

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Bakalářská práce

Suché obrábění titanových slitin

Dry machining of titanium

Autor: Petr Brodský
Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Brodský** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **457575**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Suché obrábění titanových slitin

Název bakalářské práce anglicky:

Dry machining of titanium

Pokyny pro vypracování:

1. Titan a jeho slitiny
2. Technologické vlastnosti titanu
3. Výběr nástrojů pro frézování
4. Technologická zkouška

Seznam doporučené literatury:

DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004, vii, 381 s. ISBN 08-717-0686-5.
SANDVIK, Application notes, Titanium machining

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

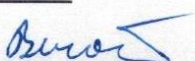
Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

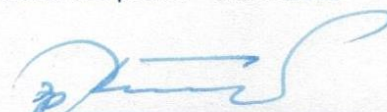
Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

24. 4. 18

Datum převzetí zadání

Brodský

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Suché obrábění titanových slitin vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady, které jsou uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne 27.7.2018

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi za čas, cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych rád vyjádřil poděkování i své rodině, která mi při studiu a tvorbě bakalářské práce byla velkou oporou.

Anotace

Tato bakalářská práce shrnuje základní informace o titanu, jeho slitinách a specifika obrábění těchto slitin. Důraz je kladen především na frézování. Rešeršní část práce se zaměřuje na výrobu titanu a rozdělení titanových slitin. Následující část je věnována především technologickým vlastnostem titanu a jeho slitinách. V další části práce jsou uvedeny obecné zásady frézování těchto slitin, nejnovější trendy a rozbor současné nabídky obráběcích nástrojů. Praktická část popisuje návrh a přípravu experimentu technologické zkoušky, jehož cílem bude zkoumání řezných sil v závislosti na úhlu čela vyměnitelné břitové destičky a jejího opotřebení.

Klíčová slova

Titan, slitiny titanu, vlastnosti titanu, frézování, frézovací nástroje, úhel čela

Annotation

This bachelor thesis summarizes basic information about titanium, its alloys and the specifics of machining of these alloys. Emphasis is put primarily on milling. The research part of this thesis focuses on the production of titanium and distribution of titanium alloys. The following part is devoted mainly to technological properties of titanium and alloys. The next part presents general principles of milling previously described alloys, the latest trends and analysis of the current offer of machining tools. The practical part describes proposal and preparation of an experiment technological test, which aims to examine the cutting forces depending on the rake angle of the indexable insert and its wear.

Key words

Titanium, titanium alloys, properties of titanium, milling, milling tools, rake angle

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	- 10 -
Úvod.....	- 11 -
1 Titan.....	- 12 -
2 Historie	- 12 -
3 Výroba titanu	- 12 -
3.1 Příprava materiálu pro chloridaci a výroba chloridu titaničitého.....	- 13 -
3.2 Redukce titanové houby	- 13 -
3.3 Výroba titanu elektrolýzou.....	- 15 -
3.4 Ostatní způsoby výroby titanu	- 15 -
3.4.1 Redukce chloridu titaničitého vodíkem	- 15 -
3.4.2 Termický rozklad chloridu titanatého.....	- 15 -
3.5 Přetavování titanové houby na kujný titan.....	- 16 -
3.5.1 Elektronová pec	- 16 -
3.5.2 Plasmová pec	- 17 -
4 Titan a jeho slitiny	- 18 -
4.1 Technicky čistý titan	- 18 -
4.2 Slitiny titanu	- 19 -
4.2.1 Metalurgická podstata vlastností titanových slitin.....	- 20 -
4.2.2 Základní rozdělení titanových slitin	- 20 -
4.2.2.1 Slitiny α	- 22 -
4.2.2.2 Slitiny pseudo α ($p\alpha$).....	- 22 -
4.2.2.3 Slitiny $\alpha + \beta$	- 22 -
4.2.2.4 Slitiny β a pseudo β ($p\beta$)	- 23 -
4.2.3 Tepelné zpracování titanových slitin	- 24 -

5	Technologické vlastnosti titanu.....	- 25 -
5.1	Obrobitelnost.....	- 25 -
5.2	Obecné zásady při obrábění	- 26 -
5.3	Mechanismus tvorby třísky	- 27 -
5.4	Teplota v místě řezu	- 28 -
5.5	Opotřebení rezných nástrojů při obrábění	- 29 -
6	Frézovací nástroje a jejich technologie	- 30 -
6.1	Nejpoužívanější povlaky	- 31 -
6.2	Výroba vyměnitelných břitových destiček.....	- 32 -
6.3	Trochoidní frézování	- 33 -
6.3.1	Nástroje pro trochoidní frézování	- 34 -
6.4	Vysokorychlostní frézování Ti6Al4V za sucha	- 35 -
6.5	Výběr nástrojů pro rovinné frézování slitin titanu	- 37 -
6.5.1	Nástroje firmy Sandvik Coromant	- 37 -
6.5.1.1	VBD Sandvik Coromant	- 37 -
6.5.2	Nástroje firmy WNT	- 38 -
6.5.2.1	VBD WNT	- 39 -
6.5.3	Nástroje firmy Seco tools	- 40 -
6.5.3.1	VBD Seco tools	- 41 -
7	Technologická zkouška	- 42 -
7.1	Materiál obrobku a obráběcí stroj	- 42 -
7.2	Kruhová vyměnitelná břitová destička.....	- 43 -
7.3	Obráběcí nástroj	- 44 -
7.4	Měření silových účinků.....	- 45 -
7.5	Řezné podmínky.....	- 45 -
8	Závěr.....	- 46 -

Seznam použité literatury	- 47 -
Seznam obrázků.....	- 50 -
Seznam tabulek	- 52 -

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
BCC	Kubická prostorově středěná mřížka	[-]
CAM	Computer aided manufacturing	[-]
CCR	Stopkové frézy pro trochoidní frézování (CircularLine)	[-]
CNC	Computer numerical control	[-]
CVD	Chemical Vapour Deposition – chemická metoda nanášení povlaku na nástroj	[-]
D	Průměr nástroje	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[GPa]
F_f	Posuvová síla	[N]
F_{fN}	Normálová síla	[N]
F_p	Pasivní síla	[N]
HB	Tvrдость podle Brinella	[-]
HCP	Hexagonální (šesterečná) mřížka	[-]
HPM	Vysoce výkonné frézování	
HSC	Vysokorychlostní frézování	[-]
HV	Tvrдость podle Vickerse	[-]
KT	Čelní opotřebení	[mm]
MRT	Úběr materiálu	[cm ³]
M_z	Moment vřetena	[N.m]
P	Výkon	[W]
PVD	Physical Vapour Deposition – fyzikální metoda nanášení povlaku na nástroj	[-]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu v tahu	[MPa]
VB	Velikost opotřebení břitu	[mm]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]

Označení	Legenda	Jednotka
a_e	Šířka řezu	[mm]
a_p	Hloubka řezu	[mm]
c	Měrná tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
f_z	Posuv na zub	[mm]
t	Doba obrábění	[min]
v_c	Řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
α_0	Ortogonální úhel hřbetu	[°]
γ	Úhel čela nástroje	[°]
γ_0	Ortogonální úhel čela	[°]
κ_r	Úhel nastavení hlavního ostří	[°]
λ	Tepelná vodivost	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
μ	Koeficient tření	[-]
ρ	Hustota	[kg.m ⁻³]
Φ	Úhel střižné roviny	[°]

Úvod

Bakalářská práce se zaměřuje na problematiku suchého obrábění titanových slitin, používaného v odvětví kosmického, vojenského i civilního letectví a také v oblasti medicínského průmyslu. Cílem práce je zjistit vlastnosti titanu a jeho slitin, které mají výrazný vliv na obrábění, zejména frézování. Dalším cílem práce je najít nejnovější trendy frézování a současné nástroje pro rovinné frézování za sucha.

Titan a jeho slitiny se řadí mezi těžkoobrobitelné slitiny. Při obrábění se obvykle intenzivně chladí, ale existují aplikace, kde je jakékoliv znečištění nepřijatelné jako například zbrojní optika. Suchým obráběním lze značně ovlivnit ekologičnost obrábění. Jedná se o obrábění bez použití jakékoliv řezné kapaliny a umožňuje tak dosáhnout velkých úspor ve výrobních nákladech. Titan je všeobecně známý, ale technologie suchého obrábění titanových slitin již tak známá není. Firmy ji považují za své know-how, které drží v tajnosti.

Titanové slitiny vynikají především díky svým kladným vlastnostem, a to nízkou hmotností, vysokou pevností a schopností odolávat koroznímu prostředí, proto je jejich možnost použití v oborech velká. Problematika obrábění titanových slitin spočívá v nízké tepelné vodivosti, která se v tomto ohledu bere jako negativní, jelikož způsobuje špatný odvod tepla při obrábění.

V teoretické části práce je nastíněna historie titanu. Další část je věnována výrobě titanu, rozdělení titanových slitin, technologickým vlastnostem a obrobitelnosti, kde se zaměřuji na obecné zásady a nejnovější trendy frézování těchto slitin. V poslední části se zabývám současnou nabídkou obráběcích nástrojů a doporučenými řeznými podmínkami pro rovinné frézování Ti6Al4V za sucha.

Předmětem praktické části je návrh a příprava experimentu na technologickou zkoušku, který bude následně dokončen v navazujícím studiu. Cílem experimentu bude porovnání závislosti řezných sil na úhlu čela vyměnitelné břitové destičky a jejího opotřebení při suchém frézování titanové slitiny Ti6Al4V. Pro porovnání bude potřeba získat od výrobce břitové destičky stejného typu s rozdílným úhlem čela a naplánovat rozsah řezných podmínek technologické zkoušky.

1 Titan

Titan je šedý až stříbřitě bílý, lehký a tvrdý kov hojně zastoupený v zemské kůře. Nejčastěji se uvádí na čtvrtém místě po hliníku, železu a hořčíku. Považuje se za jeden z moderních kovů naší doby. Vyznačuje se především vysokou pevností a vynikající odolností proti korozi. Používá se ve všech možných odvětvích například v leteckém a raketovém průmyslu [1, 2].

2 Historie

Titan byl objeven roku 1791, anglickým mineralogem a (amatérským) chemikem Williamem Gregorem, když zkoumal magnetický písek. Podařilo se mu pomocí magnetu oddělit tzv. černý písek, který je známý jako ilmenit (FeTiO_3). O čtyři roky později objevil německý chemik Martin Heinrich Klaproth nezávisle na Gregorovi minerál nazvaný jako rutil (TiO_2). Oba dva z těchto dvou prvků izolovali oxid neznámého prvku, jenž Klaproth nazval titanem [1].

3 Výroba titanu

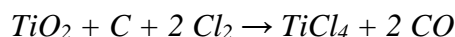
V praxi ke získání titanu nelze použít běžné hutní metody. Je to způsobeno jeho vlastností, že za vyšších teplot lehce reaguje s kyslíkem, vodíkem, uhlíkem a dusíkem. Nejrozšířenější metodou pro výrobu kovového titanu je tzv. Krollova metoda, jehož nejdůležitější částí je redukce chloridu titaničitého hořčíkem [2].

Průmyslová výroba titanu se skládá ze čtyř základních operací [2]:

- příprava materiálu pro chloridaci
- výroba chloridu titaničitého
- redukce titanové houby
- přetavování titanové houby na kujný titan

3.1 Příprava materiálu pro chloridaci a výroba chloridu titaničitého

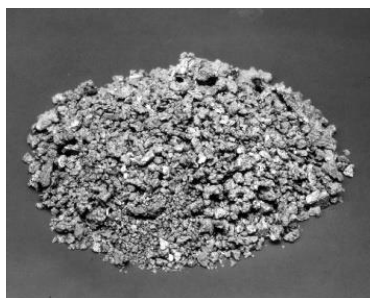
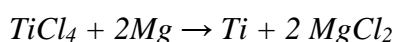
Chlorid titaničitý se volně v přírodě nevyskytuje, a proto, chceme-li z něj při výrobě titanu vyjít, je nutno ho předem vyrobit. Podstatou chloridu titaničitého je oxid titaničitý, který se nachází v ilmenitové strusce a rutilu. Reakční schéma lze znázornit následující rovnicí [2, 3]:



Oxid titaničitý reaguje dle schéma s chlorem a uhlíkem, poté vzniká chlorid titaničitý a oxid uhličitý. Chloridace probíhá v šachtové elektrické peci. V parách uniká chlorid titaničitý a se nachází v kondenzátorech jako nažloutlá kapalina. Před vlastní redukcí se chemicky čistí od průvodních kovů (Fe, V, Si) a znovu se destiluje [2, 3].

