



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Obrábění titanových slitin

Machining of titanium alloys

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Václav PADEVĚT

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Obrábění titanových slitin vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady, které jsou uvedené v seznamu citací.

V Praze dne:

.....



Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi, za trpělivost, rady a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky.

Touto cestou bych rád vyjádřil poděkování i své rodině, která mi při studiu a tvorbě bakalářské práce byla velkou oporou.



Anotace

Tato bakalářská práce pojednává o slitinách titanu a jeho obrábění, především frézování. Jsou zde shrnuty obecné vlastnosti titanu a jeho slitin. V rešeršní části jsou uvedeny některé frézovací nástroje s doporučenými řeznými podmínkami od výrobců a již zjištěné poznatky z frézování. Praktická část se zabývá zkoumáním řezných sil při různých řezných podmínkách při použití metody suchého frézování.

Klíčová slova

Titan, slitiny titanu, obrábění, nástroje, vlastnosti materiálu, frézování

Abstract

This bachelor thesis deals with titanium alloys and their machining, especially milling. It summarizes the general properties of titanium and its alloys. In the research section there are some milling tools with recommended cutting conditions from the manufacturers and the findings from milling. The practical part deals with the examination of cutting forces under different cutting conditions using dry milling method.

Key words

Titanium, titanium alloys, machining, tools, properties of the material, milling



Obsah

Úvod	- 8 -
1 Titan.....	- 9 -
1.1 Výroba čistého titanu.....	- 9 -
1.2 Vlastnosti titanu.....	- 10 -
1.2.1 Krystalová struktura	- 10 -
1.2.2 Fyzikální, mechanické a technologické vlastnosti.....	- 11 -
1.3 Slitiny titanu.....	- 11 -
1.3.1 Rozdělení.....	- 11 -
1.3.2 Slitiny α	- 12 -
1.3.3 Slitiny $\alpha+\beta$	- 13 -
1.3.4 Slitiny β	- 15 -
2 Obrábění	- 16 -
2.1 Obrobitelnost.....	- 16 -
2.2 Zásady obrábění	- 16 -
3 Frézovací nástroje.....	- 18 -
3.1 Výroba vyměnitelných břitových destiček	- 18 -
3.2 Nástroje firmy Guhring	- 19 -
3.2.1 Řezné podmínky	- 19 -
3.3 Nástroje firmy Seco.....	- 20 -
3.3.1 Řezné podmínky	- 20 -
3.4 Trochoidní frézování s nástrojem Iscar.....	- 21 -
4 Poznatky z frézování titanu	- 23 -
4.1 Vysokorychlostní frézování Ti6Al4V za sucha	- 23 -
4.2 Suché frézování slitiny Ti-6242S nástrojem s povlakem a bez	- 25 -
4.3 Měření silových účinků.....	- 26 -
4.4 Vysokorychlostní suché frézování slitiny Ti6Al4V	- 27 -
5 Suché frézování	- 31 -



5.1	Podmínky suchého frézování	- 31 -
5.2	Vyhodnocení řezných sil	- 32 -
5.3	Výsledné závislosti řezných sil	- 35 -
	Závěr	- 39 -
	Seznam citací:	- 41 -

Úvod

Téma obrábění jsem si vybral kvůli mému kladnému vztahu k výrobním technologiím, a protože mám možnost uplatnit poznatky, které jsem získal studiem teorie. Technologie obrábění umožňuje rychlou zpětnou vazbu a možnost provést celou řadu experimentů změnou řezných podmínek.

Konkrétně obrábění titanových slitin jsem si vybral, protože titan, jako materiál, je obecně známý, ale technologie obrábění titanových slitin již tak známá není, protože firmy ji dost často považují za své know-how, které je třeba chránit. V experimentální části jsem se rozhodl prozkoumat možnosti suchého frézování. Jelikož je dnes kladen obecný tlak na ekologičnost obrábění standartních materiálů – suché obrábění.

Obrábění titanových slitin je velmi žádané především v odvětvích kosmického, vojenského i civilního letectví a rovněž tak v oblasti medicínského průmyslu, kde se tento materiál hojně uplatňuje. Díky svým pozitivním vlastnostem spojených s nízkou hmotností, vysokou pevností a schopností odolávat korozním prostředím je možnost použití v těchto oborech velická. Problematika obrábění těchto slitin však spočívá v nízké tepelné vodivosti, která se v tomto ohledu bere jako negativní, jelikož způsobuje špatný odvod tepla při obrábění.

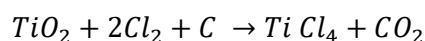
Cílem této práce je zjistit jakými vlastnostmi titan a jeho slitiny disponuje a co je s nimi v souvislosti s obráběním spojeno. Rovněž si práce klade za cíl dohledat moderní způsoby obrábění, zejména frézování, najít pro ně vhodné nástrojové materiály a stanovit jejich řezné podmínky. V praktické části se určí vliv měnících se řezných podmínek na velikost řezných sil při suchém frézování.

1 Titan

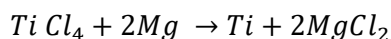
Jedná se o jeden z nejdůležitějších prvků, který se používá ve všech možných odvětvích konstrukcí pro své velmi dobré vlastnosti. O jeho objevení se zasloužil mineralog a chemik William Gregor v roce 1791, když zkoumal magnetický písek z místní řeky v Cornwallu v Anglii. Podařilo se mu oddělit „černý písek“, který je znám jako ilmenit. Nezávisle na Gregorovi objevil chemik Martin Heinrich Klaproth maďarský minerál nazývaný rutil. Oba dva z těchto prvků izolovali oxid neznámého prvku, jenž nazvali Titan [1].

1.1 Výroba čistého titanu

Nejvíce rozšířený postup, jak vyrobit čistý titan, je Krollova metoda. Podstatou je oxid titaničitý, který se nachází v rutilu (až 90 % TiO_2) a ilmenitu (40-60 % TiO_2). Tento oxid nejprve v reakci s chlorem a uhlíkem vytvoří chlorid titaničitý a oxid uhličitý. To se děje v šachtové elektrické peci [2].



Takto získaný chlorid reaguje s hořčíkem a vytvoří takzvanou titanovou houbu a chlorid hořečnatý.



Z vytvořené titanové houby se musí odstranit nečistoty. Na to se v nejvíce případech používá destilování ve vakuu s následným čištěním inertním plynem. Je to sice dražší metoda než například ošetřování kyselinou, ale dosahuje se lepších, nižších, hodnot znečištění nežádoucími prvky jako jsou hořčík, vodík a chlor [3].



Obrázek 1 - Typický vzhled titanové houby [3]

Na čistotu houby má také vliv, kde byla vytěžena prvořadá ruda, ze které došlo k výrobě. Je samozřejmé, že v různých částech světa firmy vyrábějí titanovou houbu

s různou čistotou, právě podle toho, kde získali potřebnou rudu. Mezi hlavní znečišťující prvky náleží dusík, kyslík, křemík, uhlík a železo [3].

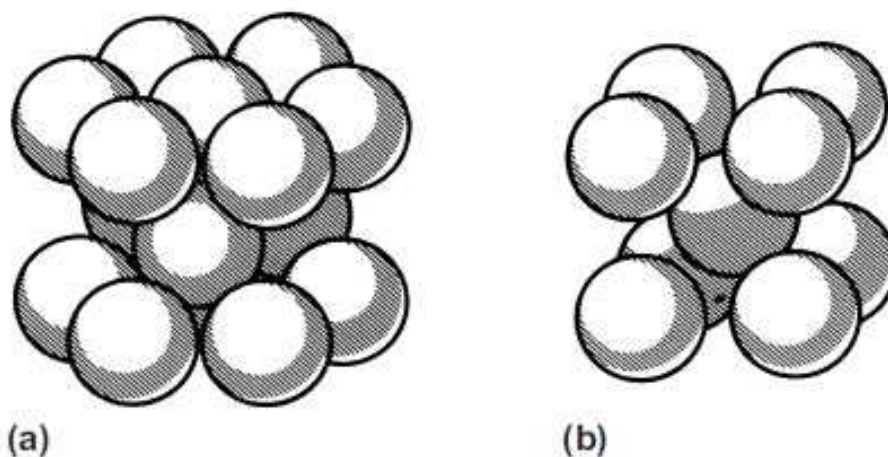
Takto čistý titan se ale v konstrukční praxi příliš často nepoužívá. Nejvíce se používá titanových slitin s různým množstvím různých legujících prvků, které se přidávají při výrobě a podstatně mění mechanické a technologické vlastnosti titanové slitiny.

1.2 Vlastnosti titanu

V této kapitole se práce bude zabírat tím, jaké vlastnosti má čistý titan a jeho slitiny a co z toho vyplývá za vlastnosti, které mohou být žádoucí i nežádoucí.

1.2.1 Krystalová struktura

Titan stejně jako mnoho ostatních kovů má více krystalografických struktur, z nichž každá je dosažitelná při různých teplotách. Čistý kov, stejně jako jeho většina slitin, krystalizuje za nízké teploty v šesterečně těsně uspořádané krystalické mřížce. Tuto fázi nazýváme α -titan (α -fáze). Mezní teplota, kdy dojde k další přeměně mřížky, je $882\pm 2^\circ\text{C}$. Při této teplotě se α -titan změní na β -titan (β -fázi), který má již krychlovou prostorově středěnou mřížku. Tato fáze je zastoupená až do teploty tání, která je 1668°C . To má za následek změnu technologických a některých mechanických vlastností [1].



Obrázek 2 - Krystalová mřížka: a) α -fáze b) β -fáze [3]

Z toho vyplývá, že přidáním různých legujících prvků, které by zvětšovaly oblasti α -fáze nebo β -fáze, lze vytvořit slitiny obsahující různý poměr těchto dvou fází. Tyto prvky označujeme α -stabilizující a β -stabilizující.

1.2.2 Fyzikální, mechanické a technologické vlastnosti

Mezi jeho pozitivní vlastnosti patří především odolnost proti korozi. Ta je způsobená tím, že jeho povrchová vrstva rychle oxiduje a vytváří pasivační vrstvu, která rychle vzniká již při pokojové teplotě. Má velmi dobrou odolnost proti atmosférické korozi, proti mořské vodě a také organickým kyselinám. Vyznačuje se hustotou 4500 kg/m^3 a pevností zhruba 250 N.mm^{-2} , což z něj činí lehký a pevný kov, jehož pevnost jde značně zvýšit tvářením za studena až na 800 N.mm^{-2} . Je dobře tvárný za tepla, při teplotách okolo $900 \text{ }^\circ\text{C}$, kdy se nachází v β -fázi. K dalším vlastnostem rozšiřující jeho použití přispívá relativně malý součinitel tepelné roztažnosti a malá tepelná vodivost, které mají za následek dobrou svařitelnost, která je podmíněná intenzivní ochranou atmosférou z argonu. Největším nedostatkem pro titan je velice špatná obrobitelnost [6].

1.3 Slitiny titanu

V dnešní době je známo více jak 100 titanových slitin. Největší odvětví, kde dojde k jejich využití je letecký a raketový průmysl (80 %) společně se součástkami do automobilů a částí jízdních kol. Největším uživatelem titanu je ovšem armáda. [7] Americké letectvo má ve svém letovém parku průzkumný letoun vyrobený jen ze slitin titanu. Předpokládá se, že náhradou hliníkových slitin slitinami titanu lze ušetřit až 25 % výsledné hmotnosti [6]. Jedná se o model Lockheed SR-71, přezdívaný jak Blackbird.



