

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Dokončovací soustružení titanových slitin

Autor: **Ondřej ŠINDELÁŘ**
Vedoucí práce: **Ing. Jan MATĚJKA**

Akademický rok 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej ŠINDELÁŘ**

Osobní číslo: **S13B0261P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**

Název tématu: **Dokončovací soustružení titanových slitin**

Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

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

1. Úvod
2. Analýza současného stavu soustružení titanových slitin
3. Možnosti a specifika dokončovacího soustružení pomocí nástroje s diamantovým břitem
4. Zhodnocení efektivity nasazení nástroje s diamantovým břitem
5. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **STANĚK, J. NĚMEJC, J.:** Metodika zpracování a úprava diplomových prací, Plzeň: ZČU 2005
- **Technická příručka obrábění Sandvik Coromant, Švédsko 2005**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Matějka**
Katedra technologie obrábění
Konzultant bakalářské práce: **Tomáš Dlabal**
Precision Castparts CZ s.r.o.

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2017**
Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 18. října 2017

Prohlášení o autorství

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Jana Matějky, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 21. 5. 2018

.....
podpis autora

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé práce panu Ing. Janu Matějkovi za odborné vedení a poskytnutí cenných rad při zpracování této práce. Dále bych rád poděkovat panu Tomášovi Dlabalovi, který byl odborným konzultantem a umožnil mi provést experimentální část práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Šindelář	Jméno Ondřej		
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Matějka	Jméno Jan		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Dokončovací soustružení titanových slitin			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2018
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	41	TEXTOVÁ ČÁST	41	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL, POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Cílem bakalářské práce je analyzovat současný stav v oblasti obrábění titanových slitin. Po obecné charakteristice typů titanových slitin a vlastnostech ovlivňujících obrobitelnost je věnována pozornost popisu technologií několika vybraných nástrojářských společností. Představeny jsou jednotlivé varianty z hlediska použití nástrojů, vyměnitelných břitových destiček, způsobu chlazení a řezných parametrů. Pro konkrétní aplikace byla využita softwarová rozhraní nabízející doporučená řešení. Zvláštní část je věnována dokončovacím karuselovému soustružení dílu z titanové slitiny Ti-6Al-4V, na kterém proběhl experiment z hlediska použití řezného materiálu z polykrystalického diamantu. Výsledek experimentu porovnává efektivitu oproti doposud používanému řeznému materiálu ze slinutého karbidu.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	titan, titanové slitiny, soustružení titanových slitin, polykrystalický diamant, vysokotlaké chlazení

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Šindelář	Name Ondřej	
FIELD OF STUDY	B2301 „Department of Machining Technology“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Matějka	Name Jan	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Finishing turning of titanium alloy		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED	2018
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	41	TEXT PART	41	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	Aim of this bachelor thesis is analyzing current situation in the machining of titanium alloys. In the theoretical part were described characteristics of titanium alloys and features affecting machinability. Attention was paid to description of technology of several chosen tooling companies. Different types of inserts, tools, cutting parameters and types of cooling systems are described. For particular applications were used online software offering recommended solutions. The subject of the practical part of this thesis was finishing turning of titanium alloy Ti-6Al-4V using polycrystalline diamond insert. Result of this test compares effectivity between polycrystalline diamond and currently used sintered carbide.
KEYWORDS	titanium, titanium alloys, turning of titanium alloys, polycrystalline diamond, high-pressure cooling

Přehled použitých zkratk, symbolů a jednotek

VBD		vyměnitelná břitová destička
PKD		polykrystalický diamant
CAD	computer aided design	počítačem podporované navrhování
EBM	electro beam melting	tavení elektronovým paprskem
PVD	physical vapour deposition	nanášení tenké vrstvy odpařováním
CVD	chemical vapour deposition	chemické nanášení tenké vrstvy
SNOP		stroj, nástroj, obrobek a přípravek
HPC	high pressure coolant	vysokotlaké chlazení
SCL	spiral cutting length	spirálová délka řezu
CNC	computer numeric control	číslicové řízení počítačem
MPa	megapascal	jednotka tlaku
°C	stupeň Celsia	jednotka teploty
HRC	hardness Rockwell C	tvrdost dle Rockwella škálou C
mm	milimetr	jednotka vzdálenosti
v_c	[m/min]	řezná rychlost
a_p	[mm]	hloubka řezu
f	[mm/ot]	posuv na otáčku
R_a	[μ]	střední aritmetická úchylka profilu

Obsah

1	Titan	2
2	Slitiny titanu	3
2.1	Titanové α slitiny	3
2.2	Titanové pseudo α slitiny	4
2.3	Titanové β a pseudo β slitiny	4
2.4	Slitina Ti-6Al-4V	4
3	Obrábění titanových slitin	6
3.1	Obecné poznatky o obrábění titanových slitin	6
3.1.1	Počáteční fáze obrábění – obecná doporučení	7
3.1.2	Střední fáze obrábění – obecná doporučení	8
3.1.3	Dokončovací fáze obrábění – obecná doporučení	8
3.2	Základní předpoklady pro volbu technologie obrábění soustružením	9
4	Technologická řešení obrábění titanových slitin jednotlivých nástrojových společností	10
4.1	Sandvik Coromat	10
4.1.1	Sandvik Coromat - dokončovací soustružení	17
4.2	Iscar	19
4.2.1	Iscar – dokončovací soustružení	22
4.3	Walter	22
4.3.1	Walter – dokončovací soustružení	24
4.4	Seco	26
4.4.1	Seco – dokončovací soustružení	27
5	Dokončovací soustružení slitiny Ti-6Al-4V	28
5.1	Obráběný díl	28
5.2	Obráběcí stroj	29
5.2.1	Technické specifikace stroje	30
5.3	Řezný materiál a nástroj	30
5.4	Řezné podmínky	31
5.5	Naměřené hodnoty a výsledky	31
5.6	Zhodnocení možnosti nasazení VBD z PKD z hlediska produktivity	33

Úvod

Pojem obrábění představuje technologický proces, jehož cílem je vytvořit požadovaný tvar předmětu (obrobku) při dodržení určitého stupně přesnosti a jakosti povrchu pomocí ubírání materiálu. Každý materiál má své specifické vlastnosti. Podle ISO standardů existuje šest hlavních skupin materiálů charakterizujících jejich obrobitelnost. V této práci bude věnována pozornost titanovým slitinám, které spadají do skupiny S – žáruvzdorné slitiny a titan.

Titanové slitiny lze rozdělit v závislosti na jejich struktuře a přítomnosti slitinových prvků do několika skupin, které budou následně popsány. Navzdory nepříliš dobré obrobitelnosti těchto slitin je jejich využití nezastupitelné v mnoha odvětvích vyžadujících dobré mechanické vlastnosti v poměru s hmotností materiálu, a odolnost v nepříznivém prostředí. Jako příklad lze uvést letecký, energetický, či automobilový průmysl, a v neposlední řadě zdravotnictví.

V teoretické části je popsán titan a jeho nejběžnější slitiny. Dále je věnována pozornost technologiím používaných k obrábění titanových slitin pomocí soustružení. Budou uváženy jednotlivé varianty z hlediska použití nástrojů a typů vyměnitelných břitových destiček.

Hlavním cílem praktické části je popsání dokončovacího soustružení slitiny Ti-6Al-4V na karuselovém soustruhu ve společnosti Precision Castparts CZ s.r.o, která je předním dodavatelem kovaných a litých produktů pro letecký a energetický průmysl. Zabývá se obráběním a nedestruktivní kontrolou kvality rotačních dílů převážně do leteckých motorů. Na základě zkušeností s obráběním těžkoobrobitelných a titanových slitin bude u materiálu Ti-6Al-4V zhodnocen přechod na technologii využívající VBD s polykrystalickým diamantem namísto běžných VBD ze slinutých karbidů, a to z hlediska efektivnosti.

1 Titan

Titan je desátý nejrozšířenější prvek na Zemi. Prvek byl objeven v roce 1971 Williamem Gregorem. Izolovat se podařil až po sto letech. Na 1 kilogram zemské kůry ho spadá přibližně 5,7 – 6,3 gramů. Zavedení titanu do průmyslové sféry se uskutečnilo teprve v 60. letech minulého století. Titan byl považován za strategickou surovinu, a jeho výroba se soustředila téměř výhradně jen v SSSR, a byla přísně tajná. Pomocí špionáže byl výrobní postup posléze rozšířen do USA a Evropy.

Základní surovinou pro výrobu titanu jsou minerály Ilmenit neboli krystalický titanát železnatý (FeTiO_3) viz obr. 1-1, vyskytující se v přeměněných a vyvřelých horninách, a dále pak Rutil pod chemickým názvem oxid titaničitý (TiO_2) viz obr. 1-2, který je k nalezení v magmatických a silně metamorfovaných horninách. Výroba titanu je energeticky složitý postup využívající Krollův proces, jelikož klasické metody nejsou vhodné vzhledem k nežádoucí interferenci titanu s kyslíkem, dusíkem a vodíkem. Krollův proces spočívá v redukci par chloridu titaničitého hořčíkem v inertní argonové atmosféře, z čehož vznikne pórovitá látka připravená na odstranění chloridu hořečnatého a nezreagovaného hořčíku, která se dále čistí. Přetavování slitin a jejich odlévání je prováděno ve vakuových pecích. [1, 2]



Obr. 1-1 – Ilmenit [31]



Obr. 1-2 – Rutil [31]

2 Slitiny titanu

V současné době je známo více než 100 titanových slitin, ale komerčně využívané množství slitin čítá rozmezí pouze 20 – 30. Polovina aplikací využívá nejběžnější slitinu Ti-6Al-4V, a přibližně čtvrtinové zastoupení má komerčně čistý titan. Modifikace krystalografické mřížky přiřazuje jednotlivé slitiny do kategorií alfa, beta a alfa-beta. V případě čistého titanu je struktura alfa, jejíž mřížka je šesterečná, těsně uspořádaná (HCP), stabilní při pokojové teplotě. Prvky jako hliník, cín a zirkon zvyšují odolnost fáze alfa proti deformaci tečením. Malé množství molybdenu a niklu zvyšuje korozní odolnost. Při určité kombinaci vanadu a chromu může být při pokojové teplotě stabilní fáze beta, případně alfa-beta. Slitiny fáze alfa nejsou vhodné pro tepelné zpracování. Zpevňování u této slitiny je vyvoláno tuhým roztokem. Transformace α struktury na β strukturu probíhá při 880° C. Atomy fáze beta uspořádává prostorově středěná kubická mřížka (BCC). Stejně tak jako u ocelí dochází u některých slitin titanu k martenzitické přeměně po zakalení. Její vliv je však mnohem méně významný, než je tomu u ocelí. Pro zvyšování pevnosti fází beta a alfa-beta má praktický význam především precipitační vytvrzování. Titan dovede odolávat agresivnímu prostředí, které u běžných konstrukčních materiálů způsobuje napadení korozí. Toto je zapříčiněno vrstvičkou TiO_2 o tloušťce přibližně 0,01 mm chránící povrch titanu. Dojde-li k narušení vrstvy a kyslík má k materiálu přístup, vrstva je okamžitě obnovena.

V následujících podkapitolách jsou stručně popsány tři výše zmíněné typy struktur. V každém popisu je uveden výčet nejběžněji používaných slitin (nebo tříd) dané struktury. Obsáhlejší popis je věnován slitině Ti-6Al-4V, která je výchozím materiálem pro praktickou část této práce. Hodnoty mechanických vlastností jsou ovlivněny způsobem tepelného zpracování. Slitiny se často zušlechťují (popouštějí a kalí), žíhají a podléhají procesům stárnutí. Metody zpracování nejsou univerzální pro všechny slitiny, jelikož tepelné zpracování je ovlivňováno přísadovými prvky obsaženými ve slitině. Samotné tepelné zpracování značně ovlivňuje fáze α a β . Mechanické vlastnosti mají zásadní vliv na proces obrábění. [1, 3]

2.1 Titanové α slitiny

Slitiny α vynikají především svojí korozivzdorností a deformovatelností, zatímco pevnostní vlastnosti nepatří mezi dominantní. Třídy komerčně čistého titanu 1 až 4 se liší obsahem kyslíku, který významně zvyšuje pevnost při současném snížení tažnosti. Prvky jako uhlík a železo se dostávají do komerčně čistého titanu při výrobě jako nečistoty. Při pokojové teplotě dosahuje pevnost v tahu komerčně čistého titanu hodnot v rozmezí 240 – 740 MPa (v závislosti na třídách). Třída 1 disponuje excelentní tvarovatelností za studena. Používá se například pro obklady ocelových reaktorů nebo jako pláty výbušných pláštěů. Obecně lze říci, že tato třída nachází uplatnění hlavně v oblastech vyžadující odolnost proti korozí, ale pouze malé hodnoty pevnosti v tahu. Třída 2 je nejpobulárnější třídou komerčně čistého titanu. Hodnoty pevností v tahu se pohybují mezi 390 – 540 MPa. Třída 3 je nejvíce využívaná pro tlakové nádoby. Pro komponenty vyžadující nízkou hmotnost, které lze docílit tenkými stěnami dílu, je třída 3 ideální. Hodnoty pevnosti jsou vyšší při zachování relativně dobré tvárnosti za studena. Pevnostních hodnot až 740 MPa dosahuje třída 4. Komplexní komponenty se tvarují okolo teploty 300 °C, jinak je třeba materiál kovat. Nejlepší korozivzdorné vlastnosti představuje třída 7, která má však vzhledem ke své ceně daleko menší využití než její ekvivalentní třída 12. Pro vyšší pevnostní vlastnosti se nabízí jedna z nejstarších slitin, a to Ti-5Al-2.5Sn. Slitina je vhodná pro nízkoteplotní aplikace, např. jako materiál vodních nádrží a tlakových nádob. Tak jako u ostatních α slitin, i u Ti-5Al-2.5Sn nedochází ke zpevňování stárnutím, ale vyniká svojí snadnou svařitelností. [1]

