti mezi řeznou hranou a utvařečem třísky. Se zvyšující se šířkou fazetky roste tuhost břitu. Rozlišujeme pozitivní, negativní a plochou geometrii fazetky, záleží na úhlu položení fazetky. Pozitivní geometrie vytváří ostřejší břit, zatímco negativní a plochá geometrie méně ostrou hranu. Situace představuje podobný rozpor mezi velikostí řezných sil a teplot a pevností geometrie jako v případě řezné hrany [13].

Geometrie utvařeče třísek je důležitá pro správnou tvorbu třísky. Nevyhovující tvorba třísky může zapříčinit vznik vibrací, dlouhý kontakt odváděné třísky s čelem nástroje, omezení odvodu třísek z místa řezu a v neposlední řadě vyšší náklady na manipulaci a skladování odpadu [13].

Geometrii dělíme na silně lámající (F), středně lámající (M) a měkce lámající (R) [14]. Uzavřený utvařeč dělí třísku na krátké kusy, naopak při použití utvařeče otevřeného nebo s plochým dnem je tříška pouze slabě tvářena. S rostoucím stupněm tváření třísky stoupá zatížení břitu nástroje [13].

Pro efektivní řešení problematiky geometrie utvařeče třísek je nutné nalézt rovnováhu mezi zatížením a vyhovující tvorbou třísky [13].

2.4. Povlakování řezných nástrojů

Povlaky na nástrojích umožňují efektivní obrábění i těžkoobrobitelných materiálů, zároveň zvyšují produktivitu obrábění. Podstata povlakování je ve vytvoření odolné vrstvy na povrchu nástroje, úprava vede ke snížení opotřebení břitu při zachování houževnatosti podkladového materiálu [21].

Povlakované SK zaujímají díky výhodným vlastnostem významné postavení na poli nástrojových materiálů. Jednotlivé typy povlaků se liší svými vlastnostmi, při výběru je třeba vybrat vhodnou technologii vzhledem k předpokládaným charakterům opotřebení [15]. Obecně lze vliv povlaků charakterizovat snížením koeficientu tření, řezných sil a množství vznikajícího tepla, dále omezení difuze mezi obrobkem a nástrojem. Obecně vede povlakování nástroje k prodloužení jeho životnosti [21].

2.4.1. Základní rozdělení metod povlakování

Podle principu nanášení povlaku na nástroj rozlišujeme dvě metody povlakování:

CVD - Chemical Vapour Deposition

PVD - Physical Vapour Deposition

Metoda CVD

CVD je nejstarší metodou pro nanášení tvrdých povlaků na nástroj, první povlaky byly vytvořeny ke konci 70 let. Ve velkém množství aplikací byla tato metoda pro své nedostatky nahrazena metodou PVD. Přicházejí však nová vylepšení CVD technologie, musíme proto volit metodu dle konkrétní aplikace [5].

Metoda CVD je založena na procesu chemického napařování. V procesu panují vysoké teploty okolo 900-1050°C [19]. Tloušťka nanesených povlaků bývá od 5 do 12 μm, výjimečně až 20μm [16]. V porovnání s metodou PVD jsou vrstvy obecně tlustší [16].

Principem metody je reakce sloučenin v plynné fázi, aktivaci provádíme pomocí zvýšené teploty [16, 17]. Podle způsobu přívodu energie rozdělujeme metodu na 4 varianty - tepelně plazmaticky, elektronově a fotonově indukovaná [16].

Výhodami metody je vysoká hustota povlaku, homogenita povlaku a výborná adheze k podkladovému substrátu. Bohužel má metoda zejména vlivem vysokých teplot celou řadu nevýhod. Patří sem vznik tahového napětí metody, energetická náročnost, nemožnost povlakovat ostré hrany, v neposlední řadě také ekologicky nevhodné pracovní plyny [19].

Je snaha modifikovat metodu CVD za účelem snížení pracovních teplot, příkladem jsou metody PACVD a MTCVD. Při snížení pracovních teplot je nutné napomoci aktivaci reaktivního plynu jinou cestou. U metody PACVD aktivace docílíme pomocí plazmatického výboje, u metody MTCVD změnou složení reakční složky na plyn CH₃CN [11, 16].

Metoda PVD

Metoda PVD je založena na uvolnění nanášených částic ze zdroje (nejčastěji kovové terče) fyzikální cestou. Metoda je charakteristická nízkými pracovními teplotami 350-600°C a sníženým tlakem 0,1-1,0 Pa [17].

Principem metody je uvolnění a následná kondenzace nanášených částic na povlakovaném povrchu. Metodu PVD dělíme podle principu uvolnění částic z terče na naprašování a napařování [18]. Některé zdroje uvádí jako další způsob iontovou implementaci [11] a klasický odporový ohřev [17].

Naprašování probíhá za sníženého tlaku účinkem dodané koncentrované energie. Není zde využíváno zahřívání naprašovaného kovu, jsme tak schopni nanášet těžkotavitelný kov za nízkých teplot [11]. Napařování je založeno na odpaření kovového materiálu dodáním tepelné energie. Odpaření materiálu za nízké teploty docílíme snížením okolního tlaku (10^{-3} - 10^{-8} Pa) [11, 18].

Výhody metody PVD oproti CVD jsou nižší tepelné ovlivnění podkladového materiálu, tvorba tlakových napětí a možnost povlakovat i ostré hrany nástroje [11, 17]. Nevýhodami jsou složitý vakuový systém, náročnější příprava povrchu před povlakováním a nutnost pohybovat povlakovanými předměty pro vytvoření souvislého povlaku [17] kvůli tzv. stínovému efektu [19].

3 OBROBITELNOST

Obrobitelnost lze charakterizovat jako schopnost materiálu být obráběn za daných podmínek. Materiály s dobrou obrobitelností lze obrábět za působení nižších řezných sil, v kratších časech, při nižším opotřebením nástroje a dodržení lepší jakosti povrchu. Obrobitelnost závisí na velkém množství faktorů, shrnul bych je do základních tří částí- vlastnosti obráběného materiálu, parametry použitého nástroje a řezné podmínky [23]. Dále například použitá metoda obrábění nebo řezné prostředí [4].

Vlastnostmi obráběného materiálu jsou myšleny především fyzikální a mechanické vlastnosti způsobené chemickým složením a strukturou daného materiálu. Mezi parametry nástroje řadíme zejména jeho geometrii, použitý řezný materiál a uchycení nástroje. Řeznými podmínkami rozumíme řeznou rychlost, posuv, hloubku řezu a použití chlazení [23].

3.1. Vliv jednotlivých vlastností materiálu na obrobitelnost

V následující části se pokusím rozebrat vliv významných fyzikálních a mechanických vlastností na obrobitelnost materiálu.

Tvrдость

Tvrдость lze definovat jako odpor proti vniknutí cizího tělesa do materiálu. Při obrábění materiálu o vyšší tvrdosti zaznamenáme nárůst řezné síly a často zvýšení opotřebením.[24] Obrobitelnost s rostoucí tvrdostí obvykle klesá. Výjimku tvoří materiály o nízké tvrdosti, u kterých může docházet vlivem adheze k zvýšené tvorbě nárůstku a vysokému opotřebením [3, 24].

Tepelná vodivost

Tepelná vodivost udává schopnost daného materiálu vést teplo, charakterizována je součinitelem tepelné vodivosti λ . Při obrábění materiálu s nízkou tepelnou vodivostí se teplo vznikající z místa řezu nedostatečně odvádí do okolního materiálu [24]. Zvýšená teplota v místě řezu má jednoznačně negativní vliv na trvanlivost použitého nástroje a obecně obrobitelnost daného materiálu [24]. Tepelnou vodivost nelze u daného materiálu příliš měnit, je proto nutné této skutečnosti přizpůsobit podmínky obrábění [3].

Deformační zpevnění

Při tváření kovů mechanismem plastické deformace dochází k tzv. deformačnímu zpevnění okolního materiálu, velikost zpevnění závisí na rychlosti deformace a sklonu daného materiálu k zpevnování. V důsledku popsaného procesu dochází ke zvýšení tvrdosti vrstvy na povrchu obrobku [3]. Deformační zpevnění se významně projeví při malé hloubce řezu a malém posuvu, protože odebíráme z velké části zpevněnou část materiálu [24].

Pevnost

Pevnost udává odolnost materiálu vůči vnějším silám. Při obrábění materiálů s vysokou pevností roste síla potřebná k překonání odporu materiálu. Břit nástroje je vlivem toho silně namáhán a hrozí jeho rozsáhlé opotřebením [24].

Pevnost většiny materiálů s teplotou významně klesá, některé materiály si však zachovávají vysokou pevnost i přes zvýšené teploty v místě řezu. Příkladem mohou být

slitiny titanu, obrobiteľnosť takových materiálov je vlivem popsaného mechanizmu snižena [27].

Obsah vměstků

V každém materiálu se v určité míře vyskytují tvrdé vměstky pocházející z výroby polotovaru. Vlivem abraze [24] následně dochází ke zvýšenému opotřebení břitu nástroje. Nepříjemným vlivům lze zabránit výběrem materiálu o vyšší jakosti [3].

3.2. Měření obrobiteľnosti

Charakterizovat obrobiteľnosť materiálov lze pomocí absolutních a relativních veličin. Vzhledem k počtu závislých parametrů je náročné stanovit absolutní veličinu vypovídající hodnoty [4].

Při měření obrobiteľnosti pomocí relativních veličin rozlišujeme veličiny celkové a měrné. V konkrétních případech volíme veličinu, která při dané technologii a materiálu nejlépe proces obrábění charakterizuje. Přihlédnout musíme na možnosti daných měřících přístrojů a podmínek. Aby bylo možné následně hodnoty srovnávat, je nutné dodržet konstantní řezné podmínky [4] a eliminovat rušivé vlivy.

K určení obrobiteľnosti často používáme následující kritéria [22].

Trvanlivost nástroje

Při hodnocení pomocí trvanlivosti nástroje měříme dobu, po kterou nástroj dokáže efektivně provádět řezný proces [22]. Podmínku ukončení trvanlivosti nástroje musíme mít předem definovanou, kritériem může být například zvýšení zatížení stroje nad určitou úroveň nebo dosažení určitého opotřebení. Materiál způsobující vyšší opotřebení je považován za hůře obrobiteľný [23]. Výsledek měření je silně ovlivněn materiálem nástroje a zvolenými řeznými podmínkami [22].

Řezné síly a spotřebovaná energie

Velikost měrné řezné síly dobře reflektuje děje probíhající při řezném procesu, při nízké řezné síle lze konstatovat dobrou obrobiteľnosť měřeného materiálu. Z naměřené měrné energie snadno odhadneme náklady za elektrickou energii při obrábění daných materiálov. (významné u hrubovacích operací) Výhodou je nižší závislost na použitém materiálu nástroje [22].

Jakost obrobeného povrchu

Jakost obrobené plochy může být v případě dokončovacích operací významným kritériem obrobiteľnosti [23], u hrubovacích operací však často postrádá význam. Obrobiteľnosť naměřená pomocí kritéria jakosti povrchu často nemusí být v souladu s výsledky ostatních měření [22].

Druh utváření a dělení třísky

V některých případech může být druh utváření a dělení třísky užitečným kritériem obrobiteľnosti materiálu. Čím kratší a lépe dělené třísky materiál při obrábění produkuje tím lépe je hodnocena dle tohoto kritéria jeho obrobiteľnosť. Kritériem je silně závislé na použitých řezných podmínkách a použitém utvařeči na nástroji [22].

3.3. Obrobitelnost titanových slitin

Slitiny titanu klasifikujeme jako těžkoobrobitelný materiál [25]. Při použití vhodných nástrojů a řezných podmínek, plynoucích ze specifických vlastností obráběného materiálu, lze tyto překážky překonat a dosáhnout efektivního obrábění [2].

Vlastnosti, jež nejvíce ovlivňují obrobitelnost slitin titanu: [2]

- nízká tepelná vodivost,
- pevnost za zvýšených teplot,
- malá kontaktní plocha nástroje s obrobkem,
- vysoká chemická reaktivita titanu za zvýšených teplot,
- poměrně nízký modul pružnosti,
- sklon k deformačnímu zpevnění.

V kapitole 6.3 se pokusím rozebrat jednotlivé vlastnosti a jejich vliv na proces obrábění, v kapitole 6.4 pak možnosti jejich eliminace.

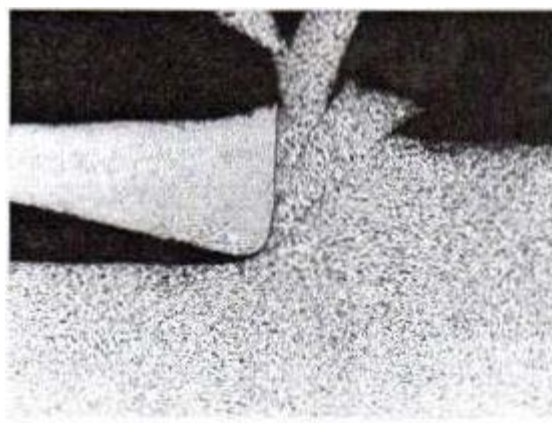
3.3.1. Porovnání obrobitelnosti jednotlivých slitin titanu

Obrobitelnost slitin titanu se liší v závislosti na fázovém složení a jejich tepelném zpracování. S narůstajícím podílem fáze β se obrobitelnost slitin snižuje vlivem vysoké pevnosti a tvrdosti. Slitina Ti6Al4V patří v porovnání se zmíněnými slitinami β mezi snáze obrobitelné [2].

3.3.2. Tvorba třísek

Způsob vzniku třísek u slitin titanu významně ovlivňuje samotný proces obrábění [30], proto považuji za adekvátní se tomuto tématu věnovat v rozboru obrobitelnosti slitin titanu.

V závislosti na zvolených řezných podmínkách dochází při obrábění slitin titanu ke vzniku tzv. segmentové třísky, charakteristické lokální plastickou deformací.



Obr. 5 Vznik segmentové třísky

Příčinou vzniku segmentové třísky jsou vzniklé vibrace způsobené nerovnoměrnou plastickou deformací. Nestabilní plastická deformace vzniká vlivem koncentrace tepla do lokalizovaných míst [32]. V těchto tzv. smykových pásech se mění vlivem vysoké teploty lokálně mechanické vlastnosti [25] a nastává zde smyková deformace. Pomocí rychlostní

kamery bylo sledováno periodické zabrzdění před smykovou deformací. Snížení vzájemné rychlosti je důvodem vzniku svarů mezi stříškou a nástrojem. Opakovaný vznik a oddělení svarů způsobuje významné opotřebení nástroje [32].

Vzniku segmentové třísky lze úspěšně zabránit snížením řezné rychlosti a posuvu [25]. Při testech v experimentální části mé práce, byla použita řezná rychlost 60 m.min⁻¹ a ke vzniku segmentové třísky nedocházelo.

3.3.3. Vliv jednotlivých vlastností slitin titanu na proces obrábění

V této kapitole se pokusím rozebrat vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti, které se významně podílí na obrobiteľnosti slitin titanu. Obecný rozbor a jejich vliv na proces obrábění lze nalézt v kapitole *obrobiteľnosť*.

Nízká tepelná vodivost

Tepelná vodivost slitin titanu je v porovnání s ocelí více než 6x nižší. ($\lambda_{\text{Ti6Al4V}} = 7,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\lambda_{\text{OCEL}} = 47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) [28, 51]. Tato skutečnost způsobuje nedostatečný odvod tepla z místa řezu, teplota zde může dosahovat v závislosti vybrané slitině a použité technologii až 1100°C [27].

Pevnost za zvýšených teplot

Pevnost slitin titanu se výrazně snižuje až při dosazení teploty kolem 800°C [27]. V aplikacích těchto slitin je tato skutečnost vysoce ceněnou vlastností, při obrábění však způsobuje významné zvýšení namáhání břitu a zvýšení teploty [29].

Vysoká reaktivita

Slitiny titanu se vyznačují vysokou chemickou reaktivitou za zvýšených teplot [27]. Vzhledem k vysoké teplotě a tlaku v místě řezu popsané výše, dochází při obrábění ke spojování materiálu obrobku s nástrojem mechanismem tvorby mikrosvarů [2, 27].

Nízký modul pružnosti

Slitiny titanu mají téměř poloviční hodnotu modulu pružnosti oproti běžné oceli, příkladem může být srovnání hodnot pro Ti6Al4V a ocel. ($E_{\text{OCEL}} = 210 \text{ GPa}$, $E_{\text{Ti6Al4V}} = 110\text{-}119 \text{ GPa}$) [28]. Vlivem nízké hodnoty modulu pružnosti má materiál obrobku snahu při zatížení nástroji uhnout [29]. Tato skutečnost způsobuje nižší úběr materiálu [29] a tendenci ke vzniku vibrací [27, 29].

3.3.4. Pravidla pro efektivní obrábění

Výše uvedené vlastnosti často způsobují významné zvýšení opotřebení nástroje a snížení efektivity obrábění slitin titanu. Volbou vhodných řezných podmínek a nástrojů lze tyto překážky částečně eliminovat a dosáhnout efektivního procesu obrábění.

Nízké řezné rychlosti a vyšší hodnoty posuvu

Doporučuje se použít nízké řezné rychlosti ze dvou základních důvodů, zaprvé snížení teploty v místě řezu [2, 29], druhým důvodem je zabránění vzniku segmentové třísky [29]. (viz. *Tvorba třísek*)

Hodnota posuvu by měla být dle možností co nejvyšší pro zachování efektivity řezného procesu. Posuv je možné navýšit, protože ovlivňuje teplotu méně než řezná rychlost [2].

Nástroj s ostrým břitem

Ostrý břit je vhodné použít z důvodu snadnějšího pronikání do materiálu obrobku. Autor připodobňuje řezný proces u slitiny titanu charakteristické vysokou pevností a elasticitou ke krájení dortu, kde je nutné taktéž použít pro ukrojení úhledných částí ostrého břitu [31]. Díky použití ostrého nástroje klesá řezná síla, vzniká méně tepla a eliminuje se zpevňující proces povrchové vrstvy materiálu [31]. Dalšími důvody použití ostrého nástroje mohou být eliminace vzniku nárůstku na břitu nástroje a snížení odpružení obrobku [2].