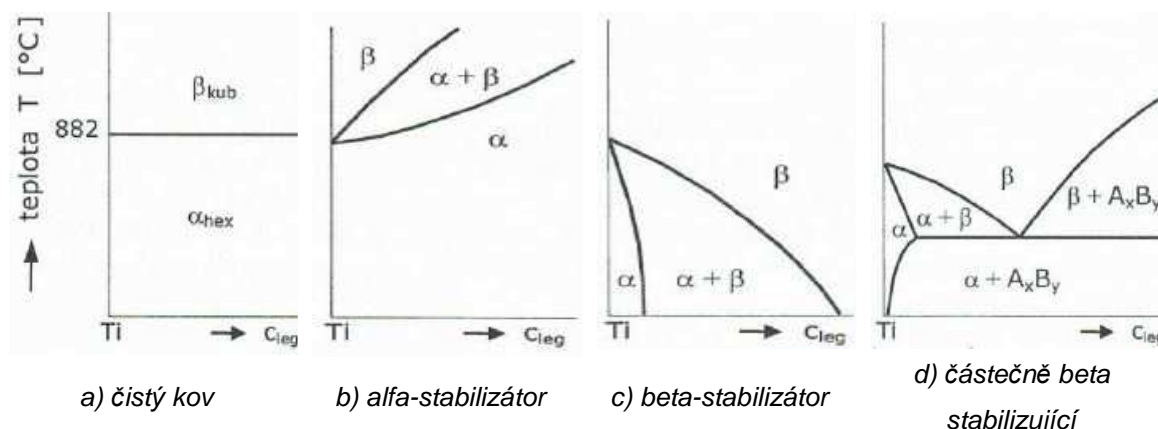
Obrázek 3 - Letoun s celo-titanovou konstrukcí [8]

1.3.1 Rozdělení

V zásadě jde o zjištění, jaká struktura je v tuhé fázi. Jako u čistého kovu můžeme mít α slitinu s mřížkou H12. Dále máme β slitiny, u kterých dosahujeme snížení teploty polymorfni přeměny. A jejich kombinace teda $\alpha+\beta$ slitiny.

Výsledné složení závisí na použití legujících prvků, které mají různou rozpustnost v jednotlivých fázích a tím ovlivňují jejich transformaci. Dle toho, jestli prvek rozšiřuje fázi β nebo α je dělíme na:

- *Rozšiřující oblast α* – Al, O, N, C, které zvyšují teplotu fázové přeměny. Většina z nich jsou ale považovány za nečistoty, u kterých je třeba minimalizovat jejich výskyt. Z toho důvodu je použitelný pouze hliník.
- *Částečně rozšiřující oblast β* – Mn, Fe, Cr, Si, Cu, Ag. V tomto případě vzniká eutektoid tvořený tuhým roztokem alfa a intermetalická fáze bohatá na legující prvek. Tyto přídavné prvky se o trochu více rozpouštějí ve fázi β než α .
- *Úplně rozšiřující oblast β* – Mo, Nb, Ta, V. Při použití těchto prvků dochází ke snížení teploty fázové přeměny v závislosti na množství legury. Takto vzniklá fáze beta je stabilní i při pokojové teplotě [5, 6].



Obrázek 4 - Vliv legujících prvků na binární rovnovážný diagram [7]

1.3.2 Slitiny α

Slitiny α se mohou jinak nazývat super alfa slitiny. Svým složením a krystalovou strukturou jsou podobné spíše čistému titanu. Mezi své legující prvky zahrnují převážně alfa stabilizátory. Nejvíce hliník, ale je možné použít i zirkon. Takto vytvořená směs kovů má vysokou pevnost za tepla, tím pádem dobře odolává proti tečení. Má dobré slévárenské a svařitelné vlastnosti, avšak je snižená plasticita [3, 4]. Hlavní zástupci se svými vlastnostmi jsou uvedeny níže v tabulce 1.

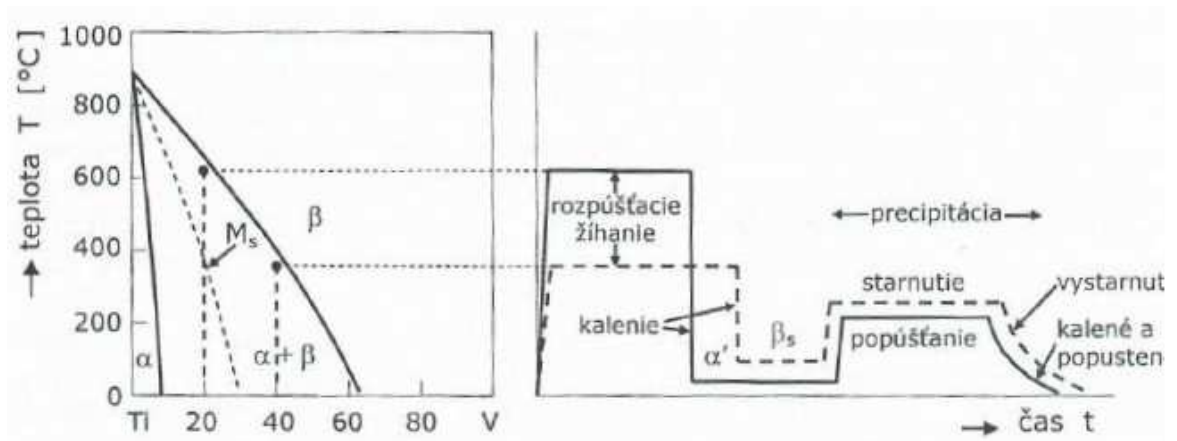
Tabulka 1 – Vlastnosti α slitin [6]

Slitina	R_e [N.mm ⁻²]	R_m [N.mm ⁻²]	A [%]
TiAl8 Zr8NbTa	860	930	15
TiAl6Zr4V1	950	980	12
TiAl8Mo1M	930	1010	10
TiAl5Sn2,5	820	860	>12

Tyto slitiny se používají pro výrobu svařitelných výkovek a plechů, dále jako lopatky do rotačních strojů, například leteckých kompresorů a parních turbín, u kterých je omezena teplota do 570 °C [7].

1.3.3 Slitiny $\alpha+\beta$

Slitiny alfa a beta jsou nejvíce používané slitiny. Mezi jejich zástupce patří nejrozšířenější slitina Ti6Al4V. Jejich vlastnosti jsou ovlivňovány množstvím (10–12 %) a typem přísadových prvků ze skupiny beta stabilizátorů a následným tepelným zpracováním. Nicméně i to je ovlivněno množstvím legur. Při použití vytvrzování nebo kalení s následným popouštěním dojde ke zvýšení pevnosti materiálu. Pokud bychom chtěli tepelně zpracovávat i slitiny, které mají málo legujících prvků, a ještě se v jejich struktuře nachází velké množství α -fáze, nedosáhneme tím žádaného zlepšení mechanických vlastností [4, 7].

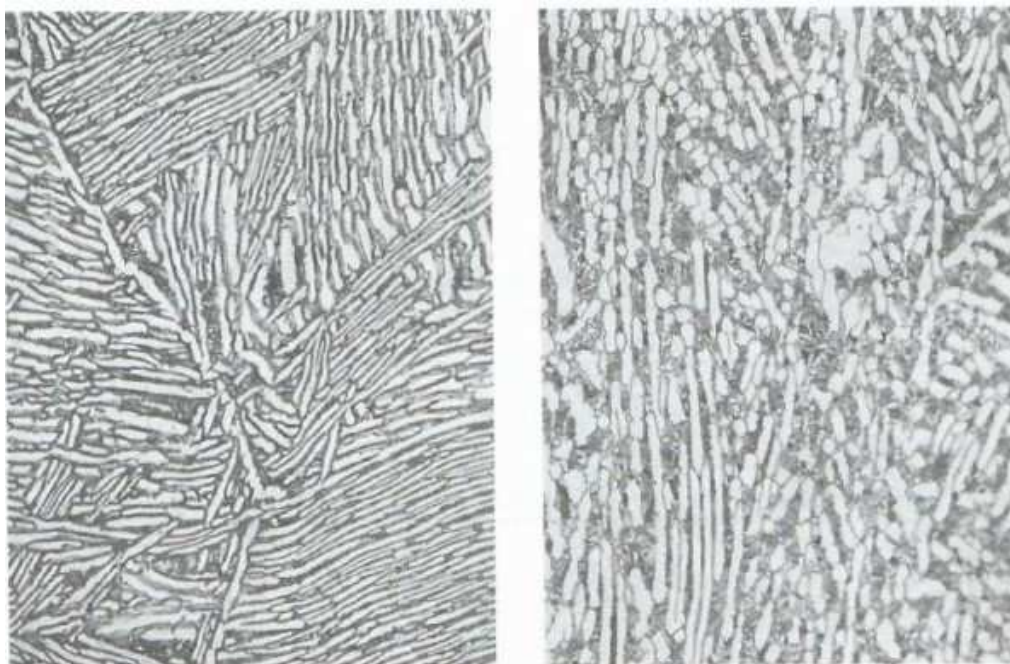


Obrázek 5 - Průběh tepelného zpracování [7]

Na obrázku 5 je zobrazen průběh tepelného zpracování pro slitinu s menším i větším obsahem legujících prvků. Pro větší obsah přísadového prvku (asi 40 % V, jak je uvedeno na obrázku) je lepší použít metodu vytvrzování, protože se nepodaří klesnout pod

teplotu začátku tvorby martenzitu – M_s . Při rychlém ochlazení vznikne přesycený tuhý roztok, ze kterého se pak při následném stárnutí uvolní precipitáty, které budou zvětšovat pevnost. Naopak pro menší koncentrace (20 % V) lze již použít kalení s následným popouštěním. U této metody protne křivku M_s a dojde k tvorbě martenzitické struktury s tuhým roztokem [7].

Obrázek 6 představuje dvě slitiny s podobným složením, kde je vidět, že je možné docílit různých struktur zrn. Vlevo jsou jehlicovitá zrna, která připomínají martenzit a vpravo jsou zobrazená rovnoosá zrna.



Obrázek 6 - Struktura titanové slitiny VT9 a VT3 [6]

V tabulce 2 jsou uvedeny mechanické vlastnosti typických $\alpha+\beta$ slitin a následně v tabulce 3 jsou detailněji uvedené vlastnosti nejvíce používaného materiálu.

Tabulka 2 - Vlastnosti $\alpha+\beta$ slitin [6]

Slitina	R_e [N.mm ⁻²]	R_m [N.mm ⁻²]	A [%]
TiAl6V	1030	1180	6-16
TiAl5Cr3Fe1	1140	1340	6-8
TiAl4Mo4V4	1030	1170	10-12
TiAl7Mo4	1210	1310	6

Tabulka 3 – Vlastnosti TiAl6V4 [6]

	Žíhaná				Vytvrzená			
	Teplota [°C]							
	20	350	400	450	20	350	400	450
HB	255-341				290-369			
Ráz. Houževnatost [J.cm ⁻²]	40				30			
Mez únavy [N.mm ⁻²]	530	-	-	-	560	450	440	-
Mez pevnosti tečení [N.mm ⁻²]	-	540	360	140	-	630	360	-

Použití je především v leteckém průmyslu do teploty 400 °C na konstrukce letadel, čerpadel, dále do teploty -200 °C pro kryogenní součástky. Takže tyto slitiny mají velmi širokou možnost uplatnění [7].

1.3.4 Slitiny β

Díky jejich krystalické struktuře (K8) jsou lépe tvářitelné za studena než jejich předchůdci. Své největší využití mají při nižších teplotách, jelikož mají menší pevnost při vyšších teplotách. Jejich pevnost je možné zvýšit až na hodnoty okolo 1500 N.mm⁻² za pomoci tepelného zpracování. Proto se o ně projevuje stále větší zájem, jelikož jde o nejpevnější slitiny za nejnižší cenu [5,6].

2 Obrábění

Jedná se o nezbytnou součást výrobního postupu. Výsledný obrobek může být zpracováván všemi možnými technologiemi, nejvíce se ale využívá soustružení a frézování.

2.1 Obrobitelnost

Při uvažování běžných metod obrábění, jako je soustružení, vrtání, frézování apod., se setkáváme s několika problémy, které vyplývají z jedinečných vlastností obráběného materiálu. Mezi tyto vlastnosti patří:

- Malá tepelná vodivost titanu, která je $11,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, má za následek velkou akumulaci tepelné energie při tření mezi nástrojem a obrobkem, která se špatně odvádí. V porovnání s nerezovou ocelí, která má tepelnou vodivost přibližně $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a uhlíkovou ocelí, jejíž tepelná vodivost je zhruba $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. To má nepříznivý vliv na trvanlivost břitu nástroje, jelikož všechna tato energie se soustředí na malou plochu [3].
- Relativně malá tvrdost a větší schopnost chemické reakce způsobuje zvýšenou možnost zadírání a vytrhávání materiálu nástrojem, k čemuž přispívá i velký součinitel tření samotného titanu.
- Nízký modul pružnosti zapříčiňuje znatelné odpružení při zatížení. To vyvolá odklonění obrobku od nástroje při obrábění.

Ze souhrnu těchto ovlivňujících vlastností vyplývá, že titan a jeho slitiny jsou těžko obrobitelné. V porovnání frézování a soustružení je více problematické právě frézování kvůli zadírání [1].