2.2 Titanové pseudo α slitiny

Kombinace vlastností při tečení u slitin α , a vysoké pevnosti u slitin $\alpha + \beta$ umožňuje z kategorie pseudo α slitin tvořit ideální materiály pro vysokoteplotní aplikace. Provozní teplota dílů této struktury je limitována přibližně 500 – 550 °C. Obsah hliníku je omezen na maximálně 6 %, jelikož větší množství má nežádoucí vliv na korozivzdornost. Křemík svým až 0,5% zastoupením výrazně posouvá teplotní hranice použitelnosti slitin. V dnešní době je považována za jednu z nejpokročilejších slitin americká slitina s obchodním názvem TIMETAL[®] 834, která byla původně vyvinuta v UK. Za předpokladu dlouhodobé stability a oxidační ochrany se provozní teplota může pohybovat až kolem 600 °C. [1]

2.3 Titanové β a pseudo β slitiny

Slitiny struktury β mohou být zpevňovány až do extrémně vysokých hodnot, a to do více než 1400 MPa. Vzhledem k mikrostruktuře těchto materiálů, využívají návrháři optimalizace, vedoucí k poměrům zachovávající vysoké hodnoty pevnosti a tažnosti. Tato tvrzení se týkají například slitiny Ti-10V-2Fe-3Al (TIMETAL[®] 10-2-3), která nachází uplatnění ve výrobě rámců, podvozků letadel a motorů. Slitina Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (TIMETAL[®] 15-3) je velmi dobře tvarovatelná za studena. Je to pásová slitina využívaná pro kritické aplikace v leteckém a kosmickém odvětví vynikající oproti ostatním inženýrským materiálům svou nízkou měrnou hmotností. Speciální uplatnění zastupuje slitina Ti-15Mo-3Nb-3Al-.2Si (TIMETAL[®] 21S), která je využívána pro výrobu dlouhých vláken zlepšujících vlastnosti ostatních titanových slitin. Podobně jako u Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al jsou z ní zhotovovány pásy o tloušťkách 0,4 – 2,3 mm. Alternativou pro letecký a automobilový průmysl jsou tzv. LCB (low cost beta) slitiny. Oblast využití β a pseudo β slitin je však limitována relativně vysokou specifickou hmotností, obtížnou svařitelností, slabými oxidačními vlastnostmi a složitou mikrostrukturou. [1,4]

2.4 Slitina Ti-6Al-4V

Slitina Ti-6Al-4V patří mezi nejpoužívanější druh titanových slitin, ze kterých tvoří přibližně 50% zastoupení. Svoji strukturou spadá do slitin alfa-beta. Její komerční využití je hojné především díky dobré obrobiteľnosti a excelentním mechanickým vlastnostem. Ti-6Al-4V představuje nejvíce probádanou titanovou slitinu. Vzhledem ke své nízké hmotnosti v kombinaci s mechanickými vlastnostmi (viz tabulka 2-2) je využívána v leteckém, automobilovém a chemickém průmyslu, kosmonautice, energetice a v neposlední řadě ve zdravotnictví. Díky své biokompatibilitě s tkáněmi a kostmi jsou takřka veškeré implantáty a protézy vyrobeny z této slitiny. Mezi přední vlastnosti této slitiny kromě již zmíněných, patří především vysoká pevnost, odolnost proti korozi, nízká tažnost a poměrně dobrá svařitelnost. Korozivzdornost v agresivním prostředí, jako je mořská voda, zapříčiňuje souvislá vrstvička oxidu, jak již bylo zmíněno v kapitole 2. Slitina je nejčastěji používána v měkkém stavu s teplotou rekrystalizačního žíhání 700 – 800 °C, které trvá přibližně 1 – 8 hodin. Obecně je doporučeno po žíhání slitinu chladit do teploty 550 °C. Použitelnost slitiny je od kryogenních teplot až do 450 °C, kdy materiál ještě neztrácí své mechanické vlastnosti. Kalení při teplotě 850 – 950 °C a stárnutí při teplotě 480 – 510 °C jsou způsoby tepelného zpracování, kterými lze zvýšit pevnostní vlastnosti. Chemické složení slitiny je uvedeno v tabulce 2-1. Stabilizační prvek fáze α je hliník, fázi β stabilizuje vanad. [1, 5]

Chemické složení a mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V jsou uvedeny pro polotovary ve formě odlitku a výkovku.

Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V	odlitek	výkovek
Hliník	5,5 - 6,75 %	5,5 - 6,75 %
Vanad	3,5 - 4,5 %	3,5 - 4,5 %
Karbon	< 0,1 %	< 0,08 %
Železo	< 0,3 %	< 0,3 %
Kyslík	< 0,2 %	< 0,2 %
Dusík	< 0,05 %	< 0,05 %
Vodík	< 0,015	< 0,015
Titan	zbytek	zbytek

Tab. 2-1- chemické složení Ti-6Al-4V [5]

Mechanické vlastnosti Ti-6Al-4V	odlitek	výkovek
Mez kluzu (Rp 0,2)	758 MPa	860 MPa
Mez pevnosti (Rm)	860 MPa	930 MPa
Prodloužení	> 8%	> 10%
Redukce plochy	> 14%	> 25%
Únavová pevnost při 600 MPa - po lisování za tepla	> 10 000 000 cyklů	
Tvrdość dle Rockwella	33 HRC	
Modul elasticity	120 GPa	

Tab. 2-2 – mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [5]

Data byla získána z materiálového listu společnosti Acram AB[®], která se zabývá zhotovováním kovových výrobků metodou EMB (Electro Beam Melting), kdy se vrstvý kovový prášek tavený silným elektronovým paprskem. Každá vrstva je roztavena přesně, dle dané geometrie stanovené CAD modelem. Takto zhotovená testovací tyč má v porovnání s konvenční výrobou mez pevnosti v tahu 1020 MPa, mez kluzu – Rp_{0,2} 950 MPa, hodnotu prodloužení 14 % a redukci plochy 40 %.

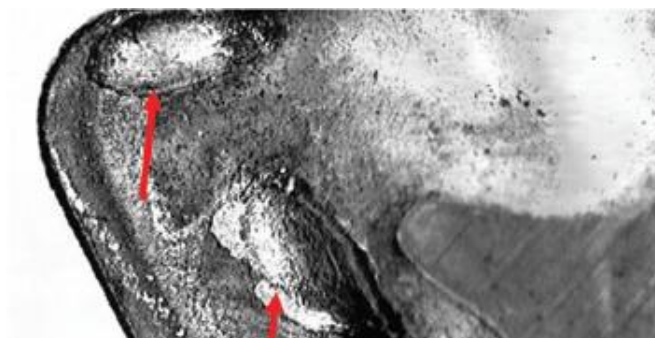
Výrobce udává, že mechanické vlastnosti materiálu produkovaného EBM metodou jsou relativně srovnatelné s žíhanými výkovky, ale mnohem lepší než u odlitků. [5]

3 Obrábění titanových slitin

3.1 Obecné poznatky o obrábění titanových slitin

Mechanicko-metalurgické vlastnosti titanových slitin způsobují obtížnější obrábění, než je tomu u ocelí se stejnou pevností a tvrdostí. Radíme je do skupiny materiálů ISO S, která z hlediska obrábění představuje nejproblematictější skupinu materiálů. Ve srovnání s korozivzdornými ocelmi je její opracování mnohem složitější. Slitiny jsou tvářeny za studena nebo za tepla. Obrábějí se ve stavu po žihání na měkko nebo po umělém stárnutí.

Modul pružnosti titanových slitin dosahuje přibližně polovičních hodnot oproti ocelím. Titanový obrobek pod tlakem nástroje podléhá větším deformačním vlivům, než obráběný povrch ocelových slitin, což vede k častému zpevňování povrchových vrstev. Při opracovávání tenkostěnných obrobků může hrozit, není-li zajištěna dostatečná tuhost obrobku a nástroje, deformace až rozdrčení či nedodržení předepsané drsnosti povrchu. Teplotní a tlakové vlivy navíc podporují vznik opotřebených nástroje ve formě kráterových výmolů. Dalšími nežádoucími jevy jsou zasekávání třísek, a jejich odtlačování od nástroje. Tříška bývá zpravidla tenká, což je problém. Tenká tříška navyšuje řezné teploty a napětí řezné hrany nástroje. Teplo z třísek obráběného kusu rozloží v substrátu zrna karbidu wolframu, a uhlík difunduje do destičky, což zapříčiní vznik kráterových výmolů na čele destičky, viz obr. 3-1. Nejvíce tepla je generováno v oblasti sekundární plastické deformace. Uvolňování tepla lze nejlépe ovlivnit řeznou rychlostí, hloubkou záběru a tloušťkou VBD. Není-li řezný proces důkladně chlazen (nejlépe vysokotlakým chlazením), může dojít až ke vzplanutí VBD. Jiskření během obrábění těchto slitin není žádnou výjimkou. Titan špatně vede teplo, proto hrozí přenos tepelných vlivů do nástroje. Na rozdíl od oceli titan chemicky nereaguje s karbidy, proto není třeba z tohoto hlediska karbidové VBD deponovat tenkou vrstvou (dále jen povlakovat). Povlakování má však svoje opodstatnění z hlediska omezení prostupu tepla vznikajícího při obrábění do nástroje. Výhodné je použít metodu PVD, která oproti CVD zachovává ostřejší hranu. Pro zamezení tvorby nárůstků na řezné hraně VBD je třeba zhodnotit chemické složení prvků obsažených v povlaku, se kterými může eventuálně titan interagovat. Čistý titan a slitina alfa se obrábí nejlépe. Obrobitelnost se zhoršuje směrem od slitiny alfa ke slitině beta. Při vnikání/vystupování do/ze záběru se mohou objevovat tendence vylamování břitů, které stejně tak může způsobovat přerušovaný řez tvořící dělené třísky. [6, 7, 28, 29]



Obr. 3-1 – vznik kráterových výmolů na čele VBD [29]

Pro efektivní obrábění titanu za předpokladu maximální životnosti nástroje se obecně doporučuje dodržovat několik pravidel:

- nízká řezná rychlost (generuje menší teploty vznikající při obrábění),
- nepřerušovat řez,
- vysoké hodnoty posuvu (ovlivňuje méně teplotu než řezná rychlost) a záběru,
- použití chlazení – vysokotlaké chlazení, zejména, je-li jako VBD použit polykrystalický diamant (doporučují se spíše emulze před minerálními oleji a vodními roztoky, kvůli nežádoucímu obsahu halogenů, které mohou způsobovat napadení titanu korozi),
- použití základní geometrie – velký radius a úhel špičky je výhodný, protože rozloží řezné síly a teploty do větší plochy VBD, což zamezí lokálnímu poškození VBD,
- tuhé upnutí obrobku – tuhé nástroje,
- hladká řezná geometrie, velký pozitivní úhel čela, zesílené ostré hrany,
- použití karbidových VBD velkých rozměrů, aby docházelo k dostatečnému absorbování tepla. [6, 7, 28]

3.1.1 Počáteční fáze obrábění – obecná doporučení

Tato fáze spočívá v prvním kontaktu nástroje s obrobkem a můžeme sem zahrnout:

- těžké hrubování až do 10 mm hloubky řezu,
- odstraňování povrchové vrstvy obrobku (kůry), která bývá často nerovná v případě polotovaru ve formě výkovku,
- tepelně zpracovaný polotovar – žiháno,
- obvykle zhotovování základních tvarů pomocí standardních soustružnických nástrojů,
- u kritických dílů se upichuje testovací kroužek, který jde obvykle na rozbor.

Doporučené řezné parametry:

Obecně se doporučují velké hloubky řezu a malé řezné rychlosti.

- a_p 3 – 10 mm,
- f_n 0,3 – 0,8 mm/ot,
- v_c 25 m/min.

Nástrojové požadavky obecně:

- nepovlakované třídy karbidů,
- houževnatost,
- odolnost proti kráterovým výmolům,
- tvrdost za vysoké teploty.

[12, 13]

3.1.2 Střední fáze obrábění – obecná doporučení

Fáze zahrnující hrubování nebo střední hrubování čistých materiálů (zbavené kůry), složená z těchto úkonů či vlastností:

- tvarování s proměnlivou hloubkou řezu od 0,5 – 4 mm,
- různé rozměrové a geometrické tolerance,
- zanechání přídávku cca 1 mm pro dokončovací operace – častý vznik tenkostěnných oblastí vyžadující co nejmenší řezné odpory (pozitivní geometrie),
- často využití speciálních držáků – např. při vytváření drážek a podpichů

Doporučené řezné parametry:

- a_p 0,5 – 4 mm,
- f_n 0,2 – 0,5 mm/ot,
- v_c 40 – 80 m/min.

Nástrojové požadavky:

- odolnost proti kráterovým výmolům,
- tvrdost za vysoké teploty,
- možnost použít VBD s deponovanými tenkými vrstvami.

[12, 13]

3.1.3 Dokončovací fáze obrábění – obecná doporučení

Poslední fáze obrábění představující nejmenší úběry materiálu s těmito vlastnostmi:

- dokončování / polodokončování,
- velký důraz na kvalitu povrchu (integrita) – poslední řez před finálním tvarem je vystaven přísným restrikcím – nástroj je dlouhou dobu v řezu,
- nástroje a jejich dráhy, včetně řezných parametrů bývají často uváděny jako kritické – určeny zákazníkem.
- oblast tenkostěnných dílů – malá tuhost (viz předchozí oddíl)

Doporučené řezné parametry:

- a_p 0,25 – 0,5 mm,
- f_n 0,1 – 0,4 ot/mm,
- v_c 80 – 120 m/min.

Nástrojové požadavky:

- odolnost proti kráterovým výmolům,
- tvrdost za vysoké teploty.

[12, 13]

3.2 Základní předpoklady pro volbu technologie obrábění soustružením

Před samotným úkonem obrábění je třeba uvažovat několik prvků, které jsou rozhodující pro volbu konkrétních technologií. Základní tři prvky jsou obráběná součást, obráběný materiál a obráběcí stroj. Z hlediska obráběné součásti nás zajímá především její tvarové provedení, typ operace, velikost výrobní dávky a požadavky na kvalitu. Faktory ovlivňující materiál jsou jeho obrobiteľnosť, struktura povrchu (např. předobrobený nebo kovaný) a tvrdost. Posledním neméně důležitým faktorem je obráběcí stroj, který je třeba zkoumat z jeho výkonnostní stránky, stability, upnutí obrobku a přívodu chladicí kapaliny. Synergie soustavy SNOB představující stroj, nástroj, obrobek a přípravek by měla být sladěna tak, aby výsledná efektivita byla co možná nejvyšší.