Dostatečné chlazení

Efektivní chlazení má při obrábění slitin titanu rozhodující roli pro efektivitu řezného procesu a zvýšení trvanlivosti nástroje. Při použití vhodné řezné kapaliny jsme schopni snížit teplotu až o 30% a významně snížit tření mezi třískou a nástrojem. Zvýšit chladicí účinek je možné použitím jedné z moderních technologií chlazení, patří sem vysokotlaké chlazení, kryogenní chlazení kapalnými plyny (CO_2 , N_2) nebo nástroj s vnitřním chlazením [29].

Vysoká tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek

Tuhost soustavy měla být co nejvyšší [1, 2], aby byla schopna zabránit vniku vibrací. Vibrace při obrábění slitin titanu vznikají převážně vlivem nestabilní deformace při tvorbě segmentové třísky [29].

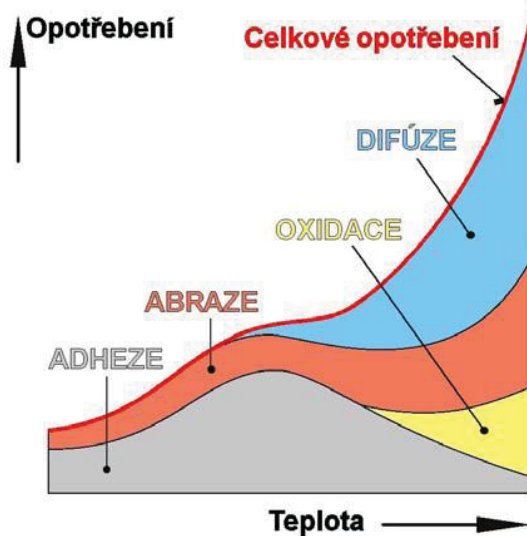
4 OPOTŘEBENÍ

Opotřebení řezného nástroje je vzhledem k extrémním podmínkám panujících v místě řezu nedílnou součástí procesu obrábění. Eliminovat opotřebení je možné pouze za předpokladu znalosti jednotlivých mechanismů opotřebení, příčin jejich vzniku a z toho plynoucích možných alternativ řešení.

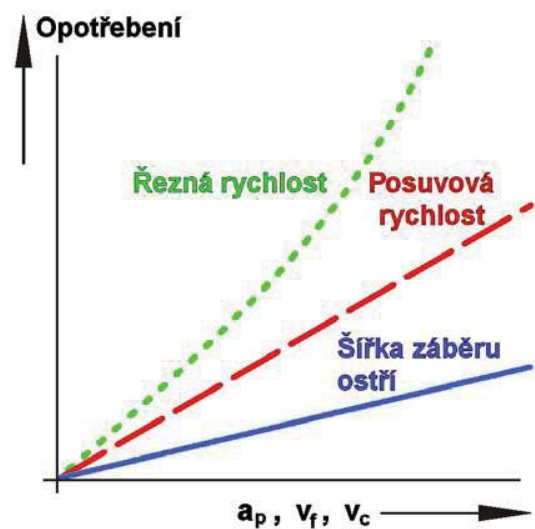
Charakter opotřebení závisí na podmínkách v místě řezu, ty mohou být ovlivněny zejména materiálem obrobku, volbou řezných podmínek nebo chlazení. Významný ovlivňuje charakter opotřebení materiál řezného nástroje.

Opotřebení vzniká v závislosti na zmíněných skutečnostech v konkrétních případech řezného procesu odlišným způsobem. Některá pravidla pro vznik opotřebení jsou však obecně platná a je možné se jimi řídit při zvyšování trvanlivosti nástrojů a produktivity obrábění. Zmíním závislost opotřebení na teplotě v místě řezu a na zvolených řezných podmínkách.

S rostoucí teplotou celkové opotřebení významně stoupá, v průběhu se mění podíl jednotlivých mechanismů. Z řezných podmínek nejvíce ovlivňuje vznik opotřebení řezná rychlost [5]. Těchto poznatků později využijeme k rozboru opotřebení slitin titanu.



Obr. 6 Vliv teploty na aktivitu jednotlivých mechanismů opotřebení [5]



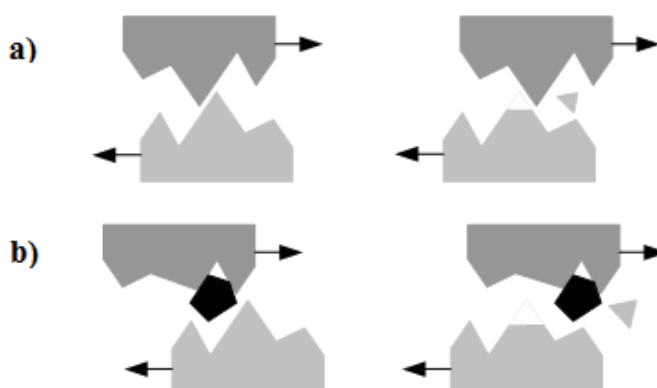
Obr. 7 Závislost celkového opotřebení na řezných podmínkách [5]

4.1. Mechanismy opotřebení řezných nástrojů

Rozlišujeme pět základních mechanismů opotřebení. Na opotřebení celkovém se v závislosti na podmínkách obrábění podílí určitá kombinace těchto mechanismů [3].

4.1.1. Abrazivní opotřebení

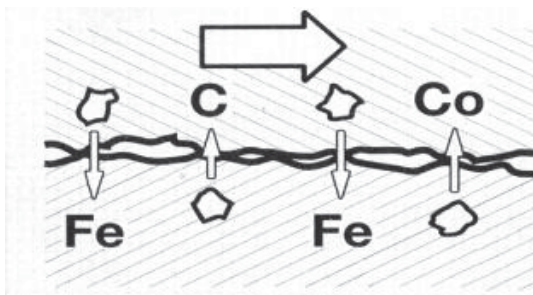
Abrazivní opotřebení je častým mechanismem opotřebení řezných nástrojů. Opotřebení však lze oproti ostatním mechanismům snadno předpovídat a zajišťuje stabilní životnost nástroje [35]. Opotřebení je způsobeno otěrem povrchu nástroje o obráběný materiál, rozlišujeme otěr nástroje přímo o obráběný materiál (obr. 8a) a otěr způsobený uvolněnými tvrdými částicemi (obr. 8b)[36]. Schopnost nástroje odolávat abrazivnímu opotřebení je dána zejména tvrdostí řezného materiálu při zvýšených teplotách [3].



Obr. 6 Princip abrazivního opotřebení [39]

4.1.2. Difuzní opotřebení

Difuzní opotřebení je založeno na difuzi atomů mezi povrchy břitu nástroje a obráběného materiálu na principu vyrovnání koncentrací atomů mezi povrchy [35]. Intenzita tohoto chemického procesu je dána afinitou kontaktních povrchů a působící teplotou [3]. Difuzní opotřebení způsobuje oslabení materiálu, projeví se nejvíce v kontaktu třísky a čela nástroje [35] a způsobuje zde tzv. žlábek na čele nástroje [3].

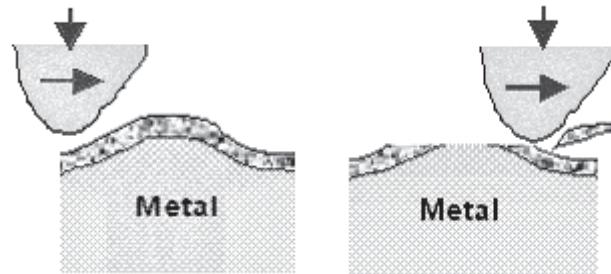


Obr. 7 Princip difuzního opotřebení [3]

4.1.3. Oxidační opotřebení

Na povrchu nástroje vzniká vlivem atmosférického kyslíku, při zvýšené teplotě vrstva oxidu [35]. V závislosti na materiálu nástroje popřípadě povlaku se vytváří vrstva oxidu o různé tvrdosti a přilnavosti k povrchu [3]. Vrstvy oxidu s nízkou tvrdostí nebo špatnou přilnavostí k povrchu nástroje jsou během obrábění narušeny a odcházejí společně se třískou.

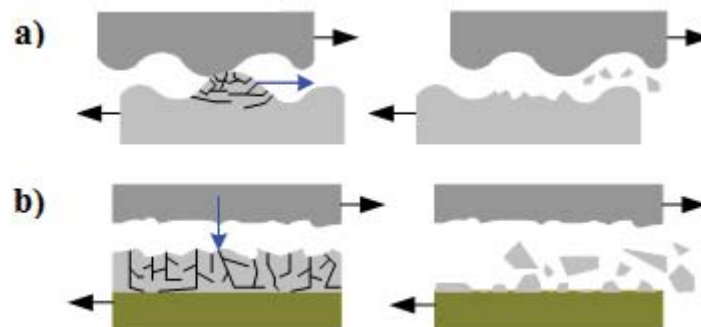
Tento proces probíhá stále dokola a způsobuje úběr materiálu nástroje [35]. Některé kovy však tvoří vysoce stabilní oxidy (například hliník), vrstvy s těmito kovy používáme při povlakování nástrojů ke zvýšení tvrdosti a teplotní stability nástroje [20].



Obr. 8 Princip oxidačního opotřebení [41]

4.1.4. Lom

Lom nastává při přetížení nástroje vlivem kolísání teplot nebo vysokých řezných sil a proměnného zatížení [3]. Nadměrné zatížení břitu může být vyvoláno opakovaným silovým působením, rozlišujeme tangenciální (obr. 11a) a normálový směr (obr. 11b) [39]. Příčinami mechanického přetížení nástroje mohou být zvolené vysoké řezné podmínky [38], nevhodně vybraný materiál nástroje [3] nebo proměnné řezné síly a vznikající vibrace [5, 38].



Obr. 9 křehký lom [39]

4.1.5. Adhezní opotřebení

Adhezní opotřebení je způsobeno opakovaným vznikem a porušováním mikrosvarů [36] mezi vrcholky nerovností daných povrchů [5]. V těchto místech dochází vlivem malé kontaktní plochy ke zvýšení působícího tlaku. Při oddělení spojených materiálů hrozí poškození nástroje vyštípnutím jeho části [35]. Adhezní spojování materiálů je základem tvorby nárůstků na břitu nástroje [3]. (Podrobně rozebráno v podkapitole *Klasifikace typů opotřebení*.)

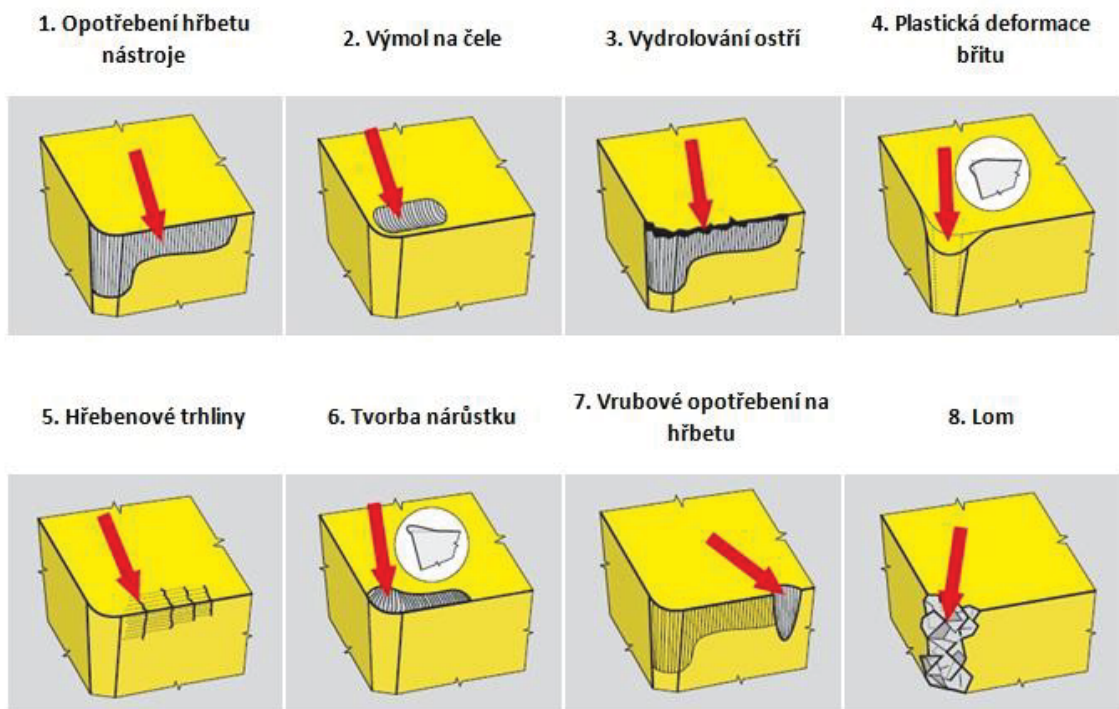


Obr. 10 Princip adhezního opotřebení [39]

4.2. Klasifikace typů opotřebení břitu nástroje

Opotřebení břitu řezného nástroje dělíme za účelem snazšího rozpoznání do více skupin, dle literatury se může toto dělení částečně lišit. Rozdělení nám posléze usnadní nalezení vhodného řešení pro danou konkrétní operaci a nastalý problém.

Výskyt jednotlivých typů opotřebení je charakteristický pro obrábění daného materiálu při zvolených řezných podmínkách. V následující kapitole se pokusím rozebrat jednotlivé typy opotřebení, konkrétní formy opotřebení při obrábění slitin titanu provedu v kapitole *Opotřebení při obrábění slitin titanu*.



Obr. 11 Typy opotřebení řezného nástroje [34]

4.2.1. Opotřebení hřbetu nástroje

Jedná se nejčastější typ opotřebení řezného nástroje, vzniká abrazivním mechanismem v kontaktu hřbetu nástroje a obrobku při utváření třísky [3]. Pokud dochází k opotřebení stejnoměrně, postupně a s nepřilíživě vysokou intenzitou považujeme stav za adekvátní zejména pro jeho snadnou predikci [38].

Řešení a rizika:

Omezit vznik opotřebení můžeme snížením řezné rychlosti, zvýšením posuvu, zvýšením odolnosti břitu proti opotřebení [37, 33] nebo zvýšením intenzity chlazení [34].

Při vysokém opotřebení nástroje se mění geometrie břitu, důsledky mohou být snížení jakosti povrchu, nedodržení zadaných tolerancí [38].

4.2.2. Výmol na čele

Opotřebení nazýváme díky svému tvaru také opotřebení ve tvaru žlábků. Ke tvorbě výmolů dochází v kontaktu odcházející třísky s čelem nástroje. Vlivem vysoké teploty je usnadněn difuzní mechanismus opotřebení, jehož vlivem se snižuje odolnost nástroje proti abrazivnímu opotřebení [3].

Řešení a rizika:

Tvorbě výmolů zamezíme snížením řezné rychlosti, použitím nástroje s vyšší termomechanickou stabilitou a tvrdostí za zvýšených teplot (například povlakovaného vrstvou Al_2O_3) nebo použitím pozitivní geometrie nástroje [37].

Při běžných řezných podmínkách nehrozí vysoké nebezpečí způsobené tvorbou výmolů, protože k opotřebení hřbetu nástroje dochází často před kritickým opotřebením čela nástroje [33]. Nadměrného opotřebení čela nástroje způsobuje změnu geometrie nástroje a oslabení břitu [37].

4.2.3. Vydrolování ostří

Vydrolování ostří se projevuje vylamováním částí břitu nástroje [37]. V porovnání s abrazivním opotřebením hřbetu je tento typ opotřebení těžko předvídatelným [33] a způsobuje zvýšené opotřebení břitu [37].

Řešení a rizika:

Zabránit zmíněnému typu opotřebení lze volbou houževnatějšího materiálu a odolnější geometrie nástroje [37], zamezení vzniku vibrací a změnou řezných podmínek - snížení posuvu a zvýšení řezné rychlosti [33].

Hlavní riziko spočívá v obtížné predikci opotřebení, během krátkého času může nastat výrazné snížení kvality obrobeného povrchu [37].

4.2.4. Plastická deformace břitu

S plastickou deformací břitu se setkáváme při vysokých řezných otáčkách vlivem vzrůstu působící teploty [33], při které se pevnost řezných materiálů výrazně snižuje.

Řešení a rizika:

Pro zamezení vzniku plastické deformace břitu je třeba omezit vznik vysoké teploty v místě řezu a snížit zatížení břitu nástroje zejména snížením řezných podmínek a účinným chlazením [33]. Druhou možností je zvýšit odolnost nástroje zvýšením pevnosti a změnou geometrie špičky [34].

Při plastické deformaci břitu dochází v důsledku změny geometrie břitu ke snížení kvality povrchu, zhoršení utváření třísek a nárůstu řezných sil, jež mohou vést k lomu nástroje [37].

4.2.5. Hřebenové trhliny

Trhliny situované kolmo na břit nástroje vznikají při kolísání teplot nástroje. Příčinou je často přerušovaný řez při frézovací operaci nebo nestejný přívod chladicí kapaliny [33].

Řešení a rizika:

V závislosti na konkrétní řezné operaci často pomůže změna přívodu chladicí kapaliny, použití VBD o vyšší houževnatosti [37] a snížení řezné rychlosti [34]. Po objevení se trhlin na břitu nástroje hrozí snížení kvality obrobenej plochy a křehké porušení části břitu [37].