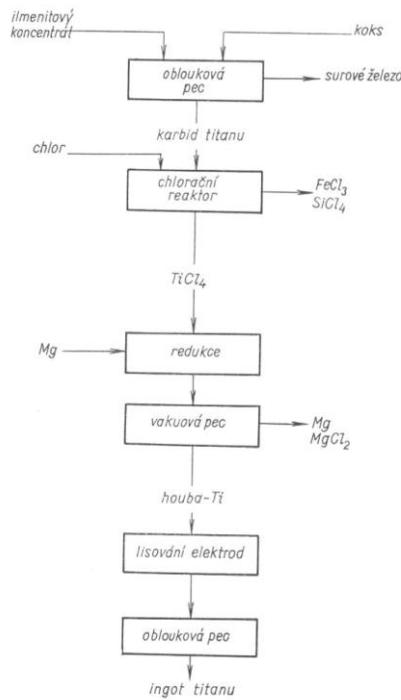
3.2 Redukce titanové houby

Získaný chlorid titaničitý se redukuje roztaveným hořčíkem nebo sodíkem. Nejrozšířenějším způsobem redukce je hořčíkem, který probíhá v kelímcích pod ochrannou atmosférou argonu nebo hélia a vytváří tzv. titanovou houbu a chlorid hořečnatý. Redukce je založena na pozvolném připouštění chloridu titaničitého do roztaveného hořčíku při teplotě 850 až 920 °C. Reakce probíhá podle následující rovnice [2, 3]:



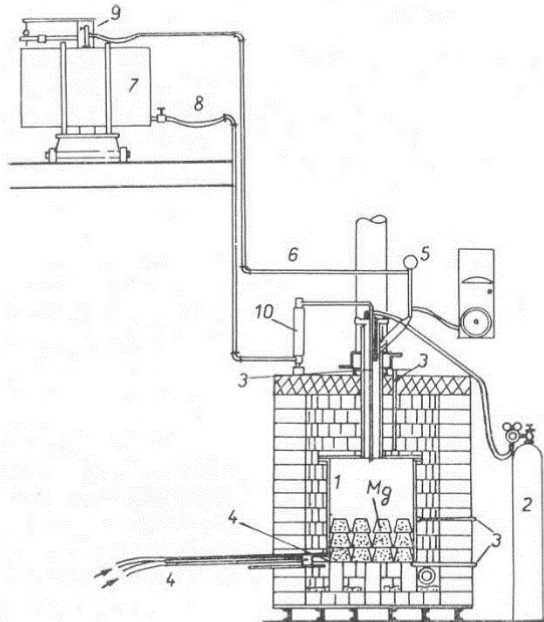
Obr. 1: Titanová houba [4]

Po skončení reakce musí titanová houba vychladnout v atmosféře inertního plynu. Vzniklý chlorid hořečnatý a zbytky hořčíku se odstraňují, buď chemicky – loužením zředěnou kyselinou solnou nebo vakuovou destilací. Vakuová destilace je dražší než loužení zředěnou kyselinou, při ní se dosahuje nižších hodnot znečištění nežádoucími prvky jako jsou hořčík, vodík a chlor. Vyredukovaný kov vytváří vrstvu titanové houby na stěnách kelímků [2, 3].



Obr. 2: Schéma výroby titanu Krollovou metodou [3]

Druhou možností je redukce chloridu titaničitého sodíkem tzv. Hunterův proces, který se podobá Krollovu pochodu. Nevýhoda spočívá v tom, že je zapotřebí těsně před redukcí sodík vakuově destilovat. Výhodou redukce je, že probíhá za nižší teploty a vznikající titan se nepřivaňuje na stěny reakční nádoby a tím je usnadněno vyjímání [2, 3, 5].



1 – kelímek s víkem; 2 – bomba s argonem; 3 – termoelektrické články; 4 – otvor na odpouštění $MgCl_2$ s chladičím zařízením; 5 – manometr; 6 – trubka na vyrovnávání tlaku; 7 – nádrž na $TiCl_4$; 8 – trubka na dávkování $TiCl_4$; 9 – ochranný uzávěr; 10 – měřidlo množství $TiCl_4$

Obr. 3: Zařízení pro výrobu titanu podle Krolla [3]

3.3 Výroba titanu elektrolýzou

Chemické vlastnosti titanu předem vylučují možnost elektrolýzy z vodných roztoků. Jedna z metod je elektrolýza chloridu titaničitého ve dvoustupňovém elektrolýzátoru. Elektrolytem je roztavená lázeň chloridu strontnatého a sodného nebo jen chloridu sodného, do níž se přivádí chlorid titaničitý [2].

Výhodou elektrolýzy je dosažení velmi dobré jakosti titanu. Dosud však nebyl propracován žádný elektrolytický postup, který by se mohl vyrovnat redukční cestě. V poloprovodním měřítku se uplatňuje elektrolýza ke zpracování odpadů polotovarů z titanu a zejména jeho slitin [2].

3.4 Ostatní způsoby výroby titanu

Z důvodu zlevnění a zjednodušení výroby titanu bylo vypracováno mnoho dalších způsobů výroby. Příkladem je rafinace titanu jodidovým způsobem a používá se k výrobě velmi čistého titanu, zejména pro laboratorní účely. Žádný z nich však zatím nebyl vyvinut do fáze použitelné v průmyslové výrobě a nemůže konkurovat redukcí hořčíkem nebo sodíkem. Zatím pouze elektrolýza měla šanci uspět, ale až po zdokonalení výrobních metod [2].

3.4.1 Redukce chloridu titaničitého vodíkem

Jedná se o redukci v elektrickém oblouku, která umožňuje získávat přímo kovové ingoty. Největším problémem je regenerace nadbytečného i vázaného vodíku, protože jinak je pochod nevhodný [2].

3.4.2 Termický rozklad chloridu titanatého

Termický rozklad chloridu titanatého probíhá ve vakuu při teplotách nad 800 °C za vzniku kovového titanu a chloridu titaničitého. Problémem této reakce je nutné dodržení přesných podmínek [2].

3.5 Přetavování titanové houby na kujný titan

Redukcí vyrobená titanová houba i kovový titan získaný elektrolýzou není vhodný přímo k dalšímu zpracování, je potřeba jej převést tavením na hotové odlitky nebo ingoty. Při tavení titanu působí velké potíže jak reakce s obecnými plyny, tak vysoká teplota tání a silná reakce se všemi běžnými materiály vyzdívek [2, 3].

Nejvhodnějším materiálem vyzdívky je grafit z důvodu jeho nízké ceny a možnosti obrábění do požadovaných tvarů. Nevýhodou grafitu je, že se rozpouští v titanu, čímž dochází ke snížení tažnosti a zvýšení jeho tvrdosti. Při vyšším obsahu uhlíku nelze dále titan zpracovat tvářením [2, 3].

Kujný titan se získává přetavením z titanové houby. Kroll volil k tavení elektrickou obloukovou pec s měděným, vodou chlazeným krystalizátorem. Při tavení titanu se obvykle pracuje ve vakuu nebo v atmosféře argonu, aby nedocházelo k reakcím se vzdušnými plyny. Teplo je generováno stejnosměrným proudem v elektrické obloukové peci. Tento proud vzniká mezi elektrodami titanu, který se teplem roztaví a v kelímku vzniká polotovar neboli ingot titanu [2, 3].

V současnosti se slitiny titanu přetavují v těchto typech pecí [6]:

- elektronová pec,
- plasmová pec,
- oblouková pec,
- indukční pec.

Tavení titanových slitin pomocí plasmy a elektronového paprsku řadíme mezi moderní způsoby tavení s přeléváním taveniny do krystalizátoru přes příhradový žlab, ze kterého vytéká klidný proud taveniny malého průřezu zabezpečující zlepšení metalurgické čistoty [6].

3.5.1 Elektronová pec

Tavení probíhá pomocí svazku elektronových paprsků, které dopadají na materiál a ten se díky vysoké kinetické energii elektronů se zahřívá. Pohyb svazků probíhá pouze ve vysokém vakuu, proto jde vždy o pece vakuové. Elektronové tavení je stále více používané, důvodem je získání kovu nejvyšší kvality [6].

3.5.2 Plasmová pec

Plasmová pec pracuje na principu ionizace plynu. V plazmovém hořáku se molekuly přiváděného inertního plynu (Ar) ionizují, které se při styku s kovem opět slučují. Proces slučování je doprovázen značným vývinem tepla, které je předáváno tavenému kovu. Zdrojem tepla v plasmových pecích je nízkoteplotní plasma vygenerována v plazmatronu [6].

Pro konstrukční použití je prvotně vyrobený ingot podruhé vakuově přetaven, tím dochází ke zlepšení jeho kvality a k dosažení chemické homogenity. Pro vysoce namáhané rotační součásti proudových motorů je materiál obvykle přetavován dvakrát. Tímto je zvýšena chemická homogenita a dochází k odstranění, či minimalizaci výskytu vad souvisejících s tavením [5].

V praxi se čistý titan příliš nepoužívá, ale jako slitina s různým množstvím přidávaných legujících prvků, které mají vliv na mechanické a technologické vlastnosti titanové slitiny.

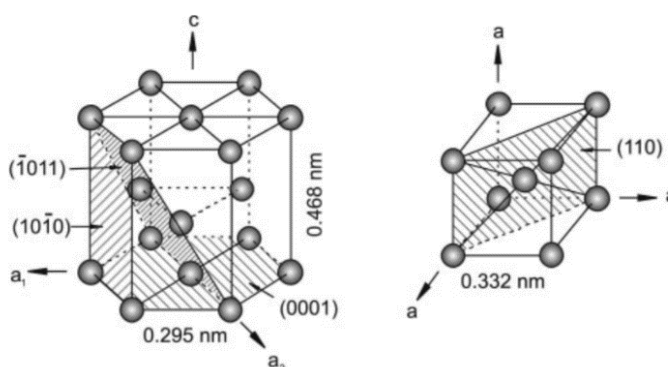


Obr. 4: Titanový ingot s vysokou čistotou [7]

4 Titan a jeho slitiny

4.1 Technicky čistý titan

Titan je polymorfní kov, který má dvě alotropické modifikace. Při teplotě 882 °C se fáze α s hexagonální mřížkou mění na fázi β s mřížkou kubickou, prostorově středěnou a je stabilní až do teploty bodu tání 1668 °C. Následkem těchto změn se mění jeho technologické a některé mechanické vlastnosti. Schématické struktury mřížek HCP α – titanu a BCC β – titanu jsou uvedeny na obr. 5. Vyšrafované roviny znázorňují místa, která jsou nejvíce obsazena atomy [1, 8].



Obr. 5: Krystalické mřížky fází alfa a beta [1]

Čistý titan je charakterizován oproti běžným ocelím nižší hustotou (4500 kg/m³), střední mezí pevnosti v tahu (400 MPa), nízkým součinitelem tepelné vodivosti (21,9 W.m⁻¹.K⁻¹) a vysokou korozní odolností oproti některým prostředím, vůči kterým ostatní kovy a slitiny nemají dostatečnou odolnost. Díky rychlé oxidaci povrchové vrstvy titanu se vytváří pasivační vrstva, která zabraňuje korozi vůči oxidačním kyselinám jako např. kyselina dusičná nebo chromová. Organickým kyselinám, alkalickým roztokům chloru a chlorovým sloučeninám odolává i za zvýšených teplot [8, 9].

V porovnání s většinou ostatních kovů má titan malou odolnost proti otěru a vysoký koeficient tření (0,65-0,68). Další nepříznivou vlastností titanu je sklon k místnímu svařování titanu s titanem nebo jinými kovy. Tvářením za studena se titan intenzivně zpevňuje tak, že tvrdého stavu ($R_m \approx 800$ MPa, $A \approx 7\%$) se dosáhne v závislosti na obsahu příměsí již asi při stupni deformace 50 %. Dobré tvárnosti za tepla dosahuje při teplotách okolo 900 °C, kdy se nachází v β – fázi. Výhodou je aplikace titanu za teplot pod bodem mrazu [8, 9].

Nedostatkem titanu jsou vysoké náklady na výrobu a zpracování, teploty nad 700 °C vedou k intenzivní reakci s kyslíkem a dusíkem, to vyjadřuje nutnost tavby a odlévání ve vakuu nebo ochranné atmosféře argonu. Dále i relativně nízký modul pružnosti v tahu 115 GPa a nemožnost opětovného zpracování odpadu ve větším množství. Z titanové houby se vyrábí více druhů titanu čistoty 99,5-99,0 %, které díky svým vlastnostem mají různá uplatnění v mnoha odvětvích, jak je uvedeno v tab. 1 [8, 9].

Tab. 1. Druhy, vlastnosti a použití chemicky čistého titanu [8]

Druh titanu	R _m [MPa]	A [%]	HB [-]	Vlastnost a použití
Ti 99,5	290	30	120	vysoká tvářitelnost a odolnost proti korozi; draky letadel, součásti námořních plavidel a chemických zařízení; výměníky tepla a kondenzátorové trubky, výlisky
Ti 99,2	390	28	200	
Ti 99,1	490	25	225	součástí draků a motorů letadel, plavidel a chemických zařízení vyžadující tvářitelnost, pevnost a odolnost proti korozi
Ti 99,0	610	20	265	

Pozn.: Uvedené hodnoty mechanických vlastností žíhaného titanu jsou střední hodnoty při 20 °C.