Volba nástrojového systému u soustružení je ovlivněna typem operace. Základní členění soustružení je na vnější a vnitřní, které může být podélné, čelní, tvarové a kopírovací. Variantami předešlých způsobů se vytvářejí kombinace umožňující zhotovovat např. osazení, srážení hran a přechody mezi průměry. Podstatnou operací je také výroba zápichů, případně zapichovací soustružení a výroba závitů. Podle velikosti úběru materiálu a jakosti povrchu opracované plochy rozdělujeme obrábění jako takové na hrubování a dokončování.

V dnešní době je ve snaze výrobců nástrojů poskytnout zákazníkům co nejlepší přehled ve svých sortimentech. Rady ve výběru nástrojů zprostředkovávají například ve formě interaktivních softwarů, kde si zákazník sám navolí podmínky, jako jsou materiál a typ operace, a program vyhodnotí optimální nástroje s podrobnými informacemi, což umožňuje poměrně rychlé získání širokého přehledu o eventuelních možnostech.

4 Technologická řešení obrábění titanových slitin jednotlivých nástrojových společností

Následující podkapitoly popisují technologie a varianty soustružení titanových slitin, které vycházejí z poznatků a zkušeností předních nástrojářských společností. Popisovány jsou různé soustružnické operace, a to z hlediska vhodné volby nástroje (materiály a geometrie VBD, nástrojové držáky), řezných podmínek a činitelů ovlivňujících proces obrábění (chlazení atd.). Oddíl spadající vždy k výše uvedené podkapitole společnosti bude věnován konkrétnímu příkladu doporučení nástroje pro vzorovou soustružnickou dokončovací operaci materiálu Ti-6Al-4V, který je předmětem zkoumání i v praktické části bakalářské práce.

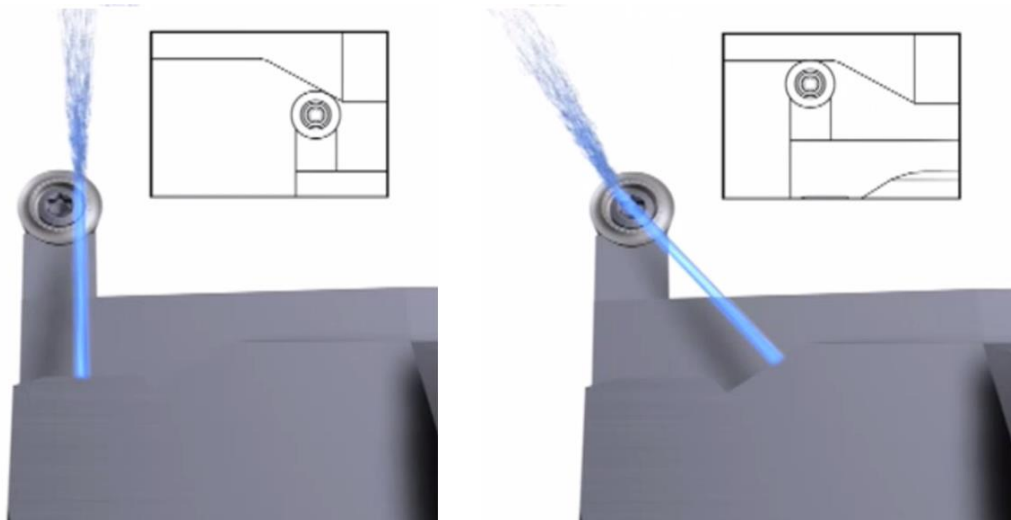
4.1 Sandvik Coromat

Společnost Sandvik Coromat nabízí řešení obrábění ve specifických průmyslových oblastech. Dominantním odvětvím, kde je vyžadována aplikace titanových slitin, je letectví. V podsekcí Titan, která je součástí sekce Letecký průmysl, najdeme několik typických součástí z tohoto prostředí. Jelikož se tato práce zabývá soustružením, bude v této kapitole dále popsáno technologické doporučení společnosti Sandvik Coromat na komponentě skříňě kompresoru viz obr. 4-1, která má rotační charakter. [8]



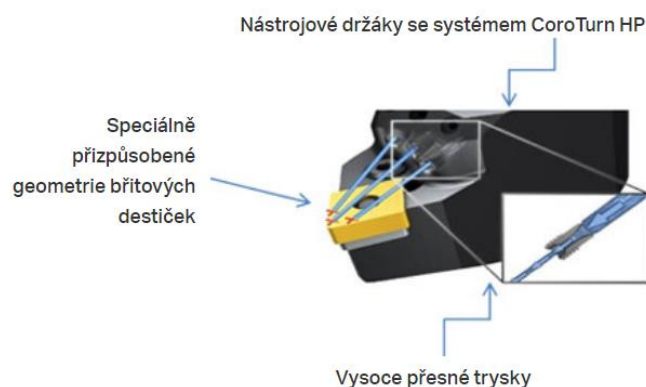
Obr. 4-1 – skříň kompresoru [8]

Hned v úvodu nás výrobce obeznamuje s nemožností použití řezné keramiky pro obrábění titanových slitin oproti niklovým slitinám, které mají lepší vlastnosti z hlediska obrobiteľnosti. Dále zdůrazňuje udržování nízkých teplot v místě řezu a využívání účinků vysokotlakého chlazení (HPC). Na obr. 4-2 je znázorněno fokusování proudu chladicí kapaliny z nástroje v závislosti na prováděném typu úkonu. [8]



Obr. 4-2 – fokusování proudu chladicí kapaliny [8]

Vyměnitelné břitové destičky kruhového tvaru umožňují díky nízkému nastavení úhlu břitu a tloušťce třísky dobrý přístup do místa řezu. Systém CoroTurn HP je systém nástrojových držáků s pokročilým způsobem přívodu chladicí kapaliny. Držáky jsou opatřeny pevnými tryskami, viz obr. 4-3, což umožňuje nasměrovat laminární proudy média do místa řezu, z čehož výsledně vyplývá lepší kontrola nad utvářením třísek, bezpečnost, prodloužení životnosti nástroje a výsledná produktivita. Tento systém je doporučován v kombinaci s břitovými destičkami disponujícími geometrií speciálně určenou pro vysokotlaký přívod řezné kapaliny. Destičky mají tvar soustředující proud řezné kapaliny do místa řezu. Geometrie tvořící klín usnadňuje dělení třísek, viz obr. 4-4. Tlak řezné kapaliny v tomto systému může dosahovat až 275 barů. Změnou průměru trysky lze nastavit rychlost a množství průtoku chladicího média. [9]

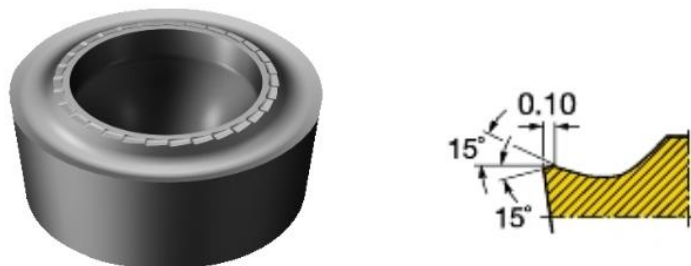


Obr. 4-3 – Systém CoroTurn HP [8]



Obr. 4-4 – Speciální geometrie VBD pro HPC obrábění [8]

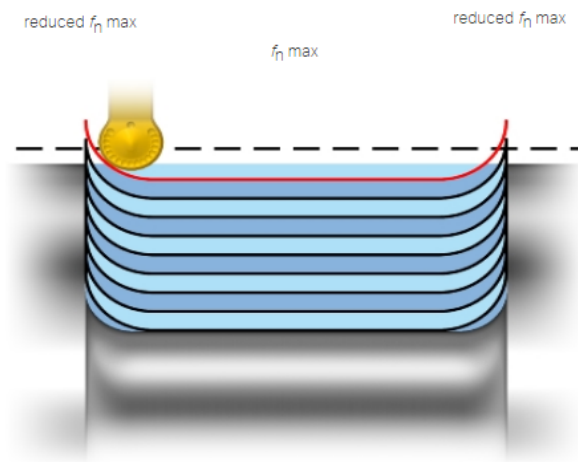
Jako jedna z doporučených vyměnitelných břitových destiček je uvedena RCMT 1204MO-SM H13A viz obr 4-5, která patří do třídy H13A. Tato třída spadá do skupiny destiček vhodných k obrábění tepelně odolných a titanových slitin. H13A konkrétně představuje nepovlakované karbidové vyměnitelné břitové destičky s dobrou abrazivní odolností, a odolností proti opotřebení při vysokých teplotách. Nabízí vhodný poměr mezi opotřebením a houževnatostí. Řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 4-1. Trochoidální soustružení, které tato destička umožňuje, je založeno na vysokých hodnotách posuvu při lineární části úběru a nízké hodnotě záběru. Ilustrační znázornění trochoidálního soustružení je na obr. 4-6, kde jsou vidět odlišné vstupní a výstupní hodnoty posuvu z lineární části obrábění (při tvorbě rádiusu). Tvořený rádius by neměl přesahovat hodnotu větší než $0,5 \times R$ destičky. Hloubka řezu se postupně redukuje až na 15 % hodnoty průměru destičky. Při vytváření rádiusu působí v místě řezu velké tlaky. Je doporučeno použít VBD s poloměrem zaoblení menším, než je zhotovovaný rádius na obrobku. Vstupní a výstupní hodnoty posuvů ($f_n - red$) v oblasti rádiusu pro VBD RCMT 1204M0-SM H13 dosahují polovičních hodnot oproti hodnotám v lineární části operace ($f_n - max$). Příliš nízké hodnoty redukovaných posuvů společně s větším poloměrem zaoblení VBD by mohli způsobovat rozvibrování nástroje. [10, 11, 13].



Obr. 4-5 – VBD RCMT 1204MO-SM H13 [10]

Řezné podmínky	
Řezná rychlost v_c [m/min]	50
hloubka řezu a_p [mm]	3
rychlost posuvu f_n - max [mm/ot]	0,4
rychlost posuvu f_n - red [mm/ot]	0,2

Tab. 4-1 – řezné parametry pro RCMT 1204MO-SM H13 při trochoidálním soustružení



Obr. 4-6 – Ilustrační znázornění trochoidálního soustružení [32]

Systém Coromat Capto Jetbreak je vyvinut pro ultra vysokotlaký přívod řezné kapaliny pro vertikální soustružení. Hodnoty tlaků se mohou pohybovat mezi 100 – 500 bary. Mnoho technologických a konstrukčních poznatků z této oblasti je už standardně využíváno u programu CoroTurn HPC. [8]

Geometrie Xcel viz obr. 4-7, pro obrábění titanu nabízí řešení pro středně hrubovací soustružení do rohu. Snižuje velikost úhlu nastavení a tloušťky třísky, což umožňuje zvýšení hodnot posuvu a řezné rychlosti. Kombinací čtvercového a kosočtvercového tvaru vyměnitelné břitové destičky s úhlem nastavení 45° a 90° vznikají výhodné geometrie. Kosočtvercové VBD zajišťují dobrý přístup do místa řezu i v omezeném prostoru. Dále umožňují obrábění ve dvou směrech s jednoduchou nástrojovou korekcí. Čtvercové VBD vynikají dlouhou životností a vysokými hodnotami posuvu. Rychlost úběru materiálu a životnost nástroje je s geometrií Xcel až dvojnásobná. [8]

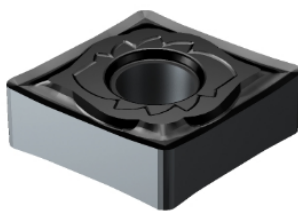


Obr. 4-7 – Geometrie Xcel [8]

Vyměnitelné břitové destičky pro obrábění titanu jsou konstruovány, aby zvládli hloubku řezu od 0,2 do 10 mm s dobrou kontrolou nad destičkou a nízkým tlakem nástroje. Geometrie VBD se pro dokončovací soustružení vybírá i dle požadavku, zda je primárním výstupem kvalitní povrch nebo kontrola nad tvořením třísky. Při dokončovací operaci není přípustné zničení nástroje, jehož vměstky by se mohli promítnout do struktury obrobeného povrchu. Optimální geometrií pro případ vyžadující kvalitní a přesný povrch je typ SGF, který má pozitivní geometrii s malým zaoblením rádiusu. Mezi přednosti této geometrie patří velmi ostrá řezná hrana, extrémní přesnost a nižší nástrojový tlak. Situace vyžadující stabilní utváření třísky může lépe zastat geometrie typu SF. Benefity této geometrie zajišťuje bezpečnost procesu, dlouhá délka řezu a utvařeč třísek. Na obr. 4-8 jsou zobrazeny rozdíly v geometrii utvařečů třísky mezi karbidovými VBD CNGG 12 04 04 s geometrií utvařeče SGF a SF, včetně vstupních řezných parametrů. [13,14, 15]

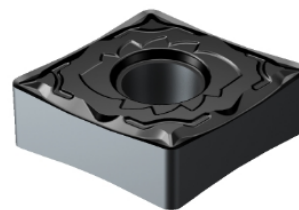
CNGG 12 04 04-SGF 1105

CNMG 12 04 04-SF 1105



S

ap 0.3 mm(0.1-3)
fn 0.12 mm/r(0.05-0.25)
vc 80 m/min(80-60)



S

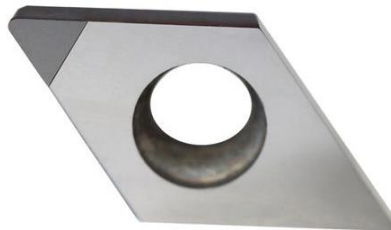
ap 0.4 mm(0.15-1.5)
fn 0.12 mm/r(0.08-0.22)
vc 80 m/min(80-65)

Obr. 4-8 – rozdíly ve tvaru utvařečů třísky geometrie SGF a SF [14, 15]

Další alternativou z hlediska volby řezného materiálu je polykrystalický diamant (PKD), který vzniká syntetizací nejtvrďšího známého přírodního materiálu, a to monokrystalického diamantu. PKD je nejtvrďším řezným materiálem s velmi dobrou odolností proti otěru. Mezi jeho nevýhody patří malá chemická stabilita za zvýšených teplot a vysoká afinita k železu. PKD je složen z nahodile orientovaných diamantových částic, které jsou spěkané s kovovým pojivem za použití vysokých tlaků a teplot. Vzhledem k nahodilé orientaci diamantových částic je odolnost proti opotřebení aktivní ve všech směrech materiálu. Malá destička z PKD je napájena na VBD ze slinutého karbidu (viz obr. 4-9), která vytváří prostředí odolné proti rázovým a tepelným šokům. Nástroje z PKD mohou být velmi dlouhou dobu v řezu. Pro zajištění životnosti je zde nutné zajistit vysokotlaké chlazení, které dobu životnosti nástroje prodlouží až o 40 %. Chlazení je podstatné z hlediska udržení nízkých teplot v místě řezu.