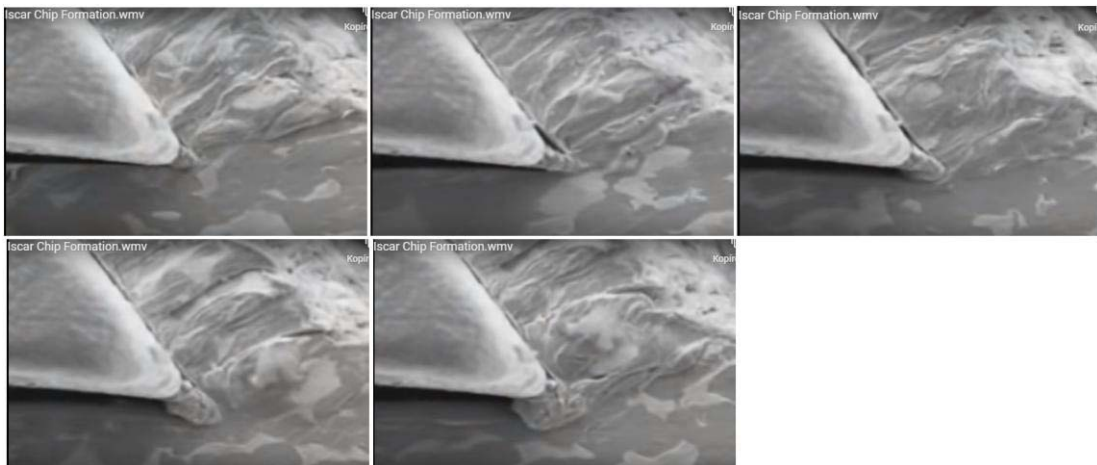
4.2.6. Tvorba nárůstku

Vlivem vysokých teplot a tlaků v místě řezu dochází k adhezivnímu spojování materiálu obrobku s nástrojem pomocí tzv. mikrosvarů [30], důležitým faktorem pro vnik nárůstku je afinita obou materiálů [3]. Po určitou dobu plní nárůstek funkci břitu, vlivem působících sil nárůstek periodicky vzniká a zaniká [33].

Řešení a rizika:

Riziko tvorby nárůstku je u určitých materiálu nevyhnutelné, snížit však lze použitím pozitivní geometrie nástroje s ostrou hranou [37], použitím vhodné řezné kapaliny a změnou řezné rychlosti [26].

Při porušení vzniklého mikrosvaru dochází k vyštípnutí části nástroje [33]. Popsaným mechanismem může během několika minut dojít k totální degradaci nástroje a jeho nutné výměně. Vytvořený nárůstek mění jeho geometrii břitu nástroje, odloučené nestabilní části snižují jakost obrobenej plochy a hrozí nedodržení zadaných tolerancí, protože břit s nárůstkem má tendenci ubírat více materiálu [26].



Obr. 12 Mechanismus tvorby nárůstku [26]

4.2.7. Vrubové opotřebení na hřbetu

Jedná se o lokalizované opotřebení na hřbetu nástroje, příčinou je kontakt nástroje se zpevněnou vrstvou na povrchu obrobku. Poloha vrubu je dána hloubkou řezu. Ke tvorbě vrubu dochází mechanismem adheze a abraze [38].

Řešení a rizika:

Pro snížení rizika vzniku vrubového opotřebení se doporučuje použít otěrovzdornější povrch břitu nástroje, zvolit nižší uhel nastavení ostří [34, 37], a popřípadě měnit hloubku řezu [33].

V důsledku vrubového opotřebení dochází ke zhoršení kvality povrchu a při velkém opotřebení hrozí křehký lom vlivem oslabení nástroje [37].

4.2.8. Lom

Lom nástroje a jeho příčiny jsou důkladně popsány v předešlé kapitole. Lom bývá konečným stadiem vývoje opotřebení nebo znakem přetížení nástroje [3].

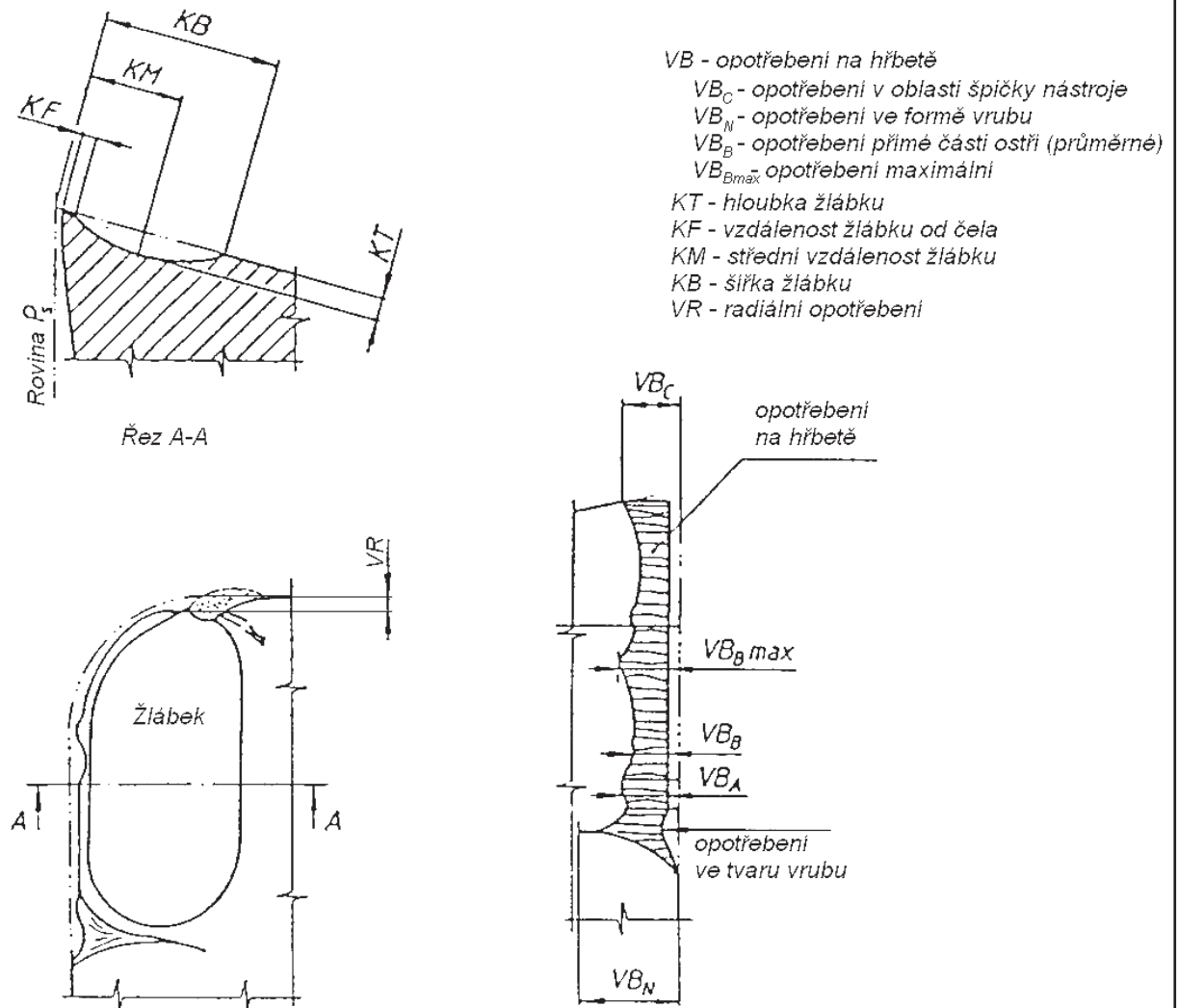
Řešení a rizika:

Riziko lomu nástroje snížíme včasnou výměnou nástroje před dosažením kritického opotřebení, volbou houževnatého materiálu nástroje a vhodných řezných podmínek pro danou operaci a konkrétní materiál a výběrem odolnější geometrie nástroje [37].

Lom znamená často ukončení trvanlivosti nástroje, zároveň hrozí poškození obrobku i částí obráběcího stroje [37]. Proto bychom se měli tomuto scénáři vyhnout i za cenu zvýšení dalších typů opotřebení.

4.3. Kriteria opotřebení

Opotřebení řezného nástroje kvantifikujeme pomocí kritérií opotřebení daných normou ČSN ISO 3685. Uvedená norma udává následující formy opotřebení a jejich charakteristiky [44].



Obr. 13 Klasifikace opotřebení břitů nástroje dle ISO 3685 [44]

Kriteria pro posouzení opotřebení nástroje a jejich hodnoty se liší dle konkrétní aplikace. Pro danou operaci se zvolí kritéria, u nichž předpokládáme významné opotřebení nebo ovlivnění prováděného procesu obrábění. Hodnoty jednotlivých kritérií volíme dle předpisů firmy, všeobecných doporučení nebo zkušenosti tak, aby byly dodrženy dané požadavky na jakost obrobené plochy nebo zadané tolerance. U hrubovacích operací může mít kritérium význam při dodržení dostatečné jakosti povrchu dosedací plochy pro další operaci, často se však kritérium shoduje s kritériem trvanlivosti nástroje [5, 51].

4.4. Rozbor opotřebení při obrábění $\alpha - \beta$ slitin titanu

Při obrábění $\alpha - \beta$ slitin titanu dochází k významnému opotřebení řezného nástroje vlivem vysokého tepelného i mechanického namáhání [25]. Obtíže pramení z fyzikálních a mechanických vlastností titanu, podmínky obrábění a jejich důsledky jsou podrobně rozebrány v předchozí kapitole *Obrobitelnost slitin titanu*.

Formy opotřebení řezných nástrojů se významně liší v závislosti na řezných podmínkách, materiálu nástroje a jednotlivých částech břitu. V následující kapitole se zaměřím na opotřebení řezných nástrojů z nepovlakovaných, popřípadě povlakovaných SK. Nejčastějšími typy opotřebení řezných nástrojů jsou opotřebení hřbetu, tvorba nárůstku [42], delaminace povlaku u povlakovaných nástrojů [40], vrubové opotřebení hřbetu, tvorba výmolu na čele nástroje a křehký lom části ostří nebo celého nástroje [27].

Opotřebení VBD krom zmíněných kritérií závisí také na způsobu chlazení či přesném složení SK, proto se hodnoty opotřebení a charakteristické rychlosti v jednotlivých studiích mohou výrazně lišit.

4.4.1. Opotřebení v závislosti na řezné rychlosti

Jak již bylo uvedeno, při obrábění slitin titanu teplota na rozhraní nástroj-obrobek silně závisí na velikosti řezné rychlosti. Se zvyšující se teplotou roste chemická a difuzní interakce nástroje s obrobkem [25]. Při nízkých řezných rychlostech jsou významné mechanické formy opotřebení, konkrétně abraze a křehký lom [29] a dále adhezní opotřebení [42]. Při zvýšení řezné rychlosti se stávají dominantními mechanismy opotřebení adheze a difuze, které mají za následek zvýšené opotřebení čela nástroje ve formě tzv. výmolu [42]. Při vysokých řezných rychlostech a nižšímu množství chladicí kapaliny hrozí kvůli vysoké teplotě a tlaku plastická deformace břitu [29].

Autor ve studii uvádí tyto dominantní opotřebení v závislosti na řezné rychlosti [42].

Při rychlostech 30-60m/min adhezní mechanismus opotřebení, popřípadě abrazivní na hřbetu nástroje. Při rychlostech 90-115m/min opotřebení ve tvaru žlábků na čele nástroje a plastickou deformaci břitu při vysokých řezných rychlostech 122-610m/min.

4.4.2. Vznik nárůstku

Nárůstek na břitu nástroje se při obrábění $\alpha - \beta$ slitin titanu se tvoří velmi často a ovlivňuje ve velké míře opotřebení nástroje. (viz. *Tvorba nárůstku* v kapitole *obrobitelnost*) Tvorba nárůstku závisí na teplotě, nejlepší podmínky pro vznik jsou při 600-800°C. Při teplotách nad 900°C dochází k redukci tvorby nárůstku zřejmě vlivem fázové změny titanu [42]. Z provedených testů a rozboru chemického složení na povrchu VBD ve zpracované studii [42] vychází následující závislost řezné rychlosti a intenzity tvorby nárůstku.

Tvorba nárůstku při zvyšování řezné rychlosti v rozmezí 30-60m/min narůstá, při rychlostech okolo 60-90m/min dochází ke slabému poklesu a poté znova k růstu v rozmezí rychlostí 90-115m/min. Při překročení řezné rychlosti 115 m/min vzroste teplota v místě řezu nad daných 900°C a dochází ke snížení tvorby nárůstku [42].

5 ŘEZIVOST

Řezivost je souhrnnou vlastností řezného nástroje, udávající jeho schopnost provádět danou řeznou operaci za daných podmínek. Řezivost nelze považovat za absolutní veličinu, protože je ovlivněna kromě parametry daného nástroje také z velké míry vlastnostmi obráběného materiálu a dalšími podmínkami obrábění [9]. Řezivost využíváme pro porovnání schopností více nástrojů provádět danou řeznou operaci u konkrétního materiálu obrobku a k optimalizaci procesu [43].

Kriteria řezivosti jsou analogická s kriterii pro obrobitelnost, vhodné kritérium pro porovnání daných nástrojů určíme v závislosti na prioritách dané operace. Hlavním kritériem řezivosti je opotřebenění bříty nástroje. Pro porovnání řezivosti více nástrojů zavádíme tzv. index řezivosti i_R [43].

$$i_R = \frac{V_{cT} \text{ testovaného nástroje}}{V_{cT} \text{ referenčního nástroje}}$$

kde V_{cT} je řezná rychlost při určité trvanlivosti T nástroje [43].

5.1. Řezivost nástrojů při obrábění $\alpha - \beta$ slitin titanu

Velké množství moderních řezných materiálů má při obrábění slitin titanu nízkou řezivost způsobenou specifickými podmínkami při procesu obrábění, více v kapitole *Obrobitelnost slitin titanu*. Optimální řezivost v závislosti na aplikaci vykazují zejména nepovlakované SK [2, 27, 39], dále SK povlakované technologií PVD [27] a nástroje vyrobené z BCBN - bezpojivový CBN a PD - polykrystalický diamant [40].

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

V praktické části mé bakalářské práce jsem se rozhodl porovnat řezivost pěti různých VBD od tří světových dodavatelů při soustružení slitiny titanu Ti6Al4V (Titan grade 5). V práci porovnávám VBD tvaru W, výběr geometrie nástroje však není součástí mé práce. Konkrétní geometrie nástroje se v daném podniku již používala pro danou operaci a materiál. Testy řezivosti VBD probíhaly v zázemí významné brněnské firmy Frentech Aerospace s.r.o., následné vyhodnocení jsem prováděl v laboratořích Fakulty strojního inženýrství.

6.1. Vybrané VBD pro testování

Pro porovnání řezivosti jsem si vybral následující VBD:

- WNMG 080408-GN IC20 (Iscar) - **A**

Nepovlakováno, substrát dle ISO – S05-S20 [46]

- WNMG 080408-HMM AH905 (Tungaloy) – **B**

povlakováno AlTiN metodou PVD, podkladový substrát dle ISO – S01-S15, tloušťka povlaku 1,5 μ m [49]

- WNMG 080408-GN IC830 (Iscar) - **C**

povlakováno AlTiN a TiN metodou PVD, podkladový substrát dle ISO – S15-S30 [46]

- WNMG 080408-QM 1115 (Sandvik) - **D**

povlakováno TiAlN a AlCr₂O₃ metodou PVD[47], další informace výrobce neudává

- WNMG 080408-SM 1115 (Sandvik) - **E**

povlakováno TiAlN a AlCr₂O₃ metodou PVD[48], další informace výrobce neudává

Pro snazší popis a vyšší přehlednost budu při komentování experimentální části práce jednotlivé VBD označovat písmeny A – E, dle seznamu výše.

6.1.1. Firma Frentech

Firma Frentech Aerospace s.r.o. je česká společnost se sídlem v Brně. Zabývá se výrobou přesných dílů pro letecký a vesmírný průmysl, dále výrobou mikroelektroniky, lékařské techniky a dalších odvětví vyžadující precizní zpracování výrobků. S pomocí moderních CNC strojů se zde vyrábí díly ze slitin hliníku a titanu, nerezavějících slitin, nástrojových ocelí a plastů. Díky moderním přístrojům a přesné kontrole je firma držitelem řady certifikátu a ocenění [45].

6.1.2. Podmínky testování

Vnější podmínky při testech jsem se snažil zachovávat konstantní, aby bylo možné naměřené hodnoty objektivně srovnávat. Zmíněnými podmínkami se rozumí použitý stroj, držák VBD, chladicí kapalina, obsluha stroje, materiál obrobku, rozměry obrobku a způsob uchycení obrobku.

U některých podmínek bohužel došlo během testování ke změně, pokusím se proto tyto vnější vlivy jmenovat a zhodnotit jejich vliv na výsledky testování. Konkrétně se jednalo o

lehkou změnu rozměrů obrobku dle produkce ve firmě a rozdílnou kvalitu použitých polotovarů.

Lehká změna rozměrů obrobků během testování však byla vzhledem k nízkému počtu kusů ve výrobní sérii nevyhnutelná. Dále jsem pozoroval u jedné z dodávek zvýšenou tvrdost povrchu polotovarů, způsobenou zřejmě při výrobě.

Zmíněné vlivy jsem se pokusil eliminovat použitím více druhů testovaných VBD při jednotlivých sériích. V závěru hodnotím tyto vlivy za nepříliš významné, a tudíž si mohu dovolit objektivně jednotlivé testování srovnat.

6.1.3. Použitý stroj

Testování probíhalo na stroji firmy Mazak, konkrétně se jednalo o typ QUICK TURN 200MY.

6.1.4. Zvolené řezné podmínky

Řezné podmínky jsem zvolil po konzultaci s technikem firmy, po celou dobu testování zůstali tyto podmínky neměnné. Hodnoty řezných podmínek byly následující:

řezná rychlost $v_c = 60\text{m/min}$

hloubka řezu $a_p = 2,0\text{mm}$

posuv $f = 0,2\text{mm}$

6.2. Provedené testy řezivosti vybraných VBD

6.2.1. Trvanlivost VBD za daných podmínek

Prvním zvoleným kritériem pro porovnání řezivosti jednotlivých VBD bylo měření trvanlivosti destiček za daných řezných podmínek. Měření u jednotlivých VBD probíhalo po dobu do dosažení předem zvoleného točivého momentu vřetene stroje, hodnota byla zvolena na 111,6 Nm.