4.2 Slitiny titanu

Jakmile byly zjištěny vlastnosti čistého titanu, začalo se zkoumat, jakými způsoby by bylo možné zlepšit jeho mechanické vlastnosti, a to přidáním dalších kovů a vytvoření slitiny na bázi titanu. Avšak vývoj nových slitin titanu stále probíhá, jedná se především o slitiny pro zvláštní aplikace [2]. Příkladem aplikace je turbodmychadlové kolo pro velké obvodové rychlosti nebo letoun Lockheed SR-71 „Blackbird“.



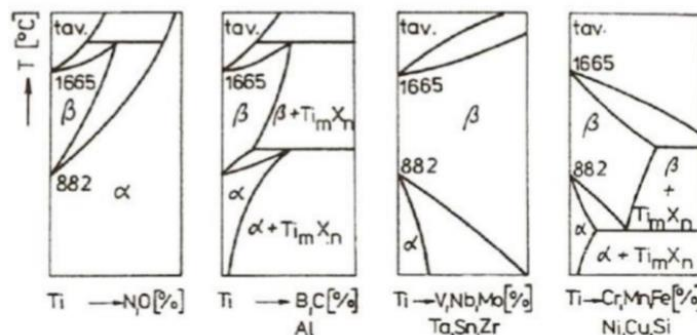
Obr. 6: Turbodmychadlové kolo [11] a letoun „Blackbird“ [12]

4.2.1 Metalurgická podstata vlastností titanových slitin

Vzhledem k polymorfii titanových slitin existují dvě základní rovnovážné fáze α (HCP) a β (BCC), které se na rozdíl od čistého titanu mohou vyskytovat v širokém teplotním rozmezí. Podle vlivu legujících prvků na termodynamickou stabilitu obou základních fází lze prvky rozdělit na α – stabilizátory, které zvyšují teplotu polymorfni přeměny, a tím v příslušném rovnovážném diagramu rozšiřují oblast fáze α a na β – stabilizátory, které teplotu polymorfni přeměny snižují a rozšiřují oblast fáze β (obr. 7) [13].

Legující prvky v titanových slitinách lze rozdělit podle rozpustnosti v jednotlivých modifikacích a vlivu na jejich stabilitu [13]:

- prvky rozšiřující oblast α (Al, N, O, C), významný je pouze hliník ostatní prvky jsou nečistoty zhoršující mechanické vlastnosti,
- prvky částečně rozšiřující oblast β (Mn, Fe, Cr, Si, Cu, Ag, N),
- prvky úplně rozšiřující oblast β (Mo, Nb, Ta, V, Zr).



Obr. 7: Základní druhy binárních rovnovážných diagramů [8]

4.2.2 Základní rozdělení titanových slitin

Slitiny titanu se obvykle dělí podle struktur základních fází v rovnovážném stavu, vytvořené při pomalém ochlazování z teploty žhání, a to do pěti skupin [8, 9]:

- slitiny α ,
- slitiny pseudo α ($p\alpha$),
- slitiny $\alpha + \beta$,
- slitiny pseudo β ($p\beta$),
- slitiny β .

Tab. 2. Vybrané tvářené slitiny titanu [8]

Druhy slitin	Stav	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Vlastnosti a použití
Slitiny α					svařitelné výkovky a plechy; lopatky leteckých motorů a parních turbín
Ti-Al5-Sn2,5	ž	860	800	16	
Ti-Al2-Mo4-Sn11	dž	1000	895	10	
Slitiny pseudo α ($p\alpha$)					dobrá svařitelnost, houževnatost, žárupevnost do 450 °C; součásti draků a turbokompresorů letadel do 550 °C
Ti-Al8-Mo1-V1	dž	950	890	15	
Ti-Al8-Zr11-Nb1-Mo-Si	kp	1100	1050	10	
Ti-Al6-Mo2-Zr4-Sn2-Si	dž	940	860	15	
Slitiny $\alpha + \beta$					součásti leteckých motorů do 400 °C; tlakové nádoby, čerpadla na plyny a chemikálie, kryogenní součásti; zbraně, plavidla, skříně raketových motorů, děla; podvozky letadel, součástí leteckých turbín do 450 °C; součásti turbokompresorů až do 500 °C
Ti-Al6-V4	ž	950	880	14	
	kp	1170	1100	10	
Ti-Al6-V6-Sn2	ž	1050	990	14	
	kp	1170	1100	10	
Ti-Al6-Mo2-Cr2-Fe-Si	kp	1450	1150	7	
Ti-Al6-Mo4-Zr2-Si	ž	1150	1050	12	
Slitiny pseudo β ($p\beta$)					výkovky pro součásti letadel a raket; větší houževnatost
Ti-V8-Mo8-Fe2-Al3	kp	1240	1170	8	
Ti-V5-Mo5-Al3-Cr-Fe	ž	1150	1100	13	
Slitiny β					dobrá tvářitelnost; svorníky a panely součástí kosmických lodí, vysokopevné svorníky a součásti letadel, jen plechy
Ti-V13-Cr11-Al3	kp	1220	1150	8	
Ti-Mo11-Zr6-Sn5	kp	1390	1320	11	

Pozn.: V tabulce jsou uvedeny střední hodnoty mechanických vlastností při 20 °C,
stav: ž – žhánáno, dž – duplexně žhánáno, kp – kaleno a popuštěno (zušlechtěno)

4.2.2.1 Slitiny α

Vyznačují se dobrou pevností a odolností proti křehkému lomu i za velmi nízkých teplot až do $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při teplotě $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou schopné odolávat vysokoteplotní oxidaci. Slitiny α mají stabilní strukturu a jsou lépe obrobitelné i svařitelné. Jejich nedostatkem je vysoká vodíková křehkost. Hlavní přísadou těchto slitin jsou prvky hliník, zirkon a cín. Žihání se zpravidla používá jako tepelné zpracování zmíněných slitin. [8, 9].

4.2.2.2 Slitiny pseudo α ($\text{p}\alpha$)

Kromě α – fáze slitiny obsahují menší množství β – stabilizátorů 2-8 % β – fáze. Mimo uvedené vlastnosti α – slitin mají kvůli přítomnosti β – fáze menší citlivost k vodíkové křehkosti a lepší plasticitu. Pevnost slitin se mění v závislosti na obsahu hliníku od 500 MPa (1 % Al) až do 1200 MPa (7 % Al). Slitiny α s malým podílem fáze β se staly základem nových typů slitin pro vyšší teploty použití 500-550 $^{\circ}\text{C}$ [8, 9].

4.2.2.3 Slitiny $\alpha + \beta$

Nejpočetnější skupinou jsou dvoufázové slitiny $\alpha + \beta$, jejichž mechanické vlastnosti jsou ovlivněny tepelným zpracováním. Používají se ve stavu vyžíhaném nebo zušlechťeném. Podíl β – fáze se pohybuje v rozmezí 5-50 %. Slitiny do 25 % β – fáze řadíme do skupiny martenzitických slitin, protože při rychlém ochlazení z oblasti β – fáze vzniká martenzitická fáze α' nebo α'' . Mají lepší odolnost vůči únavovému namáhání, obrobitelnost a tvárnost než slitiny α i pseudo α . Nicméně jejich lomová houževnatost a svařitelnost je horší [8, 9].

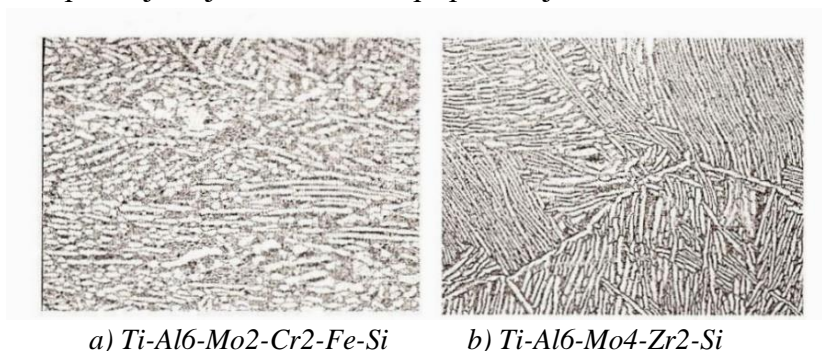
Nejpoužívanější a nejznámější slitinou této skupiny, ale i všech skupin slitin titanu je Ti-Al6-V4, na jejíž výrobu se spotřebuje kolem 50 % celkové produkce titanu. Její mechanické vlastnosti (tab. 2) je možné dále zlepšovat pomocí tepelného zpracování (tab. 3), jako je žihání či zušlechťování, které zvyšují pevnost o 15-25 %. Modul pružnosti v tahu této slitiny je 114 GPa. Překročením teploty 450 $^{\circ}\text{C}$ dochází ke zhoršení mechanických vlastností. Slitina je vytvrditelná až na 1100 MPa do tloušťky 25 mm. Je vhodná především pro tváření za tepla, ale je možné ji také odlévat. Zpracování tvářením za studena se nedoporučuje z důvodu její vysoké pevnosti a nízkému modulu pružnosti [8, 9].

Slitiny $\alpha + \beta$ se vyrábějí v rozdílných variantách s různými legurami a jsou dobře svařitelné, jejich použitelnost se pohybuje v teplotním rozmezí -210 až +400 °C. Vykazují vynikající únavové vlastnosti, odolnost vůči iniciaci trhlin i jejich šíření [8, 9, 10].

Tab. 3. Tepelné zpracování slitiny Ti-Al6-V4 [14]

Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Prostředí
Žihání ke snížení zbytkového napětí	480-650	1 až 4 h. / vzduch či pec
Žihání na měkko	705-790	1 až 4 h. / pec
Kalení	955-970	1 h. / voda
Zpevňující popouštění	480-595	4 až 8 h. / vzduch

Na obr. 8 jsou znázorněny dvě slitiny s podobným složením, u kterých lze vidět, že je možné docílit tepelným zpracováním různých struktur zrn. Vlevo jsou zobrazená rovnoosá zrna a vpravo jsou jehlicovitá zrna připomínající martenzit.



a) Ti-Al6-Mo2-Cr2-Fe-Si

b) Ti-Al6-Mo4-Zr2-Si

Obr. 8: Mikrostruktura titanových slitin [13]

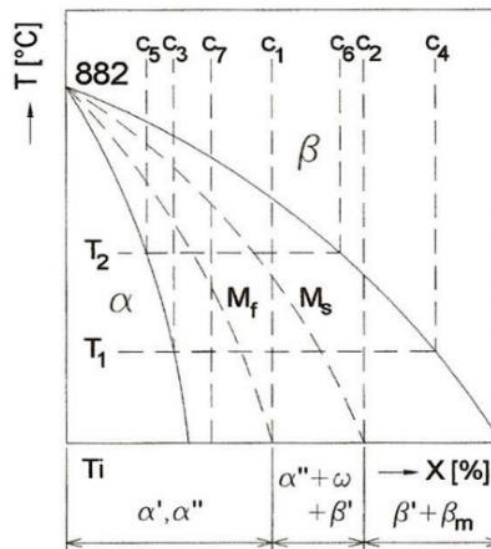
4.2.2.4 Slitiny β a pseudo β ($p\beta$)

Slitiny β disponují vysokou odolností vůči korozi, tvárností, pevností, ale zato nízkým modulem pružnosti. Slitiny mají větší měrnou hmotnost díky legujícím prvkům, jejich výroba je velmi obtížná a nákladná. Navzdory BCC mřížce jsou nejvhodnější ke tváření a oblast využití je však poměrně malá [8, 15].

Pseudo β slitiny obsahují kolem 20 % β – stabilizátorů, především železo a chrom, které tvoří intermetalické fáze. Jsou dobře tvárné, lze je využít pro lisování nebo kování součástí složitějšího tvaru [8, 15].

4.2.3 Tepelné zpracování titanových slitin

Rozhodujícími faktory pro tepelné zpracování jsou teploty a doby ohřevu či rychlosti ochlazování. S teplotou ohřevu dochází ke změně fázového složení, ale i k seskupení fází ve struktuře, čímž se mění i jejich vlastnosti. Rychlost ochlazování rozhoduje o tom, které fázové změny budou probíhat, tím určuje tvar fází a charakter mikrostruktury. Ve slitinách titanu se mohou vyskytovat nerovnovážné fáze: α' , α'' , ω , β' , β_m . Obr. 9 znázorňuje představu o fázovém složení titanových slitin po jejich zakalení z oblasti β nebo $\alpha + \beta$ [8, 15].



Obr. 9: Fázový diagram pro kalení titanových slitin z oblasti β nebo $\alpha + \beta$ [8]

Druhy tepelného zpracování titanových slitin [8, 15]:

- žihání – rekrytalizační, stabilizační, ke snížení zbytkového napětí,
- kalení + popouštění (zušlechtění)

Rekrytalizačního žihání se využívá převážně u slitin typu α a β , které se žihají v rozmezí 750-850 °C. Žihací teplota pro dvojfázové slitiny leží v oblasti pod teplotou přeměny na fázi β , neboť by docházelo k rychlému hrubnutí zrna [8, 15].