2.2 Zásady obrábění

Jak je uvedeno, titan je těžko obrobitelný materiál, a proto pro něj platí několik zásad, které by se měly dodržovat, pokud chceme efektivně ubírat materiál a tím vytvořit finální výrobek, za předpokladu maximální životnosti nástroje.

Nízká řezná rychlost: Teplotu nástroje nejvíce ovlivňuje právě řezná rychlost. Pokud ji budeme držet na nízké úrovni, snížíme tím teplotu břitu nástroje a tím zvýšíme jeho životnost. Toto platí pro všechny slitiny i čistý kov.

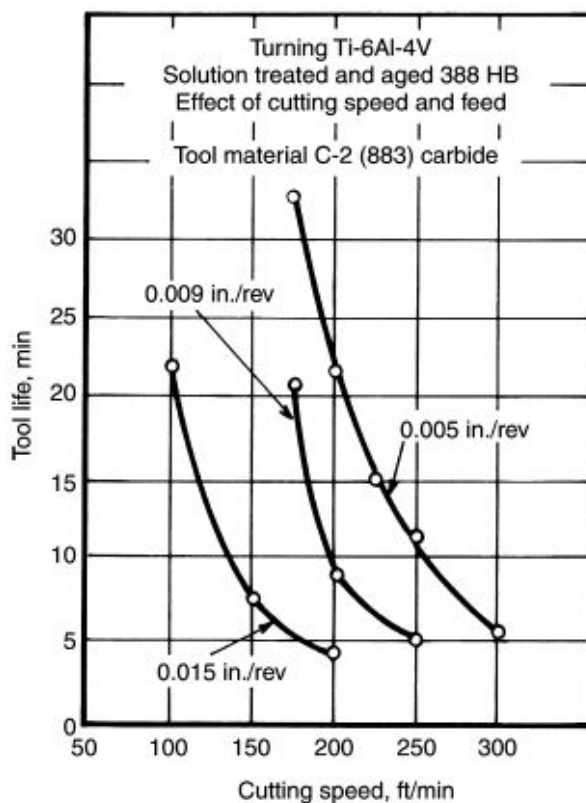
Nezastavovat, pokud je nástroj a obrobek v kontaktu: V případě, že necháme nástroj a obrobek v kontaktu při spuštěném procesu řezání, ale s absencí posuvu, zvyšuje se tím zadírání, které může mít za následek zničení nástroje.

Vysoké hodnoty posuvu a záběru: Jelikož velikost posuvu daleko méně ovlivňuje teplotu v místě řezu, je vhodné mít tuto hodnotu, co možná největší. Velikost třísky, by měla být také větší než velikost vrstvy, kde došlo ke zvýšení tvrdosti, vlivem předchozího obrábění.

Chladicí kapalina: Použití správné chladicí emulze pomůže snížit teplotu řezání, zlepšit odvod třísek a sníží řezné síly. Preferuje se použití emulze před minerálními oleji nebo vodním roztokem. Tato emulze by neměla obsahovat halogeny kvůli zvýšení korozního napadení, jinak by muselo dojít k důkladnému omytí.

Tuhost soustavy a ostrý nástroj: Oba požadavky jsou všeobecně potřebné i pro obrábění jiných materiálů. Tuhost soustavy nám zabraňuje chvění a umožňuje přesný řez, stejně tak jako ostrý nástroj, který by měl mít velký úhel čela a nízkou drsnot na čele nástroje, aby se na něho třísky nelepily [3].

Na následujícím obrázku 7 je zobrazena životnost nástroje při soustružení slitiny Ti-6Al-4V v závislosti na řezné rychlosti a posuvu.



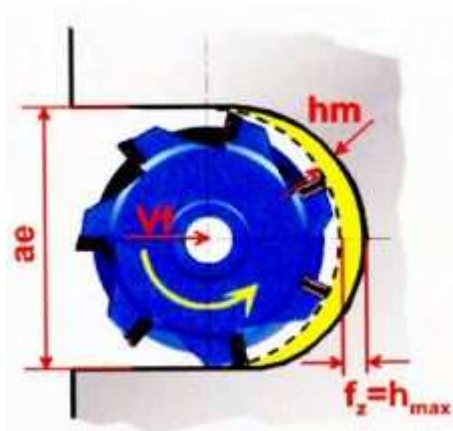
Obrázek 7 - Životnost nástroje [3]

3 Frézovací nástroje

Pro frézování titanu se používají monolitní frézy nebo frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami. Jedná se především o nástroje vyráběné metodou práškové metalurgie a následným spékáním, někdy se používá ještě chemické povlakování, kdy se na destičku nanese tenká vrstva nebo vrstvy dalšího materiálu, které zlepšují vlastnosti nástroje.

Pokud frézujeme titanovou slitinu nástrojem ze slinutých karbidů, není toto povlakování nutné, jelikož titan s karbidy chemicky nereaguje. Nicméně pokud se již volí povlakovaná destička je lepší, aby byla povlakována metodou PVD, která zachová ostřejší hranu (než CVD) [7].

Jelikož budou následně používány určité parametry frézování, pro lepší představu je na obrázku 8 zobrazen záběr čelního frézování, kde jsou nejlépe vidět velikosti třísek, záběrů a posuvu. Velikost záběru je okótován rozměrem a_e , hloubka záběru, což je vlastně hloubka drážky se označuje a_p (jedná se o rozměr „do papíru“). Posuv na zub f_z a průměrná tloušťka třísky h_m .



Obrázek 8 - Frézování drážky čelním frézováním [22]

3.1 Výroba vyměnitelných břitových destiček

Jak již bylo zmíněno, výroba se provádí technologií zvanou prášková metalurgie. Jedná se o způsob výroby, kdy je prakticky nemožné jinak vyrobit směs dvou kovů, jelikož tyto dva kovy se spolu nedají slévat. Je nutné je tedy spojit jako směs dvou nadrcených prášků.

Nejprve je nutné smíchat dva kovy, ve formě granulátu. Takto smíchané kovy musíme rozmělnit. Může se to dělat mechanicky, chemicky nebo elektrochemicky.

Mechanická metoda nejčastěji využívá mlecí zařízení, které se nazývá attritor, do nějž je přidávána mlecí emulze. Do tohoto mlýnu se vkládají smíchané kovy, například karbid wolframu s příměsí kobaltového pojiva, ve formě granulátu, který se následným mletím změní na kovový prášek. Tato namletá směs se vystaví procesu sušení, díky kterému získáme lisovatelný granulát, který můžeme vylišovat do požadovaného finálního tvaru břitové destičky. Vylisovaný objekt má pevnost zhruba asi jako křída na psaní na tabuli. Aby nástroj získal svou finální pevnost a tvrdost, je nutné jej slinovat neboli spékat. Děje se tak ve slinovací peci. Pro zvýšení životnosti nástroje dochází ještě k chemickému povlakování. Vhodnější, pro náš obráběný materiál, je metoda PVD (physical vapour deposition), která využívá odpaření pevné látky v námi řízené atmosféře. Pomocí obloukového odpařování vytváříme kladné ionty, které jsou přitahovány záporným předpětím na budoucí nástroj. Ionty se po povrchu pohybují, spojují a vytváří celistvou vrstvu povlaku. Další opakování postupu umožňuje vzniknout vícevrstvému povlaku [10, 11].

Materiál povlaku se liší v závislosti na požadovaných vlastnostech a oblastech použití. Pro frézování titanu je vhodný povlak TiAlN, protože nereaguje s obráběným materiálem tak jako povlak TiN. Pevnost povlaku TiAlN je v rozmezí okolo $30 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a přispívá ke zlepšení řezných vlastností [9, 11].

3.2 Nástroje firmy Guhring

Tento výrobce doporučuje pro frézování titanových slitin monolitní karbidové frézy s povlakovanou vrstvou AlTiN, která prodlužuje životnost nástroje. Označení nástroje je RF 100 Ti. Je pravořezný se čtyřmi zuby s rozsahem průměru od 6 do 25 milimetrů. Vhodný pro frézování bez chlazení čili nasucho. Pro lepší odvod třísek je tvarován do šroubovice s úhlem stoupání 35-38° [12].



Obrázek 9 - Nástroj RF 100 Ti [12]

3.2.1 Řezné podmínky

Vhodné řezné podmínky, které jsou uvedeny v tabulce 4, jsou určeny pro operaci frézování kapes nepravidelného tvaru nástrojem s průměrem 12 mm do materiálu TiAl6V4.

Tabulka 4 - Řezné podmínky Guehring

Hloubka řezu a_p [mm]	Pracovní záběr a_e [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv na zub f_z [mm]
24	0,53	155	Do 0,18

Úběr materiálu, kterého s těmito podmínkami lze dosáhnout, je 36 cm³.min⁻¹. Trvanlivost pro operaci hrubování je přes 135 minut [14].

3.3 Nástroje firmy Seco

Tato firma doporučuje své nové vyměnitelné břitové destičky s povlakem MS2050, které mají universální povlak PVD, který zaručuje zlepšení žáruvzdornosti a eliminuje vznik nárustků na břitech, při frézování přilnavých materiálů, jako je titan. Tyto vlastnosti značně zvyšují trvanlivost nástroje. Je možné je používat na vícero frézách a tím pádem se zvětšuje možnost využití. Lze je použít na rohové, čelní i kopírovací frézování [15].



Obrázek 10 - Nástroje SECO [15]

3.3.1 Řezné podmínky

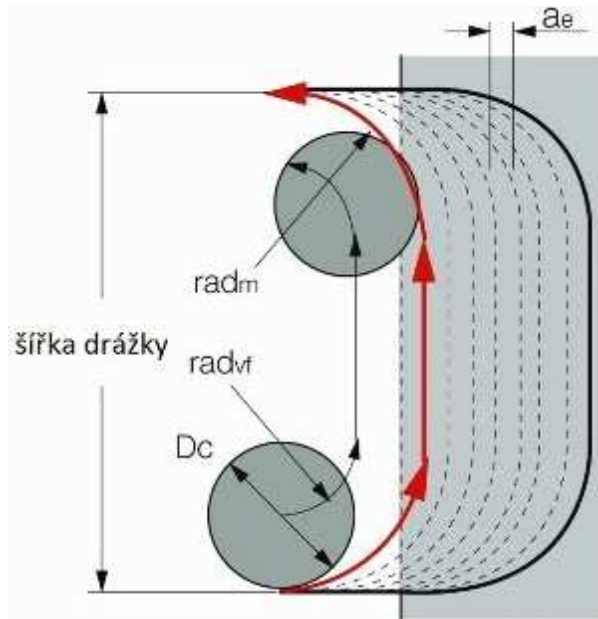
Určují se v závislosti na druhu frézovací operace a velikosti břitové destičky. Pro frézování slitiny TiAl6V4 nástrojem o průměru 12 mm jsou doporučené tyto podmínky.

Tabulka 5 - Řezné podmínky Seco [16]

a_p [mm]	1,7		
a_e/D [mm]	100%	30%	10%
f_z [mm/zub]	0,055	0,06	0,09
v_c [m/min]	42	55	65

3.4 Trochoidní frézování s nástrojem Iscar

Tato metoda je výhodná pro frézování drážek, avšak průměr nástroje musí být menší, než je velikost vyráběné drážky. To proto, aby se mohla naprogramovat dráha nástroje taková, jako je naznačená na obrázku 10. Takto zvolený postup výroby dovoluje použít až 80% posuvu, který je používán při běžném bočním frézování. Kdybychom chtěli frézovat drážku do plného materiálu, jsme nuceni použít pouze 20% této hodnoty posuvu.



Obrázek 11 - Trochoidní frézování [17]

Pro tento druh operace doporučuje výrobce nástrojů Iscar frézu Chatterfree, která je schopná ubírat materiál do hloubky $2x D$ do plného materiálu. Nástroj má karbid jakosti IC900 s povlakem TiAlN, který je nanesen metodou PVD.

Dříve bylo s programováním trochoidního frézování více potíží, jelikož softwary CAM nenabízely tuto funkci a programátor musel dráhu nástroje programovat ručně, tudíž se nevyužívalo tak často jako nyní, kdy je již tato metoda součástí softwaru a je možné ji tedy snáze naprogramovat a vyzkoušet na simulaci [17].

V následující tabulce jsou uvedeny rozdíly, kdy je použito standartní (do plného materiálu) a trochoidní frézování. Jakost karbidu byla IC900, obráběný materiál slitina titanu TiAl6V4 s nástrojem o průměru 16 milimetrů.