Kritérium je založeno na čistě praktickém základě, sleduji tímto způsobem dobu, po kterou je VBD schopna efektivně provádět danou operaci. Jinými slovy porovnávám množství materiálu, který je schopna VBD obrobit. Pokud vezmeme v úvahu fakt, že provádím testování při hrubovací operaci, je zvýšení trvanlivosti VBD pro výrobu významnou výhodou. Umožní nám to snížit počet výměn nástroje, spojených s přerušáním řezného procesu a také je tu možnost snížit cenu použitých nástrojů.

6.2.2. Opotřebení VBD za daných podmínek

Druhým kritériem pro porovnání řezivosti jsem zvolil opotřebení VBD za daných podmínek a předem určených časech řezného procesu. Všechny testované VBD vykonaly sérií šesti testů, první řezná hrana obráběla 1 minutu a každá další o jednu minutu déle. Zmíněná metodika testování mi umožnila sledovat vývoj jednotlivých mechanismů opotřebení v čase.

Fotky opotřebení jednotlivých VBD jsem provedl za pomoci mikroskopu ZEISS Stemi 2000-C a snímací aparatury v laboratoři na půdě FSI. Každou řeznou hranu jsem fotil ze tří pohledů – kolmo k čelu nástroje, kolmo k hřbetu nástroje a axonometrický pohled. Pro vytvoření fotky v softwaru ovládajícího samotný mikroskop je nutné vyfotit sérii různě zaostřených fotek, jež jsem spojil ve výsledný snímek v programu LUCIA Image.

6.3. Vyhodnocení řezivosti vybraných VBD

V následující kapitole se pokusím vyhodnotit řezivost vybraných VBD. Řezivost vyhodnocuji na základě dvou kritérií – trvanlivosti VBD a opotřebení VBD. K vyhodnocení mi dále poslouží data z přístroje Alicona infinite focus-G5 a rastrovacího elektronového mikroskopu TESCAN MIRA 3.

Opotřebení jednotlivých VBD jsem zkoumal pomocí světelného mikroskopu ZEISS Stemi 2000-C.

U dvou VBD vykazující nejlepší řezivost bylo provedeno podrobnější zkoumání. Konkrétně se jednalo o VBD WNMG 080408-GN IC20 - A od společnosti Iscar a WNMG 080408-HMM AH905 - B od společnosti Tungaloy. Měření bylo provedeno na přístroji Alicona infinite focus-G5 a rastrovacím elektronovém mikroskopu TESCAN MIRA 3. Měření provedl prof. Ing. Miroslav Píška, CSc., za což bych mu chtěl moc poděkovat.

6.3.1. Trvanlivost VBD

Měření trvanlivosti probíhalo při výrobě více sérií výrobků různých rozměrů. Vlivem této skutečnosti se u jednotlivých operací lišily vedlejší časy a hloubka řezu u poslední špony při obrábění na určitý rozměr. Z těchto důvodů jsem směrodatnou veličinu určil objem obrobeného materiálu konkrétní VBD.

U každé VBD byly provedeny dvě měření. Hodnota objemu obrobeného materiálu za sekundu V_x vyla vypočtena podělením celkového objemu obrobeného materiálu v dané operaci celkovým časem. Tato veličina se v jednom případě podstatně lišila od ostatních, bylo to zřejmě způsobeno delšími vedlejšími časy a menší hloubkou řezu při dané operaci.

Tab. 1 Trvanlivost VBD

	A Iscar GN IC20	B Tungaloy HMM AH905	C Iscar GN IC830	D Sandvik QM 1115	E Sandvik SM 1115
T_1 (s)	3291	2735	1405	1706	1479
V_{o1} (mm ³)	97059	97059	537185	115610	115610
t_1 (s)	230	230	1200	316	316
V_{x1}	422	422	448	366	366
V_1 (mm ³)	1388802	1154170	629440	624396	541314
T_2 (s)	2574	3190	1861	1595	195
V_{o2} (mm ³)	537185	97059	537185	115610	115610
t_2 (s)	1200	230	1200	316	316
V_{x2}	448	422	448	366	366
V_2 (mm ³)	1153152	1346180	833728	583770	71370
V (mm ³)	2541954	2500350	1463168	1208166	612684

Při srovnání obrobeného objemu z výše přiložené tabulky je patrná dominace dvou VBD typu A a B. U obou VBD došlo k vcelku velkému rozdílu hodnot trvanlivosti testovaných kusů. K rozdílu mohlo dojít vlivem defektu u VBD, snížení jakosti obrobku v dané části obrábění, přitavení VBD k obrobku a následnému křehkému porušení při přerušení řezného procesu.

Nízká hodnota obrobeného objemu u VBD typu C byla způsobena velmi nízkou trvanlivostí druhé strany VBD. Hrany VBD naproti již opotřebeným vykazovali trvanlivost pouze okolo 30–90 sekund.

VBD D a E v testu skončili velmi špatně. VBD D vykazovala vcelku rovnoměrnou trvanlivost na jednotlivých hranách pohybujícím okolo pouze 115–380 sekund. U VBD E došlo u jednoho testovaného kusu k lomu VBD a ukončení trvanlivosti.

K lépe podloženým závěrům by bylo možné dojít při provedení více rozsáhlého testování.

Detailní informace o provedeném testování je možné nalézt v tabulkách v příloze k bakalářské práci.

6.3.2. Porovnání velikosti opotřebení VB_{max} v čase

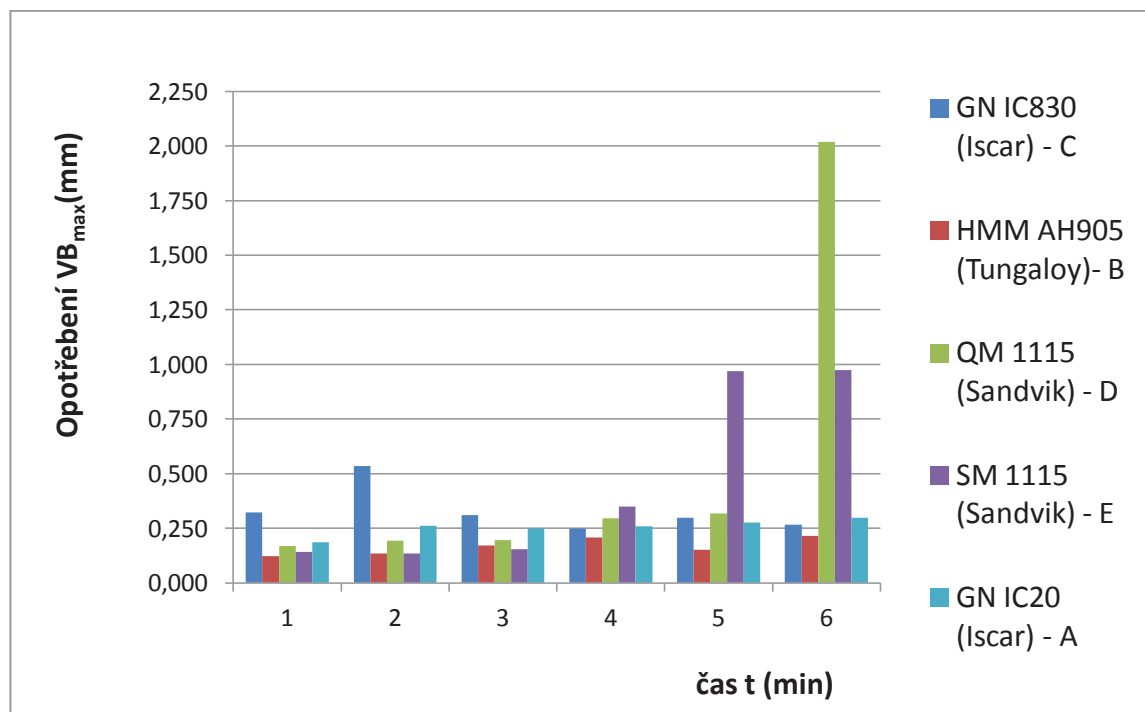
V následující části sleduji vývoj kritéria opotřebení VB_{max} u jednotlivých VBD. Kriterium maximálního opotřebení hřbetu jsem zvolil pro srovnání VBD, protože při konkrétních podmínkách obrábění je opotřebení hřbetu častou příčinou ukončení trvanlivosti nástrojů.

Při vyhodnocení jsem neměl k dispozici software pro přímé měření velikosti opotřebení, proto jsem velikost opotřebení určoval přímo z pořízených snímků hřbetu VBD.

Testování vývoje opotřebení nemohlo bohužel vlivem prostředí výroby probíhat kontinuálně na jedné z řezných hran. Bylo nutné vývoj opotřebení simulovat zvyšující se délkou řezného procesu na jednotlivých hranách VBD. Vlivem této skutečnosti byly do měření zaneseny chyby způsobené nehomogenitou materiálu obrobku a možnými defekty u VBD. V několika případech došlo ke snížení velikosti opotřebení v čase, jedná se o GN IC830 – typ C, HMM AH905 typ B (5. min.), GN IC20 typ A (2. min) a SM 1115 typ E (2. min.)

U jednotlivých VBD došlo významným rozdílným velikosti opotřebení, pod pomyslnou hranicí 0,3mm skočila po šesti minutách řezného procesu pouze VBD B od společnosti Tungaloy. Oproti tomu nejhoršího výsledku, více než 2 mm, bylo dosaženo za stejný časový interval u VBD D od společnosti Sandvik. Podrobné výsledky provedeného testu řezivosti podle kritéria VB_{max} lze nalézt v tabulce níže, dále snímky použité k vyhodnocení naleznete v příloze k bakalářské práci.

Nejvyšší řezivost vychází v souladu s předchozím kritériem trvanlivosti u VBD typu A a B.



Obr. 14 Závislost opotřebení VB_{max} na čase u jednotlivých typů VBD

Tab. 2 Opořebení VBD VBmax (mm)



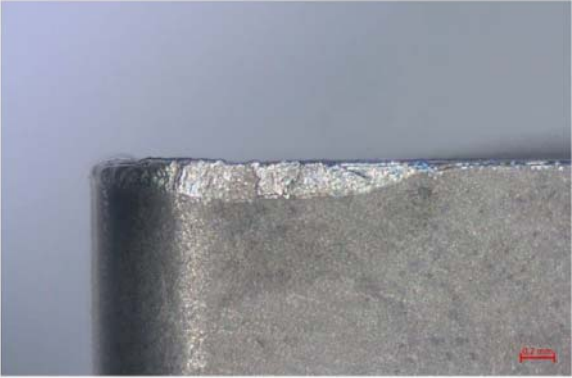

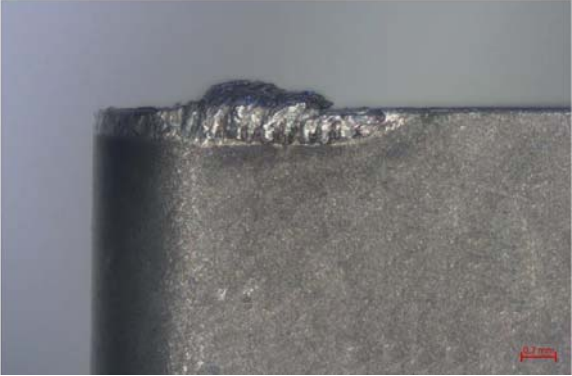

	A Iscar GN IC20	B Tungaloy HMM AH905	C Iscar GN IC830	D Sandvik QM 1115	E Sandvik SM 1115
1. min.	0,186	0,122	0,324	0,169	0,143
2. min.	0,263	0,135	0,535	0,193	0,136
3. min.	0,249	0,117	0,311	0,196	0,155
4. min.	0,260	0,207	0,249	0,297	0,349
5. min.	0,277	0,153	0,298	0,318	0,969
6. min.	0,299	0,215	0,268	2,019	0,975

6.3.3. Vývoj opořebení v čase u vybraných VBD

V následující části práce se pokusím rozebrat vývoj opořebení v čase u testovaných VBD. Rozhodl jsem se pro porovnání použít pohledu kolmo na hřbet VBD a axonometrický pohledu, tyto dva pohledy jsou dostačující pro identifikaci a posouzení jednotlivých opořebení.

Měřítka u snímků hřbetu VBD je zobrazeno v pravém dolním rohu, snímků v axonometrickém pohledu měřítka chybí kvůli přiblížení fotografie.

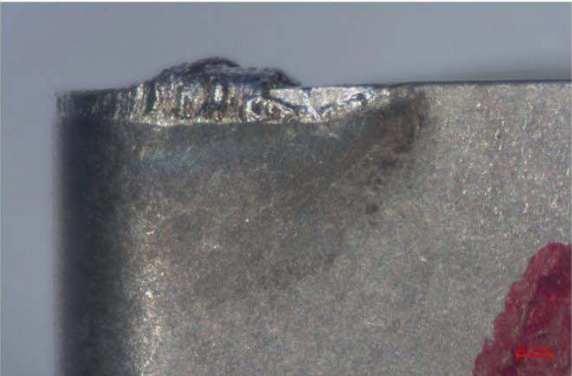

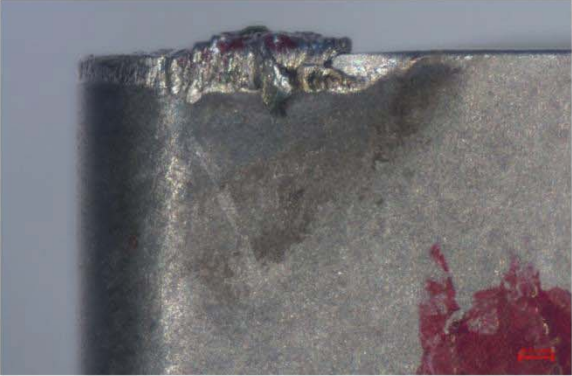



Tab. 3 Opatření VBD typu WNMG 080408-GN IC20 (Iscar) - A v závislosti na čase

čas	Hřbet	Axonometrický pohled
1'		
2'		
3'		

Od první minuty testu probíhá tvorba rovnoměrného opotřebení hřbetu VBD, intenzivně se tvoří na řezné hraně nárůstek. Stav z 2. minuty zobrazuje situaci při oddělení nárůstku. Na axonometrickém pohledu vidíme již od počátku řezného procesu intenzivní tvorbu opotřebení ve tvaru výmolu na čele nástroje.

Na snímku ze třetí minuty pozorujeme na hřbetu černou skvrnu, zřejmě způsobenou vlivem zvýšené teploty v místě řezu.

Tab. 4 Opořebení VBD typu WNMG 080408-GN IC20 (Iscar) - A v závislosti na čase

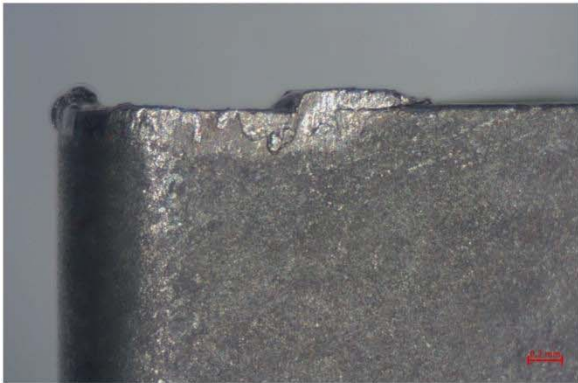
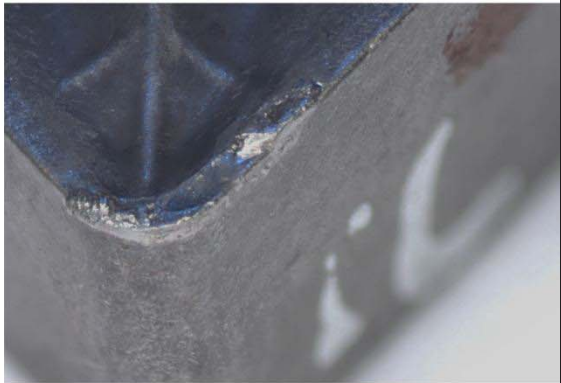
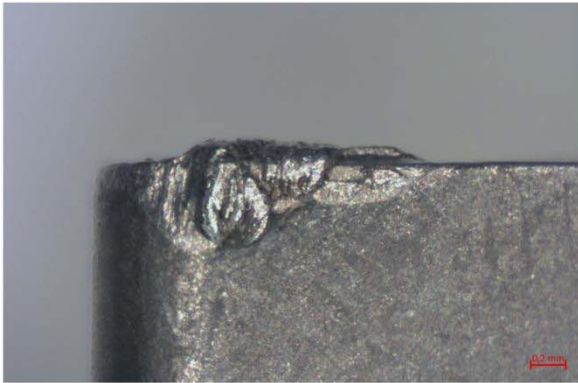

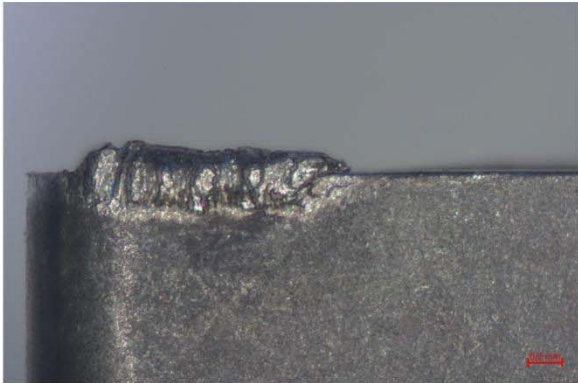
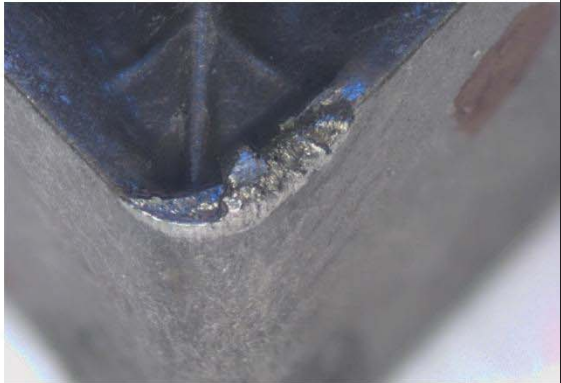
čas	Hřbet	Axonometrický pohled
4'		
5'		
6'		

Opořebení hřbetu VBD vzniká v průběhu dalších třech minut pouze s nízkou intenzitou. Vlivem narůstající teploty v místě řezu roste opořebení ve tvaru výmolu na čele, opořebení zatím nemá vliv na trvanlivost VBD, ovlivňuje však negativně tvorbu a odvod třísek z místa řezu.