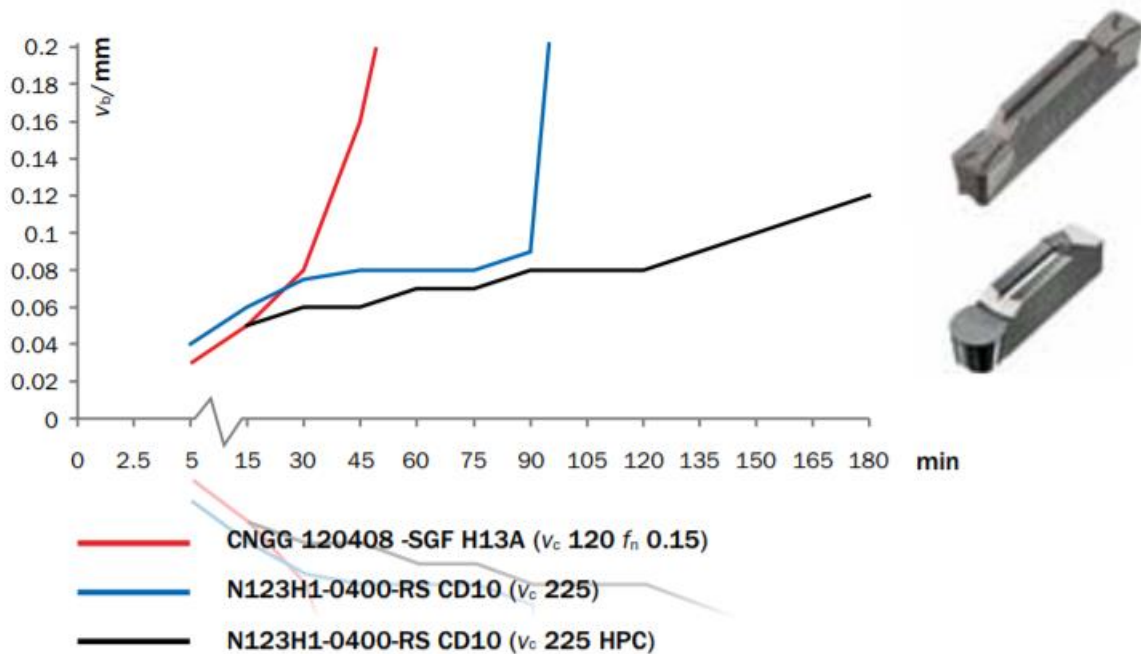
Pro nástroje z PKD platí několik zásadních omezení:

- teploty v oblasti řezání nesmí překročit 600 °C,
- nepoužitelný pro obrábění železných materiálů (afinita),
- nevhodný pro houževnaté materiály s vysokou pevností. [6, 16]



Obr. 4-9 – provedení VBD s řeznou částí z polykrystalického diamantu [33]

Na obr. 4-10 je vidět výsledek testu, který ukazuje životnost PKD nástroje třídy CD10 u dokončovacích operací, v porovnání s karbidovou nepovlakovanou VBD třídy H13A. Červená křivka představuje karbidovou VBD: CNGG 120408 – SGF H13A. Řezná rychlost pro tuto VBD je 120 m/min a posuv 0,15 mm/ot. Modrá a černá křivka představuje použití nástroje z PKD. Nástroj je N123H1-0400-RS CD10. Řezná rychlost pro tento nástroj je 225 m/min a posuv 0,2 mm/ot. Modrá křivka znázorňuje chlazení tlakem 5 barů, kdežto černá představuje vysokotlaké chlazení (HPC) 70 bary. [6,13,16]



Obr. 4-10 – porovnání životností VBD ze slinutého karbidu s VBD z polykrystalického diamantu [13]

Informaci, zdali vybraná VBD spolehlivě provede jeden průchod, určuje délka spirálového řezu (SCL), která může být vypočítána pro zadaný průměr a délku řezu v závislosti na hodnotách posuvu. [13]

Při vnitřním dokončovacím soustružení je vhodné použít VBD základního tvaru s pozitivní geometrií napomáhající zamezit vychýlení VBD. Pro nej přesnější výsledky vyžadující přesné tolerance a hladký povrch výrobce doporučuje nástroje řady Silent Tools® viz obr. 4-11, které se uplatňují v případech, kdy je třeba štíhlého nástroje pro obrábění děr malých průměrů. Délka tlumících nástavců je v provedeních přesahujících trojnásobnou hodnotu průměru, a může dosahovat až desetinásobnou hodnotu průměru u ocelových adaptérů, a až čtrnáctinásobnou hodnotu u karbidových adaptérů. Tlumící adaptér může být kombinován s různými řeznými hlavičkami řady CoroTurn SL. Během drážkovacích a dělicích operací je z hlediska minimalizace vibrací doporučen malý rádius a ostré řezné hrany VBD. Vibrace napomáhá omezit i co nejmenší možná délka nástroje, tenká VBD a kdykoliv je to možné, použití tlumících adaptérů. Vhodný typ chlazení (nejlépe HPC) by měl zajistit odchod třísky z drážky, aby bylo zamezeno přeřezávání třísky. Optimální formou třísky jsou malé spirálky. [13]



Obr. 4 – 11 – nástrojový držák řady Silent Tools® pro tlumení vibrací u vnitřního soustružení [13]

4.1.1 Sandvik Coromat - dokončovací soustružení

V prostředí webového rozhraní společnosti Sandvik Coromat je nabízen k výběru ideální břitové destičky filtr, který na základě zvolených parametrů pomůže nasměrovat k optimálním variantám. Jako kritérium materiálu byla zvolena skupina S – konkrétně třída destiček je H13A, která odpovídá svojí konstrukcí obrábění titanových slitin, a typ operace dokončování. Další parametry jako je velikost, tvar a rádius nebyly uvažovány, jelikož jde jen o zjištění typu VBD, které se pro daný druh soustružení hodí. Následně jsou vypsány některé vhodné VBD pro dokončovací soustružení titanových slitin. Všechny uvedené destičky jsou třídy H13A, jejíž vlastnosti jsou popsány v předchozí podkapitole.

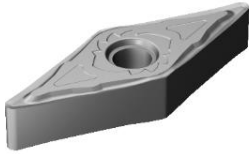
Výčet doporučených VBD viz obr. 4-12 je tvořen: CNGG 12 04 01 (02) -SGF H13A; DNGG 15 04 01 (02)-SGF H13A; VNGG 16 04 01 (02)-SGF H13A; WNGG 08 04 01 (02, 12)-SGF H13A; TR-VB1302-F H13A a několika dalšími VBD.

V tabulce 4-2 je porovnán vliv změny rozměru rádiusu špičky u CNGG 12 04 0X (za X jsou dosazeny jednotlivé hodnoty rádiusu špičky) na počáteční řezné parametry. [18]

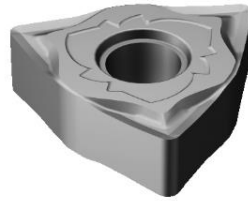
název VBD	v_c	a_p	f_n
CNGG 12 04 01-SGF H13A	40 (40 - 40)	0,3 (0,1 - 5)	0,04 (0,04 - 0,08)
CNGG 12 04 02-SGF H13A	40 (40 - 40)	0,5 (0,2 - 5)	0,04 (0,04 - 0,10)
CNGG 12 04 04-SGF H13A	40 (40 - 35)	0,3 (1,3 - 3)	0,12 (0,05 - 0,25)
CNGG 12 04 08-SGF H13A	40 (40 - 30)	0,5 (0,2 - 3)	0,15 (0,10 - 0,30)
CNGG 12 04 12-SGF H13A	40 (40 - 25)	0,8 (0,3 - 4)	0,18 (0,10 - 0,35)

Tab. 4-2 – vliv změny rozměru rádiusu VBD na řezné parametry [18]

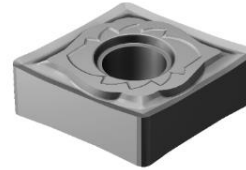
VNGG 16 04 01-SGF H13A



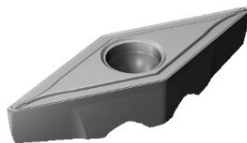
WNGG 08 04 01-SGF H13A



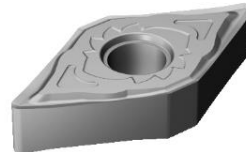
CNGG 12 04 01-SGF H13A



TR-VB1302-F H13A



DNGG 15 04 01-SGF H13A



Obr. 4-12 – vhodné VBD pro dokončovací soustružení titanových slitin [18]

Pomocí interaktivní aplikace CoroPlus® ToolGuide™ bude uveden příklad optimální volby nástroje pro konkrétní operaci. V nabídce úloha je zvolena rotační symetrická součást, z čehož je patrné, že se díl bude obrábět metodou soustružení. Po nastavení obráběného materiálu jako slitina titanu Ti-6Al-4V, je zvolena pro opracování vnější válcová plocha. Výchozí obráběný průměr o rozměru 500 mm bude opracován na průměr 499 mm. Délka obráběné plochy činí 20 mm. Drsnost obráběného povrchu je 0,8 μm . Soustruh disponuje výkonem 25 kW, 4000 ot/min.

Obr. 4-13 ukazuje výsledky vyhodnocené programem ToolGuide™. Nástroj je vybrán z řady T-Max (vhodná pro soustružení středních až velkých součástí), typ DCBNR 2020K 12 s vyměnitelnou břitovou destičkou jakosti 1105 druhu CNMG 12 04 16-SMR 1105. Třída 1105 představuje karbidové povlakované VBD, které vynikají odolností proti ulpívání nárůstku na ostří.

Úhel nastavení hlavního ostří nástroje je 75°, úhel špičky nástroje je 100°, ortogonální úhel čela -6°. Nástroj nedisponuje možností tlumení. VBD typu CNMG 12 04 16SMR 1105 pokrývá povlak zhotovený metodou PVD (Ti, Al). Jako hlavní typ operace pro níž je VBD určena výrobce uvádí střední obrábění, přesto byla VBD pro dokončovací operaci vyhodnocena jako vhodná. Hladící břit není přítomen. [19]

The screenshot displays the ToolGuide software interface for a turning operation. It is divided into three main sections: 'VÁLCOVÁ PLOCHA' (Cylindrical Surface), 'POUZE PODÉLNÉ SOUSTRUŽENÍ VNĚJŠÍCH PLOCH / INDEXOVATELNÁ' (Only longitudinal turning of external surfaces / indexable), and 'ŘEZNÉ PODMINKY' (Cutting Conditions).

Workpiece Information: Material is 334 HB Ti6Al4V (Titanium alloy). Machine is Soustruh 03 - střední (sklíčidlo 6-12"). Power is 25 kW, speed is 4000 1/min.

Tool Selection: Under 'T-Max P', the selected tool is DCBNR 2020K 12 (Nástroj) and the insert is CNMG 12 04 16-SMR 1105 (Destička). The shank is Rectangular shank -metric: 20 x 20.

Cutting Parameters:












- Initial diameter (DMS): 500 mm
- Final diameter (DME): 499 mm
- Length of cut (LM): 20 mm
- Surface roughness (RRA): 0,8 μm
- Depth of cut (AP): 0.5 mm
- Feed (FN): 0.211 mm
- Spindle speed (VC): 69.2 m/min
- Number of passes: 1

Tool Life: Estimated tool life is 8.09 hours (TLIFEC). Estimated cutting time per part is 02:09,000 minutes (TMF).

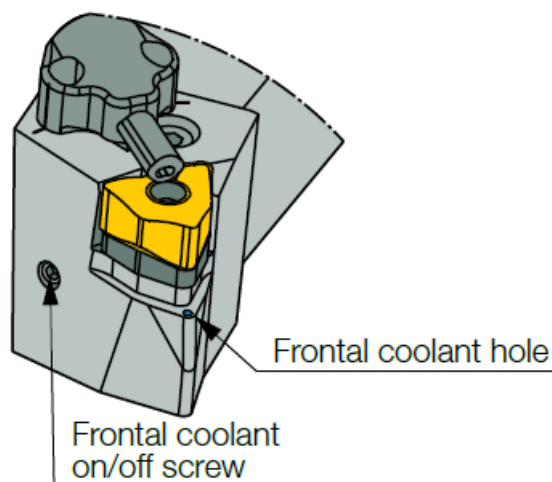
Obr. 4-13 – vyhodnocení optimální technologie pro daný obráběcí úkon v prostředí programu ToolGuide™ [19]

4.2 Iscar

Pro opracování těžce obrobitelných materiálů jako jsou inconel a slitiny titanu společnost Iscar nabízí nástroje řady Jetcut. Jedná se o řešení nacházející uplatnění v oblasti vysokotlakého chlazení (HPC), díky kterému se zrychlují procesy obrábění titanových slitin až o 200 % oproti konvenčnímu způsobu chlazení. Systém zamezuje zasekávání třísek, slibuje rychlejší obrábění a zvýšení životnosti řezných hran při soustružení průměrů stejně tak jako při drážkování. Chladicí médium je do místa řezu dopravováno dostatečným tlakem, aby kapalina vlivem teplot ve velké míře nepodléhala vypařování, ještě než se dostane do požadovaného místa. Kromě chlazení materiálu v místě řezu je úkolem kapaliny hasit a roztříštit roztavené třísky do přijatelných rozměrů, aby nepřekáželi samotnému chlazení v místě řezu. Pro různé tvary VBD jsou nabízeny 4 varianty profilů teleskopických tub vedoucích chladicí médium z nástroje do místa řezu, viz obr. 4-14. Schématické zobrazení provedení chlazení na nástroji je vidět na obr. 4-15. Výrobce u tohoto systému dále zdůrazňuje, aby byla věnována maximální pozornost hodnotě tlaku, který by neměl překročit hodnotu 300 barů. [20, 21]