Tabulka 6 - Porovnání trochoidního frézování s běžným [17]

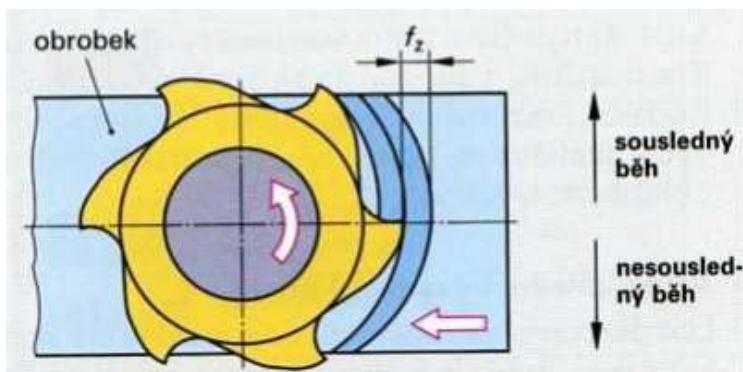
	Standartní frézování	Trochoidní frézování
v_c [m/min]	45	115
f_z [mm/zub]	0,04	0,12
a_p [mm]	12	22
a_e [mm]	12	1-1,5
Čas výroby	55 min	33 min

4 Poznatky z frézování titanu

Jelikož jde o složitou a náročnou operaci, zabývají se tím skupiny lidí, které zjišťují a posouvají hranice řezných podmínek tam, kde je to pro nás nejvýhodnější. Pozorují a porovnávají jaké situace, materiály a tvary VBD (vyměnitelných břitových destiček) nejvíce ovlivňují průběh frézování a tím pádem vliv na celkový výsledný obrobek. Výsledky se získávají cestou experimentů, které se zaměřují na minimální rozdíl vstupních podmínek a porovnávají rozdílné výsledné hodnoty, které jsou tímto ovlivněny.

4.1 Vysokorychlostní frézování Ti6Al4V za sucha

Za vysokorychlostní frézování se považuje ta operace, kdy se řezná rychlost pohybuje mezi 120 až 1000 m.min⁻¹. Tato rychlost platí pro slitiny titanu. Je jasné, že čím více se zvýší řezná rychlost, bude to mít za následek zmenšení trvanlivosti břitu nástroje. Proto je důležité stanovit řezné podmínky tak, aby byly co nejvíce produktivní. Na trvanlivost



Obrázek 12 - Sousedné a nesousedné frézování [18]

břitu má zásadně vliv metoda frézování, jestli se frézuje sousledně nebo nesousledně. V prvním případě jde tříska z maximální tloušťky do minimální a při nesousledném frézování je to naopak. Pro sousledné frézování platí, že při něm vzniká menší intenzita opotřebení a z toho vyplývající větší trvanlivost břitu. Avšak při tomto způsobu je velké riziko vniku rázů, které jsou velmi nežádoucí, jelikož je možné, že při nich dojde až k úplné destrukci břitu. U nesousledného frézování je zmenšená trvanlivost způsobena tím, že tříska jde z minima do maxima. Na počátku řezu břit stlačuje materiál pod sebe, což má za následek tvorbu tvrdé zpevněné vrstvy, která se hůře odstraňuje. Z toho důvodu má nesousledné frézování zhruba 3,5x menší trvanlivost než druhý způsob úběru materiálu [19].

Do tohoto experimentu vstupovaly dvě VBD, které měly stejný tvar, tolerance a utvařeče třísek (označení APXT11T3). Lišily se základním substrátem karbidu a materiálem povlaku. Nástroj A je určen pro obrábění žárovevných slitin Ti a Ni, má povlak z materiálu TiN a doporučenou řeznou rychlostí v rozmezí 30–100 m.min⁻¹. Nástroj B je doporučen pro frézování korozivzdorných ocelí s povlakem z materiálu TiAlN

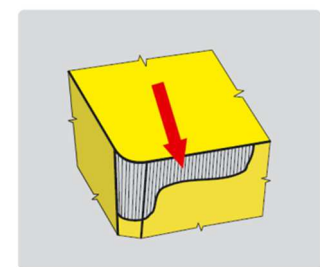
a řeznou rychlostí doporučenou v rozmezí 100-200 m.min⁻¹. Frézovalo se nesousledně se shodnými velikostmi třísek $a_p = 1,5$ mm a $a_e = 1,5$ mm. Posuv na zub byl volen v rozmezí 0,05-0,125 mm. Nástrojem byla dvoubřitá fréza o průměru 20 mm, poháněna vřetenem s maximálním výkonem 15 kW. Hodnotícím kritériem, který ukončuje experiment, je velikost opotřebení břitu $VB = 0,3$ mm. Optimální podmínky se volily pro maximální MRT, což je úběr materiálu, který se odebere za dobu trvanlivosti břitu, v závislosti na velikosti posuvu a řezné rychlosti [19].

Pro nástroj A je nejvhodnější volit co možná nejmenší posuv, jelikož bylo dokázáno, že při malém posuvu se odebere co možná nejvíce materiálu. Potvrzeno bylo také to, že s rostoucí řeznou rychlostí klesá trvanlivost břitu. Pro nástroj B vyplynulo, že je nejvhodnější volit posuv okolo hodnoty 0,1 mm, jelikož zde nástroj vykazuje největší množství ubraného materiálu v celém rozmezí rychlostí. Bylo stanoveno, že nástroj A odebere za nejvhodnějších podmínek maximálně 13 cm³ materiálu na jednu trvanlivost břitu, kdežto nástroj B odebere za jednu svou trvanlivost 43 cm³. Rozdíl ve prospěch nástroje B je skoro 3,5x větší než u nástroje A, z toho je určitá část způsobena jenom trvanlivostí břitu (asi jedna sedmina násobku) [19].

Obrázek 12 zobrazuje závislost opotřebení VB na době obrábění t za použití konstantní rychlosti řezu. Porovnávají se zde nástroje A a B s různou velikostí posuvu f_z (0,1; 0,075; 0,05 mm).



Obrázek 13 - Závislost opotřebení na době obrábění za sucha [19]



Obrázek 14 - Opotřebení nástroje VB [21]

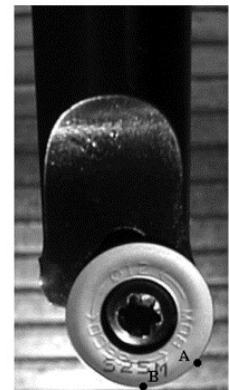
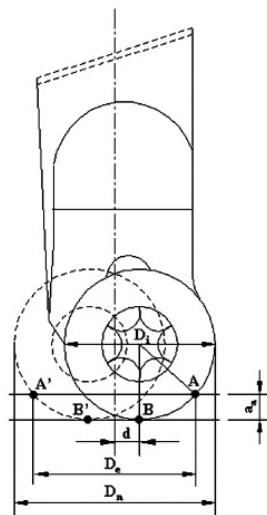
Na obrázku číslo 13 je vidět, co se myslí pojmem opotřebení VB. Jedná se o poškození břitu, kdy měříme výšku opotřebovaného povrchu na hřbetu nástroje, který je způsoben otěrem.

Z výsledků je možné určit, že pro vysokorychlostní frézování daného materiálu za sucha je lepší použít nástroj pro obrábění korozivzdorných ocelí s povlakem TiAlN ze slinutého karbidu skupiny M s jakostí M20 až M35 [19].

4.2 Suché frézování slitiny Ti-6242S nástrojem s povlakem a bez

Na tuto metodu frézování se klade stále větší důraz. Důvodem proč se tak děje jsou zvyšující se nároky na ekologickou výrobu a snižování ceny výroby. Ekologický požadavek vyplývá z pozůstatku chladicí kapaliny, kdy se jedná o nevhodný odpad výroby. Dále také to, že při chlazení se dostává do prostředí nevhodná mlha, která může zapříčinit horší zdravotní stav zaměstnanců.

Testovacím strojem je vertikální CNC frézka s maximálním výkonem 9 kW a maximálními otáčkami $10\,000\text{ min}^{-1}$. Testovaným nástrojem je VBD kulového tvaru s průměrem 12 mm. Díky excentrickému uložení destičky a rotaci frézy vznikne rotační průměr 16 mm. Nástroj A je definován jako nepovlakovaný slinutý karbid wolframu s kobaltovým pojivem s příměsí karbidů Ti, Ta a Nb. Nástroj B má stejný základní materiál, jen je ještě povlakován devíti vrstvami materiálu TiC a TiN o celkové tloušťce $10\ \mu\text{m}$. Řezné

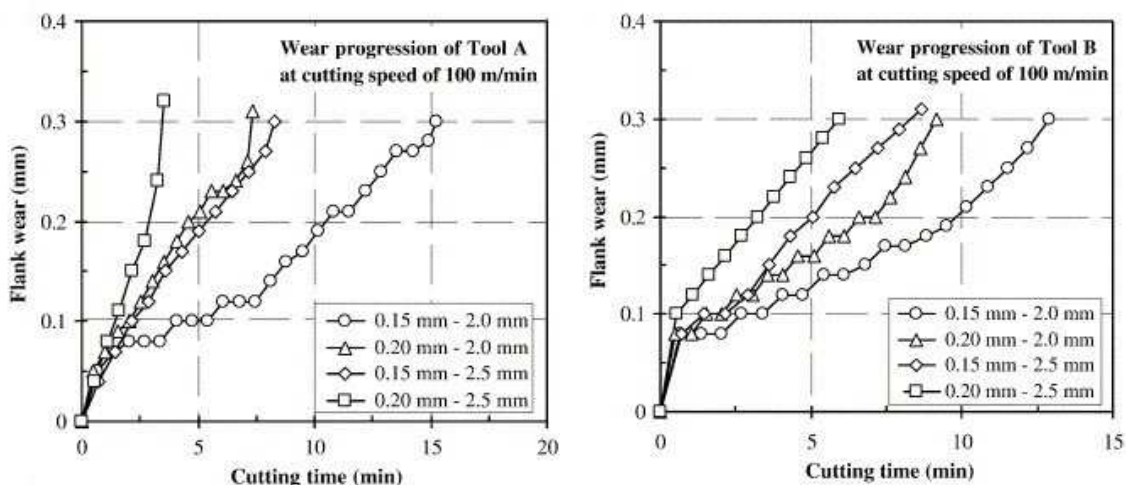


Obrázek 15 - Nástroj pro frézování Ti-6242S [20]

podmínky se mění v rámci řezné rychlosti v rozmezí od 100 do $125\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, posuv na zub mezi $0,15$ - $0,2\text{ mm}$ a hloubka záběru od 2 do $2,5\text{ mm}$. Radiální hloubka záběru je konstantně rovna $8,8\text{ mm}$ [20].

Experiment potvrdil, že maximální opotřebení na hřbetu je situováno do místa s největší obvodovou rychlostí, tedy do bodu A. Toto opotřebení dosahovalo až velikosti $0,9\text{ mm}$. Dále ukázalo, že nástroj B má tendenci lineárního opotřebení, avšak jen do chvíle, kdy dojde k otěru povlakované vrstvy. Jelikož oba nástroje měli podobné výsledky, lze určit, že při řezné rychlosti v rozptylu od 100 do $110\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ dosahují nástroje stejné trvanlivosti [20].

Následující obrázek ukazuje vztah mezi velikostmi opotřebení a času řezu při rychlosti $100\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Pro dva různé posuvy ($0,15$ a $0,2\text{ mm}$) a dvě velikosti třísek (2 a $2,5\text{ mm}$).