Tvorba nevhodného tvaru třísek a tím způsobený špatný odvod třísek byl sledován při obrábění touto VBD v průběhu zkoušek trvanlivosti.

O vysoké teplotě hovoří také stále více intenzivní začernění hřbetu destičky. V šesté minutě dochází dokonce k navaření části obráběného materiálu na nástroj.

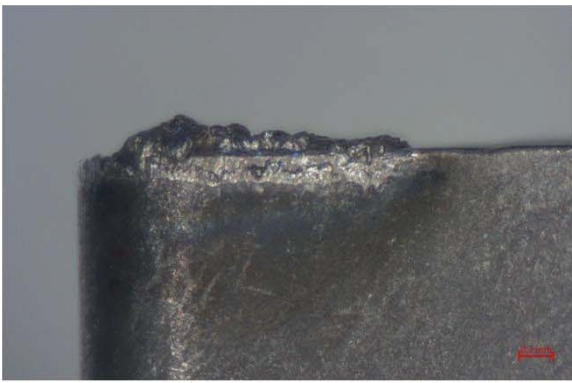

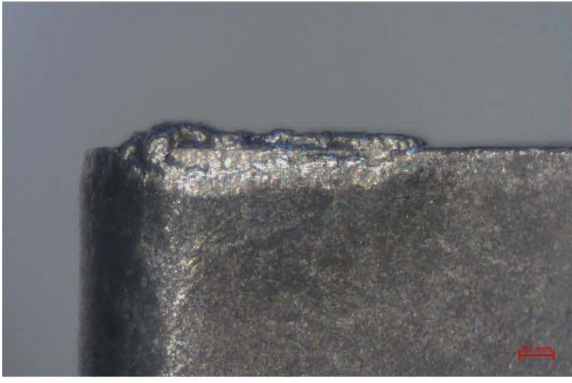

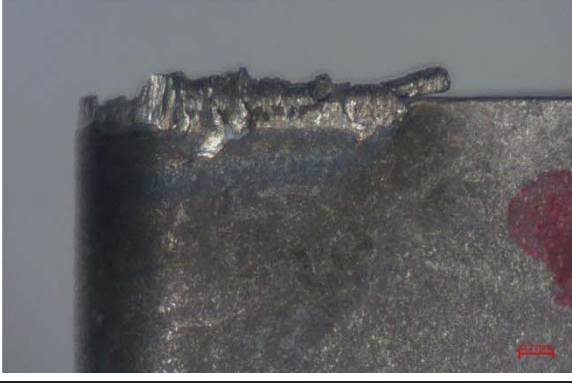

Tab. 5 Opatření VBD typu WNMG 080408-GN IC830 (Iscar) - C v závislosti na čase

čas	Hřbet	Axonometrický pohled
1'		
2'		
3'		

Na hřbetu VBD se tvoří rovnoměrné opotřebení. Výjimkou je opotřebení na snímku z druhé minuty řezného procesu, v tomto případě vzniká nerovnoměrné opotřebení zřejmě vlivem obsahu tvrdých částic v obrobku nebo vrstvy obrobku s vyšší tvrdostí.

Na břitu nástroje se tvoří nárůstek s intenzitou poněkud vyšší než v případě předchozí VBD. Důvodem by mohla být méně ostrá hrana vlivem povlaku přítomného na destičce IC 830.


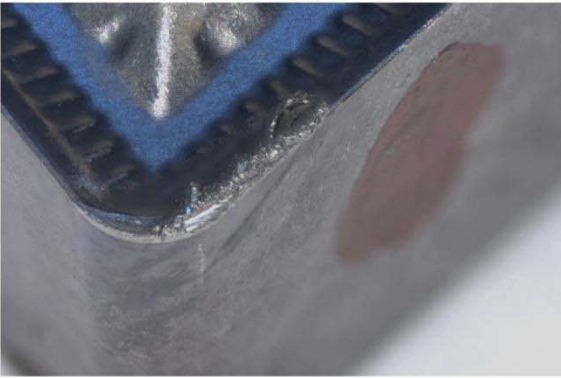
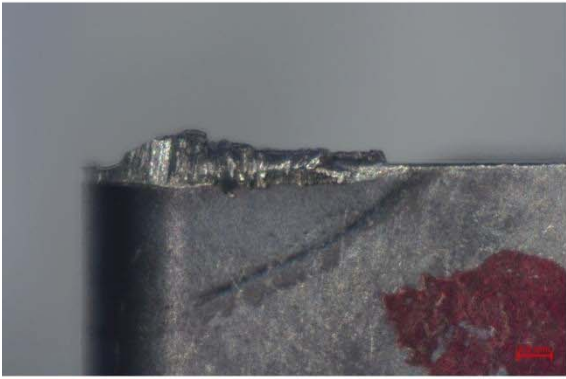
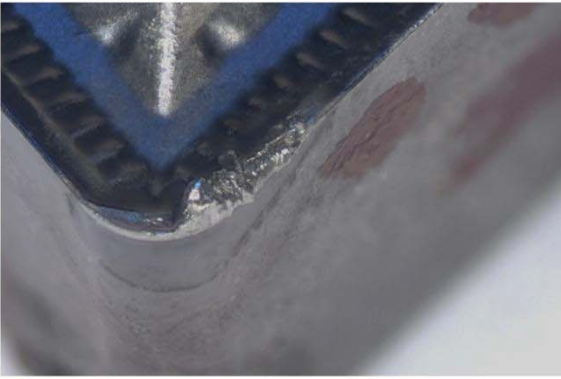
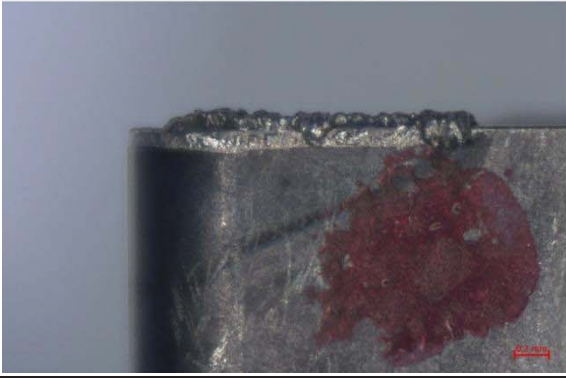
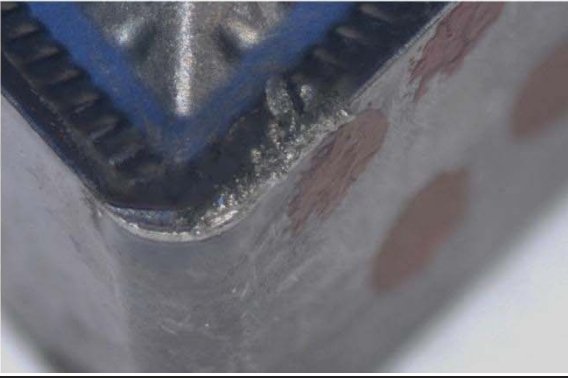
Tab. 6 Opořebení VBD typu WNMG 080408-GN IC830 (Iscar) - C v závislosti na čase

čas	Hřbet	Axonometrický pohled
4'		
5'		
6'		

Intenzita tvorby nárůstku vypadá i v dalších třech minutách poměrně vysoká. Vlivem rostoucí teploty v místě řezu vzniká začerněná část n hřbetu VBD.

Opořebení hřbetu je na všech snímcích poměrně nízké a rovnoměrné.

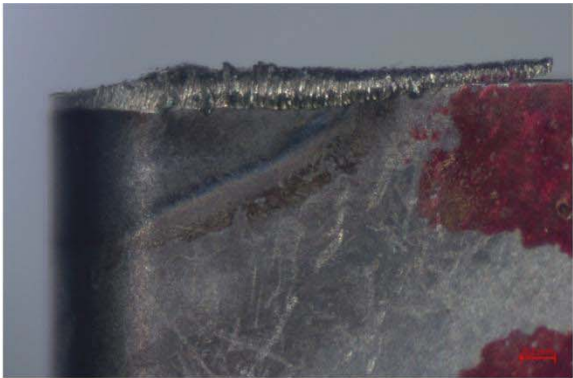
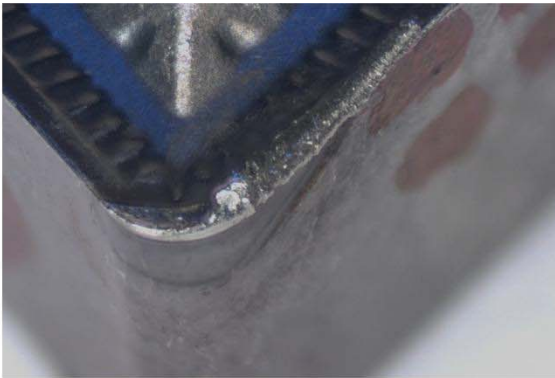
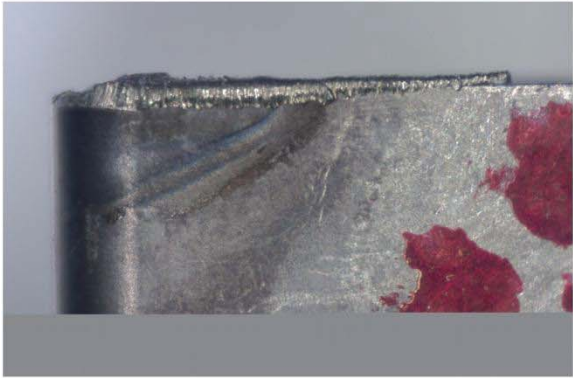

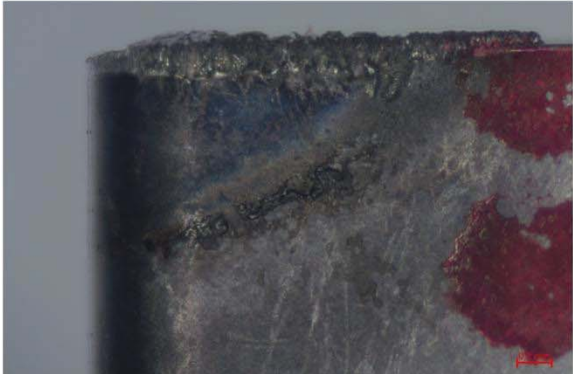
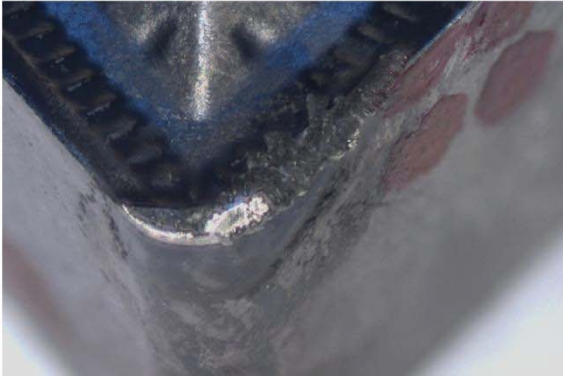
Tab. 7 Opatření VBD typu WNMG 080408-HMM AH905 (Tungaloy) - B v závislosti na čase

čas	Hřbet	Axonometrický pohled
1'		
2'		
3'		

VBD vykazuje dle přiložených snímků velmi nízkého opotřebení. Opotřebení hřbetu i čela je oproti ostatním nástrojům téměř zanedbatelné.

Skvrny způsobené zvýšenou teplotou se tvoří již od počátku obrábění.

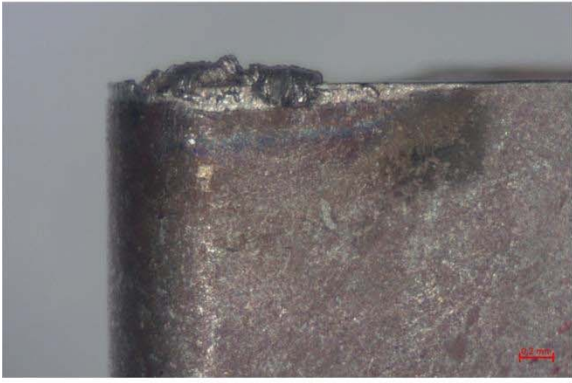

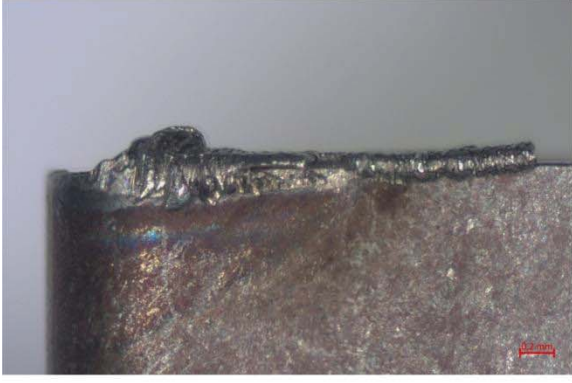

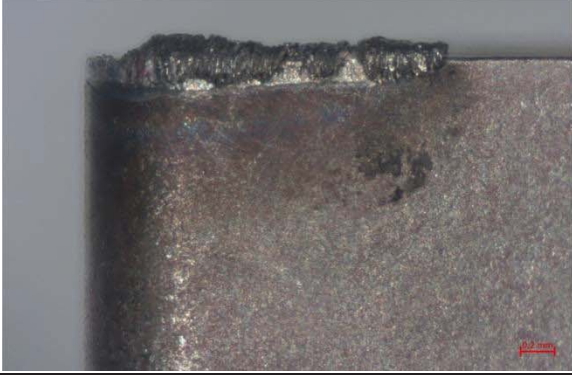

Tab. 8 Opořebení VBD typu WNMG 080408-HMM AH905 (Tungaloy) – B v závislosti na čase

čas	Hřbet	Axonometrický pohled
4'		
5'		
6'		

S postupujícím časem v řezném procesu se zvyšuje tvorba nárůstku na břitu. Teplota břitu nástroje v šesté minutě se zvyšuje natolik, že dochází k navařování obráběného materiálu.

Navzdory popsaným okolnostem VBD po šesti minutách obrábění vypadá velmi zachovale.

Tab. 9 Opatření VBD typu WNMG 080408-QM 1115 (Sandvik) - D v závislosti na čase

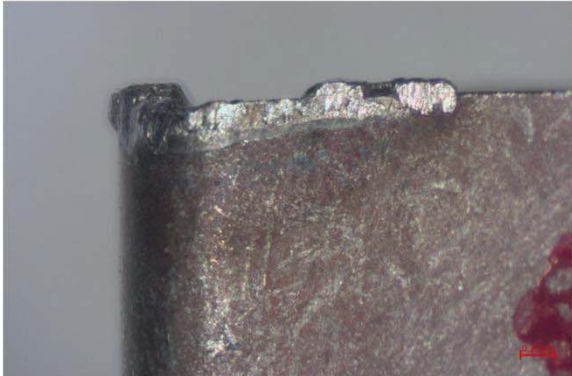



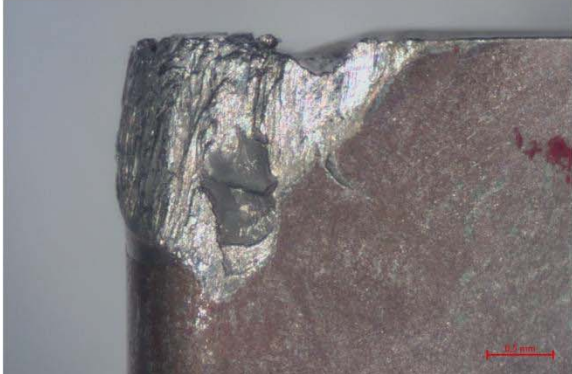

čas	Hřbet	Axonometrický pohled
1'		
2'		
3'		

Na VBD se vytváří rovnoměrné opotřebení hřbetu, výmol na čele se tvoří postupně již od počátku řezného procesu.

Na hřbetu jsou viditelné po celou dobu obrábění skvrny způsobené tepelným zatížením. Na břitu nástroje dochází k intenzivní tvorbě nárůstku.

Na snímku z druhé a třetí minuty dochází k oddělování povlaku na hřbetu zejména v oblasti poloměru špičky.