Stabilizační žihání je dvojího druhu: *Izotermické žihání* při teplotě 850-950 °C, následné ochlazení v peci na teplotu 500-650 °C, výdrž a ochlazení na vzduchu. Tento druh žihání slitiny vykazuje poměrně vysokou pevnost a žárupevnost spolu s dobrou tvárností. *Žihání dvojité* má podobný režim, navíc s mezi ochlazením na okolní teplotu a znovu zahřátí na žihací teplotu. Dosahuje se zvýšení pevnosti, tvárnost slitin však klesá [8, 15].

Při žíhání ke snížení zbytkového napětí se teploty u slitin titanu pohybují v rozmezí 550–600 °C s následným pozvolným ochlazením. Zušlechťování se z hlediska zvyšování mechanických vlastností uplatní nejen u dvoufázových slitin titanu, také u slitin β . Skládá se z ohřevu na kalící teplotu, kalení a popouštění. Ohřev na kalící teplotu probíhá v oblasti $\alpha + \beta$ příslušného rovnovážného diagramu, tak aby bylo zachováno co největší množství metastabilní fáze β . Kalení se provádí do vody, po tomto procesu následuje popouštění obvykle za teploty 500–600 °C [8, 15].

5 Technologické vlastnosti titanu

5.1 Obrobitelnost

Titan se všeobecně zařazuje mezi těžkoobrobitelné materiály pro své specifické vlastnosti. Jedná se o nízkou tepelnou vodivost, malou měrnou tepelnou kapacitu a vysokou teplotu tavení. Následkem těchto vlastností vznikají vysoké teploty v místě řezu, tím se zvyšuje nebezpečí plastické deformace břitu a jeho okamžité porušení. Pro představu je uvedeno porovnání vlastností titanu s ocelí v tab. 4. Na obrobitelnost titanu má také vliv jeho vysoká chemická reaktivita a malá tvrdost, která způsobuje zvýšenou možnost zadírání a vytrhávání materiálu nástrojem. Z tohoto důvodu je více problematické frézování než soustružení kvůli zadírání, k čemuž přispívá velký součinitel tření samotného titanu [1, 16].

Charakteristickým znakem pro obrábění titanových slitin je zpevňování v oblasti primární plastické deformace při procesu řezání a tvoření nárůstku, proto je důležitá vysoce pozitivní a ostrá geometrie břitu nástroje. Při obrábění titanových slitin je oproti jiným materiálům plocha kontaktu třísky s čelem nástrojem malá, to znamená, že rezná hrana je vystavena velkému mechanickému i tepelnému namáhání. K obtížné obrobitelnosti přispívá i nízký modul pružnosti titanu, který způsobuje znatelné odpružení při zatížení a vyvolává při obrábění odklonění obrobku od nástroje [1, 16].

Tab. 4. Porovnání vlastností titanu s ocelí [16]

Materiál	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Teplota tavení [°C]
Titan	4506	21,9	523	1668
Ocel	7850	47	461	1350–1450

5.2 Obecné zásady při obrábění

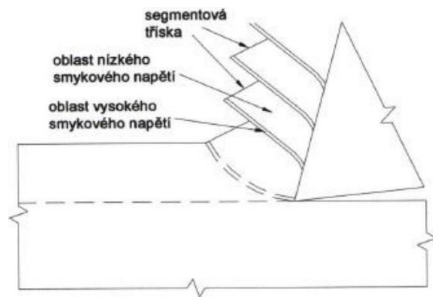
Zmíněné charakteristické vlastnosti tvoří překážky při obrábění. Vhodnou volbou některé ze zásad lze zefektivnit obrábění titanových slitin, a tím vytvořit finální výrobek za předpokladu životnosti nástroje [4, 13]:

- **Tuhost soustavy a ostrý nástroj.** Zajistit co největší tuhost soustavy, aby se zabránilo chvění a umožnil se přesný řez. Používat ostrý nástroj s pozitivní geometrií břitu, velkým úhlem čela a nízkou drsností na čele, aby se na něj třísky nelepily a dosáhlo se požadované jakosti povrchu. Tyto požadavky jsou všeobecně potřebné i pro obrábění jiných materiálů.
- **Zabránit práci s opotřebenými nástroji.** Pro obrábění se slinutými karbidy je kritická hodnota velikosti opotřebení břitu na hřbetě 0,3 mm.
- **Nízká řezná rychlost.** Nejvíce řeznou rychlost ovlivňuje teplota nástroje. Pokud bude na nízké úrovni, snižuje se teplota břitu nástroje a zvyšuje se životnost. Tato zásada platí pro všechny slitiny i čistý kov.
- **Zajištění pravidelného a stálého záběru.** Je-li nástroj v záběru s obrobkem při spuštěném procesu řezání s absencí posuvu, zvyšuje se tím zadíraní, které může mít za následek zničení nástroje.
- **Používat vyšší hodnoty posuvu a hloubky řezu** kvůli vzniku nebezpečného zpevňování. Velikost posuvu méně ovlivňuje teplotu v místě řezu. Proto je vhodné, aby byla hodnota co největší. Velikost třísky, by měla být větší než velikost vrstvy, kde došlo ke zvýšení tvrdosti, vlivem předchozího obrábění.
- **Používat procesní chladicí kapaliny,** jejichž úkolem je odvádět teplo z místa řezu, zlepšovat odvod třísek, snižovat velikosti řezných sil a prodlužovat trvanlivost nástrojů. Doporučuje se používat emulze před minerálními oleji nebo vodním roztokem. Emulze nesmí obsahovat halogeny z důvodu zvýšeného korozního napadení, jinak by muselo dojít k důkladnému omytí.

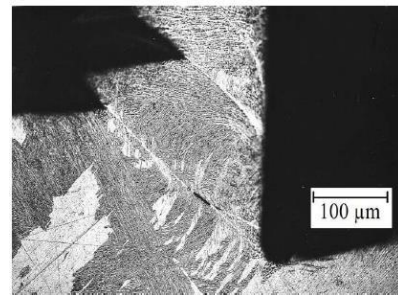
5.3 Mechanismus tvorby třísky

Při vnikání řezného klínu dochází k intenzivní plastické deformaci podél roviny maximálních smykových napětí (střížné roviny). Tvar a charakter třísky poskytuje řadu informací, jak probíhal daný proces řezání, jakého charakteru bude nově vzniklý obrobený povrch, charakter zpevňování nebo odpevňování při řezání apod. [16].

U obrábění titanových slitin vznikají tepelnou nestabilitou segmentové třísky (obr. 10). Jednotlivé segmenty třísek mají vůči objemu poměrně malé plastické deformace. Výrazně vyšší plastická deformace se nachází v úzké oblasti mezi segmenty (smykový pás). Oblast je označována jako adiabatický katastrofický stříhový pás. Vznik takového pásu je projevem smykové nestability deformace a vzniká jako důsledek odpevnění při koncentraci tepla a špatné tepelné vodivosti deformovaného materiálu [16].

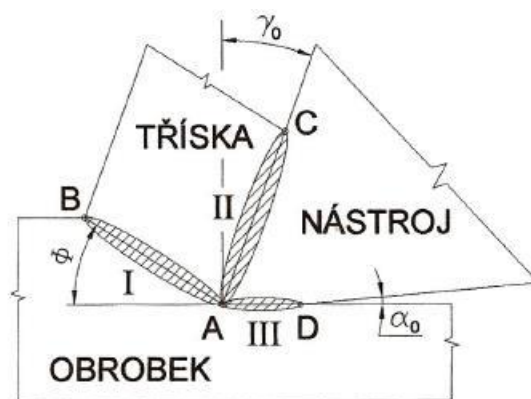


Obr. 10: Segmentová tříška [12]



Obr. 11: Utváření kořene třísky slitiny Ti6Al4V při $v_c = 60 [m.min^{-1}]$ a $f_z = 0,15 [mm]$ [17]

Při vzniku třísky se deformovaná oblast materiálu vlivem řezného nástroje nazývá kořenem třísky. Kořen třísky zahrnuje tři oblasti výrazné plastické deformace znázorněné na obr. 12 [18]:



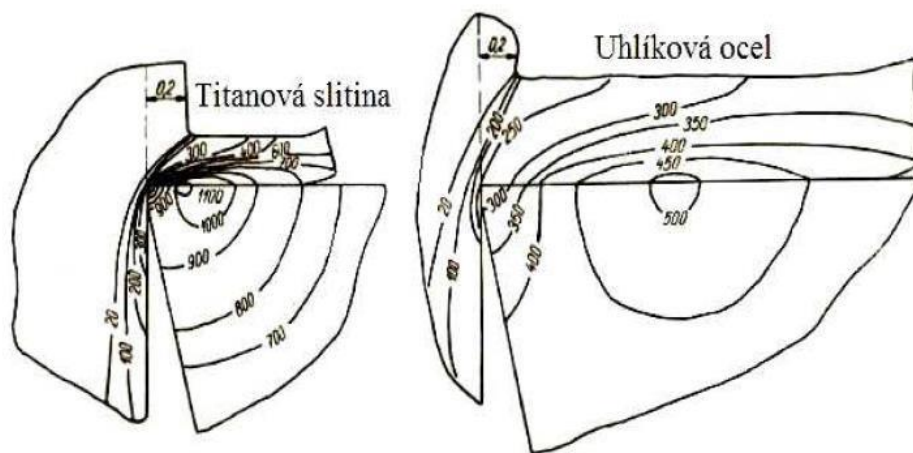
- I oblast primárních plastických deformací – maximální smykové napětí,
- II oblast sekundárních plastických deformací – tření třísky po čele nástroje,
- III oblast terciárních plastických deformací – tření o obrobený povrch materiálu.

Obr. 12: Znázornění oblasti plastických deformací v kořenu třísky [18]

5.4 Teplota v místě řezu

Při obrábění v místě řezu vzniká teplo, jehož množství je ovlivněno tepelnými vlastnostmi obráběného materiálu jako jsou tepelná vodivost a měrné teplo. Velmi malá tepelná vodivost titanových slitin oproti jiným kovům spolu se špatnými třecími vlastnostmi mají za následek generování vysokých teplot v místě řezu [13, 16].

Z důvodu špatného odvodu tepla do třísky a obrobku lze pozorovat vysokou koncentraci tepla na řezné hraně nástroje (obr. 13). Řezný nástroj se při obrábění rychle zahřívá a současně v něm vzniká velmi vysoké napětí, čímž dochází k intenzivnímu opotřebení nástroje [13, 16].



Obr. 13: Teplotní pole při obrábění uhlíkové oceli a titanové slitiny [19]

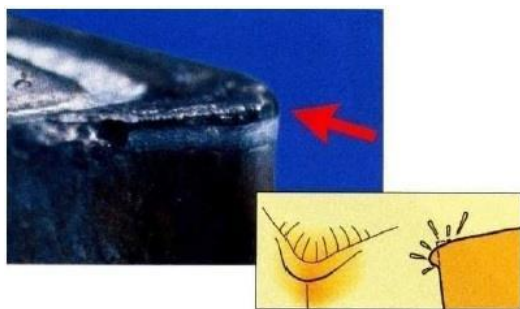
Velikost teploty v místě řezu je ovlivněna mnoha faktory [13, 16]:

- řeznými podmínkami,
- geometrií nástroje,
- řezným materiálem,
- aplikací procesních kapalin.

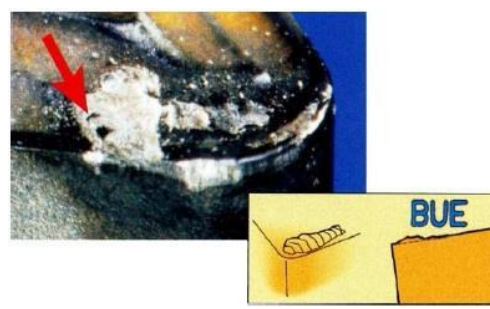
Vliv na zvýšení teploty má řezná rychlost oproti šířce záběru ostří. Teplotní problematika v místě řezu titanových slitin kvůli jejich špatným tepelným vlastnostem vyžaduje důkladnou volbu řezných nástrojů a procesních kapalin, které mají nejen funkci chladící, ale zároveň i mazací (emulze) vzhledem k intenzivnímu tření a vývinu tepla [13, 16].

5.5 Opotřebení řezných nástrojů při obrábění

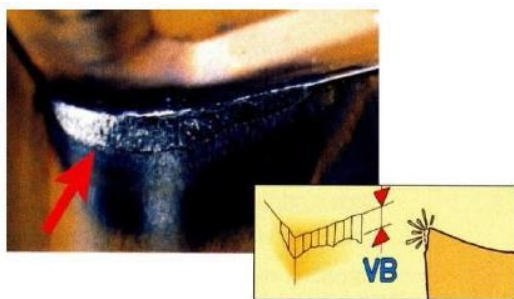
Opotřebení řezných nástrojů při obrábění titanových slitin je zapříčiněno především vysokým součinitelem tření s ostatními kovy a nízkou tepelnou vodivostí titanu. Častými projevy degradace nástroje při obrábění titanových slitin jsou hřbetní opotřebení, čelní opotřebení, plastická deformace nástroje a tvoření nárůstku (obr. 14-17) [20].