Insert	Channel Shape Inside the Nozzle Tube	Nozzle Tube	Flow Rate liter/min			
			70 Bar	100 Bar	140 Bar	300 Bar
		NZ-CW-JHP	19-23.5	22.5-28	26.5-33	46-52
		NZ-D-JHP	19-23.5	22.5-28	26.5-33	46-52
		NZ-V-JHP	9.5-11.8	11.3-14	13.4-16.7	22-26
		NZ-R-JHP	19-23.5	22.5-28	26.5-33	46-52
		Holes	14-16	18-23	23-26	33-37
Frontal Coolant Hole⁽¹⁾		Hole	5.4-6.6	6.4-8	7.5-9.5	10-14

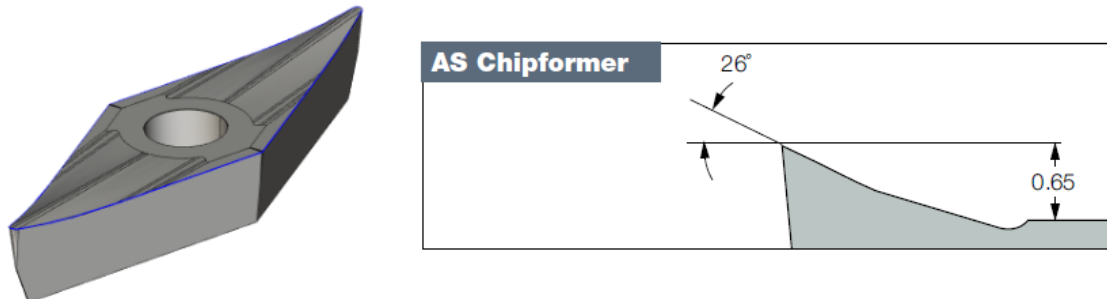
Obr. 4-14 – varianty profilů pro přívod řezné kapaliny v závislosti na tvaru VBD [20]



Obr. 4-15 – schéma provedení chlazení na nástroji [20]

Pro obrábění Ti-6Al-4V jsou nabízeny standardní soustružnické destičky různých karbidových jakostí. Nejzákladnější nabízená třída jakosti je IC20. Jedná se o nepovlakovanou karbidovou třídu VBD. Pro obrábění větších dílů lze použít například ISO destičky CCGT 060202 AS IC20, CCGT 09T304 AS IC20 nebo VCGT 110302 AS IC20 a VCGT 160408 AS IC20. Pro lehčí upichovací operace je vhodné použít VBD typu JET-CUT opatřené chlazením středem destičky, kdežto těžší aplikace lépe zvládnou nástroje řady TANG – GRIP (tangenciálně upnuté jednostranné destičky pro čelní drážkování).

Na obr. 4 – 16 je vidět VBD VCGT 110302 AS IC20 s geometrií použitého utvařeče třísky. Jedná se o velmi pozitivní utvařeč, který je často používán zejména pro obrábění hliníku. [22]

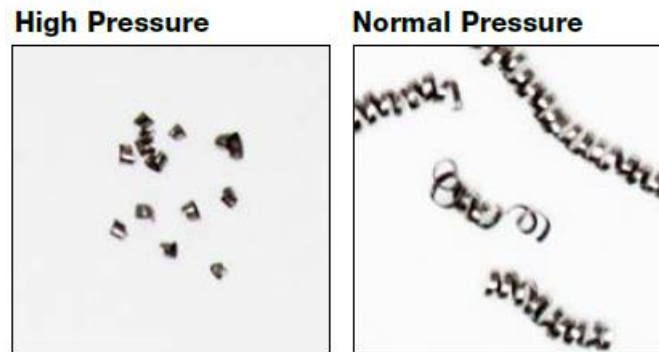


Obr. 4-16 - VBD VCGT 110302 AS IC20 s geometrií použitého utvařeče třísky [20]

Vhodné třídy karbidů využívající povlakování metodou PVD jsou IC908, IC907 a IC1008. IC 907 je pevný submikronový substrát s nánosem tenké vrstvy TiAlN. Tato třída je navržena pro obrábění žáruvzdorných slitin nízkými až středními rychlostmi. IC 908 je z tvrdého, jemnozrnného substrátu odolného proti odlamování, kombinovaného s tenkou vrstvou z TiAlN. Třída tohoto karbidu dobře odolává oxidaci a opotřebení. Pro přerušovaný řez je ideální třída IC1008, která využívá tenké vrstvy TiAlN + TiN, a je rovněž vhodná pro žáruvzdorné slitiny. [22]

Dokončovací a polodokončovací soustružnické operace mohou být provedeny např. broušenými destičkami VCET, DCET a CCET, které disponují leštěným utvařečem WF a hladící geometrií. Pro velmi přesné dokončovací operace jsou určeny destičky VCGT s utvařečem MD. Pro zapichovací a upichovací operace je doporučován systém JET-CUT, kdy je vedena chladicí kapalina středem destičky přímo pod vznikající třísku, společně s destičkami o šířce 3 a 4 mm v karbidové jakosti IC908. [22]

Iscar uvádí ve svém katalogu nástrojů výsledek porovnávacího testování, při kterém byl soustružen materiál Ti-6Al-4V pomocí nástroje PCLNL 2525M-12-JHP a VBD: CNMG 120412-PP IC20. Rozdíl běžného chlazení o hodnotách 6 – 8 barů oproti vysokotlakému chlazení o hodnotě 70 barů, se kromě prodloužení životnosti nástroje podílel i na formování třísky viz obr. 4-17. Testování proběhlo při třech různých hodnotách řezných rychlostí, a to při: $v_{c1} = 50$ m/min; $v_{c2} = 60$ m/min; $v_{c3} = 75$ m/min, hloubce řezu: $a_p = 2,5$ mm a posuvu na otáčku: $f_n = 0,3$ mm/ot. [21]



Obr. 4-17 – vliv změny tlaku na tvar třísky [21]

4.2.1 Iscar – dokončovací soustružení

Iscar také nabízí aplikaci pro volbu vhodných nástrojů, která funguje na podobné bázi, jako většina těchto softwarů viz předchozí kapitola 4.1 popisující technologie společnosti Sandvik Coromat. Opět byly zadány klíčové parametry, jako obráběný materiál, typ operace, požadovaná drsnost povrchu, obráběné rozměry. Aby výsledné doporučení mělo vypovídající hodnotu v kontextu této práce, byly zvoleny stejné parametry jako při využívání aplikace ToolGuide™ společnosti Sandvik Coromat. Pod záložkou stupeň tuhosti lze navíc zvolit, zda upínání obráběné součásti je stabilní či nikoliv, je-li tvar dílu tenkostěnný nebo normální, a u typu řezu lze zvolit možnosti: kontinuální, přerušovaný nebo silně přerušovaný.

Program Iscar tool advisor vyhodnotil a nabídl 3 možná řešení. Řezné podmínky jednotlivých variant se od sebe liší jen nepatrně. Doporučeny jsou držáky ze skupiny Isotrun. Volba číslo jedna představuje nástroj SCLCR 2525M-12 s úhlem hřbetu 7° v kombinaci s rombickou destičkou CCGT 120404-AS svírající úhel 80° s velmi pozitivním úhlem čela. Druhá varianta zahrnuje nástroj DCLNR 2525M-12 s taktéž rombickou destičkou CNMG 120408-F3M, která je oboustranná a svírá úhel 80°. Destička je vhodná především pro obrábění nerez ocelí. Třetí varianta obsahuje stejnou destičku jako varianta druhá, ale liší se druhem nástroje, kterým je PCLNR 2525X-12-JHP-MC. Jedná se o nástroj s vysokotlakým přívodem chladicí kapaliny. Kapalina ústí centrální tryskou v dutině klampu upevňujícího břitovou destičku, a frontální dutinou nástroje. [30]

4.3 Walter

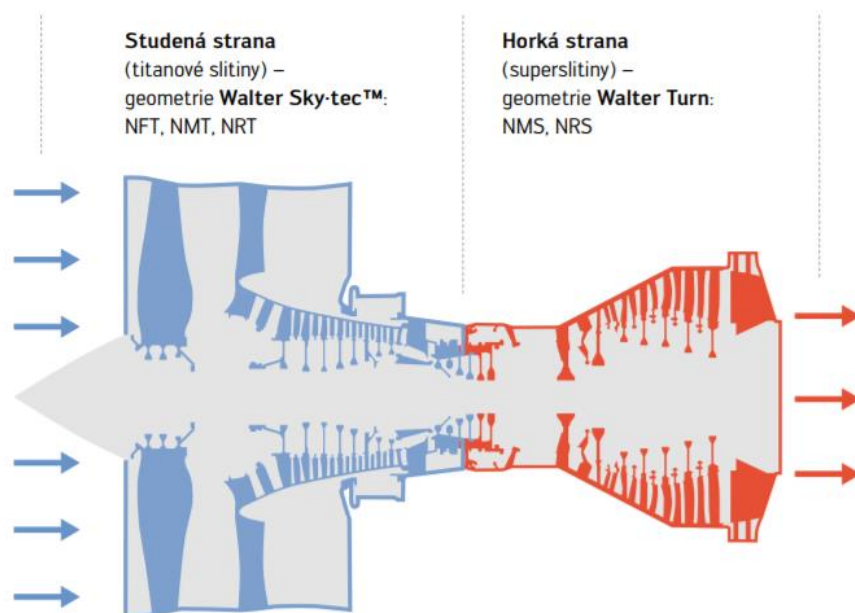
Pro těžkoobrobitelné superslitiny, kam řadíme i slitiny titanu poskytuje společnost Walter geometrie z řady Sky.Tec™, kam se řadí typ NRT, NMT a NFT viz obr. 4 - 18. Tato geometrie je využita především u obrábění hnacích mechanismů v leteckém a kosmickém průmyslu. Geometrie NFT je vhodná pro dokončovací obrábění titanových slitin. Břit je broušený ze všech stran pro dosažení maximální přesnosti. Nejběžnější tvary této geometrie jsou C, D a V. Pro střední obrábění nestálých součástí či vnitřní obrábění se používá geometrie NMT, která klade nízký řezný odpor díky dvojnásobně pozitivně zakřivené geometrii. Základní tvary představují C, D, T a W. Hrubovací operace využívají provedení stabilní makrogeometrie NRT, které působí proti opotřebení utvářeče. V tomto případě je prioritní co největší úběr materiálu za jednotku času. [23]

Přibližně 75 % aplikací vyžaduje nepovlakovaný druh řezného materiálu WS10 (ISO S10). U těžkých přerušovaných řezů nebo při nestabilních podmínkách obrábění má uplatnění WS20 (ISO S20/M20). Jedná se o povlakovaný druh metodou PVD složený z Al_2O_3 .

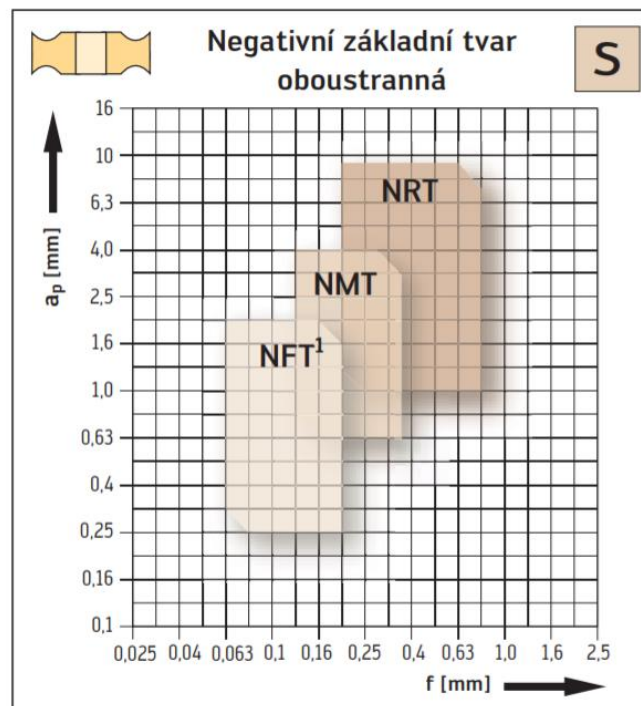
Na obr. 4-19 je vidět rozdíl v používané technologii geometrií břitových destiček při obrábění studené strany turbíny letadla, kde své uplatnění najdou již zmíněné geometrie, a strany teplé, kde je využívána geometrie Walter Turn (NMS, NRS). Závislost mezi hodnotami posuvu a hloubky řezu ovlivňující volbu geometrie zobrazuje graf na obr. 4-20. [23]



Obr. 4-18 – geometrie řady Sky.Tec™ (zleva NFT, NMT, NRT) [23]



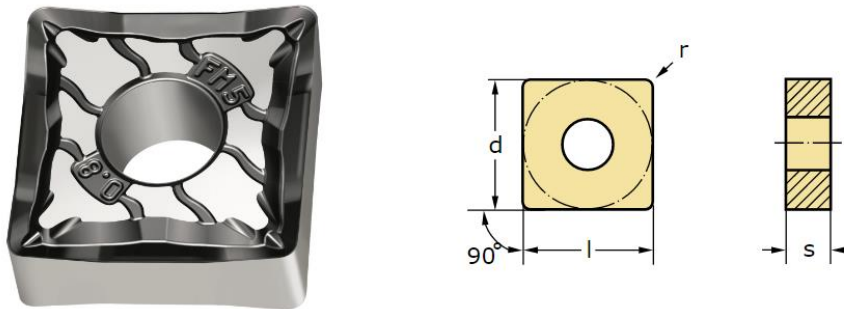
Obr. 4-19 – používané druhy geometrií v závislosti na druhu materiálu, který je v praxi ovlivňován různými teplotami [23]



Obr. 4-20 – závislost mezi řeznými podmínkami a typem vhodné geometrie [24]

4.3.1 Walter – dokončovací soustružení

Softwarové rozhraní pro volbu optimálního nástroje se v případě společnosti Walter nazývá GPS. Pro stejnou operaci, tedy axiální soustružení na čisto z průměru 500 mm na průměr 499 mm společnost Walter nabízí řešení pomocí nástroje DSDNN2020K12 s úhlem nastavení v podélném směru 45° a úhlem sklonu 6° , společně se čtvercovou negativní břitovou destičkou SNMG 120408-FM5 WSM20S viz obr. 4-21. Index FM5 značí typ utvařece, který je vhodný pro dokončovací soustružení nerezových ocelí (přesto, že jako výchozí materiál byla zvolena titanová slitina Ti-6Al-4V). V online katalogu je mimo jiné kromě ISO M uvedena také vhodnost skupiny ISO S. Index WSM20S značí jakost karbidu. První písmeno W značí výrobce Walter, druhé písmeno S (těžko obrobitelné materiály) popisuje druh tenké vrstvy nebo hlavní použití, na které je daná jakost vhodná. Písmeno M představuje také oblast hlavního použití, tudíž je zřejmé, že destička je vhodná pro materiály ISO skupin M a S. Číslo 20 vyznačuje poměr mezi odolností proti opotřebení a houževnatostí. V tomto případě je poměr poměrně vyvážený. Poslední písmeno S reprezentuje obchodní název generace Tiger-tec[®] Silver, což je karbidová třída určená pro obrábění materiálů skupiny ISO S. Nanášení tenké vrstvy Al_2O_3 je prováděno metodou PVD. Právě oxid hlinitý způsobuje odolnost vůči opotřebování VBD za vysokých teplot, které jak již bylo zmíněno, jsou u této skupiny obráběných materiálů hlavním problémem. Generace Tiger-tec[®] Silver se vyrábí v karbidových jakostech WSM10, WSM20 a WSM30. [25,26]



Detaily k výrobku

Popis	Symbol	Hodnota
Průměr vnitřní kružnice	d	12.70 mm
Poloměr špičky	r	0.80 mm
Funkční šířka	f	0.07–0.20 mm
Hloubka řezu	a_p	0.4–1.5 mm

Obr. 4-21 – popis SNMG 120408-FM5 WSM20S [27]

V porovnání s řeznými parametry předchozích konkurenčních návrhů je nutné podotknout, že řezné podmínky se od konkurenčních řešení liší minimálně. Pro ukázkou jsou uvedeny na obr. 4-22.

