

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Obrábění titanových slitin**

Machining of Titanium alloys

Autor: Daniel Králíček

Ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vedoucí: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Praha 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Králíček** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **490921**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Obrábění titanových slitin**

Název bakalářské práce anglicky:

**Machining of Titanium alloys**

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše v oblasti soustružení titanových slitin
2. Přehled významných vědeckých publikací
3. Titanové slitiny - materiálová charakteristika
4. Nástroje pro obrábění titanových slitin
5. Technologické zkoušky soustružení

Seznam doporučené literatury:

DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004. ISBN 0-87170-686-5.  
OVERBY, Alan. CNC machining handbook: building, programming, and implementation. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně za použití uvedených a řádně ocitovaných pramenů v seznamu zdrojů.

V Praze dne: .....

Podpis: .....

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Zdeňku Pitrmucovi za cenné rady a odborné připomínky při jejím vypracování.

Také bych rád poděkoval mé rodině a partnerce, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na suché soustružení titanových slitin a měření řezných sil při obrábění. V rešeršní části jsou uvedeny způsoby výroby titanu a rozdělení titanových slitin. Následující část je zaměřena na měření řezných sil při soustružení. V další části jsou shrnuty poznatky k obrobitelnosti titanových slitin a inovace v oblasti obrábění titanu. Praktická část se věnuje měření řezných sil při soustružení slitiny Ti6Al4V, vlivu různých faktorů na řeznou sílu a tvorbě empirických rovnic sloužících k výpočtu řezné síly.

## **Klíčová slova**

Slitiny titanu, obrobitelnost titanu, soustružení, měření řezných sil, empirické rovnice

## **Abstract**

This bachelor thesis focuses on dry turning of titanium alloys and measurement of cutting forces during machining. In the research part methods of production of titanium and distribution of titanium alloys are listed. The following part focuses on measuring of cutting forces during turning. The next part summarizes the knowledge of machinability of titanium alloys and innovation in the field of titanium machining. The practical part is devoted to the measurement of cutting forces during turning of Ti6Al4V alloy, the influence of various factors on the cutting force and creation of empirical equation used for calculation of cutting force.

## **Keywords**

Titanium alloys, machinability of titanium, turning, cutting force measurement, empirical equations

# Obsah

Přehled použitých zkratké.....	8
Úvod.....	9
1. Titan .....	10
1.1. Výroba titanu .....	10
1.2. Titan a jeho slitiny .....	10
1.2.1. Slitiny typu $\alpha$ .....	11
1.2.2. Slitiny typu $\alpha + \beta$ .....	12
1.2.3. Slitiny typu $\beta$ .....	12
1.3. Grade.....	12
2. Řezné síly při soustružení.....	13
2.1. Řezná síla.....	14
2.2. Posuvová síla .....	14
2.3. Pasivní síla .....	14
2.4. Měrný řezný odpor .....	15
2.5. Měření řezných sil.....	17
2.5.1. Dynamometry .....	17
2.5.2. Mechanické dynamometry .....	18
2.5.3. Hydraulické dynamometry.....	18
2.5.4. Pneumatické dynamometry.....	19
2.5.5. Indukční dynamometry .....	19
2.5.6. Kapacitní dynamometry.....	19
2.5.7. Odporové dynamometry.....	19
2.5.8. Piezoelektrické dynamometry .....	20
3. Obrábění titanových slitin.....	21
3.1. Obrobitelnost titanových slitin .....	21
3.2. Řezné podmínky při obrábění titanu .....	22
3.3. Doporučené nástrojové materiály .....	23
4. Inovace v oblasti obrábění titanu .....	25
4.1. Progresivní materiály .....	25
4.2. NCB100.....	26
4.3. Drážkování na nástroji .....	26
4.4. Kryogenické chlazení při obrábění.....	27
5. Praktická část .....	29
5.1. Pracovní podmínky experimentu.....	29

5.2.	Vliv posuvu na řeznou sílu.....	30
5.3.	Vliv hloubky řezu na řeznou sílu .....	32
5.4.	Vliv úhlu nastavení hlavního ostří na řeznou sílu.....	34
5.5.	Vliv destičky na řeznou sílu .....	39
5.6.	Vliv posuvové rychlosti na drsnost.....	41
5.7.	Experimentální zjištění řezné síly.....	42
5.7.1.	Ti6Al4V .....	42
5.7.2.	Ocel C45 .....	48
6.	Závěr.....	55
7.	Bibliografie .....	57