Tab. 10 Opořebení VBD typu WNMG 080408-QM 1115 (Sandvik) - D v závislosti na čase

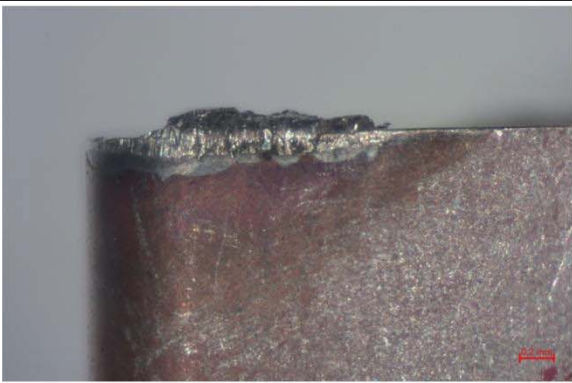

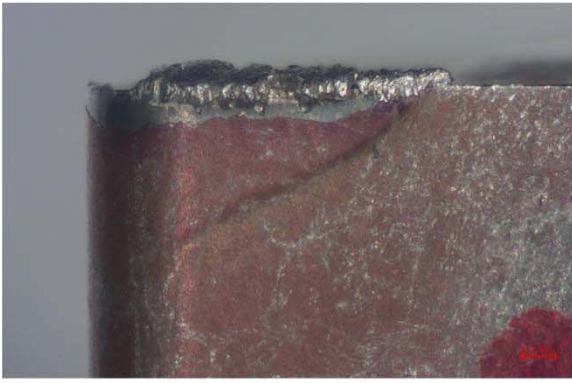

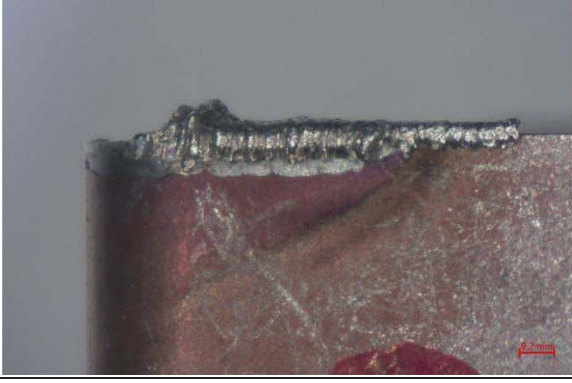

čas	Hřbet	Axonometrický pohled
4'		
5'		
6'		

V dalších minutách obrábění vzniká opořebení hřbetu nejvíce v oblasti špičky, nerovnoměrné opořebení směřuje k totální destrukci špičky VBD.

Oddělování povlaku je dále viditelné na hřbetu v oblasti hlavního ostří a od 4 minuty také na čele VBD.

Na čele VBD dochází k soustavnému zvětšování výmolu, destrukce břitu v šesté minutě mohla být významně urychlena oslabením materiálu vlivem výmolu na čele.

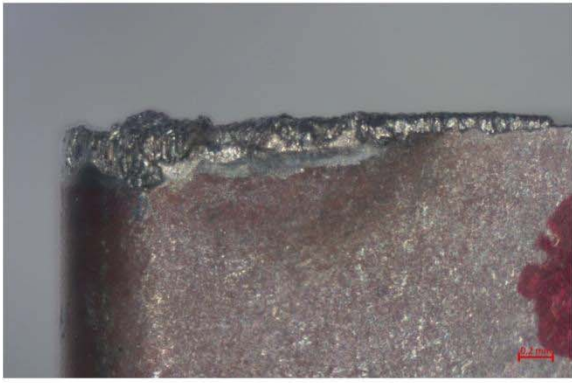



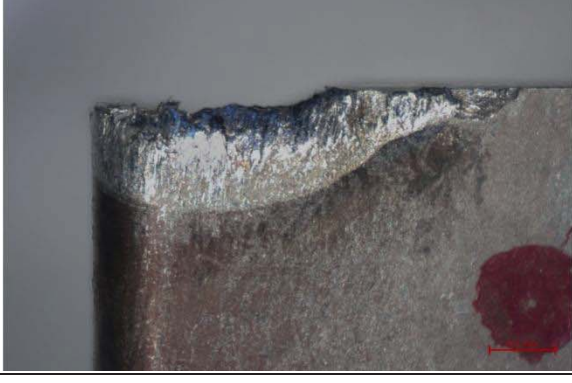

Tab. 11 Opořebení VBD typu WNMG 080408-SM 1115 (Sandvik) - E v závislosti na čase

čas	Hřbet	Axonometrický pohled
1'		
2'		
3'		

Na hřbetu se vytváří v průběhu řezného procesu poměrně nízké a rovnoměrné opořebení. Ke vzniku výmolu na čele nástroje do třetí minuty příliš nedochází, důvodem může být lepší tvar utvařeče třísek v porovnání s předešlou VBD.

Na hřbetu dochází porovnání s předešlým typem VBD ve velké míře k oddělování povlaku. Materiál povlaku i technologie nanášení by měla být dle dostupných informací od výrobce totožná u obou VBD. Rozdíl může být v tloušťce vrstev a přilnavosti k podkladovému substrátu. Další možné vysvětlení může být odlišné tepelné a mechanické namáhání hřbetu VBD způsobené rozdílnou geometrií utvařeče.

Tab. 12 Opořebení VBD typu WNMG 080408-SM 1115 (Sandvik) - E v závislosti na čase

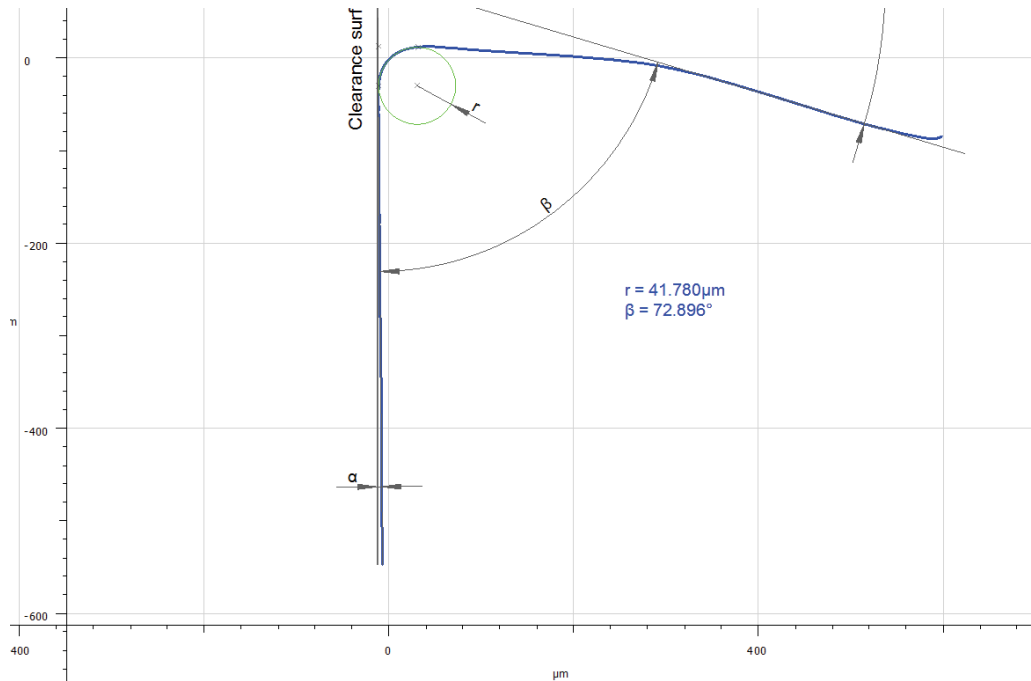
čas	Hřbet	Axonometrický pohled
4'		
5'		
6'		

Opořebení hřbetu i čela VBD po dosažení čtyřech minut rychle narůstá. Také nárůstek se tvoří ve 4-5 minutě s vysokou intenzitou.

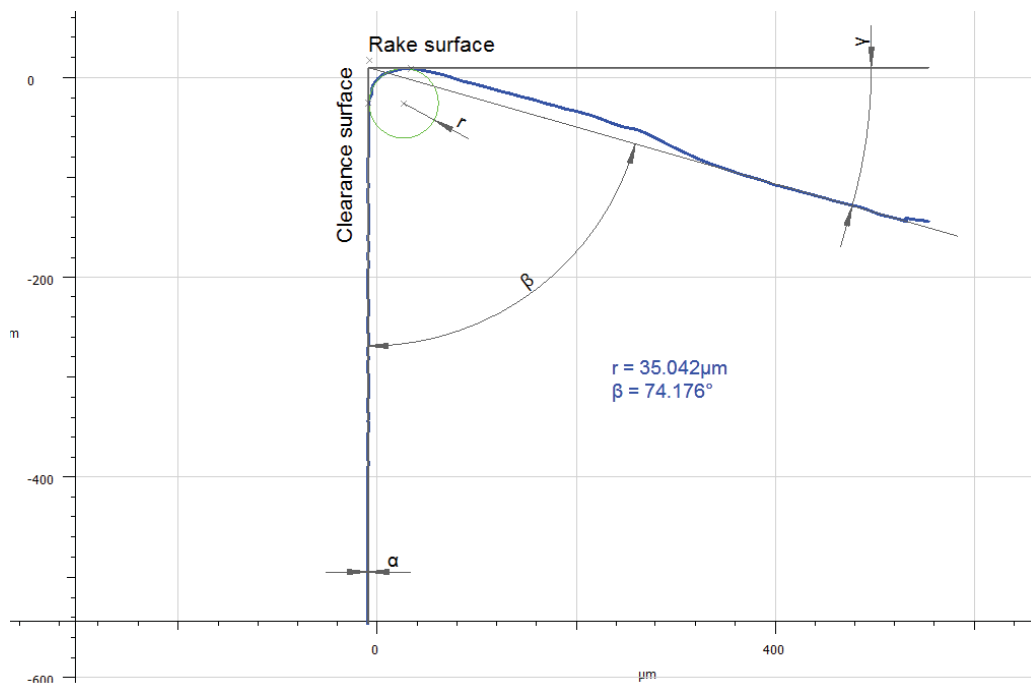
Na snímcích z páté a šesté minuty je patrné oddělování povlaku také na čele nástroje a zároveň došlo ke křehkému porušení materiálu v oblasti poloměru špičky VBD.

6.3.4. Vyhodnocení měření geometrie břitu

Na přístroji Alicona infinite focus-G5 se provedlo měření geometrie břitu za účelem objasnit řezivost VBD GN IC20 (Iscar) - A a HMM AH905 (Tungaloy) – B během testů.



Obr. 15 Geometrie břitu VBD WNMG 080408-GN IC20 (Iscar) - A



Obr. 16 Geometrie břitu VBD WNMG 080408-HMM AH905 (Tungaloy) - B

Pomocí přiložených snímků se pokusím charakterizovat ostří břitu a geometrii fazetky. Ostří břitu udává poloměr zaoblení ostří r , se zvyšující se hodnotou se břit stává méně

ostrým. Velikost poloměru zaoblení ostří u VBD typu A je $41,78\mu\text{m}$ a u VBD typu B je $35,04\mu\text{m}$.

Dále si povšimněme rozdílné geometrie fazetky, liší se šířkou i úhlem. Fazetka na VBD typu B má nižší rozměry a více pozitivní geometrii. Šířka fazetky je $259,6\mu\text{m}$ u VBD typu A a $240,3\mu\text{m}$ u VBD typu B. Úhel fazetky je 85° u typu A a 74° u typu B. Pozitivní geometrie a malá šířka fazetky tvoří ostřejší břit nástroje. Grafické srovnání geometrie VBD A a B je v příloze k bakalářské práci.

Obecně ostří břitu nástroje závisí na zmíněných podmínkách, ostřejší nástroj způsobuje snazší pronikání do materiálu obrobku. (více v kapitole *Geometrie nástroje*) Pro efektivní obrábění slitin titanu je použití ostrého nástroje velmi důležitou podmínkou. (více v kapitole *Obrobitelnost titanových slitin*)

Z testování bylo patrné, že VBD typu B kladla nižší odpor řeznému procesu. U nové VBD typu B bylo pozorováno téměř poloviční zatížení vřetene stroje v porovnání s VBD typu A. Zároveň opotřebení čela VBD a konkrétně fazetky bylo významně nižší. Tyto výsledky odpovídají předpokladům. Celkově ostřejší břit VBD typu B způsobuje nižší řezné síly a s tím spojené tepelné namáhání. Významně vyšší opotřebení čela VBD typu A je způsoben zejména vysokou hodnotou úhlu fazetky.

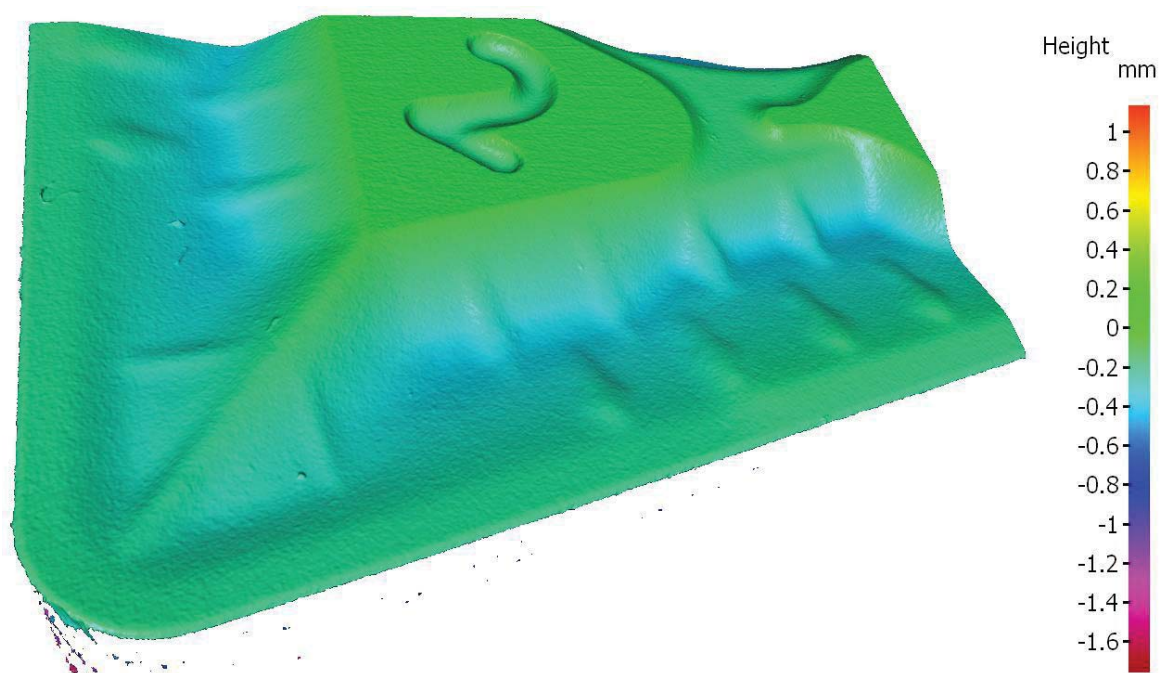
VBD A**VBD B**

Obr. 17 Srovnání opotřebení čela VBD

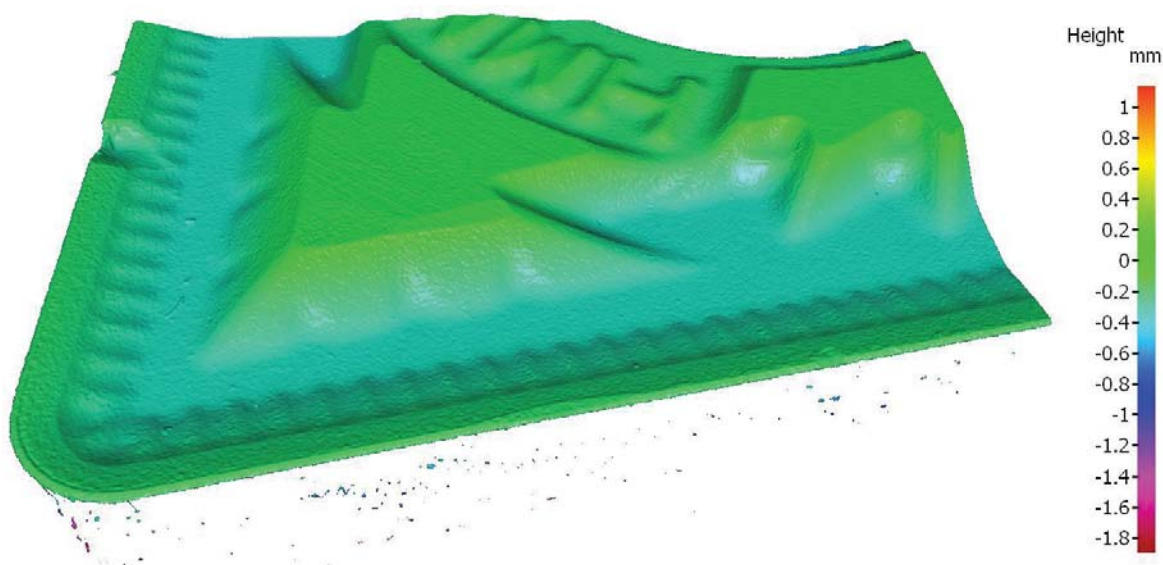
6.3.5. Vyhodnocení měření geometrie čela VBD

Na přístroji Alicona infinite focus-G5 se provedlo 3D optické měření za účelem zobrazení řezné geometrie u VBD A a B. Pomocí výsledků tohoto měření se pokusím zdůvodnit některé z výsledků testování.

Povšimněme rozdílné geometrie utvařeče třísek GN na VBD typu A od společnosti Iscar a HMM na VBD typu B od společnosti Tungaloy.