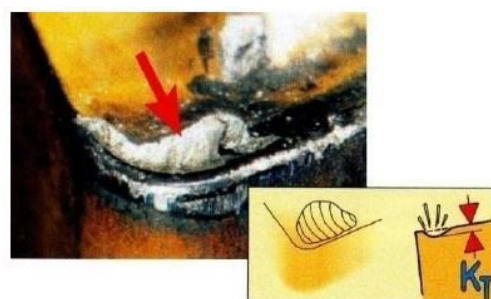
Obr. 14: Plastická deformace břitu [20]



Obr. 15: Tvorba nárůstku [20]



Obr. 16: Hřbetní opotřebení VB [20]



Obr. 17: Čelní opotřebení KT [20]

Hřbetní opotřebení (obr. 16) je poškození břitu, kde se měří výška opotřebeného povrchu způsobené otěrem na hřbetu nástroje.

Nízká odolnost nástrojového materiálu proti opotřebení a příliš vysoká řezná rychlost mají za následek rychlého opotřebení nástroje na hřbetě. Důsledkem toho vzniká nežádoucí jakost obrobenech ploch či nedodržení předepsaných tolerancí [20].

Opatření vůči nadměrnému opotřebení na hřbetě je doporučeno snížit řeznou rychlost, zvolit nástrojový materiál s vyšší odolností proti opotřebení, případně použít nástroj povlakovaný oxidickou keramikou (Al_2O_3 , či zvolit cermetovou třídu). U materiálů, kde dochází ke zpevňování při jejich obrábění jako u titanu se doporučuje zvolit menší úhel nastavení [20].

Výmol na čele nástroje ve tvaru žlábků KT vzniká vlivem vysokých řezných teplot a na straně čela dochází k difuznímu opotřebení. Žlábek na čele způsobuje zeslabení břitu a může dojít k jeho vylomení, což vede ke snížení jakosti obrobenech ploch. Jako opatření proti kráterovému opotřebení na čele je doporučeno snížit řeznou rychlost, případně posuv a zvolit VBD s pozitivní geometrií či použít povlakovaný nástroj povlakem Al_2O_3 [20]

Plastická deformace břitu je způsobena vysokými řeznými teplotami za současného působení vysokých měrných tlaků v místě řezu. Následkem toho dochází ke změně v geometrii, čímž se zhoršuje jakost obrobenech ploch anebo zlomení břitové destičky. Proti plastické deformaci břitu lze zabránit, buď snížením řezné rychlosti nebo použitím třídy slinutých karbidů s lepší odolností proti plastické deformaci [20].

6 Frézovací nástroje a jejich technologie

Jako u ostatních metod obrábění je vhodné zvolit správný řezný nástroj, obráběcí stroj, řezné podmínky a řezné prostředí vzhledem k množství problémů, vyplývajících z vlastností titanových slitin. Řezné materiály pro frézovací nástroje se volí podle vlastností obráběného materiálu. Přednostně se používá při volbě řezného materiálu druh a způsob jeho povlakování.

Pro frézování titanu se používají monolitní frézy nebo frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami. Nástroje se vyrábějí metodou práškové metalurgie s následným spékáním karbidů, na nichž je nanášena tenká vrstva, nebo více vrstev povlaku dalšího materiálu, které zlepšují jeho vlastnosti [13, 21].

Z důvodu snížení prostupu tepla do nástroje je výhodné použít metodu povlakování PVD, která zachovává ostřejší hranu než metoda CVD. Při použití povlakovaných destiček je potřeba sledovat složení povlaku, jelikož titan má při vysokých teplotách obrábění tendenci chemicky reagovat s prvky obsaženými v povlaku, tím pak dochází ke zvýšené tvorbě nárůstků na řezné hraně [21].

6.1 Nejpoužívanější povlaky

TiN zlaté barvy je nejběžnějším používaným povlakem. Vyznačuje se vynikající odolností proti opotřebení, tepelnou stabilitou, dobrou adhezí a snižuje koeficient tření, tím se zlepší tepelný přenos tepla od nástroje. Tvrdost povlaku se pohybuje kolem 2300 HV a maximální pracovní teplota použití je 550 °C. Používá se na méně náročné aplikace při nízkých řezných rychlostech například vrtání děr [22].

Povlak TiCN modrošedé barvy s hladkým povrchem je charakterizován nízkým koeficientem, vysokou houževnatostí a odolností vůči opotřebení i přes svoji vysokou tvrdost. Tvrdost povlaku se pohybuje kolem 3000 HV a maximální pracovní teplota použití je 400 °C. Pro své vlastnosti se používá např. při přerušovaném řezu, kde vznikají nízké teploty na řezné hraně. Povlak se aplikuje v oblasti frézování, řezání, vrtání a vystružování [22].

Fialovo-bronzový povlak TiAlN patří mezi nejpoužívanější povlaky ve vysokorychlostním obrábění. Povlak TiAlN má výbornou odolnost vůči vysokým teplotám, a to díky jeho tvrdé vrstvě oxidu hliníku, která umožňuje vykonávat práci zhruba rychleji než s povlakem TiN. Tvrdost se pohybuje kolem 2800 HV a maximální pracovní teplota použití je 800 °C. Používá se v oblasti frézování a vrtání tvrdých ocelí s vysokou pevností a vysokoteplotních slitin včetně niklové báze a titanu. Zejména je vhodný pro obrábění za sucha díky jeho vysoké tepelné odolnosti [22].

Povlak AlTiN černé barvy je tvrdší než povlak TiAlN. Rozdíl mezi nimi je v procentním obsahu prvku v povlaku. Tvrdost povlaku se pohybuje kolem 4500 HV a maximální pracovní teplota použití je 800 °C. Vhodný je pro suché obrábění titanových slitin, abrazivní a těžkoobrobitelné materiály [22].

Tab. 5. Shrnutí vlastností nejpoužívanějších povlaků [22]

Povlak	Barva	HV [-]	Teplota použití [°C]	Hlavní použití pro:
TiN	zlatá	2300	550	univerzální jakost
TiCN	modrošedá	3000	400	frézování, přerušované řezy
TiAlN	fialovo-bronzová	2800	800	univerzální jakost, stabilní řezy
AlTiN	černá	4500	800	výkonná jakost, tvrdé obrábění

6.2 Výroba vyměnitelných břitových destiček

Vyměnitelné břitové destičky se vyrábějí technologií zvanou prášková metalurgie. Práškovou metalurgií lze spojit směs dvou kovů, které jinými technologiemi nelze jinak vyrobit kvůli jejich neslévatelnosti. Směs dvou kovů je nutné spojit jako směs dvou nadrcených prášků [23].

Nejprve dochází ke smíchání dvou kovů ve formě granulátů, které jsou poté rozmělněny. Rozmělnění probíhá mechanicky, chemicky nebo elektrochemicky. Při mechanické metodě se nejčastěji využívá mlecí zařízení zvané attritor (kulový mlýn, obr. 18) v němž je přidána emulze. Do tohoto mlýnu se vkládají smíchané kovy jako například karbid wolframu s příměsí kobaltového pojiva ve formě granulátů, který se následným mletím změní na kovový prášek. Vzniklý kovový prášek je vystaven procesu sušení, díky kterému se získává lisovatelný granulát, z kterého lze vylišovat břitové destičky do požadovaného tvaru [23].

Vylisovaná břitová destička je křehká a snadno se láme, aby získala svou požadovanou pevnost a tvrdost dochází k jejímu vytvrzení ohřevem, slinováním nebo spékáním, kde se používá takzvaná slinovací pec. Po vytvrzení se destička vybrousí do požadované geometrie a předepsané velikosti. Pro zvýšení životnosti destičky dochází ještě k chemickému povlakování. [23].

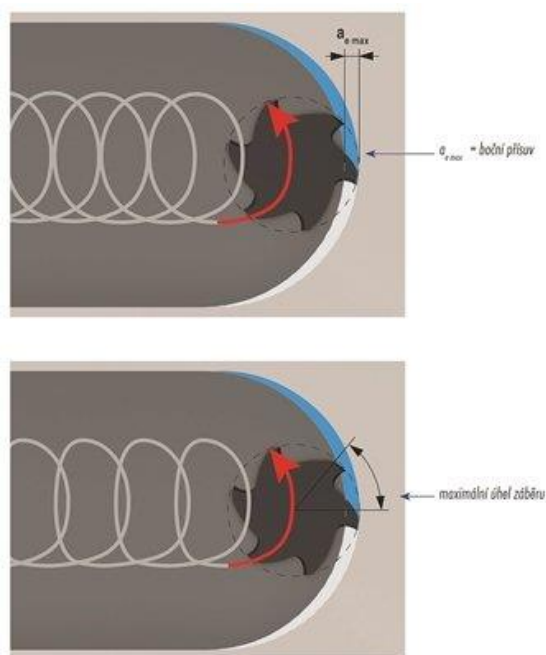
Pro frézování titanu jsou vhodné vícevrstvé povlaky při kombinaci TiN a TiAlN nanášené metodou PVD na nástroj. Při této metodě se využívá odpaření pevné látky v řízené atmosféře. Pomocí obloukového odpařování se vytváří kladné ionty, které jsou přitahovány záporným předpětím na budoucí nástroj. Ionty se po povrchu pohybují, spojují a vytváří celistvou vrstvu povlaku. Dalším opakováním postupu vzniká vícevrstvý povlak [24].



Obr. 18: Attritor-kulový mlýn [23]

6.3 Trochoidní frézování

Metoda trochoidního frézování je výhodná pro frézování drážek větších šířek, než je vlastní průměr nástroje, a to pomocí jediného nástroje. Princip spočívá v naprogramování kruhové dráhy nástroje s přísvem vpřed do záběru s každým cyklem, naznačený na obr. 19. Při trochoidním frézování se udržuje minimální úhel záběru (úhel opásání), a tím se redukuje chvění nástroje. Takto zvolený postup výroby dovoluje použít až o 80 % hodnoty posuvu oproti běžnému bočnímu frézování, ale při obrábění drážky do plna je třeba posuv snížit na 20 % oproti posuvu obvyklému při bočním frézování [25, 26].



Obr. 19: Dráha nástroje při trochoidním frézování [26]

Dříve bylo programování více problematické, protože softwary CAM nenabízely funkci trochoidního frézování a programátor musel dráhu nástroje programovat ručně, tudíž se nevyužívalo tak často jako nyní. V dnešní době jsou převážně CNC řídicí systémy vybaveny touto funkcí a lze ji snáze naprogramovat i graficky simulovat [25].

Výhody trochoidního frézování [27]:

- úspora času a snížení řezných sil,
- pokles zatížení nástroje a hlubší řez nástroje,
- efektivnější využití řezných břitů,
- větší přesnost obrobku a lepší odvod třísek.

6.3.1 Nástroje pro trochoidní frézování

Pro tento druh operace doporučuje výrobce nástrojů Iscar použít stopkovou frézu Chatterfree, která je schopná ubírat materiál do hloubky 2krát D do plného materiálu. Monolitní karbidová fréza má karbid jakosti IC900 s povlakem TiAlN, který je nanesen metodou PVD, jenž zaručuje dobrou kombinaci mechanických vlastností [25].

Tab. 6. Porovnání standardního a trochoidního frézování drážky [25]

	Standardní frézování	Trochoidní frézování
Materiál obrobku	Ti-6Al-4V (třída 5), žhánáno	Ti-6Al-4V (třída 5), žhánáno
Nástroj	Iscar čelní stopková fréza: ECH160B32-6C16	Iscar čelní stopková fréza: ECH160B32-6C16
Třída karbidu	IC900	IC900
D [mm]	16	16
v_c [m/min]	45	115
f_z [mm/zub]	0,04	0,12
a_p [mm]	12	22
a_e [mm]	12	1-1,5
Chlazení	Emulze	Emulze
Čas výroby [min]	55	33
Životnost nástroje [ks]	4	4

Novinkou pro tento druh operace jsou stopkové frézy (CCR) od výrobce WNT. Při jejich vývoji se kladl důraz na povrchovou úpravu a odolnost povlaku proti otěru, přičemž se využila moderní technologie povlakování metoda „Dragonskin“. Frézy CCR jsou otěruodolné a současně schopné odolávat značnému kolísání teplot, což je typické u frézování. Specifickou vlastností těchto fréz je speciální lamač třísek, který je součástí geometrie břitu. Díky lamači třísek se délka třísky omezuje na 2krát D a zajišťuje se její optimální odvádění [26].