## Přehled použitých zkratk

$A_D$	Plocha odřezávané třísky	[mm <sup>2</sup> ]
$a_p$	Hloubka řezu	[mm]
CBN	Kubický nitrid bóru	[-]
$C_{Fc}; C_{kc}; C_k$	Empirické konstanty	[-]
CNC	Computer Numerical Control	[-]
CP	Comercially Pure	[-]
CVD	Chemical Vapour Deposition	[-]
dt	Doba náběhu	[s]
f	Posuvová rychlost	[mm/ot]
F	Řezná síla	[N]
$F_c/F_z$	Řezná složka síly	[N]
$F_f/F_x$	Posuvová složka síly	[N]
$F_p/F_y$	Pasivní složka síly	[N]
$k_c$	Měrný řezný odpor	[MPa]
$\kappa_r$	Hlavní úhel nastavení	[°]
$\kappa_r'$	Vedlejší úhel nastavení	[°]
$\lambda_c$	Základní délka	[mm]
ML	Minimum Quantity Lubricant	[-]
PCD	Polykrystalický diamant	[-]
$P_c$	Výkon stroje v záběru	[W]
$P_0$	Výkon stroje naprázdno	[W]
$P_{už}$	Užitkový výkon	[W]
PVD	Physical Vapour Deposition	[-]
R	Řezný odpor	[N]
Ra	Střední hodnota drsnosti	[μm]
VBD	Vyměnitelné břitové destičky	[-]
$v_c$	Řezná rychlost	[m/min]
$X_{Fc}; Y_{Fc}$	Empirické konstanty	[-]



## Úvod

Slitiny titanu mají široké spektrum využití. Využívají se v civilním i vojenském letectví. Díky své biokompatibilitě jsou také vhodné pro medicínský průmysl. Tyto slitiny se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály, které potřebují intenzivní chlazení při obrábění. To má ale negativní vliv na ekologii. Proto se zaměřím na možnosti suchého soustružení titanových slitin. Cílem této práce je popsat vlastnosti titanu a podmínky obrábění, konkrétně soustružení. Dalším cílem je popsat nástrojové materiály vhodné pro obrábění titanu a nejnovější trendy týkající se vyměnitelných břitových destiček a soustružení.

V dnešní době je kladen velký důraz na ekologičnost procesů. Jako možná varianta se nabízí suché obrábění, které nevyužívá chladících kapalin, čímž také snižuje náklady na obrábění. Obrábění titanu na sucho je ale složité, protože reaguje se vzduchem a jeho povrch výrazně degraduje. Dochází také k velkému tepelnému namáhání nástroje kvůli špatné tepelné vodivosti. Jelikož je ale titan velice lehký a zároveň velice pevný materiál, vyniká tak právě v leteckém průmyslu. Další důležitou schopností titanu je vysoká odolnost proti korozi.

V teoretické části bakalářské práce je stručně popsána historie výroby titanu a rozdělení podle legujících prvků. Dále se zaměřuji na řezné síly při soustružení, jejich výpočet a měření. Ty jsou důležité hlavně pro výrobce nástrojů i strojů. Podle řezných sil je pak potřeba dimenzovat nástrojové držáky, upínací šrouby nebo pohony strojů. Díky řezným silám se dá také předvídat opotřebení nástroje.

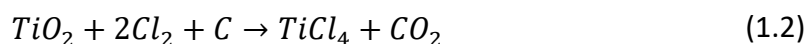
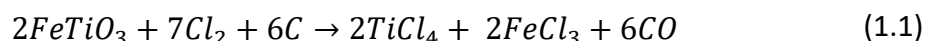
Cílem praktické části je měření řezných sil při suchém obrábění titanu a při různých podmínkách. Následně se vyhodnotí vliv jednotlivých faktorů na řeznou sílu. V závěru práce porovnám řezné síly při suchém soustružení slitiny Ti6Al4V a oceli C45. Z naměřených dat následně vytvořím empirické vztahy určené pro výpočet řezné síly.

## 1. Titan

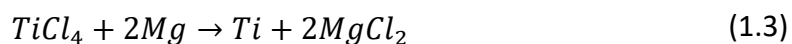
Titan byl objeven v roce 1790 v nerostu ilmenit, ale čistý titan byl vyroben až v roce 1910. Jelikož jeho výroba byla drahá, nebyl do poloviny 20. století příliš rozšířen. Je to devátý nejrozšířenější kov v zemské kůře. S rostoucím výzkumem obráběcích materiálů se zjednodušilo obrábění titanu a jeho slitin, a díky tomu se rozšířilo využití titanu do odvětví letectví, medicíny a také v chemickém a petrochemickém průmyslu. Stále se ale musí dbát na vhodně zvolené řezné podmínky. [1]

### 1.1. Výroba titanu

Čistý titan se vyrábí redukcí ilmenitu ( $\text{FeTiO}_3$ ) nebo rutilu ( $\text{TiO}_2$ ) v proudu chloru za vysokých teplot.