Obr. 18 Geometrie čela VBD WNMG 080408-GN IC20 (Iscar) - A



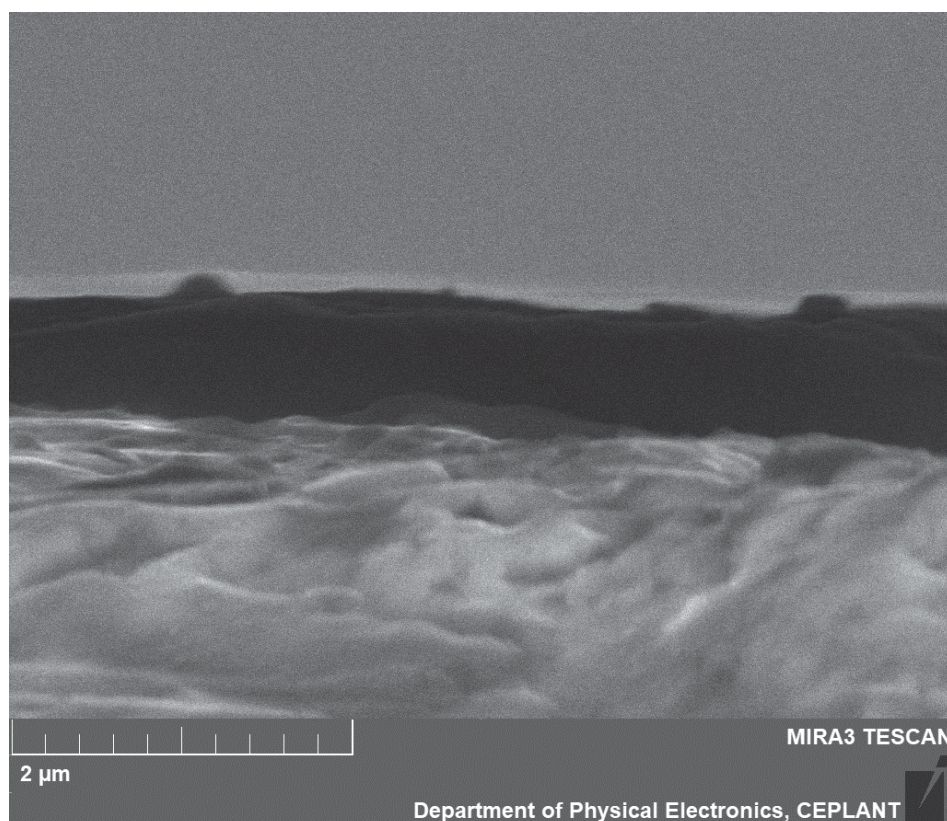
Obr. 19 Geometrie čela VBD WNMG 080408-HMM AH905 (Tungaloy) -B

Mezi danými utvařeči je významný rozdíl, typ HMM má více uzavřenou (pozitivnější) geometrii a je více tvarovaný. V řezném procesu by měl typ HMM lépe tvářet vniklou třísku, tento předpoklad se v testech potvrdil. Po celou dobu obrábění do skončení trvanlivosti VBD dokázal zajistit na rozdíl od typu GN dostatečné tváření třísky. U typu GN docházelo k negativnímu ovlivnění řezného procesu dlouhými zamotávajícími se třískami.

6.3.6. Tloušťka povlaku

Pro zjištění podrobnějších informací a ověření těch udávaných výrobcí ohledně použitých povlaků bylo nutné použít elektronového mikroskopu TESCAN MIRA 3. Povlaky jsem studoval pomocí snímků pořízených na lomu VBD a vyhodnocením tzv. kalotestů.

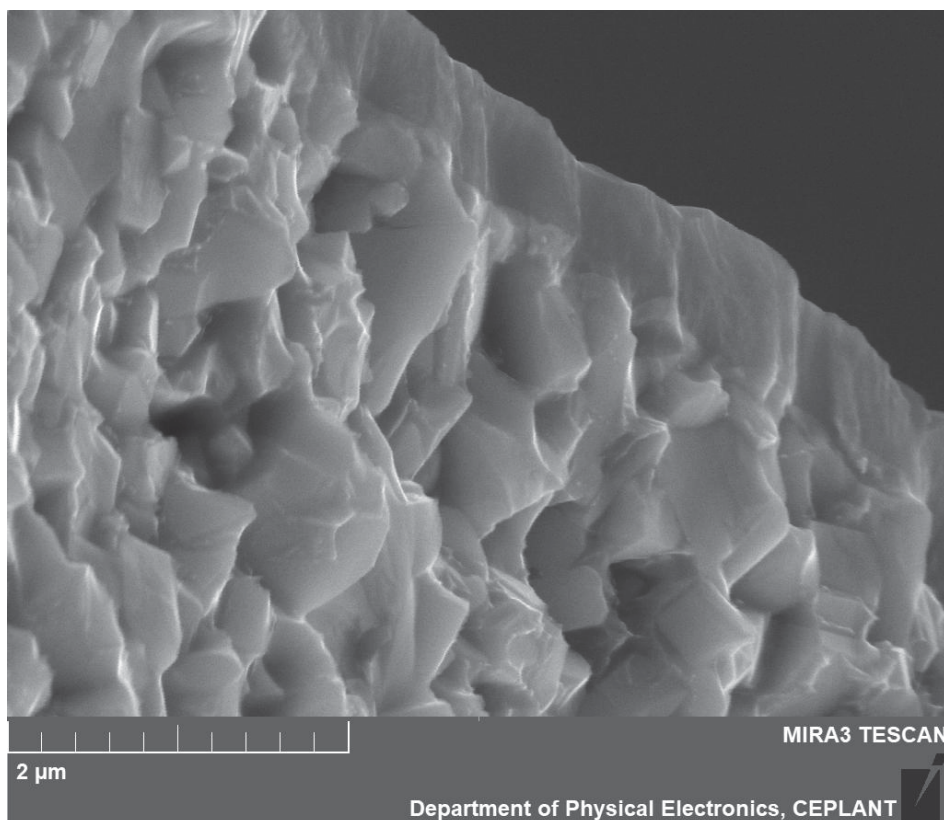
U obou podrobněji zkoumaných VBD byla nalezena na povrchu vrstva povlaku. Toto zjištění bylo u VBD typu A velkým překvapením, protože výrobce VBD udává jako nepovlakované. Podle přiloženého snímku se jedná o povlak o s průměrnou tloušťkou $0,76\mu\text{m}$, povlak z provedeného kalotestu není zcela znatelný. Měření tloušťky povlaku ze snímku lomu i snímek z kalotestu je možné nalézt v příloze k bakalářské práci.



Obr. 20 Povlak Iscar - B

U VBD typu B byl prokázán povlak pomocí snímku lomu VBD i kalotestem. Podle přiložené fotografie se jedná o povlak s průměrnou tloušťkou $0,78\mu\text{m}$, provedený kalotest udává tloušťku $0,784\mu\text{m}$. Výsledky obou metod měření se shodují, jsou však významně odlišné od hodnoty udávané výrobcem ($1,5\mu\text{m}$).

Měření tloušťky povlaku ze snímku lomu i vyhodnocení snímku z kalotestu je možné nalézt v příloze k bakalářské práci.



Obr. 21 Povlak Tungaloy - A

6.3.7. Chemické složení povlaku a podkladového substrátu

Elektronový mikroskop je schopen s vysokou přesností určit chemické složení zkoumaného materiálu. Z pořízených snímků lomu VBD je možné zjistit chemické složení daného povlaku i podkladového substrátu. Jednotlivé chemické prvky jsou vykresleny různými barvami.

V horní části přiložených obrázků je pořízený snímek s popsány chemickými prvky, ve spodní části je zobrazen výskyt jednotlivých prvků na samostatných snímcích. Součástí získané analýzy je také procentuální hmotnostní obsah jednotlivých prvků.

Množství jednotlivých prvků ve hmotnostních procentech:

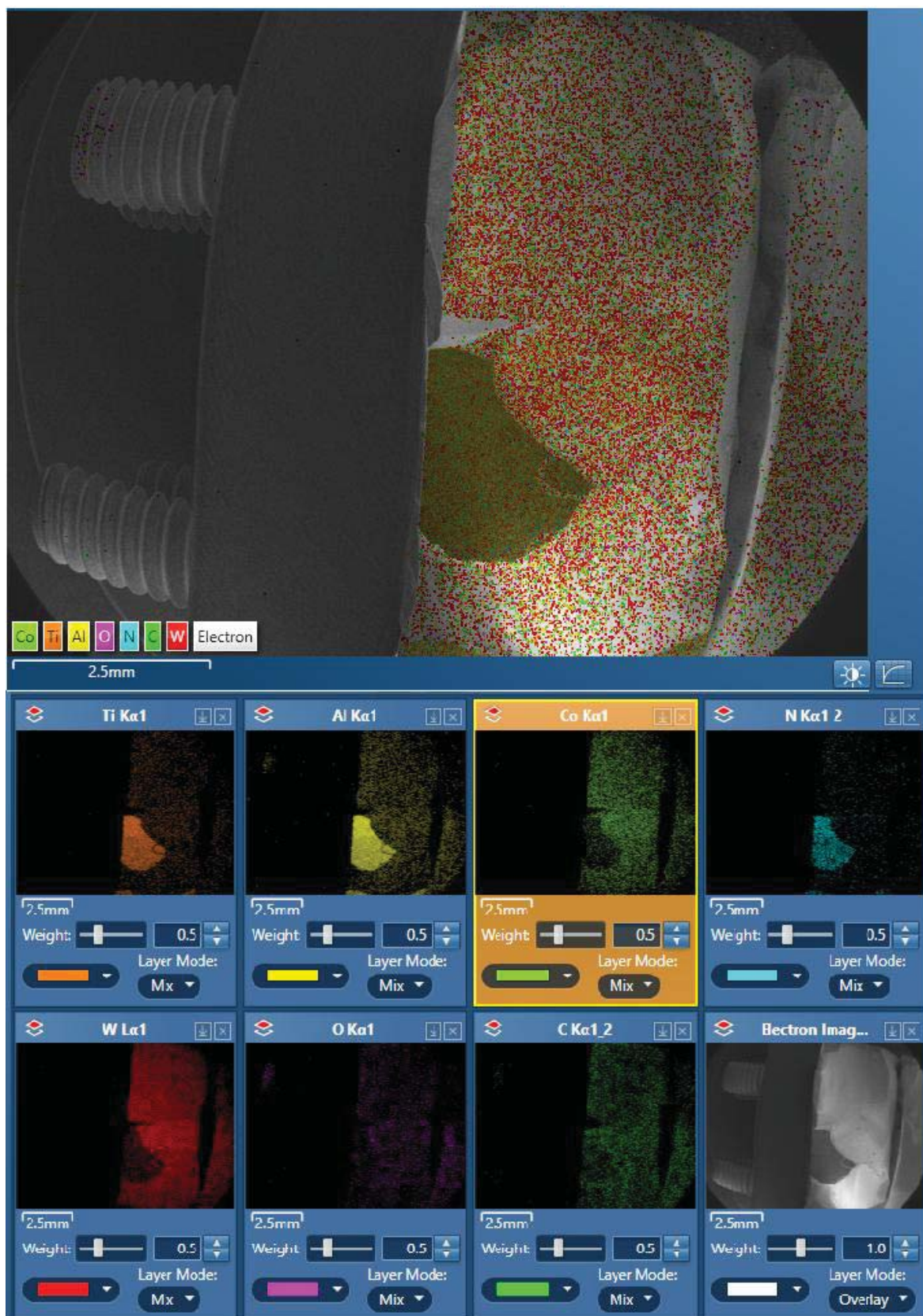
VBD – A: 75,9% W, 6,6% C, 5,0% Ti, 4,9% Co, 3,7% Al, 3,6% O, 0,3% Cr

VBD – B: 73,0% W, 9,0% N, 8,3% C, 5,2% Co, 2,5% Ti, 1,8% Al, 0,2% Cr

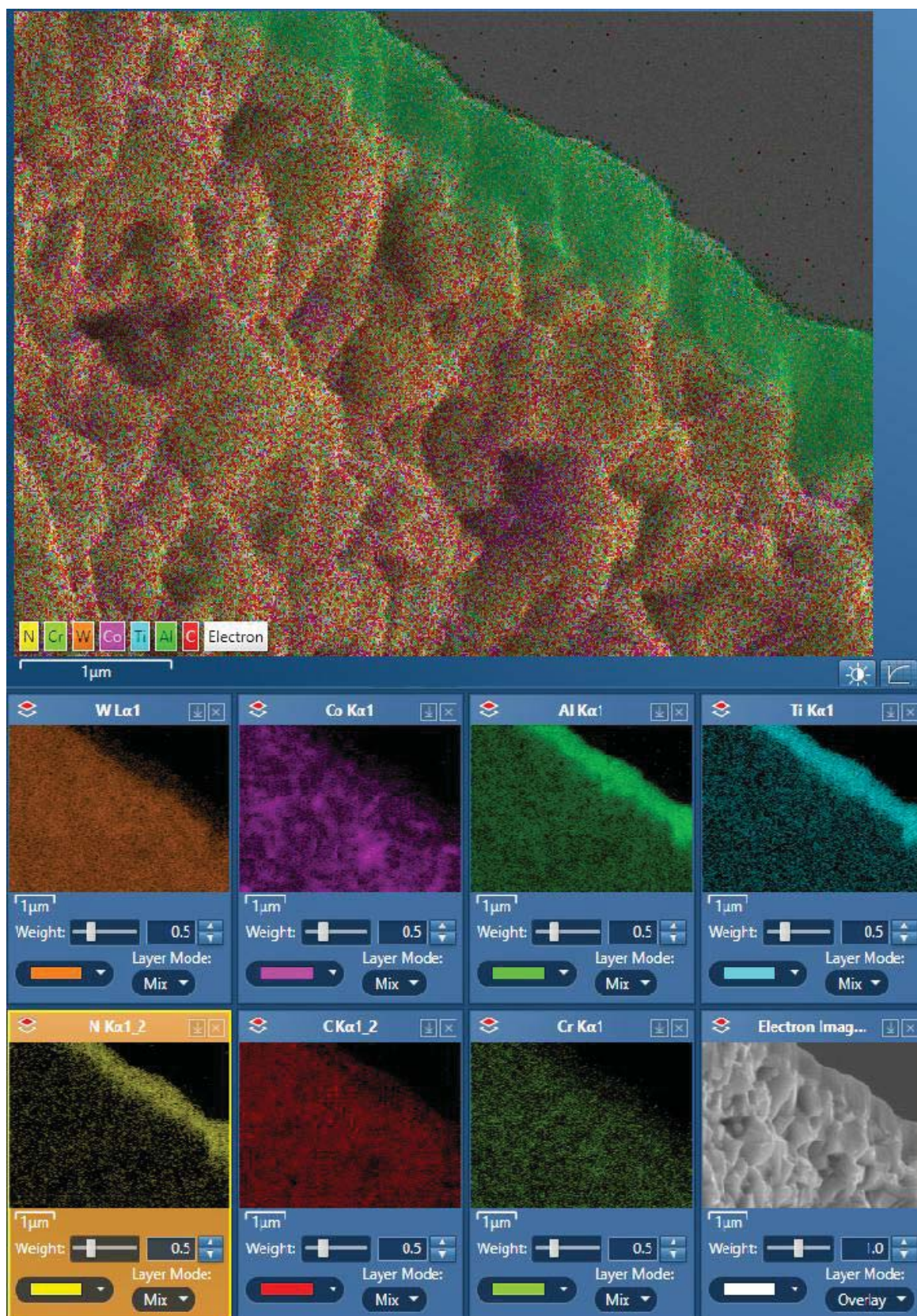
Povlaky A i B obsahují Ti a Al. Skuteční množství může být zkruseno rozdílým lomem VBD, z tohoto důvodu srovnávám poměr jednotlivých prvků. Poměr Ti/Al je u obou povlaků téměř shodný, poměr u povlaku je A 1,35 a u povlaku B 1,39. U povlaku A není zobrazeno množství N, podle snímku však oba povlaky tvoří nitridy (Ti, Al)N.

Podkladový substrát VBD A i B je tvořen z chemického hlediska prvky W, Co a C, poměr W/Co je u substrátu A 15,49 a u substrátu B 14,04. U podkladového substrátu B je vyšší podíl Co, z tohoto hlediska by měla VBD – B vykazovat vyšší houževnatost.

U VBD – A je nalezeno určité množství kyslíku, zřejmě se jedná o chybu vniklou v měření, protože zbytky kyslíku by měly být během slinování odbourány.

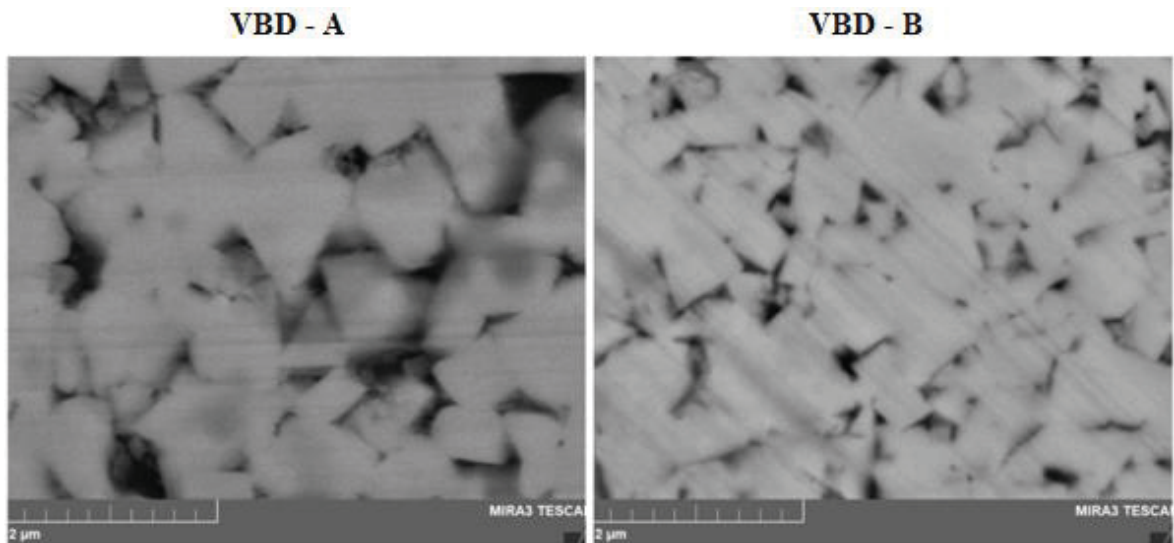


Obr. 22 Chemické složení Iscar - A



Obr. 23 Chemické složení Tungaloy - B

6.3.8. Struktura podkladového substrátu



Obr. 24 Struktura slinutého karbidu

Na snímcích pořízených elektronovým mikroskopem vidíme strukturu podkladového substrátu VBD. Struktura udává mechanické vlastnosti VBD, důležitými parametry jsou velikost částic karbidu a obsah pojiva. Snímky obou jsou přiblíženy na úroveň jednotlivých částic SK, zároveň jsou ve stejném měřítku, a proto je možné jejich strukturu jednoduše porovnat. SK u VBD-A je oproti struktuře VBD-B tvořen většími částicemi karbidu, mezi nimiž jsou místy velké mezery vyplněné pojivem z Co.