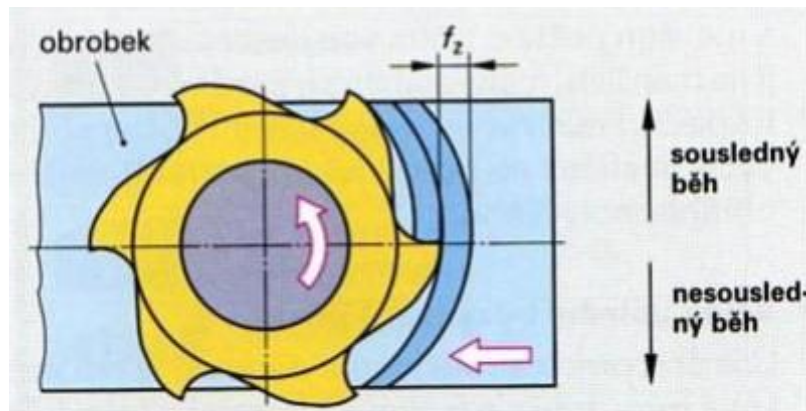


Obr. 20: Stopková fréza pro trochoidní frézování [26]

6.4 Vysokorychlostní frézování Ti6Al4V za sucha

Jedná se o technologii obrábění s vysokými řeznými rychlostmi (HSC) v přirozeném prostředí, které je tvořeno pouze upraveným či neupraveným vzduchem. Podstatou HSC je zvyšování řezných a posuvových rychlostí, jejichž cílem je zvýšit podíl tepla odvedeného třískou, a naopak snížit podíl tepla odvedeného nástrojem a obrobkem. Řezná rychlost se pro HSC slitiny titanu pohybuje mezi 120-1000 m.min⁻¹ [29].

Obecně známým jevem je, že se zvyšující se řeznou rychlostí dochází k rychlému opotřebení a zmenšení trvanlivosti břitů nástroje. Je proto důležité stanovit řezné podmínky tak, aby byly co nejvíce produktivní. Na trvanlivost břitu má zásadní vliv metoda frézování, zda se frézuje sousledně nebo nesousledně (obr. 21) [29].



Obr. 21: Sousledné a nesousledné frézování [28]

V prvním případě jde tříška z maximální tloušťky do minimální a při nesousledném frézování naopak. Při sousledném frézování vzniká menší intenzita opotřebení, která vede k delší trvanlivosti břitu řezného nástroje. Nevýhodou tohoto způsobu je vznik rázů působících na břit nástroje při jeho vjíždění do materiálu, které vedou až k úplné destrukci břitu. U nesousledného frézování tříška jde z minima do maxima, tím se trvanlivost břitu zmenšuje. Na začátku řezu břit stlačuje materiál pod sebe, čímž vzniká tvrdá zpevněná vrstva, která se hůře odstraňuje. Z toho důvodu má nesousledné frézování zhruba 3,5krát menší trvanlivost než sousledné frézování [29].

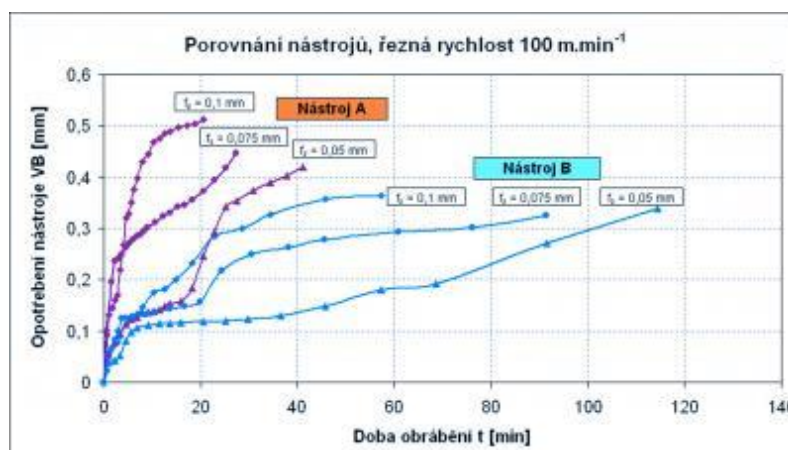
V rámci výzkumu byl proveden experiment, kde vstupovaly dvě vyměnitelné břitové destičky a lišily se pouze základním substrátem karbidu a materiálem povlaku. VBD měly stejný tvar, tolerance a utvářeče třísek (označení APXT11T3). První volbou (Nástroj A) byla destička určená pro obrábění žáropevných slitin na bázi Ti a Ni, která měla povlak z materiálu TiN s doporučenou řeznou rychlostí v rozmezí 30-100 m.min⁻¹ [29].

Druhou alternativou (Nástroj B) byla destička určená pro frézování korozivzdorných ocelí s povlakem z materiálu TiAlN a řeznou rychlostí doporučenou v rozmezí 100-200 m.min⁻¹. Nástrojem byla dvoubřitá stopková fréza o průměru 20 mm, poháněná frézovacím vertikálním centrem s maximálním výkonem 15 kW [29].

Frézovalo se nesousledně se shodnou velikostí třísky šířky a hloubky řezu 1,5 mm. Posuv na zub byl volen v rozsahu 0,05-0,125 mm. Kritériem pro vyhodnocení výzkumu byla zvolena hodnota velikosti opotřebení břitu 0,3 mm. Optimální podmínky se volily pro maximální MRT, který se odebral za dobu trvanlivosti břitu v závislosti na velikosti posuvu a řezné rychlosti [29].

Ze zaznamenané závislosti velikosti opotřebení nástroje na době obrábění za použití konstantní rychlosti řezu (obr. 22) byly zjištěny závěry. Porovnávaly se zde nástroje A a B s různou velikostí posuvu na zub (0,1; 0,075; 0,05 mm). Pro nástroj A je nejvhodnější volit co nejmenší posuv okolo 0,05 mm. Bylo dokázáno, že při malém posuvu se odebralo nejvíce materiálu v rámci jedné trvanlivosti břitu. Potvrzeno bylo také to, že s rostoucím posuvem a řezné rychlosti klesá trvanlivost břitu [29].

Pro nástroj B vyplynulo, že je nejvhodnější volit posuv okolo hodnoty 0,1 mm, který vykazoval největší množství ubraného materiálu v celém rozmezí rychlostí. Nástroj A odebral za nejvhodnějších podmínek téměř 13 cm³ materiálu v rámci jedné trvanlivosti břitu, kdežto nástroj B odebral během jedné trvanlivosti více než 43 cm³. Ve výsledku u nástroje B je rozdíl téměř 3,5krát větší než u nástroje A, z toho část je způsobena výhradně rozdílem trvanlivostí břitu obou nástrojů [29].



Obr. 22: Závislost opotřebení na době obrábění za sucha [29]

Z výsledků lze určit, že pro vysokorychlostní frézování slitiny titanu Ti6Al4V za sucha je lepší použít nástroj pro obrábění korozivzdorných ocelí s povlakem TiAlN ze slinutého karbidu skupiny M s jakostí M20 až M35 [29].

6.5 Výběr nástrojů pro rovinné frézování slitin titanu

Na základě oslovení vybraných firem mi byly doporučeny nástroje a vyměnitelné břitové destičky pro rovinné frézování titanové slitiny Ti6Al4V za sucha.

6.5.1 Nástroje firmy Sandvik Coromant

Jeden z největších výrobců frézovacích nástrojů doporučuje čelní frézu koncepce CoroMill 419 419-084Q27-14H s vyměnitelnými břitovými destičkami. Fréza je určena pro čelní a tvarové frézování s vysokými rychlostmi posuvu, včetně postupného zahlubování a šroubovicové interpolace. Používá se především pro polodokončovací a hrubovací operace. Vhodná je pro méně výkonné stroje a upínací přípravky s nižší tuhostí [30].



Obr. 23: Doporučená fréza CoroMill 419 [30]

6.5.1.1 VBD Sandvik Coromant

K tomuto nástroji výrobce doporučuje břitovou destičku s pěti řeznými hranami typu 419R-1405M-PM, jejíž geometrie je uvedena v tab. 7. Navzdory středně tvrdé karbidové třídě (S30T) s tenkým PVD povlakem dosahuje destička vynikající trvanlivosti břitu a umožňuje obrábění za sucha při vyšších řezných rychlostech. VBD je určena pro obrábění od dokončovacích aplikací až po lehké hrubování za stabilních podmínek [31].

Tab. 7. Geometrie VBD 419R-1405M-PM [32]

κ_r [°]	Třída karbidu	Povlak	Metoda povlakování	γ [°]	Fazetka [mm]
19	S30T	(Ti,Al)N ₂	PVD	15	0,2

Tab. 8. Doporučené řezné podmínky k VBD 419R-1405M-PM S30T

a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]
1,5	50	55	0,55

Vzhledem k jiné geometrii uvádím od stejného výrobce kruhovou VBD typu RCKT 12 04 M0-PM (tab. 9), s níž se úspěšně frézovalo a která byla použita v loňské bakalářské práci. Díky velice houževnaté karbidové třídě (S40T) se středně tlustým CVD povlakem bylo s destičkou možno obrábět hrubováním slitinu titanu za sucha [31].

Pro vyhodnocení a porovnání výsledků byly zvoleny podmínky experimentu rozdělením do dvou částí dráhy nástroje. V první části dráha nástroje byla volena v postranní poloze, kde se střídalo sousledné a nesousledné frézování. Ve druhé části se volila dráha nástroje v centrální poloze, kde se shodovala s osou obrobku. Výstupními řeznými podmínkami experimentu byla řezná rychlost a posuv na zub. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že se řezná síla nezvětšovala stejně a posuv měl v porovnání s rychlostí daleko větší vliv na řeznou sílu [33].

Tab. 9. Geometrie RCKT 12 04 M0-PM [32]

$\kappa_r [^\circ]$	Třída karbidu	Povlak	Metoda povlakování	$\gamma [^\circ]$	Fazetka [mm]
0-90	S40T	Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN	CVD	20,9	0,12



Obr. 23: Vyměnitelné břitové destičky typu 419R a RCKT [32]

6.5.2 Nástroje firmy WNT

Výrobce WNT doporučuje pro hrubovací a dokončovací operace nástrčné rovinné frézy s VBD systému A 2740-09 (SFHT), A 2510 RS (RPHX) a A HFC-09 s maximálním posuvem na zub do 3 mm (XDLX). Všechny nástroje jsou opatřeny velmi tvrdým povlakem Highlight pro zvýšení odolnosti a životnosti frézovacích těl [34].



Obr. 24: Doporučená fréza A 2510 RS [35]

6.5.2.1 VBD WNT

Výrobce WNT k nástrojům doporučuje různé tvary břitových destiček (tab. 10), které jsou vyrobené ze speciální karbidové sorty HCF 5240 třídy S40 a jsou vhodné pro obrábění titanu a slitin titanu. VBD jsou povlakovány metodou „Dragonskin“ CVD vrstvou povlaku TiN/TiAlN, jenž má pozitivní geometrii pro hladký a klidný řez. Dále jsou opatřeny hlubokým lamačem třísky tzv. utvářečem pro zajištění optimálního utváření třísek při vyšších řezných rychlostech. Břitové destičky jsou vhodné pro dokončovací a hrubovací operace [35].

Tab. 10. Geometrie doporučených VBD k nástrojům od výrobce WNT [35]

Typ destičky	κ_r [°]	Počet břitů [-]	Utvářeč třísky	γ [°]	Fazetka [mm]
SFHT	45	4	- F40	8	-
RPHX (kruhová)	0 - 90	-	- M31	13	0,15
XDLX	15	4	- F40	15	-

Tab. 11. Doporučené řezné podmínky k různým tvarům VBD [35]

Typ destičky	a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]
SFHT	0,2 - 3,8	-	60	0,05 - 0,15
RPHX	0,5 - 3	-	60	0,1 - 0,3
XDLX	0,1 - 0,5	7,5	60	0,1 - 0,8

Pozn.: Uvedené hodnoty jsou pro oblast M středního obrábění a slabší stroje. Hodnoty doporučených řezných podmínek se u kruhové destičky typu RPHX mění dle velikosti, uvedená velikost je pro průměr 12 mm.



Obr. 25: Vyměnitelné břitové destičky různých tvarů [35]

6.5.3 Nástroje firmy Seco tools

Výrobce Seco tools doporučuje čelní monolitní karbidové frézy nástrojové řady JHP, jejichž geometrie je uvedena v tab. 12. Zuby fréz jsou vyrobené s nestejnou roztečí z důvodu zamezení jejich vibrací při obrábění. Pro lepší odvod třísek jsou tvarovány do nepravidelných šroubovic, jenž mají za úkol snižovat chvění. Monolitní frézy se používají především ve vysoce výkonném frézování (HPM) a umožňují dosáhnout velkých úběru materiálů [36].



a) JHP750



b) JHP 770

Obr. 26: Monolitní karbidové frézy řady JHP [36]

Tab. 12. Geometrie monolitních karbidových fréz řady JHP [36]

Označení	D [mm]	Povlak	Počet břitů [-]	Úhel šroubovice [°]	γ [°]
JHP 750	2–25	Tribon	2–4	44	9
JHP 770	6–25	Sira	4–5	42	6

Tab. 13. Doporučené řezné podmínky k monolitním frézám řady JHP

Označení	a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]
JHP 750	5	5	80	0,08
JHP 770	5	10	70	0,08

Pozn.: Uvedené doporučené řezné podmínky jsou pro čtyřbřité frézy o průměru 12 mm.