Obrázek 16 - Velikost opotřebení nástroje A a B v závislosti na řezném čase [20]

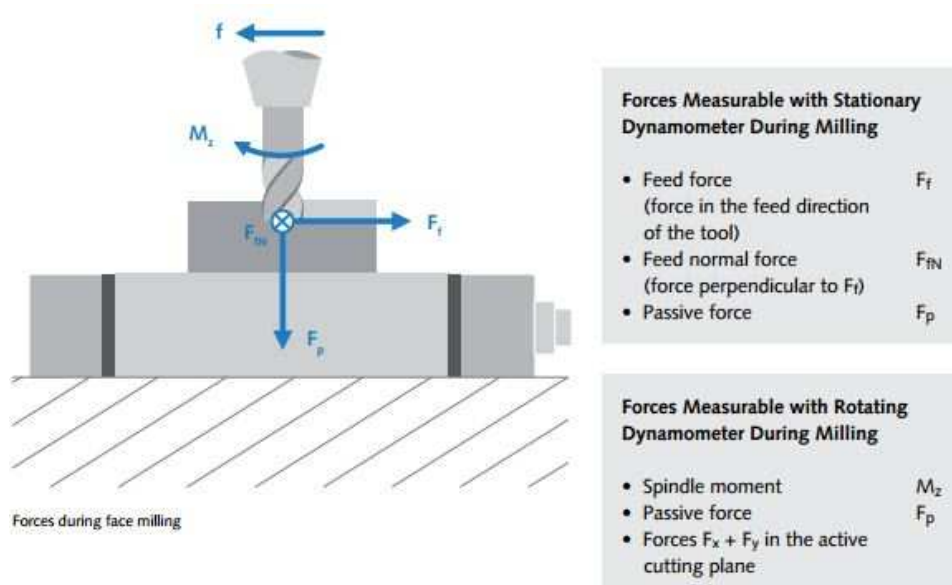
4.3 Měření silových účinků

Další faktor, který dává informaci o obrábění, je velikost řezných sil, které při frézování, nebo i jiné operaci, vznikají. Mezi největší výrobce měřící techniky a senzorů, pro měření sil, kroutícího momentu, tlaku a vibrací, patří firma Kistler.

Silové účinky a tím pádem i řezná síly se měří pomocí dynamometrů. Ty mohou mít v zásadě dvě konstrukce, stacionární a rotační. Stacionární konstrukce se upíná na frézovací stůl a do ní se teprve upíná obrobek. Rotační konstrukce umožňuje umístit dynamometr na rotační vřeteno, které u frézování koná hlavní řezný pohyb. V podstatě se dá říci, že u stacionární konstrukce měříme síly na obrobku, kdežto u rotačního provedení měříme síly na nástroji [24].

Pro měření se používají dynamometry s piezoelektrickými krystaly, které pracují na principu piezoelektrického jevu. Tento jev se vyznačuje tím, že při deformaci daného krystalu vyvolá odpovídající elektrické napětí. To vnáší do měření značné výhody, mezi které patří linearita senzorů a velké rozpětí měřítka měřených sil. Z toho vyplývá, že můžeme použít i velké dynamometry, které se pro daný účel mohou zdát předimenzované, a měřit s nimi i malé síly. Nicméně, jak z vlastností piezoelektrického krystalu vyplývá, je třeba zpracovat výstupní signály z dynamometru a převést je na napěťový signál, ze kterého již lze, díky výpočetní technice, zpracovat závislost řezných sil [24].

Na následujícím obrázku je vyobrazeno, co lze změřit při frézování, v závislosti na použité konfiguraci dynamometru. Stacionárním dynamometrem se změří pasivní síla, normálová síla a síla závislejší na směru posuvu. Při rotační konstrukci se změří moment vřetena a pasivní síla [24].



Obrázek 17 - Schéma sil při měření dynamometrem [24]

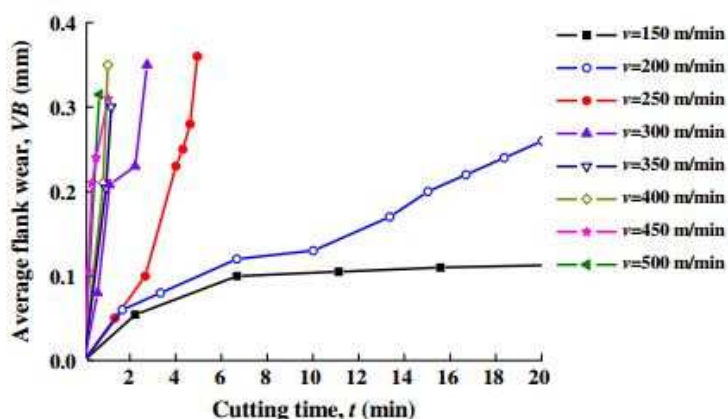
4.4 Vysokorychlostní suché frézování slitiny Ti6Al4V

Tento druh operace má své největší výhody díky vysoké produktivitě a tím pádem snížení ceny výrobních nákladů a schopnosti dosáhnout výborné kvality povrchu. Šetří se také životní prostředí, jelikož nedochází k použití chladicích kapalin, které se těžko odbourávají [23].

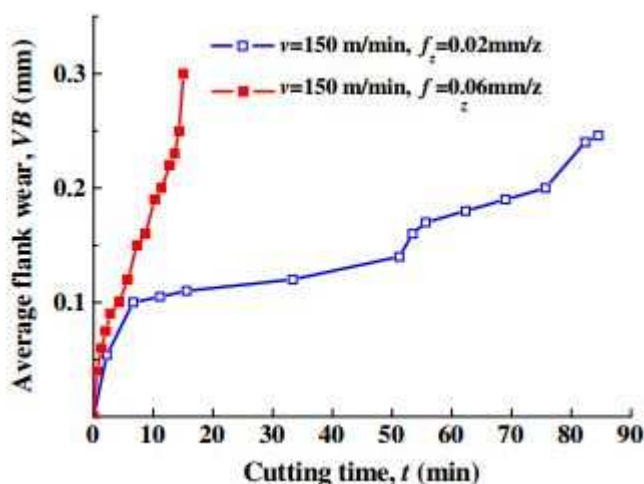
Při pokusu byla měřena velikost opotřebení, průběh řezných sil a teplota řezu. Použitým nástrojem byla čelní válcová fréza firmy SECO o průměru pět a dvacet milimetrů (katalogové číslo: R217.69-2525.0-09-3AN) s vyměnitelnou břitovou destičkou typu XOMX090308TR-M08 s jakostí karbidu MP2500. Tato destička je povlakována metodou CVD povlakem z $Ti(C, N-Al_2O_3)$. Nástroj obráběl strategií čelního frézování [23].

Z pohledu vlivu řezné rychlosti na velikost opotřebení bylo zjištěno, že se stoupající řeznou rychlostí stoupá také opotřebení VB. To samé bylo zjištěno pro zvětšující se posuv na zub f_z . Oproti tomu hloubka řezu nemá na opotřebení až tak zásadní vliv, jako předešlá kritéria [23].

Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny měnící se velikosti opotřebení s měnící se řeznou rychlostí. Pro obrázek 17 platí, že je konstantní posuv 0,02 mm/z, hloubka řezu 1 mm a velikost záběru 5 mm. Mění se řezné rychlosti. Pro obrázek 18 platí to samé, jen se kromě rychlosti mění i velikost posuvu.



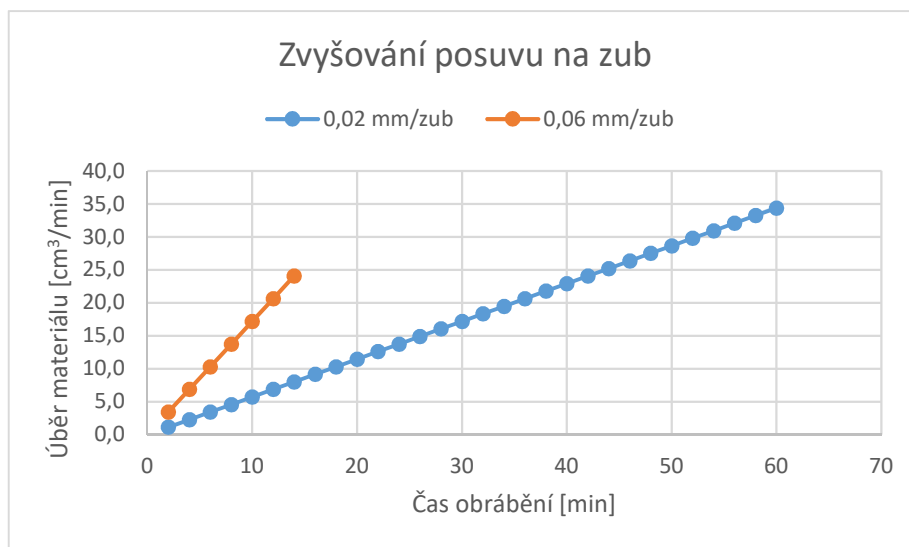
Obrázek 18 - Velikost opotřebení v závislosti na čase a rezné rychlosti [23]



Obrázek 19 - Velikost opotřebení v závislosti na čase a posuvu [23]

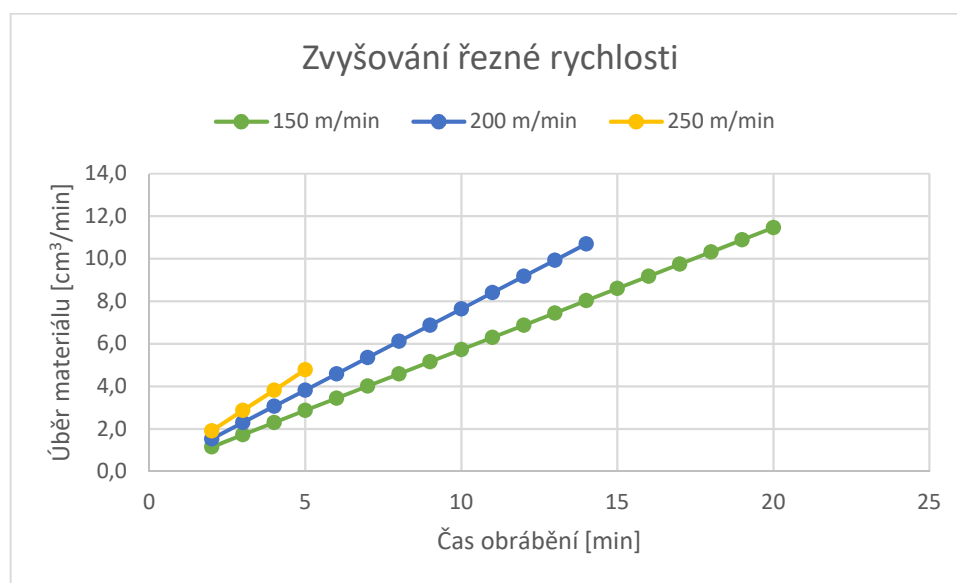
Na grafy, které jsou zobrazené na obrázcích 18 a 19 se lze podívat také z hlediska množství úběru materiálu a doby, za kterou dojde ke kritickému opotřebení. Pokud se uvažuje, že kritická hodnota opotřebení VB bude 2 mm, lze stanovit dobu, za kterou dojde k tomuto opotřebení a bude nutné vyměnit nástroj. Z rezných podmínek se může stanovit množství ubraného materiálu za čas obrábění. Hodnoty se pak dají porovnat a zjistit, co je z pohledu produktivity práce výhodnější.

Při uvažování trojnásobku původní hodnoty posuvu, se dá uvažovat trojnásobné zvýšení úběru materiálu, než dojde ke stanovené hodnotě kritického opotřebení. Jak lze vidět na obrázku 20, kde je vykresleno množství odebraného materiálu při době jedné trvanlivosti břitu, k tomuto předpokladu nedochází, jelikož při zvýšené hodnotě posuvu je trvanlivost nástroje natolik zmenšena, že nedojde ke zvýšení úběru materiálu.



Obrázek 20 - Úběr materiálu při zvyšování posuvu

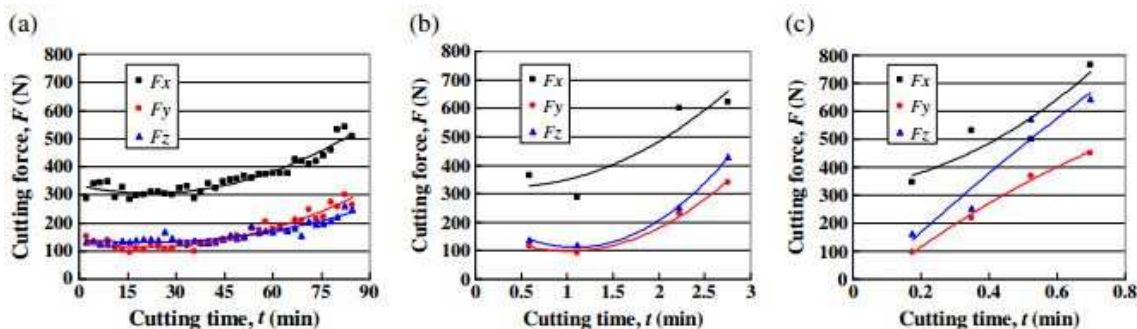
Může se rovněž předpokládat zvyšování řezné rychlosti za účelem zvýšení produktivity. Jak lze vidět na obrázku 21, při zvýšení řezné rychlosti ze 150 na 200 m/min je množství ubraného materiálu za trvanlivost břitu prakticky stejné. Tudíž je zřejmé, že obrobíme více materiálu při vyšší rychlosti, ale nezvýší se tím náklady na častější výměnu nástroje. Nelze ovšem rychlost zvyšovat pořád, jelikož ani pak se předpoklad navýšení úběru materiálu nezvýší, jak je vidět pro rychlost 250 m/min.