Všeobecné informace		ECO	Řezné podmínky
Parametry			1
Počet průchoďů ve směru a_p	NOPap	1	
Počáteční průměr	D_{ms}	500	mm
Konečný průměr	D_{me}	499	mm
Hloubka řezu	a_p	0,5	mm
Řezná rychlost	v_c	62,5	m/min
Posuv na otáčku	f_n	0,172	mm
Max. otáčky vřetena	rpm_{max}	39,9	1/min
Max. řezný výkon	$P_{c\ max}$	0,214	kW
Max. řezný moment	$M_{c\ max}$	51,4	Nm
Hlavní čas celkem	$T_{c\ tot}$	2:55	min:s
Vedlejší čas celkem	$T_{nc\ tot}$	0,154	S
Doba životnosti nástroje	LifeTime	20	Min

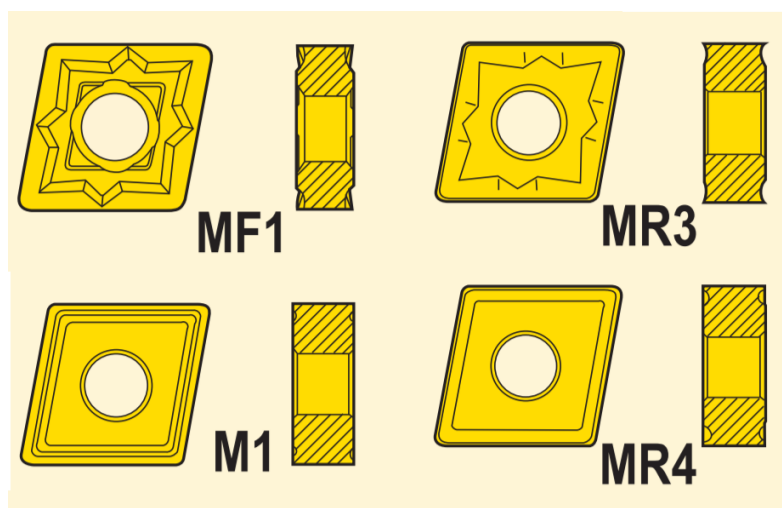
Obr. 4-22 – přehled řezných parametrů vyhodnocených aplikací GPS [25]

4.4 Seco

Společnost Seco nabízí z pokročilých řezných materiálů vhodných k obrábění titanových slitin VBD z PKD (polykrystalického diamantu) v pěti možných třídách. Vrstva PKD může být na povrch karbidové VBD zhotovena buďto metodou pájení nebo slinováním. Pro obrábění titanu je nejvhodnější multimodální třída Secomax PCD30M a Secomax PCD20. Třída Secomax PCD30M nachází uplatnění převážně v případech obrábění abrazivních materiálů při zachování kvalitní struktury povrchu. VBD této jakosti mají kruhový tvar, a PKD je slinován do základního materiálu, kterým je nepovlakovaný karbid. Řezné hrany z jedné strany plochy destičky jsou použitelné po celém obvodu. Secomax PCD20 je určena pro všeobecné obrábění zahrnující širší spektrum operací. Substrát destiček jakosti PCD20 je tvořen středně velkými zrny karbidů (10 μm) v kobaltovém pojivu. VBD mají kruhový nebo čtvercový tvar. Tato třída je vhodná pro dosažení rovnováhy mezi odolností proti opotřebení a houževnatostí. [29]

Tak jako ostatní společnosti i Seco nabízí svůj vlastní systém chlazení nazývaný Jetstream Tooling, vyznačující se vysokým tlakem chladicí kapaliny a přesným zaměřením na řeznou hranu.

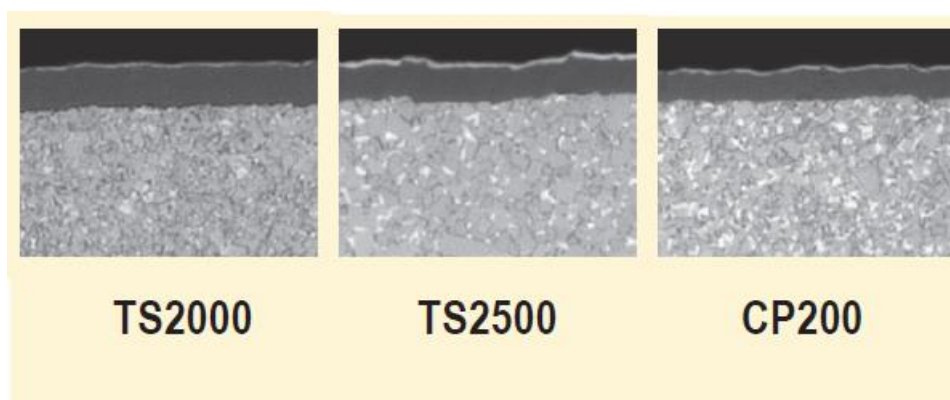
V katalogu produktů výrobce popisuje utvařeče třísek karbidových VBD vhodných pro konkrétní typy operací. Pro obrábění titanu jsou doporučovány utvařeče: MF1, M1, MR3 a MR4 viz obr. 4-23. ISO VBD tvaru CG s MF1 utvařečem se vyznačují přesnou a ostrou řeznou hranou, kdežto u VBD tvaru MG se stejným utvařečem třísek jsou řezné hrany lehce leštěné, což má za následek zvýšení pevnosti břitu. MF1 je dobrou volbou pro dokončovací a polodokončovací operace. Pro hrubovací až polodokončovací operace je vhodný utvařeč typu M1. Hrana pozitivního úhlu čela je mírně leštěná pro navýšení její odolnosti. V kombinaci s ISO VBD tvaru CG vytváří podmínky pro velmi ostrou hranu. Široký rozsah hrubovacích operací by měla zvládnout třída utvařeče MR3, disponující taktéž pozitivním úhlem čela s vysoce pevnou řeznou hranou. Utvařeč třídy MR4 mající negativní fazetku zaručuje extrémně tvrdou řeznou hranu, která je třeba v situacích, kdy je řez přerušován nepříznivými povrchovými podmínkami surového materiálu. [29]



Obr. 4-23 – přehled utvařečů třísek vhodných pro opracování titanových slitin [29]

Vhodné povlakované třídy karbidových VBD splňující kritéria pro obrábění titanových slitin představují: TS2000, TS2500 a CP200. Všechny tyto jemnozrnné třídy se deponují metodou PVD a jsou na bázi (Ti, Al) N + TiN. Vzhledem ke své tvrdší struktuře jsou TS2000 a CP200 vhodné pro dokončovací operace. TS2000 je odolnější vůči opotřebení. Houževnatější strukturu má třída TS2500, která se používá pro hrubovací operace. Je navržena pro širokou oblast materiálového použití zahrnující například nerez oceli. Schéma jednotlivých tenkých vrstev je zobrazeno na obrázku 4-24.

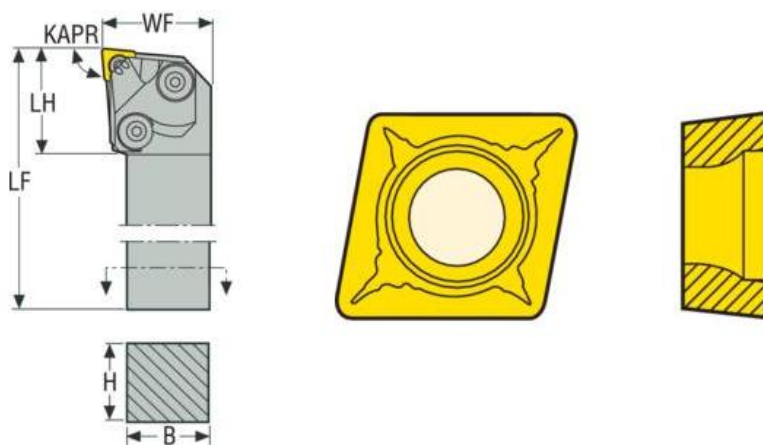
Třídy karbidů nevyužívající tenké vrstvy jsou: 883 a 890, z čehož 883 je vhodná pro hrubovací operace, a 890 nemá uvedené přesné specifikace, kromě vyváženého poměru mezi tvrdostí a houževnatostí. [29]



Obr. 4-24 – struktura jednotlivých tenkých vrstev [29]

4.4.1 Seco – dokončovací soustružení

Funkce Suggest pracující na stejném principu, jako konkurenční online rozhraní pro návrh optimálních nástrojů, doporučila variantu pro referenční operaci zmíněnou v této práci, a vybrala nástroj SCLCL 2525M12 JET. Úhel nastavení ostří nástroje je 95° , úhel sklonu 0° . Vyměnitelná břitová destička kompaktní s tímto nástrojem je CCMT 120408-F1 ve třídě řezného materiálu TS2000. Vybraná varianta je na obrázku 4-25. [36]



Obr. 4-25 – vybraná varianta aplikací Suggest pro referenční operaci [36]

5 Dokončovací soustružení slitiny Ti-6Al-4V

Cílem této části je porovnat varianty dokončovacího karuselového soustružení titanové slitiny Ti-6Al-4V, která byla již popsána v podkapitole 2.4. Výstup tvoří analýza zhodnocující efektivitu jednotlivých variant. Následující podkapitoly budou popisovat charakter obráběné součásti, obráběcí stroj a použité nástroje včetně řezných materiálů. Vzhledem k politice firemních pravidel není možno uvádět konkrétní tvary a rozměry dílu, proto budou použity orientační rozměry pro lepší představivost, což ale nebude žádným způsobem ovlivňovat prováděný experiment.

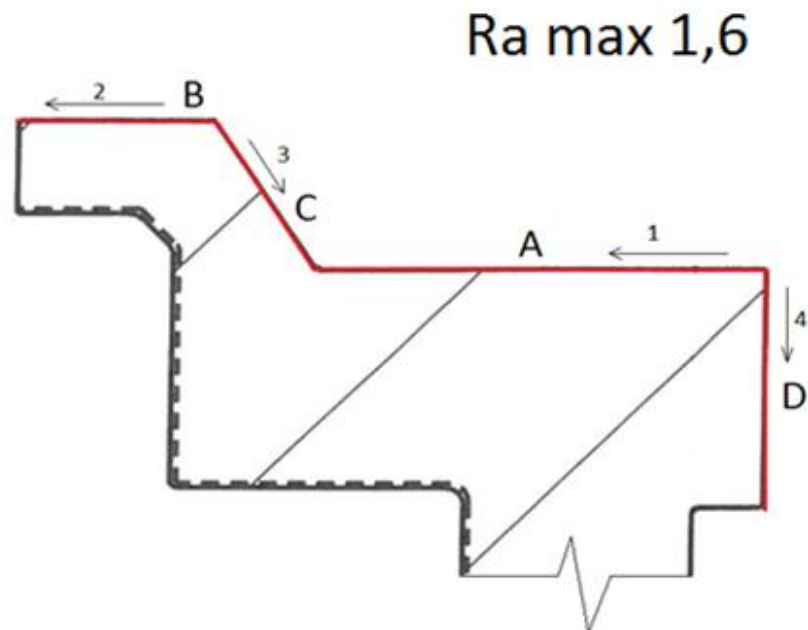
5.1 Obráběný díl

Obráběným dílem je rotační součást tvořící prvek leteckého motoru ve ventilační části. Vzhledem k tvarovému charakteru je pro opracování využito karuselové soustruhy, jehož specifikace jsou uvedeny v následující podkapitole 5.2. Na obr. 5-1 je vidět tvarové provedení obráběných ploch. Jedná se tedy celkem o dvě čelní plochy, jednu plochu tvarovou (kuželovou) a plochu průměru. Průměr součásti představuje cca 800 mm, výška cca 500 mm.



Obr. 5-1 – tvar obráběných ploch

Na následující straně je vidět obr. 5-2 zobrazující skicu profilu obráběných ploch, vyňatou z procesního výkresu, který je standardní dokumentační přílohou pro obsluhu stroje. Poměr jednotlivých rozměrů stran odpovídá skutečnosti. Písmena A, B, C, D značí jednotlivé plochy, šipky s číslicemi označují průběh (pořadí a směr) obrábění. Předepsaná maximální drsnost ploch je R_a 1,6. Soustřednost průměrů je v toleranci 0,5 mm. Rádusy vzniklé v přechodech mezi tvary mají hodnotu 1,2 mm.