Dalším doporučeným nástrojem je univerzální čelní fréza QuattroMill R220.53-0080-12-8A se silnými břitovými destičkami čtvercového tvaru. Fréza má pozitivní řezný úhel čela a negativní radiální úhel, který zajišťuje vyšší produktivitu ve stabilních i nestabilních podmínkách frézování [37].



Obr. 27: Univerzální čelní fréza QuattroMill [37]

6.5.3.1 VBD Seco tools

K tomuto nástroji výrobce doporučuje jednostranné břitové destičky se čtyřmi řeznými hranami SEEX1204AFN-M10 třídy MS 2050 s povlakem (Ti;Al) N – NbN. Povlak zaručuje zlepšení žáruvzdornosti a eliminuje vznik nárůstků na břitech při frézování přilnavých materiálů, jako například u titanu. Destičku je možno využít na vícero frézách, tím se zvětšuje možnost využití. Vzhledem k pozitivní geometrii lze destičku použít na rohové, čelní, kopírovací frézování i s vysokým posuvem [38].

Tab. 14. Geometrie VBD SEEX1204AFN-M10 MS2050 [39]

κ_r [°]	Třída karbidu	Povlak	Metoda povlakování	γ [°]	Délka hladící hrany [mm]
45	MS 2050	(Ti;Al) N – NbN	PVD	7	1,5



Obr. 28: Vyměnitelná břitová destička typu SEEX [39]

Tab. 15. Doporučené řezné podmínky k VBD SEEX1204AFN-M10 MS2050

a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]
1,5	50 % D	30	0,13

7 Technologická zkouška

V praktické části práce je návrh s přípravou na experiment technologické zkoušky. Experiment bude probíhat ve školních laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Při experimentu se bude provádět rovinné frézování titanové slitiny Ti6Al4V za sucha, které je pro uvedenou slitinu netradiční a komplikované. Technologická zkouška bude zahrnovat konzervativní doporučené i vlastní produktivní podmínky.

Cílem technologické zkoušky bude porovnání závislosti řezných sil na úhlu čela vyměnitelné břitové destičky a jejího opotřebení. Dalším cílem bude pozorování vlivu úhlu čela destičky na výslednou kvalitu povrchu. Následně se u břitové destičky se stejnou geometrií bude sledovat vliv povrchové úpravy s povlakem nebo bez povlaku.

7.1 Materiál obrobku a obráběcí stroj

Rovinné frézování bude probíhat na titanové slitině Ti6Al4V. Obrobek bude ve tvaru kvádrů o výšce 60 mm a obráběné ploše 136×26 mm, který bude následně odebírán obráběcím nástrojem, a to symetrickým záběrem (obr. 32). Mechanické vlastnosti této slitiny jsou popsány v tab. 2.

Obráběcím strojem bude vertikální frézovací centrum VMC-500, jehož technické parametry jsou uvedeny v tab. 16. Jedná se o tříosé obráběcí centrum s CNC řízením. Centrum je vybavené řídicím systémem Acramatic 2100. Výrobcem frézovacího centra je Kovosvit MAS, a.s..

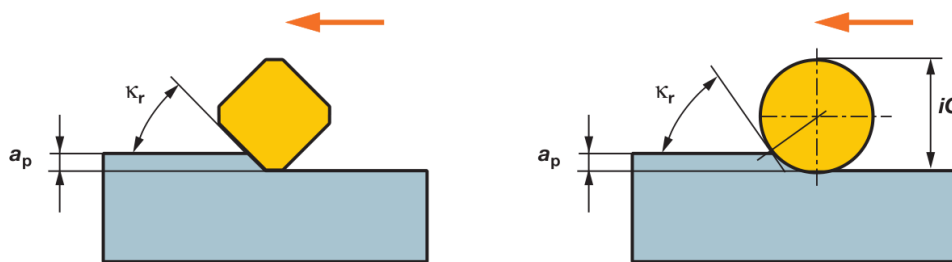
Tab. 16 Technické parametry obráběcího centra VMC-500 [42]

Technické parametry		
Rozměry upínací plochy stolu:	délka (ve směru osy x):	800 mm
	délka (ve směru osy y):	500 mm
Rozpětí posuvu:	ose x	500 mm
	ose y	500 mm
	ose z	500 mm
Maximální otáčky vřetena:		$8\,000\text{ min}^{-1}$
Upínací kužel vřetena:		ISO 40
Výkon hlavního elektromotoru:		5,5 kW

7.2 Kruhová vyměnitelná břitová destička

Pro experiment byla vybrána břitová destička kruhového tvaru (tzv. kruhovka). Důvody a výhody použití kruhovky jsou vysvětleny v následující části:

Z důvodu zvýšení produktivity frézování rovinných ploch je nutné dodržet úhel nastavení hlavního ostří do 45° , zatímco při použití kruhových VBD je tento požadavek limitován axiální hloubkou řezu. Při nedodržení doporučení a zvýšení κ_r dochází k výraznému nárůstu řezných sil a opotřebení ve formě vrubu [40, 41].

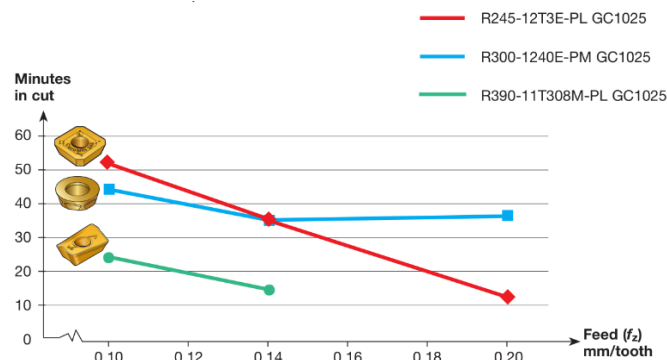


Obr. 28: Limitovaná hloubka řezu při úhlu nastavení 45° [40]

Díky kruhovým břitovým destičkám s úhlem nastavení menším než 45° se snižuje velikost opotřebení ve tvaru vrubu, které je nejčastějším problémem špatné kvality obrobené součásti a poklesu produktivity. Aplikací této destičky lze dosáhnout bezporuchového provozu, zvýšení trvanlivosti a snížení počtu výměn nástrojů [41].

Při použití kruhových břitových destiček a menší hloubky řezu, než je jejich poloměr se vůči velikosti posuvu sníží tloušťka třísky a prodlouží délka břitu, která je v záběru. Důsledkem toho se snižuje teplota vznikající v místě řezu a vzniká prostor pro zvýšení řezné rychlosti i posuvu a dosažení maximálního objemu výroby [41].

Ze zaznamenané závislosti (obr. 29) úhlu nastavení tří různých typů destiček a posuvu na zub při obrábění titanové slitiny Ti6Al4V je patrné, že je výhodnější použít kruhovou břitovou destičku, tím dochází ke zvýšení trvanlivosti břitu.



Obr. 29: Vliv úhlu nastavení a posuvu na zub při obrábění Ti6Al4V [40]

7.3 Obráběcí nástroj

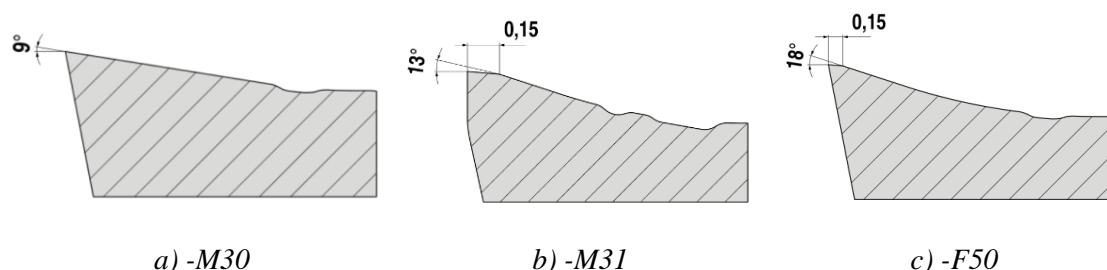
Pro technologickou zkoušku bude použita nástrčná fréza A251.63.R.06-12-RS od výrobce WNT s maximálním obráběcím průměrem 63 mm (obr. 24), kterou lze osadit šesti destičkami. Pro měření bude použita jen jedna kruhová vyměnitelná břitová destička.

Frézovací hlava bude postupně osazena pěti různými kruhovými destičkami typu RPHX (obr. 25) o průměru 12 mm od téhož výrobce, jejich geometrie jsou uvedeny v tab. 17. Rozdíl mezi jednotlivými destičkami se liší v úhlu čela (utvářeče), povlaku nebo karbidové třídě. Zkoušené VBD jsou povlakovány metodou „Dragonskin“. Pro porovnání budou zkoušeny destičky i bez povlaku.

Tab. 17 Geometrie kruhových destiček pro experiment [35]

Sorta (Cerazit)	Třída karbidu	Metoda/Povlak	Utvářeč třísky	γ [°]	Fazetka [mm]
CTPM240	M40	PVD/TiAlTaN	-M30	9	-
CTC5240	S40	CVD/TiN,TiAlN	-M31	13	0,15
CTPM245	M45	PVD/ TiAlTaN	-F50	18	0,15
CTC5240	S40	bez	-M31	13	0,15
CTPM245	M45	bez	-F50	18	0,15

Pozn.: U destiček s utvářečem třísky -F50 je provedení bříty zaoblené a zkosené, zatímco u ostatních je jen zaoblený břit.



Obr. 30: Přehled utvářečů třísek kruhových destiček [35]

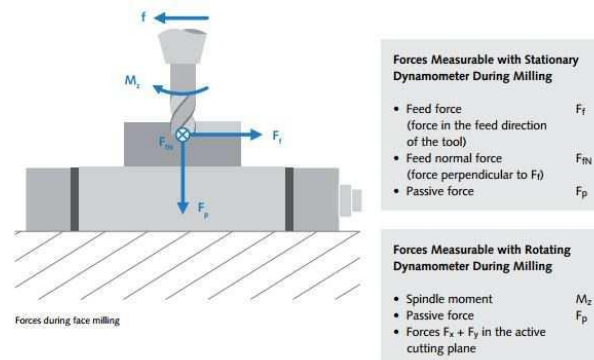
Následně bude frézovací hlava osazena ještě jedním typem kruhové destičky RCKT 12 04 M0-PM od výrobce Sandvik Coromant, její geometrie je uvedena v tab. 9. Tento typ kruhové destičky má větší úhel čela než ostatní kruhové destičky od výrobce WNT.

7.4 Měření silových účinků

Mezi největší výrobce měřicí techniky a senzorů patří firma Kistler, jejichž dynamometry jsou určeny pro měření sil při obrábění. Pro technologickou zkoušku bude použit dynamometr Kistler typu 9265B.

Jedná se o stacionární (deskový) tříosý dynamometr, který se upne na stůl frézky a na něj bude upnut obrobek. Stacionární dynamometr pracuje na principu piezoelektrického jevu a měří síly na obrobku. Tento dynamometr umožňuje změřit pasivní síly, normálové síly a posuvové síly. Existuje i rotační dynamometr, který měří síly jen na nástroji, konkrétně moment vřetena a pasivní síly [33].

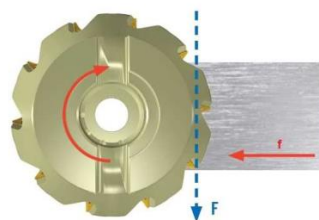
Na obr. 31 je zobrazen stacionární a rotační dynamometr, kde jsou znázorněny jejich jednotlivé měřené síly.



Obr. 31 Schéma měřených sil dynamometrem [33]

7.5 Řezné podmínky

Frézování bude probíhat v centrální poloze (obr. 32), kde osa obrobku bude shodná s dráhou nástroje (symetrický záběr). Tato strategie obrábění byla zvolena z důvodu snazšího vyhodnocení řezných sil. Při frézování nebude použita chladicí kapalina. Plánovaný rozsah řezných podmínek se bude měnit mezi čtyřmi hodnotami, a to posuv na zub (0,05; 0,1; 0,15; 0,2 mm) a řezná rychlost (60; 100; 150; 200 m.min⁻¹). Dalším parametrem při každé hodnotě bude hloubka řezu 1 mm.



Obr. 32 Centrální poloha dráhy nástroje [33]

8 Závěr

Úkolem bakalářské práce bylo zjistit a shrnout obecné informace o titanu, jeho vlastnostech a vyráběných slitinách. Pozornost byla věnována především výrobě titanu, rozdělení titanových slitin a technologickým vlastnostem, které způsobují jeho těžkoobrobitelnost. Dále jsem identifikoval nejnovější trendy a nástroje určené pro obrábění za sucha titanové slitiny Ti6Al4V, zejména frézování. K těmto nástrojům jsou uvedené i doporučené řezné podmínky přímo od výrobců.