Obrázek 21 - Úběr materiálu při zvyšování řezné rychlosti

Z těchto odvozených hodnot se dá říci, že když potřebujeme zvýšit efektivitu práce při frézování, je lepší zvyšovat řeznou rychlost než posuv. Posuv má tudíž na rychlejší opotřebení nástroje větší vliv.

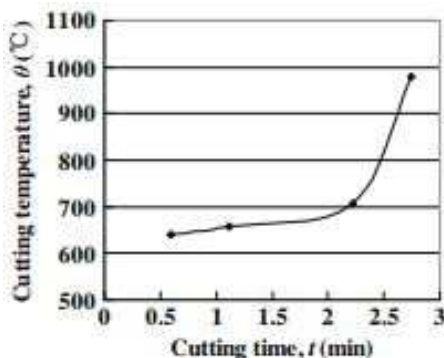
Z hlediska řezných sil lze uvažovat, že se zvětšující se řeznou rychlostí, velikostí záběru, hloubky řezu a posuvu, budou silové účinky narůstat. Na dále zmíněných obrázcích představuje hlavní řeznou sílu složka F_x . Nárůst řezných sil je také ovlivněn faktem, že čím více narůstají řezné parametry, tím více se opotřebuje-ztupí nástroj, tudíž se musí vynaložit více síly k tomu, aby nástroj pronikl do materiálu [23].



Obrázek 22 - Řezné síly v závislosti na čase a rychlosti [23]

Obrázek 22 vykresluje závislosti za konstantní hloubky řezu 1 mm velikosti záběru 5 mm a posuvu na zub 0,02 mm/z. Mění se řezné rychlosti, kdy pro **a** $v= 150 \text{ m.min}^{-1}$, **b** $v= 300 \text{ m.min}^{-1}$, **c** $v= 450 \text{ m.min}^{-1}$.

Je samozřejmé, že čím více se zvyšují řezné podmínky, tím více se bude zvyšovat i teplota řezu. Tato vlastnost platí pro všechny materiály. U slitin titanu se ale jedná o větší problém, jelikož má malou tepelnou vodivost. Největší teplota vzniká v místě vstupu a výstupu břitu nástroje do řezu. Se zvyšující se teplotou roste i schopnost obráběného materiálu chemicky reagovat s materiálem nástroje a tím se značně zvyšuje jeho opotřebení.



Obrázek 23 - Teplota řezu [23]

Na předchozím vyobrazení závislosti teploty a času při konstantních hodnotách posuvu, řezné rychlosti, hloubky řezu a velikosti záběru ($a_e = 5 \text{ mm}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f_z = 0.02 \text{ mm/z}$, $v = 300 \text{ m.min}^{-1}$) je vidět, že po určité době dojde razantnímu zvýšení teploty spojené s větším poškozením nástroje [23].

5 Praktická část – zkoušky suchého frézování

Při obrábění klade materiál obrobku odpor, jenž je nutné překonat. V tomto důsledku musí nástroj vytvořit řezné síly, které tento odpor překonají. V praktické části se práce zabývá vyšetřováním a zjišťováním řezných sil, které vznikají při frézování titanové slitiny. Tyto síly ovlivňují vše, co se v době řezu odehrává, jako například teplotu řezu a trvanlivost břitu nástroje. Z tohoto důvodu je nutné vědět závislosti těchto sil na řezných podmínkách. Monitorování řezných sil je vhodné zejména z toho důvodu, že poskytuje stabilní a okamžité výsledky zatížené malou nejistotou ve srovnání s měřením ostatních veličin.

5.1 Podmínky suchého frézování

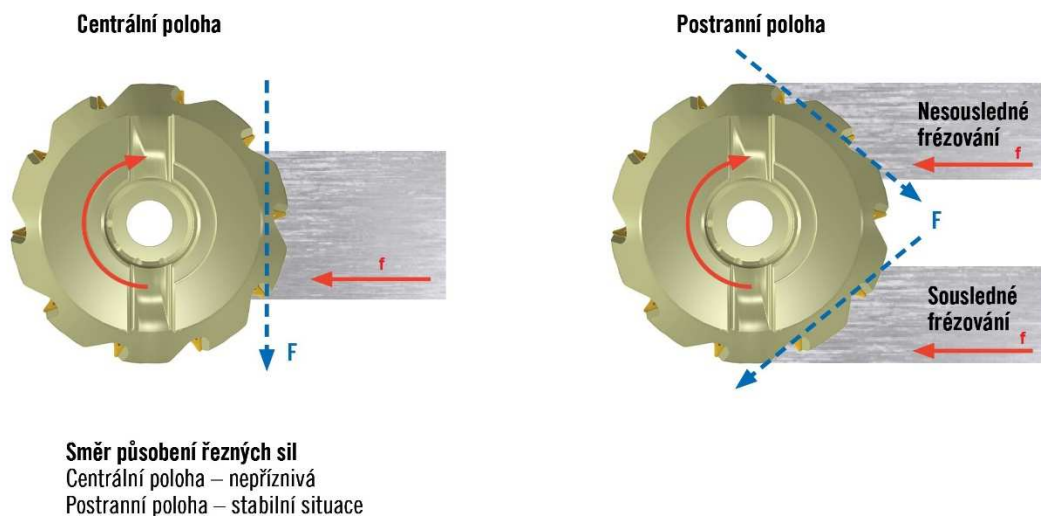
Experiment byl prováděn ve školních laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Obráběcím strojem byla vertikální konzolová frézka FV 25 CNC A s řídicím systémem Heidenhain. Na upínacím stole frézky byl připevněn stacionární tříosý dynamometr firmy Kistler, který snímal řezné síly. Na něj byl upnut obrobek ze slitiny Ti6Al4V ve tvaru kvádrů o výšce 60 milimetrů a obráběné ploše 136x26 milimetrů. Jako držák nástroje byla použita fréza s účinným průměrem 63 milimetrů. Vlastní nástroj byla vyměnitelná břitová destička typu RCKT 12 04 M0-PM s povlakem CVD Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN. Jednalo se o kruhovou destičku, jejíž průměr byl 12 milimetrů. Všechny použité stroje a nástroje jsou zobrazeny na obrázku 24.



Obrázek 24 - Použitý stroj a nástroje

Experiment je rozdělen do dvou částí. V první části se dráha nástroje volí jako v běžné praxi. Na obrázku 25 je zobrazena jako postranní poloha, kdy se střídá sousledné a nesousledné frézování. Ve druhé části se dráha nástroje volí v centrální poloze, kdy osa obrobku je shodná s dráhou nástroje. Vstupními řeznými podmínkami byla řezná rychlost a posuv na zub. Řezná rychlost se měnila mezi čtyřmi hodnotami (100; 150; 175; 200 m.min⁻¹) a stejně tak posuv na zub (0,05; 0,08; 0,1; 0,12 mm.z⁻¹).