Obr. 5-2 – profil obráběných ploch s vyznačením směrů a pořadí obrábění

5.2 Obráběcí stroj

Experiment byl prováděn na stroji BASICTURN 2000 s CNC řídicím systémem Sinumerik 840D SL viz obr. 5-3. Jedná se o karuselový číslicově řízený soustruh od společnosti TOSHULIN a.s. Stroj je vhodný především pro opakovanou výrobu středních a malých sérií, součástí tvarů přírub, kotoučů apod., což odpovídá charakteru dílu, na kterém byl prováděn experiment.



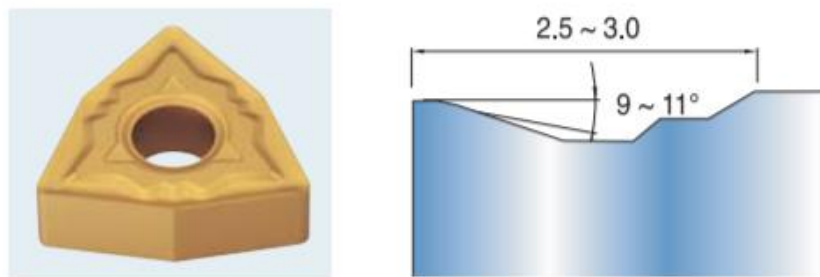
Obr. 5-3 – BASICTURN 2000 [39]

5.2.1 Technické specifikace stroje

- 3 řízené osy (X, Z, C)
- 12 místný diskový zásobník pro automatickou výměnu nástrojů
- napájení 3 x 400 V, 50 Hz
- AC motor hlavního vřetena 58 kW Siemens
- AC pohony posuvů X, Z, C Siemens
- AC pohon rotačních nástrojů 22 kW Siemens
- čtyřčelist'ová upínací deska se svěráky na povrchu (ručně ovládaná)
- standardní rozsah otáček upínací desky 2-315 ot/min
- zvýšený tlak chlazení nastavitelný do 20 bar

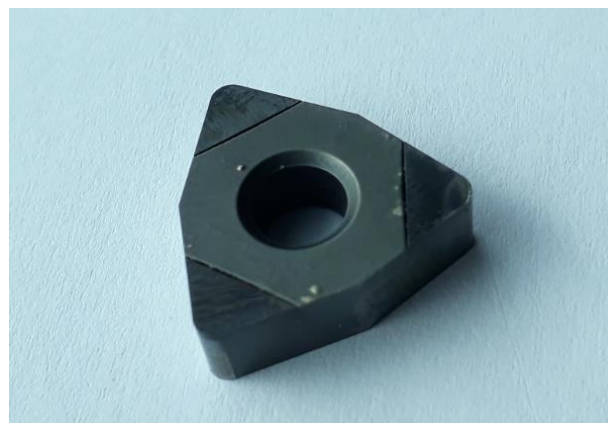
5.3 Řezný materiál a nástroj

V podkapitole 5.1 Obráběný díl byla popsána prováděná část operace. Standardním řezným materiálem vykonávajícím tuto operaci je povlakovaná VBD ze slinutého karbidu typu WNMG 080412 – HS. Jedná se o povlakování pomocí TiAlN metodou PVD. Jakost karbidu je společností Korloy značena PC9030. Na obr. 5-4 je vidět daná VBD společně s profilem utvařeče typu HS. Na destičce je použitelných celkem šest řezných hran.



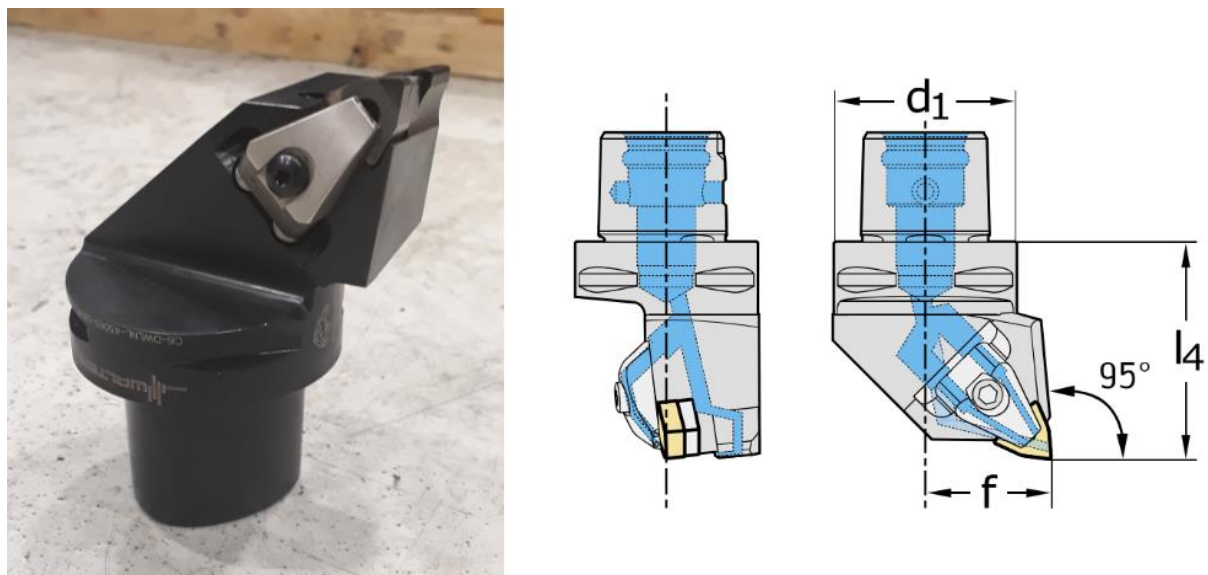
Obr. 5-4 – karbidová WNMG 080412 – HS [38]

Pro experimentální účel byla použita VBD z PKD. Tvar destičky byl totožný, tedy WNMG 080412. Destička má tři použitelné řezné hrany, které jsou tvořeny napájením břitu z PKD do základního materiálu, kterým je karbid. VBD je znázorněna na obr. 5-5.



Obr. 5-5 – VBD z polykrystalického diamantu

Použitým nástrojovým držákem byl modulární Capto držák typu C6-DWLNL-45065-08-P viz obr. 5-6. C6 představuje kód velikosti spojení, D způsob upnutí VBD pomocí upínky, W tvar VBD, L úhel nastavení, N úhel hřbetu a L provedení nástroje. Úhel nastavení ostří je 95° . Nástroj disponuje vnitřním chlazením, které fokusuje proud chladicí kapaliny do místa řezu. Řez nástrojem je vidět také na obr. 5-6.



Obr. 5-6 – nástroj C6-DWLNL-45065-08-P [37]

5.4 Řezné podmínky

Řezné podmínky kromě řezné rychlosti u obou řezných materiálů byly stejné. U karbidové VBD to byla řezná rychlost 60 m/min, kdežto u VBD z PKD dosahovala hodnot 200 m/min. Hloubka řezu a_p měla konstantní hodnotu 0,3 mm po celou dobu popsané části operace. Posuv f byl 0,2 mm/ot.

5.5 Naměřené hodnoty a výsledky

Část zmíněné operace vykoná standardně využívaná karbidová destička za 62,2 min.. Naproti tomu VBD z PKD je v řezu pouze 18,65 min. Důležité je však zmínit, že na rozdíl od VBD z PKD je třeba vyměnit řeznou hranu, a to celkem třikrát. První výměna nastává po obrobené ploše A, další po obrobených plochách B a C, a nakonec po opracování čelní plochy D. Toto jsou vedlejší časy při výrobě, které nejsou započteny ve výše zmiňovaném čase 62,2 min., a tedy celkový čas oproti VBD z PKD dále navyšují. Pro obrobení již zmíněných ploch jednoho dílu jsou zapotřebí 3 řezné hrany, tj. jedna strana destičky. Jedna karbidová VBD tedy obrobí dva díly.

U VBD z PKD bylo jako kritérium otočení řezné hrany stanoveno bezpečné dodržení přípustné kvality obrobeného povrchu. Při testech jedna řezná hrana bezproblémově obrobila 2 kusy, u třetího kusu byla kvalita povrchu v hraničních hodnotách. Tzn. z důvodu určité opakovatelnosti a spolehlivosti a případných dalších vlivů, byla stanovena výměna řezné hrany po 2 kusech.

Tabulka 5-1 vyznačuje naměřené hodnoty drsností jednotlivých ploch při použití VBD z PKD v závislosti na obráběném dílu stejnou hranou. Dále pak znázorňuje dobu v řezu na konkrétní obráběné ploše. Nutno podotknout, že při porovnání drsností ploch vzniklé pomocí

VBD z karbidu byly výsledné rozdílné hodnoty minimální. To, že jedna VBD z PKD umožňuje obrobit celkem 6 dílů oproti karbidové VBD, která umožní pouze díly dva, je patrné z předchozího popisu. Důležitým výstupem experimentu je však závěr, je-li nasazení VBD z PKD do výrobního procesu této části operace schopné pokrýt celkové požadavky z hlediska efektivity.

plocha	čas v řezu [min]	Drsnosti [Ra]		
		1.	2.	3.
A	8,4	0,69	0,41	1,52
B	1,75	0,64	0,46	1,49
C	2,5	0,51	0,65	1,05
D	6	0,83	1,30	1,31

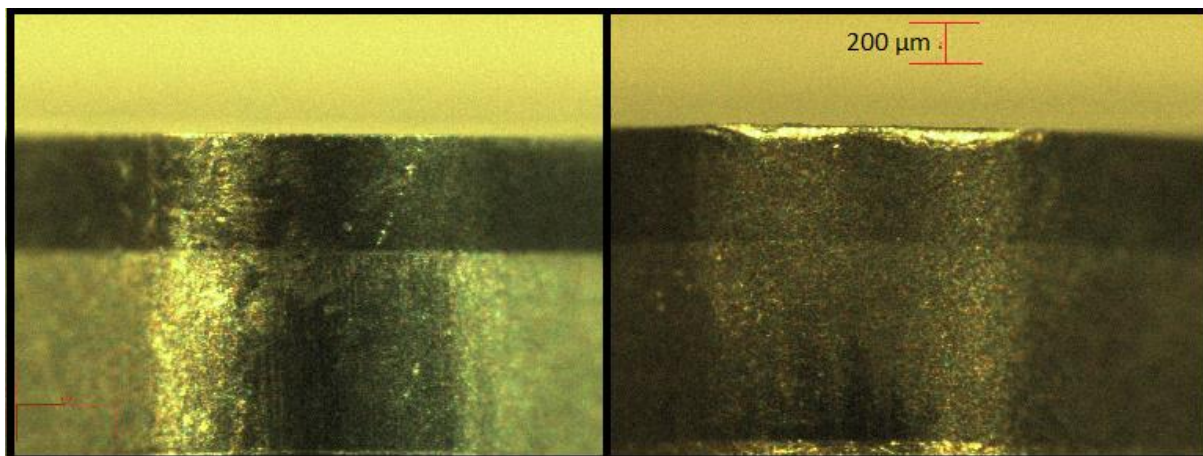
Tab. 5-1 – záznam časů v řezu a drsností obrobených ploch pomocí VBD z PKD

Na obr. 5-6 je vidět ukázka měření drsnosti obrobené plochy A u prvního obráběného dílu pomocí dílenského informativního měřidla.

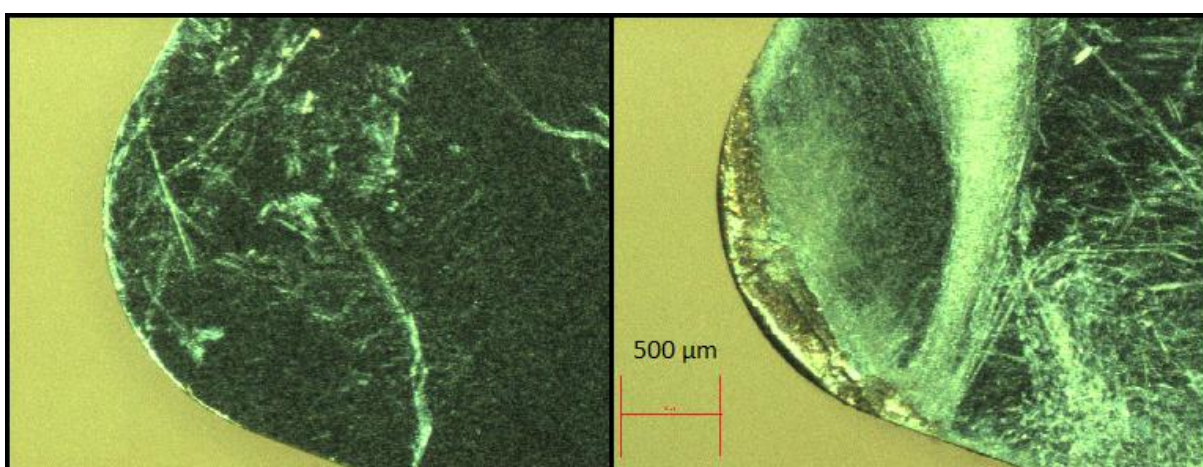


Obr. 5-6 – měření drsnosti obrobené plochy

Obr. 5-7, který zobrazuje snímek z mikroskopu, porovnává stav hřbetu nové VBD z PKD s destičkou použitou v řezu po dobu 55,95 min (tedy po třech obrobených dílech). Opotřebení hřbetu VB_{max} je 77 μm . Stejně tak obr. 5-8 zobrazuje opotřebení čela VBD KB hodnotou 334 μm . Z analýzy opotřebení hřbetů nástroje je patrné, že destička vykazuje vyšších hodnot na hřbetu, který je hlavním hřbetem při soustružení ploch C a D viz obr. 5 - 2, tzn. z pohledu kinematiky u podélného soustružení, i když čas v řezu je kratší než u ploch A a B. Toto může způsobovat obrábění kuželové plochy, u kterého jsou jiné záběrové podmínky, případně i vyjždění nástroje z řezu, hlavně pak u plochy C.