Přes svá pozitiva mají titanové slitiny jeden nedostatek, a to obtížnou obrobitelnost způsobenou jejich vlastnostmi. Vlastnosti způsobující jeho těžkoobrobitelnost jsou především nízká tepelná vodivost, nízký modul pružnosti, vysoká teplota tavení a chemická reaktivita. Při obrábění titanových slitin dochází k silnému zpevňování povrchové vrstvy a generování vysokých teplot, proto je důležitá pozitivní a ostrá geometrie břitu nástroje.

Mezi aktuálně nejpoužívanější nástroje pro frézování titanových slitin patří monolitní nástroje a frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami. Nástroje jsou v současnosti nejčastěji opatřeny povlaky TiAlN nebo AlTiN, které jsou schopné odolávat vysokým teplotám při obrábění. Na základě oslovení výrobců Sandvik Coromant, WNT a Seco tools mi byly doporučeny nástroje i řezné podmínky pro rovinné frézování titanové slitiny Ti6Al4V za sucha.

V poslední části práce jsem navrhnul a připravil experiment pro technologickou zkoušku, který bude dokončen v navazujícím studiu. Jednotlivé cíle experimentu jsem popsal v návrhové části. V rámci přípravy jsem vybral vyměnitelné břitové destičky kruhového tvaru s rozdílným úhlem čela a naplánoval rozsah řezných podmínek technologické zkoušky.

Výhoda kruhových destiček spočívá v úhlu nastavení, který je limitován axiální hloubkou řezu, a tím se snižuje jejich opotřebení ve tvaru vrubu. Opotřebení ve tvaru vrubu bývá nejčastějším problémem špatné kvality obrobené součásti a dochází ke snížení trvanlivosti břitu. Bude zkoušeno celkem šest různých typů kruhových destiček, a to pět typů od výrobce WNT a jeden typ od výrobce Sandvik Coromant.

Ve své bakalářské práci jsem splnil všechny předpokládané cíle popsané v zadání.

Seznam použité literatury

- [1] *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Editor Christoph LEYENS, editor M. PETERS. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. ISBN 3527305343.
- [2] SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada hutnické literatury.
- [3] *TITAN: Metalurgie neželezných kovů* [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.nom.wz.cz/KOVY/titan.html>
- [4] DONACHIE, Matthew J. *Titanium: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, 2000. ISBN 978-0-87170-686-7.
- [5] *Microstructure and properties of materials (Volume2)* [online]. World Scientific Publishing Company, 2000. s. 436 [cit. 2018-02-28]. ISBN 981-02-4180-1. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=1YhIDQAAQBAJ&hl=cs>
- [6] KARÁSEK, Jan. *Obrábění titanových slitin*. Fakulta strojního inženýrství, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Miroslav Piška.
- [7] *TOHO Titanium CO., LTD* [online]. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <http://www.toho-titanium.co.jp/en/products/sponge.html>
- [8] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
- [9] SEDLÁČEK, Vladimír. *Únava hliníkových a titanových slitin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [10] BENEŠ, Libor. *Slitiny titanu* [online prezentace]. ČVUT, [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/05_Slitiny%20Ti.ppt
- [11] *ČZ a.s.* [online]. Strakonice: ČZ, [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <http://www.czas.cz/?pageid=20103&subid=3>
- [12] *TMS Titanium* [online]. 2013 [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://tmstitanium.com/the-lockheed-sr-71-blackbird/>
- [13] NESLUŠAN, Miroslav a Andrej CZÁN. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-933-4.
- [14] FÜRBAACHER, Ivan. *Lexikon technických materiálů: se zahraničními ekvivalenty : kovy : plasty : keramika : kompozity*. Praha: Verlag Dashöfer, 1998. ISBN 80-86229-02-5.
- [15] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.

[16] ŽÁK, Jan, Bohumil BUMBÁLEK a Radko SAMEK. *Speciální letecké technologie*. Brno: Československá redakce VN MON, 1990.

[17] BUMBÁLEK, Bohumil, Petr VALA a Zdeněk NOVÁK. Vlastnosti povrchové vrstvy slitiny titanu VT6 a VT8. Brno, září 1988. Technická zpráva. Výzkumný ústav 070 Brno. Vedoucí práce Bohumil Bumbálek

[18] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

[19] MIKOVEC, Miroslav. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů: určeno pro technology a konstruktéry*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada strojírenské literatury.

[20] *Technická příručka obrábění: soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů: příručka firmy Sandvik Coromant*. Praha: Sandvik Coromant, 2005.

[21] *Technika a trh* [online]. ISCAR, 2010 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/obrabeni/obrabeni-titanu>

[22] *TITANIUM COATINGS TiN - TiCN - TiAlN - AlTiN* [online]. Hannibal Carbide Tool [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.hannibalcarbide.com/technical-support/titanium-coatings.php>

[23] *Prášková metalurgie* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/praskova_metalurgie.pdf

[24] *Současnost a trendy povlakování technologií PVD* [online]. MM Spektrum, 2003 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>

[25] *Problematika obrábění titanových dílu* [online]. MM Spektrum, 2012 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-obrabeni-titanovych-leteckych-dilu.html>

[26] *Evoluce v trochoidním frézování* [online]. MM Spektrum, 2016 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/evoluce-v-trochoidnim-frezovani.html>

[27] *Výkonové frézování* [online]. MM Spektrum, 2014 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vykonove-frezovani.html>

[28] Sousedné, nesousedné frézování. In: *Zozei* [online]. [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <http://zozei.sssebrno.cz/userdata/imagelibrary/upload/eelni-frezovani.jpg>

[29] *Suché frézování materiálu Ti6Al4V vysokými rychlostmi* [online]. MM Spektrum, 2006 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialu-ti6al4v-vysokymi-rychlostmi.html>

- [30] *CoroMill 419* [online]. Sandvik, [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_419/
- [31] *Nástrojové třídy a břitové destičky pro frézování titanu a žárovzdorných slitin (HRSA)* [online]. Sandvik [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/milling-inserts-grades-titanium-hrsa/>
- [32] *Sandvik ecbook* [online]. Sandvik, 2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: http://sandvik.ecbook.se/SE/en/Supplement_18_1/
- [33] PADEVĚT, Václav. *Obrábění titanových slitin*. Fakulta strojní, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Pitrmuc.
- [34] *FRÉZY S VYMĚNITELNÝMI DESTIČKAMI* [online]. WNT [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.wnt.com/cz/nastroje/frezovani.html>
- [35] *WNT Katalog 2016–14 Frézy s vyměnitelnými destičkami* [online]. WNT, 2016 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.wnt.com/cz/download.html>
- [36] *Monolitní karbidové frézy* [online]. 2018 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://usercontent.azureedge.net/Content/UserContent/Documents/021575.pdf>
- [37] *QUATTROMILL - 4 ŘEZNÉ HRANY, JEDNOSTRANNÉ DESTIČKY* [online]. Seco tools [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.secotools.com/#article/m_6962
- [38] *NOVÉ FRÉZOVACÍ TŘÍDY SECO MS2050 OPTIMALIZOVANÉ PRO OBRÁBĚNÍ TITANU* [online]. 2015 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/#?terms=ms2050>
- [39] *Katalog a technický průvodce 2018* [online]. Seco tools, 2018 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/#article/84570>
- [40] SANDVIK, Application notes, Titanium machining
- [41] *Sandvik coromant: Moderní metoda soustružení náhrad kyčelního kloubu pomocí kruhových břitových destiček* [online]. [cit. 2018-06-30]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/medical/advancesinmedicine/pages/default.aspx>
- [42] *Fermat machinery* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <http://www.fermatmachinery.com/pouzite-stroje/obrabeci-centrum/vertikalni/mcv-500-cs-161832/>

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Titanová houba [4]</i>	- 13 -
<i>Obr. 2: Schéma výroby titanu Krollovou metodou [3]</i>	- 14 -
<i>Obr. 3: Zařízení pro výrobu titanu podle Krolla [3]</i>	- 14 -
<i>Obr. 4: Titanový ingot s vysokou čistotou [7]</i>	- 17 -
<i>Obr. 5: Krystalické mřížky fází alfa a beta [1]</i>	- 18 -
<i>Obr. 6: Turbodmychadlové kolo [11] a letoun „Blackbird“ [12]</i>	- 19 -
<i>Obr. 7: Základní druhy binárních rovnovážných diagramů [8]</i>	- 20 -
<i>Obr. 8: Mikrostruktura titanových slitin [13]</i>	- 23 -
<i>Obr. 9: Fázový diagram pro kalení titanových slitin z oblasti β nebo $\alpha+\beta$ [8]</i>	- 24 -
<i>Obr. 10: Segmentová tříška [12]</i>	- 27 -
<i>Obr. 11: Utváření kořene třísky slitiny Ti6Al4V [17]</i>	- 27 -
<i>Obr. 12: Znázornění oblasti plastických deformací v kořenu třísky [18]</i>	- 27 -
<i>Obr. 13: Teplotní pole při obrábění uhlíkové oceli a titanové slitiny [19]</i>	- 28 -
<i>Obr. 14: Plastická deformace břitu [20]</i>	- 29 -
<i>Obr. 15: Tvorba nárůstku [20]</i>	- 29 -
<i>Obr. 16: Hřbetní opotřebení VB [20]</i>	- 29 -
<i>Obr. 17: Čelní opotřebení KT [20]</i>	- 29 -
<i>Obr. 18: Attritor-kulový mlýn [23]</i>	- 32 -
<i>Obr. 19: Dráha nástroje při trochoidním frézování [26]</i>	- 33 -
<i>Obr. 20: Stopková fréza pro trochoidní frézování [26]</i>	- 34 -
<i>Obr. 21: Sousedné a nesousedné frézování [28]</i>	- 35 -
<i>Obr. 22: Závislost opotřebení na době obrábění za sucha [29]</i>	- 36 -
<i>Obr. 23: Doporučená fréza CoroMill 419 [30]</i>	- 37 -
<i>Obr. 23: Vyměnitelné břitové destičky typu 419R a RCKT [32]</i>	- 38 -
<i>Obr. 24: Doporučená fréza A 2510 RS [35]</i>	- 38 -

<i>Obr. 25: Vyměnitelné břitové destičky různých tvarů [35]</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Obr. 26: Monolitní karbidové frézy řady JHP [36].....</i>	<i>- 40 -</i>
<i>Obr. 27: Univerzální čelní fréza QuattroMill [37].....</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Obr. 28: Vyměnitelná břitová destička typu SEEX [39].....</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Obr. 28: Limitovaná hloubka řezu při úhlu nastavení 45° [40].....</i>	<i>- 43 -</i>
<i>Obr. 29: Vliv úhlu nastavení a posuvu na zub při obrábění Ti6Al4V [40].....</i>	<i>- 43 -</i>
<i>Obr. 30: Přehled utvářečů třísek kruhových destiček [35]</i>	<i>- 44 -</i>
<i>Obr. 31 Schéma měřených sil dynamometrem [33]</i>	<i>- 45 -</i>
<i>Obr. 32 Centrální poloha dráhy nástroje [33]</i>	<i>- 45 -</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 1. Druhy, vlastnosti a použití chemicky čistého titanu [8]</i>	<i>- 19 -</i>
<i>Tab. 2. Vybrané tvářené slitiny titanu [8]</i>	<i>- 21 -</i>
<i>Tab. 3. Tepelné zpracování slitiny Ti-Al6-V4 [14].....</i>	<i>- 23 -</i>
<i>Tab. 4. Porovnání vlastností titanu s ocelí [16]</i>	<i>- 25 -</i>
<i>Tab. 5. Shrnutí vlastností nejpoužívanějších povlaků [22].....</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Tab. 6. Porovnání standardního a trochoidního frézování drážky [25].....</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Tab. 7. Geometrie VBD 419R-1405M-PM [32]</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Tab. 8. Doporučené řezné podmínky k VBD 419R-1405M-PM S30T</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Tab. 9. Geometrie RCKT 12 04 M0-PM [32].....</i>	<i>- 38 -</i>
<i>Tab. 10. Geometrie doporučených VBD k nástrojům od výrobce WNT [35].....</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Tab. 11. Doporučené řezné podmínky k různým tvarům VBD [35]</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Tab. 12. Geometrie monolitních karbidových fréz řady JHP [36].....</i>	<i>- 40 -</i>
<i>Tab. 13. Doporučené řezné podmínky k monolitním frézám řady JHP</i>	<i>- 40 -</i>
<i>Tab. 14. Geometrie VBD SEEX1204AFN-M10 MS2050 [39].....</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Tab. 15. Doporučené řezné podmínky k VBD SEEX1204AFN-M10 MS2050.....</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Tab. 16 Technické parametry obráběcího centra MCV 500 [42]</i>	<i>- 42 -</i>
<i>Tab. 17 Geometrie kruhových destiček pro experiment [35]</i>	<i>- 44 -</i>