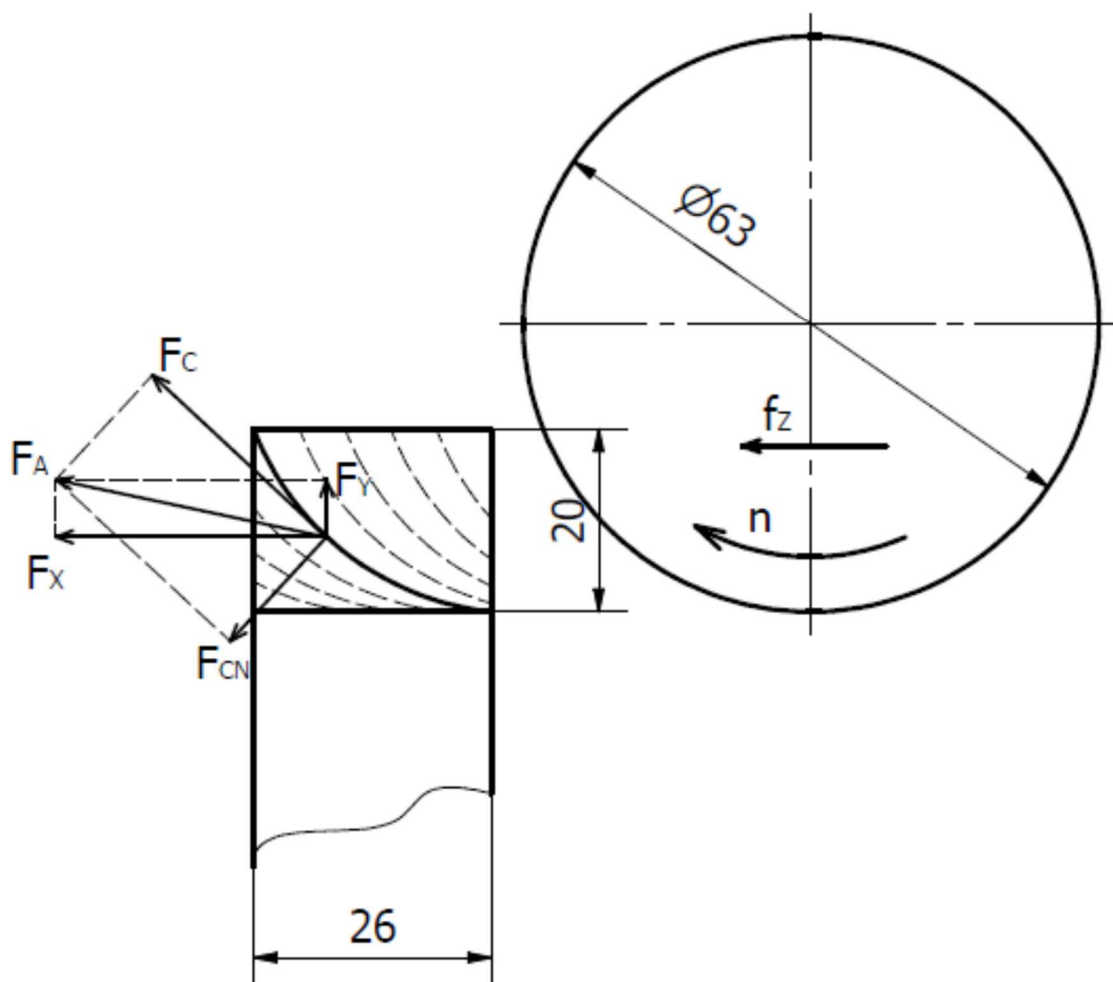
CENTRÁLNÍ POLOHA VERSUS POSTRANNÍ POLOHA



Obrázek 25 - Dráha nástroje

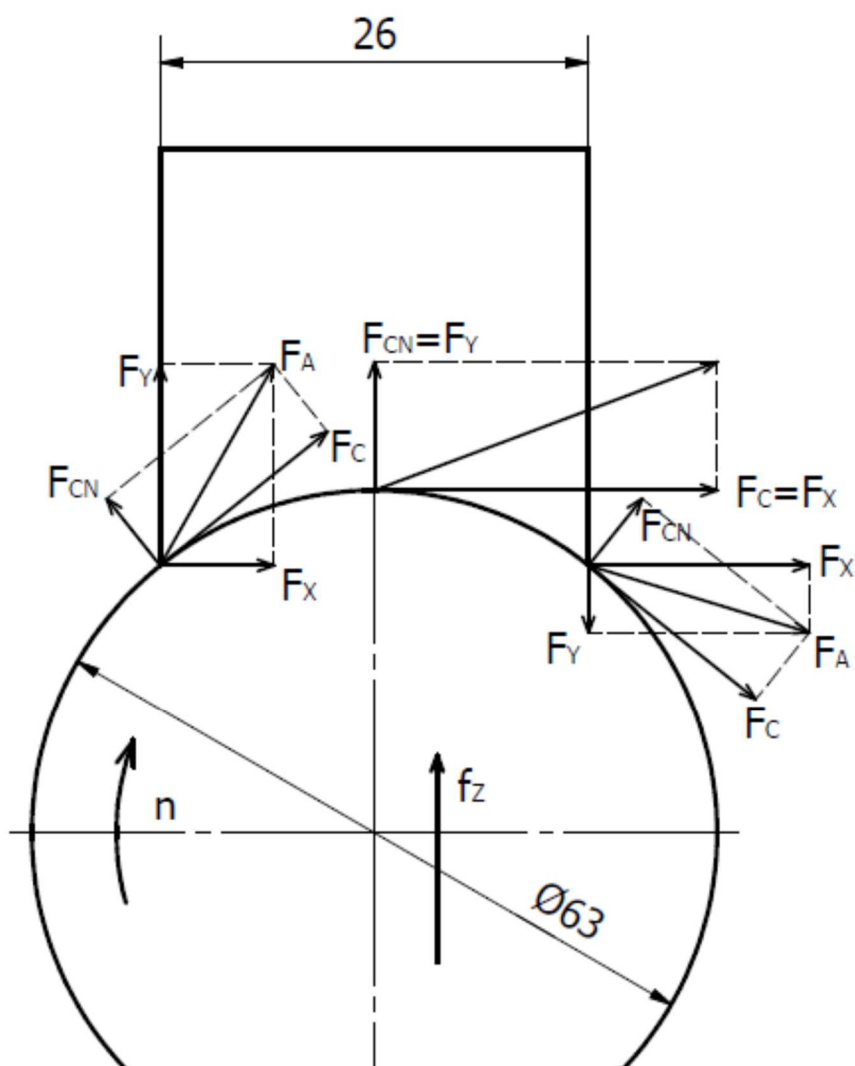
5.2 Vyhodnocení řezných sil

Důvod, proč se experiment dělí na dvě části, je také způsob vyhodnocení a porovnání výsledků. Pro objektivitu experimentu je důležité, aby se porovnávaly dvě hodnoty, které jsou porovnatelné. Musí se tudíž zajistit shodnost podmínek, při nichž dojde k odměření řezných sil. Na to má právě vliv dráha nástroje. První část experimentu, jejíž ilustrační průběh řezných sil je zobrazen na obrázku 26 vpravo, je pro zajištění shodnosti podmínek velmi složitá a nevhodná, nicméně reprezentuje reálnou strategii obrábění při frézování roviny.



Obrázek 26 - Postranní poloha

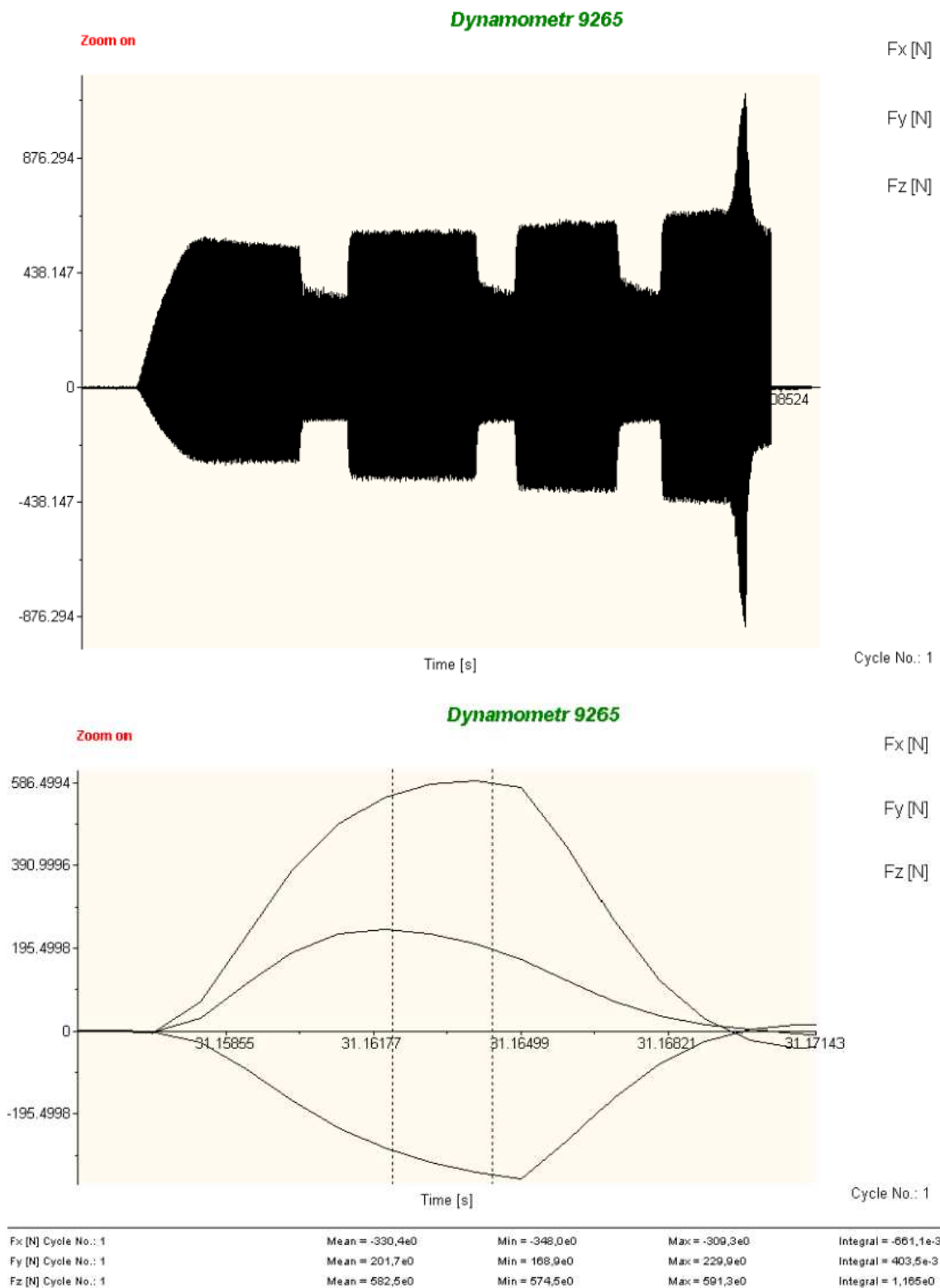
Na obrázku 26 lze vidět, že řezná síla F_C je jedna ze složek aktivní síly F_A , která je výslednicí sil F_X a F_Y , které získáme z dynamometru. Pro zajištění shodných porovnatelných podmínek by bylo nutné si zvolit místo, kde chceme silové účinky změřit a dopočítat dobu z řezných podmínek, kdy tohoto místa dosáhneme. Tato doba je však pro každý posuv a rychlost jiná.



Obrázek 27 - Centrální poloha

Druhá část experimentu, kdy je použita centrální poloha nástroje, je pro vyhodnocování daleko jednodušší a ušetří spoustu času, avšak neztrácí nic ze své vypovídající hodnoty. K porovnání rozdílu řezných sil při různých podmínkách je tato metoda naprosto vyhovující. Důvod, proč je tato metoda jednodušší, je vyobrazen na obrázku 27, kde je zobrazen ilustrační průběh řezných sil.

Na předchozím obrázku si lze všimnout, že při vstupu a výstupu nástroje z řezu je obdobný problém s rozkladem sil jako v předchozí části. Je tam také vidět, že když se nástroj nachází přesně v polovině řezu, tak souřadný systém řezných sil je shodný se souřadným systémem dynamometru, a tudíž hlavní řezná síla F_c je shodná se silou F_x a normálová řezná síla je shodná se silou F_y . Z naměřených hodnot dynamometru, které jsou vidět na následujícím obrázku 28, lze postupným přibližováním získat průběh sil daný pro jeden záběr nástroje. Určením úzkého intervalu, kdy se nástroj nachází v půlce záběru, se pak určí velikost sil.



Obrázek 28 - Výsledek měření z dynamometru

5.3 Výsledné závislosti rezných sil

Z průběhu sil, které změnil dynamometr se pro každé řezné podmínky určily tři vypovídající hodnoty, z nichž byla stanovena průměrná hodnota dané síly. Z konfigurace



souřadných systémů stroje a dynamometru vyplývá, že složka F_x odpovídá hlavní řezné síle, složka F_y je normálová řezná síla a F_z je pasivní řezná síla. V tabulce číslo 7 jsou zobrazeny výsledné hodnoty řezných sil.

Tabulka 7 - Výsledné hodnoty

řezná rychlost		100	[m/min]		otáčky	483	[1/s]	
posuv	[mm/min]	24	[mm/min]	39	[mm/min]	48	[mm/min]	58
	[mm/z]	0,05	[mm/z]	0,08	[mm/z]	0,1	[mm/z]	0,12
F_c [N]	230,8		303,7		343,4		398,3	
F_{CN} [N]	163		197,6		235,1		249,2	
F_p [N]	445,9		534,4		580,4		633,6	

řezná rychlost		150	[m/min]		otáčky	724	[1/s]	
posuv	[mm/min]	36	[mm/min]	58	[mm/min]	72	[mm/min]	87
	[mm/z]	0,05	[mm/z]	0,08	[mm/z]	0,1	[mm/z]	0,12
F_c [N]	264,1		322,5		357,6		406,3	
F_{CN} [N]	207,4		237,5		244,6		260,7	
F_p [N]	579,5		631,5		644,6		686,2	

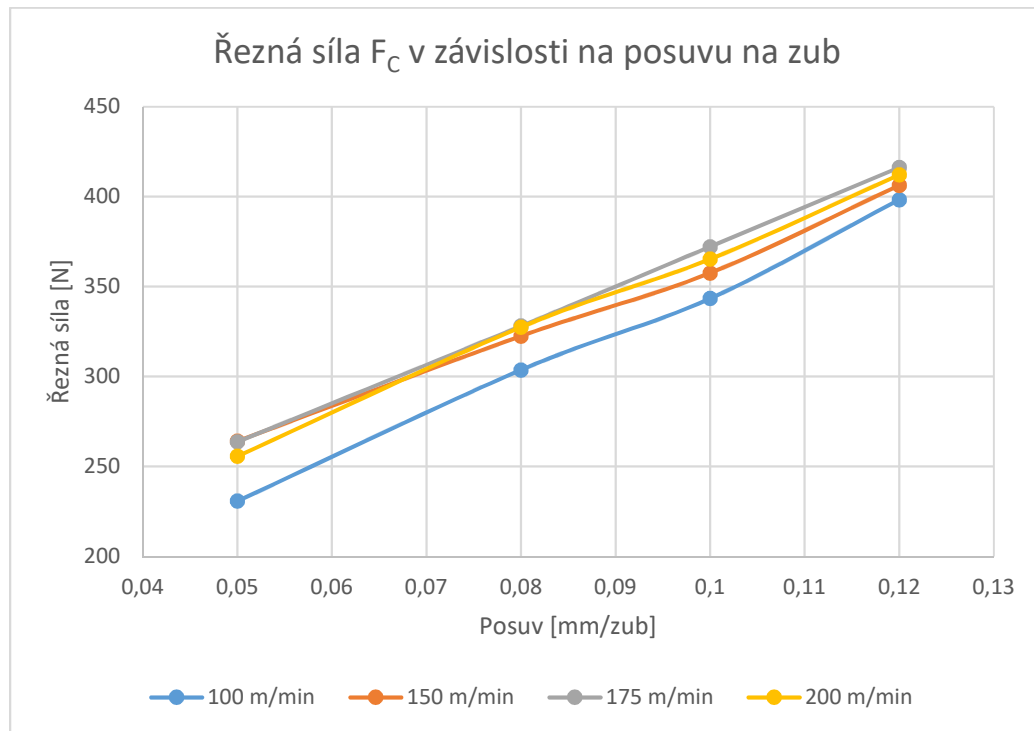
řezná rychlost		175	[m/min]		otáčky	844	[1/s]	
posuv	[mm/min]	42	[mm/min]	68	[mm/min]	84	[mm/min]	101
	[mm/z]	0,05	[mm/z]	0,08	[mm/z]	0,1	[mm/z]	0,12
F_c [N]	263,7		328,1		372,2		416,2	
F_{CN} [N]	202,3		220,2		224,5		242	
F_p [N]	568,5		615		634,9		670,2	