Obr. 5-7 – opotřebení hřbetu VBD z PKD - zleva nová řezná hrana, zprava opotřebená



Obr. 5-8 – opotřebení čela VBD z PKD – zleva nová řezná hrana, zprava opotřebená

5.6 Zhodnocení možnosti nasazení VBD z PKD z hlediska produktivity

Pro nasazení nové technologie do výrobního procesu musí existovat opodstatnění. V případě použití VBD z PKD je hlavním důvodem snížení času obrábění. Otázkou zůstává, zdali nasazení nové technologie bude rentabilní a dovede navýšit celkovou efektivitu procesu. V následujícím odstavci budou popsány kritéria, která se podílejí na výsledné produktivitě.

VBD	řezná rychlost	počet řezných hran	cena za VBD	čas v řezu
slinutý karbid	60	6	4,00 €	62,20
PKD	200	3	50,00 €	18,65

ESH na operaci	6,6
původní P-timer	4,10
nový P- timer	3,35
úspora času [min]	43,55
úspora času [%]	70,16


produktivita	
původní	160,98%
nová	197,01%
rozdíl	36,03%

Tab. 5-2 – ukazatele produktivity

- ESH (earn standard hours) - představuje vymezený čas pro operaci, který bude zaplacen zákazníkem
- P- timer – reálný čas operace včetně vedlejších činností
- původní produktivita je výsledkem podílu ESH a původního P-timeru (v procentech)
- po nasazení nové technologie (PKD) se původní hodnota P-timeru stane novou hodnotou ESH
- nový reálný čas pro operaci (pro celou operaci, ne jen testovanou část), tedy P-timer je 3,35
- výsledek podílu původního P-timeru (tedy nové EHS) s novým P-timerem se vynásobí původní produktivitou a výsledkem je produktivita nové technologie
- celá operace tedy použitím VBD z PKD navýší svoji produktivitu o 36,03 % z původních 160,98 % na 197,01 %

Z rozboru je tedy jasné, že stávající technologii využívající VBD ze slinutého karbidu je vhodné nahradit technologií novou, tedy použitím VBD z PKD. Podle výše uvedených čísel tomu tak jednoznačně je, ale uvažíme-li vliv lidského faktoru vstupujícího do celého děje, může být z následujícího důvodu nová technologie nevýhodná. Je třeba si uvědomit již zmíněnou rozdílnost ceny VBD z karbidu oproti PKD. Stane-li se, že obsluha stroje naplno nevyužije všechny řezné hrany destičky ze slinutého karbidu, tak lze považovat skutečnost samozřejmě za neekonomickou, ale dopady jsou minimální. Nastane-li však tento problém u destičky z PKD, dojde k daleko výraznějším negativním vlivům na efektivitu procesu. Navíc je zde problém týkající se rozlišitelnosti řezných hran, které se už zúčastnili řezu. U VBD ze slinutého karbidu to nepředstavuje problém, jelikož jedna celá strana destičky představuje počet hran potřebných pro obrobení všech ploch jednoho kusu v této operaci. Navíc každá hrana jde do řezu pouze jednou. Problém je rozlišit opotřebení řezných hran u VBD z PKD. Po vizuální stránce obsluha stroje nemá šanci poznat, zdali byla hrana v řezu jednou nebo třeba třikrát. Z tohoto důvodu je třeba zajistit opatření eliminující možnost předčasného vyřazení VBD z procesu nebo naopak nedodržení technologického postupu, kdy by obsluha použila řeznou hranu na více než dva kusy, čímž by hrozilo nebezpečí nedodržení předepsané jakosti povrchu.

Jako možné řešení problému je označit sériové číslo VBD a řezné hrany například symboly I, II, III. Aktuálně používanou VBD z PKD by pak obsluha stroje z tohoto hlediska evidovala do speciálního listu pro odečítání řezných hran, který by mohl například vypadat jako na obr. 5-9. Tento způsob by nepřinesl prakticky žádnou zátěž pro obsluhu stroje, jen by udělala křížek k pořadí kusu po obrobení označenou hranou. Při výměně směny by pak nedocházelo k subjektivnímu posuzování stavu životnosti VBD a bylo by zajištěno objektivní předání informace.

Evidenční list pro VBD z PKD typu:		WNMG	
Označení hrany	1. kus	2. kus	Sériové číslo VBD:
I	 	 	000 1
II	 		
III			
Zaškrtnuté pole u patřičné hrany značí počet její použití.			
Dodržujte technologický postup - nepoužívejte řeznou hranu vícekrát ani méněkrát než na dva kusy.			
V případě pochybnosti o možnosti použití dejte vědět parťákovi.			

Obr. 5-9 evidenční list pro VBD z PKD

Po vyřazení VBD z PKD z oběhu této operace její životní cyklus nemusí nutně končit. Důvodem vyřazení z této operace je, jak již bylo zmíněno riziko nedodržení předepsané drsnosti povrchu. Jiné operace však mohou mít mírnější požadavky na kvalitu povrchu a je možné, že by zde destička našla svoje uplatnění, čímž by rentabilita opět stoupla. Předpokladem pro tuto variantu kromě technologické možnosti je však relevantní informovanost o použití jednotlivých řezných hranách a časech v řezu. Možnost dalšího použití by tak byla zřejmě předmětem dalšího testování.

Závěr

Předmětem této práce bylo analyzovat situaci o aktuálních technologiích využívajících se při obrábění titanových slitin. Lze dojít k závěru, že jednotlivé nástrojářské společnosti doporučují velmi podobná opatření. Kromě řezného materiálu, který je standardně využíván ve formě slinutého karbidu, je kladen vysoký důraz na správné technologie chladících procesů. Přesto, že zde bylo z hlediska výrobců doporučováno v některých případech využívat povlakované vyměnitelné břitové destičky, tak se dle rozhovoru s odborným konzultantem této práce nejedná o zásadní kritérium. V praxi nebyla upozorována z hlediska efektivity (trvanlivost, kvalita povrchu atd.) žádná zásadní výhoda. Standardně jsou tedy využívány nepovlakované slinuté karbidy. V práci jsou popsány jednotlivé geometrie vyměnitelných břitových destiček a optimální řezné podmínky vztahující se k nim. Řada destiček má širší oblast použití, ale charakterizuje je vhodnost využití pro těžko obrobitelné materiály ISO skupin S a M. U materiálů této skupiny bývají vzhledem k tvarům součástí často zařazeny zapichovací operace, které jsou z hlediska odvodu třísky a chlazení nejproblematictější oblastí. Často je třeba podstupovat kompromisům, které umožňují požadované tvary vůbec obrobit při zachování požadované jakosti. Mezi nekonvenční řezné materiály vhodné k dokončovacím soustružením titanových slitin patří i polykrystalický diamant, který se ukázal v experimentální části této práce jako prostředek, který značně dovedl zefektivnit danou operaci, a to zejména možností obrábět několika násobnou rychlostí oproti slinutému karbidu. Testování proběhlo na karuselovém číslicově řízeném soustruhu, kde byl dokončován povrch dílu leteckého motoru. Zároveň byla zmíněna i možná úskalí spojená s neekonomickým zacházením s takto nákladným řezným materiálem.

I přes stávající technologie dosahující v této oblasti již špičkových výkonů, představuje oblast obrábění titanových slitin prostor pro neustálý posun, proto je třeba bádát po nových technologiích, které ho pomohou realizovat.

Použité zdroje

- [1] LEYENS, C. a M. PETERS. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. [Chichester: John Wiley] (distributor), c2003. ISBN isbn3-527-30534-3.
- [2] VNOUČEK. Strojírenské materiály: Titan a jeho slitiny [přednáška] [7. 10. 2015.]
Také dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Nikl_titan.pdf
- [3] DOWLING, Norman E. Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. New Jersey: Prentice Hall, 1993. ISBN isbn0-13-026956-5.
- [4] Titanium metal corporation [online]. c2000 Praha: Rada pro výzkum, vývoj a inovace, ©2000. Poslední změna 27.07.2011 13:27 [cit. 27. 2. 2018]. Dostupné z: <http://www.timet.com/literature/datasheets.html>
- [5] Acram AB: Ti 6Al4V Titanium Alloy [online], [cit. 26. 1. 2018]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>
- [6] Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN isbn91-972299-4-
- [7] Sandvik Coromat: ISO S HRSA a titan [online] [cit. 25. 12. 2017]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_s_hrsa_titanium/pages/default.aspx
- [8] Sandvik Coromat: Průmyslová řešení – letecký průmysl [online] [cit. 25. 12. 2017]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industriesolutions/aerospace/titanium/Pages/Fan-casing.aspx>
- [9] Sandvik Coromat: Coro Turn HP [online] [cit. 25. 12. 2017]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-CZ/products/CoroTurn_HP/Pages/default.aspx

- [10] Sandvik Coromat: RCMT 12 04 M0-SM H13A [online] [cit. 25. 12. 2017]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=RCMT%2012%2004%20M0-SM%20%20%20%20H13A>
- [11] Sandvik Coromat: Parting and grooving – How to apply [online] [cit. 2. 1.2018]. Dostupné z:
https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/parting_grooving/choice-of-application/profiling/how-to-apply/Pages/default.aspx
- [12] DIVIŠ, Jakub. Obrábění titanu a těžkoobrobitelných slitin soustružením. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012, 94 s. (77 659 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/21743>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Šálek, Jiří.
- [13] Sandvik Coromat: Application Guide – Titanium [online] [cit. 15. 2. 2018]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/c-2920-35.pdf>
- [14] Sandvik Coromat: Products - CNMG 12 04 04-SF 1105 [online] [cit. 4. 3. 2018]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=CNMG%2012%2004%2004-SF%201105>
- [15] Sandvik Coromat: Products - CNMG 12 04 04-SGF 1105 [online] [cit. 4. 3. 2018]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=CNGG%2012%2004%2004-SGF%201105>
- [16] Sandvik Coromat: Knowledge – PCD [online] [cit. 4. 3. 2018] Dostupné z:
https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_diamond/pages/default.aspx
- [17] Sandvik Coromat: Products – CoroTurn Prime [online] [cit. 20. 2. 2018] Dostupné z:
https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/coroturn_prime/pages/default.aspx?internal_camplink=Primeturning&internal_camplink_type=Hyperlink

- [18] Sandvik Coromat: Products – grade H13A [online] [cit. 15. 1. 2017] Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/pages/search15products.aspx?tpcleaf=INSTRNG&q=grade:H13A>
- [19] Sandvik Coromat: ToolGuide [online] [cit. 15. 1. 2017] Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/coroplus-toolguide/Pages/default.aspx>
- [20] Iscar: Jetcut [online] [cit. 23. 2. 2018] Dostupné z:
<http://www.iscar.cz/Products.aspx/CountryId/6/ProductId/10165>
- [21] Iscar: Non-Rotating Tool Lines [online] [cit. 8. 3. 2018] dostupné z:
http://www.iscar.cz/Catalogs/publication-2017/Non_Rotating_catalog_06_2017.pdf
- [22] Iscar: Obrábění titanu pro lékařský průmysl [online] [cit. 8. 3. 2018] Dostupné z:
<http://www.iscar.cz/Media/pdf/ObrabenTitanuProLekarskyPrumysl.pdf>
- [23] Walter: Inovace výrobků 2011 [online] [cit. 20. 2. 2018] Dostupné z:
<http://www.nastroje-svada.cz/katalog/katalog2012.pdf>
- [24] Walter: Kompletní katalog 2017 [online] [cit. 20. 2. 2018] Dostupné z:
<https://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/general-catalogue-2016-cz.pdf>
- [25] Walter: GPS [online] [cit. 20. 2. 2018] Dostupné z:
https://www.walter-tools.com/en-gb/tools/search_and_shop/Pages/default.aspx
- [26] Walter: Tiger-tec ® [online] [cit. 20. 2. 2018] Dostupné z:
https://www.walter-tools.com/en-gb/tools/standard_products/turning/overview/iso_turning/tiger_tec_iso_s/pages/default.aspx

- [27] Walter: online katalog [online] [cit. 20. 2. 2018] Dostupné z:
<https://www.walter-tools.com/cs-cz/search/pages/default.aspx#/turning/iso-turning/indexable-inserts/iso-indexable-inserts-negative-basic-shape/000508/SNMG120408-FM5%20WSM20S?query=%257B%2522t%2522%253A%2522productdetails%2522%257D>
- [28] STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. Metal cutting theory and practice. Third edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 1466587539.
- [29] Seco: katalog a technická příručka 2018 – soustružení [online] [cit. 12. 3. 2018] Dostupné z:
<https://usercontent.azureedge.net/Content/UserContent/Documents/021369.pdf>
- [30] Iscar: Iscar tool advisor [online] [cit. 10. 2. 2018] Dostupné z:
<http://www.iscar.com/ita/MainPage.aspx>
- [31] Ilmenit a Rutil: obrázky [online] [cit. 29. 4. 2018] Dostupné z:
<http://www.sberatelmineralu.cz/ilmenit-11128.html>
- [32] Trochoidální soustružení: obrázky [online] [cit. 29. 4. 2018] Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/parting-grooving/pages/profiling.aspx>
- [33] PCD: obrázky [online] [cit. 24. 3. 2018] Dostupné z:
<http://www.directindustry.com/prod/beijing-worldia-diamond-tools-co-ltd/product-121413-1631591.html>
- [34] CNGG 12 04 04-SGF 1105: obrázky [online] [cit. 15. 2. 2018] Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=CNGG%2012%2004%2004-SGF%20%20%201105>
- [35] CNMG 12 04 04-SF 1105: obrázky [online] [cit. 15. 5. 2018] Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=CNMG%2012%2004%2004-SF%20%20%201105>

- [36] Seco: Suggest – technologie a použití nástr. [online] [cit 18. 3. 2018] Dostupné z:
<https://www.secotools.com/#dashboard/Suggest/Suggest>
- [37] Walter: C6-DWLNL-45065-08-P [online] [cit 20. 4. 2018] Dostupné z:
<https://www.walter-tools.com/cs-cz/search/pages/default.aspx#/turning/iso-turning/walter-turn-turning-tools-external-machining/walter-capto-turning-toolholders-negative-basic-shape/000152/C6-DWLNL-45065-08-P>
- [38] Korloy: Cutting tools – katalog 2007 [online] [cit 5. 4. 2018] Dostupné z:
<http://www.korloy.com/eng/catalog/catalog2007/Korloy%20E-2.pdf>
- [39] Strojimport: TOSHULIN - Basicturn 2000 [online] [cit 3. 5. 2018] Dostupné z:
<http://www.strojimport.cz/soustruhy/karusely/>