Se zvyšující se velikostí částic karbidu roste u SK typu WC do určité míry pevnost a houževnatost, naopak tvrdost SK s velikostí částic klesá. (více v kapitole *Řezné nástroje ze slinutých karbidů*)

SK typu B by měl vlivem jemnější struktury dosahovat vyšší tvrdosti a naopak SK typu A vyšší houževnatosti.

Obsah pojiva je z důvodu rozdílné velikosti částic náročné tímto způsobem porovnávat, vystačíme si proto s výsledky chemické analýzy na předchozích stranách.

6.4. Ekonomické zhodnocení porovnávaných VBD

Důležitým faktorem pro výběr obecně nástrojů je ekonomická výhodnost. Při zhodnocení je nutné uvažovat komplexně, brát v úvahu fakt, že náklady na výměnu nástrojů mohou tvořit menší část celkových nákladů. Při použití nového typu nástroje je nutné zvážit kromě nákladů na výměnu nástrojů (bereme v úvahu hrubovací operaci):

- množství vedlejších časů stroje spojených s výměnou nástrojů
- tvorbu vhodného tvaru třísek a následné skladování odpadu
- v neposlední řadě bezpečnost obsluhy a stroje

V následující tabulce je vyhodnocení nákladů na výměnu nástrojů v podobě ceny daného typu nástroje při provedení řezné operace s celkovým úběrem 1m^3 materiálu obrobku. Výsledná cena závisí na množství materiálu obrobeného průměrně jednou VBD a ceně dané VBD dle katalogu výrobce.

Dochází k velmi rozdílným výsledkům u jednotlivých VBD, rozdíl v ceně nástroje na obrobení 1m³ je více než pětinasobný.

Tab. 13 Ekonomické zhodnocení nákladů na výměnu VBD

	A - Iscar GN IC20	B - Tungaloy HMM AH905	C - Iscar GN IC830	D - Sandvik QM 1115	E - Sandvik SM 1115
V-ks (mm ³)	1270977	1250175	731584	604083	306342
Cena ks (Kč)	237	308	304	340	340
cena-1m³(Kč)	186471	246366	415537	562837	1109871

U VBD typu D a E je výsledek způsobený nízkou trvanlivostí nástrojů v dané operaci a poměrně vysokou cenou za kus.

VBD typu C, D a E vlivem nízké trvanlivosti nevyhovují z hlediska množství vedlejších času, způsobených výměnou nástroje. U nástroje E bylo pozorováno během testů náhlé porušení VBD v důsledku křehkého lomu, není vyloučeno opakované porušení vedoucí k ohrožení bezpečnosti stroje.

V dalším vyhodnocení budu uvažovat pouze VBD na prvních dvou pozicích. Rozdíl v ceně nástrojů, potřebných k obrobení daného objemu materiálu je způsoben zejména cenou VBD. U VBD typu A docházelo během experimentu k tvorbě nevhodného tvaru třísek, důsledky jsou horší skladování obrobeneho odpadu nutnost přerušování řezného procesu vlivem zasekávání třísek v místě řezu.

Konečné vyhodnocení řezivosti z ekonomického hlediska a dalších aspektů provedu v závěru bakalářské práce.

ZÁVĚR

V rámci teoretické části bakalářské práce byly nastudovány a sepsány základní informace související s tématem obrábění slitin titanu vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) ze slinutého karbidu, řezivosti a opotřebením použitých nástrojů. Důraz je kladen na popsání specifických podmínek a možném řešení problémů při obrábění slitin titanu.

V experimentální části práce byla provedena studie řezivosti a opotřebením pěti různých VBD od tří světových výrobců řezných nástrojů. Jednotlivé VBD byli zvoleny po konzultaci s obchodními zástupci daných společností popřípadě technologem, ve které výzkum probíhal.

Hodnocení řezivosti VBD probíhalo na základě následujících kritérii:

- trvanlivost VBD za daných podmínek,
- opotřebením hřbetu VBD VB_{max} v předem určených časových intervalech.

Experiment byl prováděn na obrocích různých rozměrů, u jednotlivých sérií se lišilo množství vedlejších časů i hloubka řezu při obrábění posledního řezu na výsledný rozměr. Aby nedošlo ke zkreslení výsledků popsánymi okolnostmi, za směrodatnou veličinu byl považován objem obrobeného materiálu danou VBD.

Porovnání řezivosti VBD:

- řezivost jednotlivých VBD vychází dle obou zvolených kritérií velmi podobně,
- je viditelná zřejmá dominance VBD typu A a B, ostatní VBD vykazují v porovnání s nimi velmi nízkou řezivost,
- dle kritéria trvanlivosti VBD (obrobeného objemu danou VBD) dopadla nejlépe VBD typu A,
- pouze VBD typu A a B přesáhly hodnotu obrobeného objemu $2,5 \text{ dm}^3$ na jednu VBD,
- dle kritéria opotřebením hřbetu VBD VB_{max} vychází nejlepší řezivost u VBD typu B,
- pouze u VBD typu B nepřesáhlo opotřebením VB_{max} po šesti minutách řezného procesu hodnotu $0,25 \text{ mm}$ ($250 \mu\text{m}$).

Ekonomicko-technologické zhodnocení:

- ceny jednotlivých VBD jsou v rozmezí 237 až 340 Kč/kus,
- nejnižší cenu nástroje k obrobení 1 m^3 vykazuje VBD typu A, jako jediná se dostala s cenou pod 200000 Kč/m^3 , jedinou konkurencí je VBD typu B s hodnotou téměř 250000 Kč/m^3 ,
- dominance VBD typu A je způsobena nejnižší cenou nástroje mezi porovnávanými VBD a zároveň nejvyšší hodnotou obrobeného objemu na jednu VBD,
- během řezného docházelo u VBD typu A k nevhodné tvorbě třísek, jež způsobuje zejména špatný odvod třísek z místa řezu a náročnější skladování odpadu.

Podrobnější srovnání dvou VBD s nejvyšší řezivostí – VBD typu A a B:

- u VBD typu A bylo dosaženo obrobení většího objemu materiálu na jednu VBD ($2,542\text{dm}^3$ oproti $2,500\text{dm}^3$),
- u VBD typu B došlo během šesti minut řezného procesu k nižšímu opotřebení hřbetu i čela VBD (viz. kapitola *Vývoj opotřebení v čase u vybraných VBD*),
- během řezného procesu docházelo u VBD typu A k nevhodné tvorbě třísek.

Rozdílné charakteristiky výše uvedených VBD zdůvodňují zejména odlišnou řeznou geometrii a rozdílným strukturním složením podkladového SK.

Možné vysvětlení:

- u VBD typu B dochází vlivem ostřejšího břitu (nižší poloměr zaoblení ostří) a pozitivnější geometrii fazetky ke snazšímu průchodu houževnatým materiálem obrobení a díky tomu k nižšímu opotřebení,
- vlivem více uzavřeného a lépe tvarovaného utvařeče třísek nastává u VBD typu B vyšší stupeň tváření třísky,
- kvůli většímu tváření třísky a ostřejší geometrii může docházet k snížení trvanlivosti VBD typu B.

V závěru práce bych z testovaných VBD doporučil pro obrábění materiálu Ti6Al4V použití VBD typu B díky dostatečné trvanlivosti a zároveň vyhovujícímu procesu tváření třísky.

Ve studii by bylo možné dále pokračovat:

- vícenásobným testováním trvanlivosti VBD pro získání lépe podložených výsledků,
- provedením zkoušek vzniku opotřebení v čase po delší časový úsek, nejlépe do ukončení trvanlivosti jednotlivých VBD. Tímto způsobem by bylo možné lépe identifikovat opotřebení, jež zapříčiňuje vyřazení VBD.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LEYENS, Ch. a M. PETERS. *Titanium and Titanium alloys: Fundamentals and applications*. 2nd ed. Koln: Willet-VCH, 2005. ISBN 3-527-30534-3.
- [2] DONACHIE, M.J. *Titanium: A Technical guide*. 2nd ed. Ohio: Materials Park, 2000. ISBN 08-717-0686-5.
- [3] SANDVIK COROMAT - SANDVIK CZ S.R.O. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook*. Praha: Scintia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [4] FOREJT, M. a M. PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [5] HUMÁR, A. *Technologie obrábění: Studijní opory por magisterskou formu studia* [online]. 2003, 138 s. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [6] KLAPKOVÁ, A. *Mechanické vlastnosti titanových slitin*. Brno, 2012. Bakalářská. Ústav materiálových věd a inženýrství VUT-FSI v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. S. VĚCHET, CSc.
- [7] *Vliv tepelného zpracování na mikrostrukturu slitiny Ti6Al4V* [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/61024/2016_BP_Fisar_a_Simon_160772.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Ústav materiálových věd a inženýrství VUT-FSI v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Rudolf Foret, CSc.
- [8] *Použití slitin titanu: Titan* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/85107?zp_id=85107. Bakalářská práce. Ústav materiálových věd a inženýrství VUT-FSI v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [9] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje: studijní opory* [online]. VUT-FSI, Ústav technologie obrábění, Brno, 2006 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
- [10] VANĚK, Mojmír. *Slinuté karbidy* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/18383>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Anton Humár.
- [11] VOPAŘIL, J. *Moderní řezné nástroje ze slinutých karbidů* [online]. Brno, 2009 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/16538>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [12] *Všeobecné soustružení: Volba vhodných soustružnických břitových destiček* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx>

- [13] DE VOS, P. *Mechanická zatížení a řezné geometrie při soustružnických operacích* [online]. 2015 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/mechanicka-zatizeni-a-rezne-geometrie-pri-soustruznickych-operacich/>
- [14] *Příručka pro technology: Proces obrábění kovů - vliv geometrie* [online]. 2012 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-kovu-vliv-geometrie.html>
- [15] NARASIMHA, M. a S. REMESH. Coating Performance on Carbide Inserts. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)* [online]. 2014, 6 str. [cit. 2020-03-25]. ISSN 2321-0869. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267098665_Coating_Performance_on_Carbide_Inserts/link/5479988b0cf205d1687fa746/download
- [16] HANZLÍK, J. *Měření vlastností povlaků vytvořených PA-CVD technologií: Metody povlakování* [online]. Zlín, 2018 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42389/hanzl%C3%ADk_2018_dp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Martin Ovsík, Ph.d.
- [17] NOVÁKOVÁ, R. *Povlakování střížných nástrojů ze slinutých karbidů: Povlakované slinuté karbidy* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/84113>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [18] NOVOTNÝ, M. *Metody povlakování řezných nástrojů: Metody povlakování* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/49264>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [19] TUNA, J. *Metody povlakování řezných nástrojů: Povlakování* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/49938>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [20] *PVD Coatings: Overview: AlTiN & TiAlN* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.destinytool.com/coatings.html>
- [21] FAHAD, M. *A Heat Partition investigation of Multilayer Coated Carbide Tools for High Speed Machining through experimental studies and Finite Element Modelling: Carbide cutting tools and coatings* [online]. Manchester, 2012 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/312893270_A_heat_partition_investigation_of_multilayer_coated_carbide_tools_for_high_speed_machining_through_experimental_studies_and_finite_element_modelling. Disertační práce. The University of Manchester, School of Mechanical Aerospace and

- Civil Engineering. Vedoucí práce Dr M.A. Sheikh and Dr Paul T. Mativenga.
- [22] SCHNEIDER, G. *Cutting Tool Applications: Machinability of Metals* [online]. 2009 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.americanmachinist.com/cutting-tools/media-gallery/21895130/cutting-tool-applications-chapter-3-machinability-of-metals>
- [23] DEBAPRIYA, M. *Machinability of Metals: Meaning, Evaluation and Factors* [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <http://www.yourarticlelibrary.com/metallurgy/machinability-of-metals-meaning-evaluation-and-factors/96082>
- [24] Machinability [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <http://mmc-permanent.learnways.com/courses/88/machinability.html>
- [25] ZEMAN, P. a M. SULITKA. *Produktivita a jakost při obrábění* [online]. České učení technické v Praze, fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, 2017 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: https://sst.cz/images/Sulitka_Zeman_2017_RCMT_SST_OR_Kurim.pdf
- [26] *Metal machining insight: Avoiding built up edge* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://blog.miragemachines.com/metal-machining-insight-avoiding-built-up-edge>
- [27] EZUGWU, E.O. a Z.M. WANG. Titanium alloys and their machinability. In: *Journal of Materials Processing Technology* [online]. School of Engineering Systems and Design, South Bank University, London, UK, 1997 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013696000301>
- [28] *Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5* [online]. 2002 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1547>
- [29] PRAMANIK (1), A. a G. LITTEFAIR (2). Machining of titanium (*Ti-6Al-4V*): *Theory to application* [online]. 2015 [cit. 2020-03-31]. Department of Mechanical Engineering, Curtin University, Bentley, WA, Australia (1), School of Engineering, Deakin University, Waurn Ponds, Australia (2). Dostupné z: https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/32886/212990_212990.pdf?sequence=2
- [30] PERVAIZ, S. *Investigating cooling and lubrication strategies for sustainable machining of titanium alloys: Impact on machinability and environmental performance* [online]. 2014 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279995108_Investigation_Cooling_and_Lubrication_Strategies_for_Sustainable_Machining_of_Titanium_Alloys/download. Licentiate Thesis. School of Industrial Engineering and Management, Department of Production Engineering in Stockholm.

- [31] STANDRIDGE, M. *Aerospace Manufacturing and Design: Titanium machining tips* [online]. 2016 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/titanium-machining-tips/>
- [32] POPELKA, Z. *Analýza mechanismu tvoření třísky při obrábění titanových slitin: Problematika obrábění titanu a jeho slitin* [online]. Brno, 2011 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41003. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
- [33] THOMPSON, J. Identifying tool wear. *Canadian Metalworking*. 2018. Dostupné také z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/cuttingtools/identifying-tool-wear>
- [34] *Průručka obrábění: opotřebení VBD* [online]. Pramet, 2004 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: http://stachura.cz/novy/data/prirucka_obrazeni_pramet.pdf
- [35] Tool wear mechanism: Abrasion, Adhesion, Diffusion, Fatigue and Oxidation wear. *MECHOLIC - for mechanical engineering* [online]. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.mecholic.com/2016/02/tool-wear-mechanism-abrasion-fatigue.html>
- [36] OLORTEGUI-YUME, J. a P. KWON. Tool Wear Mechanisms in Machining. *International Journal of Machining and Machinability of Materials* [online]. 2007 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236272027_Tool_Wear_Mechanisms_in_Machining/link/5567371908aefcb861d384f0/download
- [37] *MTG-A - Všeobecné soustružení: Problémy a jejich řešení* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/viewtopic.php?t=21701>
- [38] *MTG-H - Materiály: Opotřebení břitů* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/viewtopic.php?t=21701>
- [39] KOPELIOVICH, D. *Mechanisms of wear* [online]. 2017 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear&s=mechanism
- [40] PRAMANIK, A., N. ISLAM, A.K BASAK a G. LITTLEFAIR. Machining and Tool Wear Mechanisms during Machining Titanium Alloys: Cutting Tool Materials and Wear. *Advanced Materials Research* [online]. 2013 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/261951685_Machining_and_Tool_Wear_Mechanisms_during_Machining_Titanium_Alloys

- [41] *Wear and Wear Mechanism* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: http://emrtk.unimiskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/1_konzultacio_elemei/wear_and_wear_mechanism.htm
- [42] ODELROS, S. *Tool wear in titanium machining: Discussion* [online]. 2012 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:538046/FULLTEXT01.pdf>. Uppsala universitet.
- [43] BAKSA, T. *Trvanlivost řezných nástrojů při obrábění velmi tvrdých a pevných materiálů: Řezivost nástroje* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/15052/1/DP_2014_BAKSA_TOMA_S.pdf. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakultě strojní, Katedra Technologie Obrábění. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek PhD.
- [44] *Měření opotřebení nástrojů: Klasifikace typů opotřebení* [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf
- [45] Frentech Aerospace s.r.o. [online]. [cit. 2020-08-22]. Dostupné z: <http://frentech.eu/>
- [46] *ISO soustružení: WNMG-GN* [online]. [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=5507801&fnum=489&mapp=IS&lang=WZ>
- [47] *T-Max® P insert for turning: WNMG 08 04 08-QM 1115* [online]. [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=wnmg%20432-qm%201115>
- [48] *T-Max® P insert for turning: WNMG 08 04 08-SM 1115* [online]. [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=wnmg%2008%2004%2008-sm%201115>
- [49] *PVD coated grade for superalloy turning: AH905* [online]. In: . [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: <https://www.tungaloy.com/wp-content/uploads/404.pdf>
- [50] *Titan Grade 5 (6Al-4V): Chemické složení* [online]. 2019 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.bibusmetals.cz/materialy/titan-slitiny-titanu/titan-grade-5-6al-4v/>
- [51] SZCZYGIEL, Pavel. *Zkoušky řezivosti vyměnitelných břitových destiček pro obrábění kolejových součástí* [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/58883>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
PVD	Physical Vapour Deposition
SK	Slinutý karbid
CVD	Chemical Vapour Deposition
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition
MTCVD	Middle Temperature Chemical Vapour Deposition
CBN	Cubic Boron Nitride
PD	Polykrystalický diamant
CNC	Computer Numeric Control
VBD	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
E	[GPa]	modul pružnosti v tahu
M_k	[N·m]	točivý moment
T	[min]	trvanlivost
V	[m ³]	objem
VB_{max}	[mm]	maximální opotřebení hřbetu
V_x	[m ³ ·s ⁻¹]	objem obrobený za sekundu
i_R	[-]	index řezivosti
r	[μm]	poloměr zaoblení ostří
v_c	[m·min ⁻¹]	řezná rychlost
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Měření geometrie břitu VBD A a B
- Příloha 2 Měření opotřebení VBmax u jednotlivých VBD
- Příloha 3 Hodnoty trvanlivosti pro jednotlivé VBD
- Příloha 4 Měření tloušťky povlaku ze snímku lomu pro VBD A a B
- Příloha 5 Vyhodnocení kalotestu pro VBD B