řezná rychlost		200	[m/min]		otáčky	965	[1/s]	
posuv	[mm/min]	48	[mm/min]	77	[mm/min]	97	[mm/min]	116
	[mm/z]	0,05	[mm/z]	0,08	[mm/z]	0,1	[mm/z]	0,12
F_c [N]	255,7		327,5		365,3		412,1	
F_{CN} [N]	193,1		213,6		225,8		231,1	
F_p [N]	527,5		594,7		615,2		654,6	

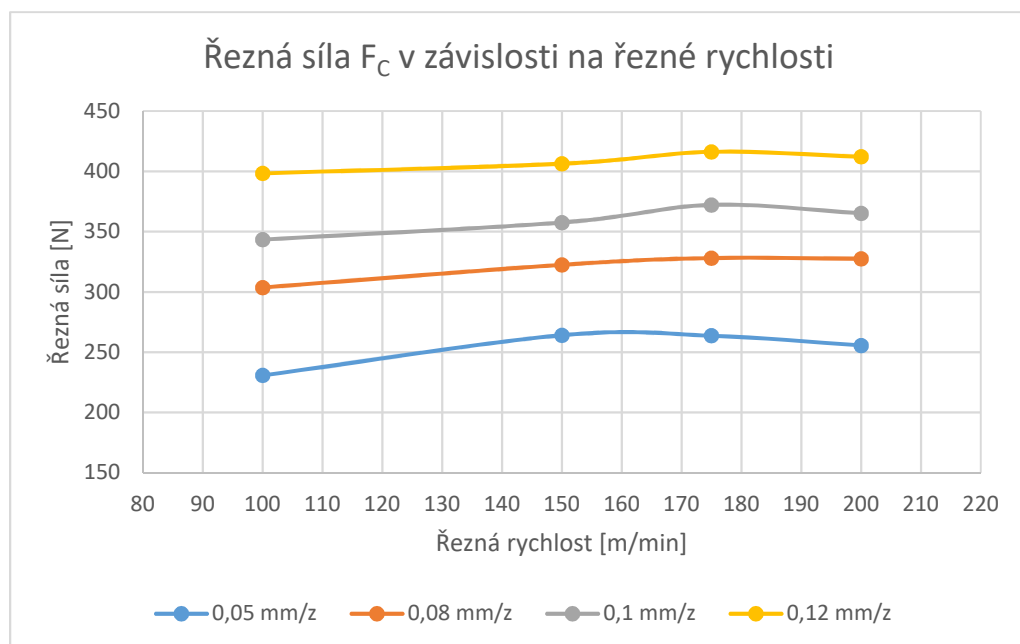
Při pohledu do tabulky výsledků si lze všimnout, že největší není hlavní řezná síla, ale pasivní. To je způsobeno volbou vyměnitelné břitové destičky a jejím poloměrem.

Jelikož zde je použita kulatá destička, je zde daleko větší poloměr než u destičky jiného tvaru. Velký poloměr nástroje způsobuje, že je nástroj značně odtlačován od materiálu, což má za následek vzrůst pasivní síly.

Z výsledných hodnot lze sestavit grafy, které budou vykazovat závislosti řezných sil na posuvu a na řezné rychlosti. Oba tyto grafy je možné vidět na obrázcích 29 a 30.



Obrázek 29 - Řezná síla v závislosti na posuvu



Obrázek 30 - Řezná síla v závislosti na rychlosti

Z grafů, které vycházejí z naměřených hodnot vyplývá, že řezná síla se nezvětšuje stejně. Posuv má v porovnání s rychlostí daleko větší vliv na řeznou sílu. Z tabulky 7 a přidružených grafů je patrné, že řezná síla nepatrně roste do řezné rychlosti 175 m/min. Od této hodnoty byl zaznamenán velmi pozvolný pokles. Tento jev byl sledován u všech 4 hodnot posuvu. Jednou z možných příčin je vzrůst teploty v místě řezu spojený s odpevněním obráběného materiálu. Naproti tomu vliv posuvu na velikost řezné síly se ukázal jako zcela zásadní. Průběh je pro všechny rychlosti vzrůstající a téměř lineární.

Tabulka 8 - Funkce závislostí

V závislosti na posuvu		V závislosti na rychlosti	
Konstantní rychlost [m/min]	Rovnice:	Konstantní posuv [mm/z]	Rovnice:
100	$F_C=1426*f_z^{0,61}$	0,05	$F_C=107*v_c^{0,17}$
150	$F_C=1096*f_z^{0,48}$	0,08	$F_C=178*v_c^{0,12}$
175	$F_C=1229*f_z^{0,52}$	0,1	$F_C=212*v_c^{0,11}$
200	$F_C=1273*f_z^{0,54}$	0,12	$F_C=305*v_c^{0,06}$

Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo zjistit obecné informace o vlastnostech titanu a jeho slitin. V části literární rešerše jsem identifikoval současné speciální nástroje pro obrábění této slitiny. K těmto nástrojům jsou uvedeny i doporučené řezné podmínky přímo od jejich výrobců. Náplní praktické části bylo měření řezných sil při suchém frézování za intenzivních nekonzervativních podmínek.

Mezi nejdůležitější vlastnosti, které ovlivňují i vlastnosti titanových slitin, patří krystalová mřížka konkrétní slitiny. Titan krystalizuje ve dvou fázích alfa a beta. Fáze alfa má krystalovou mřížku šesterečnou, těsně uspořádanou, oproti tomu fáze beta má krychlovou prostorově středěnou mřížku. Mezní teplota pro přechod z alfa fáze na beta fázi je 882°C. To, jaká fáze je zastoupená ve slitinách, má zásadní vliv na mechanické a technologické vlastnosti dané slitiny, jelikož struktura tvořená fází beta bude znatelně lépe obrobitelná než struktura s fází alfa.

Vlastnosti titanových slitin jsou závislé na tom, jaké fáze je tvoří, proto je základně rozdělujeme do tří skupin. Slitiny α , slitiny β a slitiny $\alpha+\beta$, které patří mezi nejrozšířenější kvůli nejvíce používané slitině Ti6Al4V. Slitiny alfa se vyznačují vysokou pevností za tepla, dobrými slévárenskými vlastnostmi a dobrou svařitelností. Slitiny beta mají vysokou pevnost při nízkých teplotách a jsou dobře tvářitelné za studena. Slitiny alfa a beta jsou kombinací svých předchůdců, kde záleží na množství a typu legur, díky kterým budou převažovat finální vlastnosti slitiny.

Mezi aktuálně nejnovější používané nástroje pro frézování patří jak monolitní nástroje, tak frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami. Obě možnosti vyžadují, aby nástroj byl povlakován. Nejčastěji se používají povlaky TiAlN nebo AlTiN. Konstrukci speciálních nástrojů se věnují především výrobci Guhring, Seco a Iscar. Pro tyto nástroje byly nalezeny i doporučené řezné podmínky, kde se řezná rychlost pohybovala v rozmezí od 65 do 155 metrů za minutu a posuv se pohyboval v intervalu od 0,055 do 0,18 milimetrů na zub.

V praktické části jsem porovnával silové poměry pro dvě strategie frézování roviny. Prezentovány jsou pouze výsledky ze strategie symetrického frézování, jelikož mají větší vypovídací schopnost.

Řezné síly jsem měřil pro posuv od 0,05 do 0,12 milimetrů na zub. Velikost řezné rychlosti se pohybovala od 100 metrů za minutu až do rychlosti 200 metrů za minutu, což je kvalifikováno jako vysokorychlostní obrábění. Po konci experimentu nebyly na nástroji



patrné velké známky opotřebení, pouze došlo k otěru povlakované vrstvy. Na obrobku nedocházelo k viditelnému zhoršení kvality povrchu. Rovněž jsem nepozoroval zapálená nebo vyhřátá místa. Vzrůst teploty v místě řezu byl velmi dobře pozorovatelný na měnící se barvě třísek, která šla do fialové až černé.

Naměřené hodnoty jsem použil ke stanovení funkcí řezných sil na posuvu a rychlosti. Z těchto závislostí vzešlo, že velikost řezné síly se mění převážně v závislosti na posuvu. Při změně rychlosti v daném rozmezí se řezná síla mění jen nepatrně.

Ve své bakalářské práci jsem splnil všechny předpokládané cíle popsané v zadání. Rovněž jsem zmapoval změny velikostí řezných silových účinků při suchém frézování slitiny Ti6Al4V v závislosti na intenzivních nekonzervativních řezných podmínkách.

Seznam citací:

- [1] LEYENS, C. a M. PETERS. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. [Chichester: John Wiley] (distributor), c2003. ISBN 3527305343.
- [2] SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada hutnické literatury.
- [3] DONACHIE, Matthew J. *Titanium: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, c2000. ISBN 978-0-87170-686-7
- [4] Titanium Machining Guide. In: *Kennametal* [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/Industry%20Solutions/Titanium_material_machining_guide_Aerospace.pdf
- [5] Application Guide Titanium. In: *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/c-2920-35.pdf>
- [6] SKOČOVSKÝ, Petr, Peter PALČEK, Radomila KONEČNÁ a Ladislav VÁRKOLY. *Konstrukční materiály*. Žilina: Žilinská univerzita, 2000. ISBN 80-7100-608-4.
- [7] ŠVEC, Pavol. *Konstrukční materiály*. Bratislava: Nakladatelstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3386-1.
- [8] SR-71 „Blackbird“. In: *Wikipedie* [online]. Wikimedia Foundation. [vid. 5. 3. 2017]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lockheed_SR-71_Blackbird#/media/File:Lockheed_SR-71_Blackbird.jpg
- [9] Obrábění titanových dílů. *TechMagazín* [online]. 2012, 2012 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/666>
- [10] Prášková metalurgie a její využití. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/praskova-metalurgie-a-jeji-vyuziti>
- [11] Současnost a trendy povlakování technologií PVD. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, 2003(4), 52 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologiei-pvd.html>
- [12] RF 100 Ti - Titanium Alloys. *Guhring* [online]. c2015 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.guhring.com/ProductsServices/Tools/?Type=41>

- [13] 3498.jpg (400x57). In: Guhring [online]. c2015 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: http://www.guhring.com/App/GuhringUSA_files/toolimages/3498.jpg
- [14] Produktivní obrábění nerezových ocelí a titanových slitin. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, 2015(12), 62 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/produktivni-obrabeni-nerezovych-oceli-a-titanovych-slitin.html>
- [15] Nové frézovací třídy Seco MS2050 optimalizované pro obrábění titanu. *Technický týdeník* [online]. 2015 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/nove-frezovaci-tridy-seco-ms2050-optimalizovane-pro-obrabeni-titanu_32919.html
- [16] SECO [online]. *Katalog a technický průvodce 2015- Frézování*. 2015. [vid. 17.3.2017]. Dostupné z: https://www.secotools.com/CorpWeb/Czech%20Republic/katalogy/2015/CZ_Catalog_Milling_2015_Inlay_LR.pdf
- [17] Problematika obrábění titanových leteckých dílů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, **2012**(5), 42 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-obrabeni-titanovych-leteckych-dilu.html>
- [18] Sousedné nesousedné frézování. In: Zozei [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://zozei.sssebrno.cz/userdata/imagelibrary/upload/eelni-frezovani.jpg>
- [19] Suché frézování materiálu Ti6Al4V. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006, **2006**(12), 50 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialu-ti6al4v-vysokymi-rychlostmi.html>
- [20] NOUARI, M. a A. GINTING. Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry end milling of titanium alloy. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2006, **200**(18-19), 5663-5676 [cit. 2017-03-23]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.07.063. ISSN 02578972. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897205007620>
- [21] Opotřebenění břitu. In: *T-support* [online]. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: https://www.t-support.cz/t-support/data/resources/Image/old/rezne_4d.jpg
- [22] Základní vzorce pro frézování. In: *TaeguTec* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_2114.pdf



- [23] LI, Anhai, Jun ZHAO, Hanbing LUO, Zhiqiang PEI a Zeming WANG. Progressive tool failure in high-speed dry milling of Ti-6Al-4V alloy with coated carbide tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, **58**(5-8), 465-478 [cit. 2017-04-12]. DOI: 10.1007/s00170-011-3408-1. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-011-3408-1>
- [24] Cutting Force Measurement. In: *Kistler* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=65&model=download&callee=frontend>
- [25] Mechanické zatížení při frézování. In: SECO [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/CZ-Czech-Republic/Aktuality/TECHNICKE-LANKY/Mechanicke-zatizeni-pri-frezovani/>