Díky tomu vzniká chlorid titaničitý, který se následně redukuje hořčíkem a získáme tak čistý titan (tzv. titanovou houbu) a chlorid hořečnatý. [1]



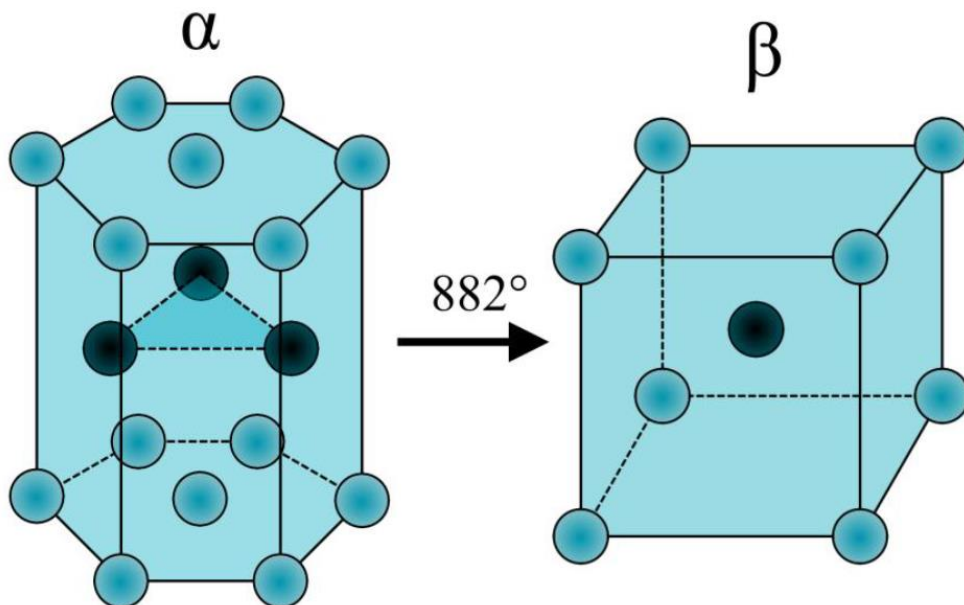
Toto je tzv. Krollův proces. Existuje ještě jeden způsob výroby titanu, a to síranový, při kterém se ilmenit rozloží na směs síranů. Od této metody se ale pomalu upouští. Své využití má i oxid titaničitý ve formě tzv. titanové běloby, která se využívá jako bělidlo v zubních pastách nebo se používá jako povlak ke zmatnění povrchu při optickém měření. [2]

### 1.2. Titan a jeho slitiny

Titan je nemagnetický kov s velice nízkou hustotou ( $4510 \text{ kg/m}^3$ ) v poměru k železu ( $7850 \text{ kg/m}^3$ ). Díky tomu jsou součásti z titanu mnohem lehčí a pevnější než ocelové, což jsou vlastnosti požadované v letectví. Teplota tání se pohybuje mezi  $1660\text{-}1670 \text{ }^\circ\text{C}$  a pevnost v tahu kolem  $240 \text{ MPa}$ . Odolnost titanu může být pozitivně ovlivněna legováním jinými prvky. Za vyšších teplot je velice reaktivní s kyslíkem a dusíkem,

proto je při svařování nutné použít inertní plyny, jako třeba argon. Na druhou stranu je titan a jeho slitiny vysoce biokompatibilní a nereaguje s lidskou tkání ani kostmi. Má schopnost pasivace, což znamená, že při pokojové teplotě vytváří vrstvu  $\text{TiO}_2$  a díky tomu je odolný vůči většině solí a korozi. Na druhou stranu má titan nízkou tepelnou vodivost ( $11,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; železo má kolem  $75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) a nízký součinitel teplotní roztažnosti. Vlivem těchto a dalších faktorů se hůře obrábí.

Čistý titan označovaný též jako CP (Commercially Pure) je ve srovnání s legovanými slitinami svými mechanickými vlastnostmi nejslabší, avšak má nejvyšší korozní odolnost. [1] Má šesterečnou těsně uspořádanou krystalickou mřížku. Ta se při  $882^\circ\text{C}$  mění na mřížku krychlovou prostorově středěnou a titan se tak dostává z fáze  $\alpha$  do fáze  $\beta$ . [3]



Obr. 1 – přeměna slitiny alfa na slitinu beta [3]

### 1.2.1. Slitiny typu $\alpha$

Slitiny typu  $\alpha$  se také někdy nazývají superalfa slitiny a svým složením se nejvíce blíží čistému titanu. Legující prvky se nazývají alfa stabilizátory a jsou jimi například hliník, cín, kyslík a dusík. Díky vysoké pevnosti za tepla mají slitiny vysokou odolnost vůči tečení. Jsou dobře svařitelné a mají skvělé mechanické vlastnosti při kryogenních teplotách. [4]

### **1.2.2. Slitiny typu $\alpha + \beta$**

Slitiny typu  $\alpha + \beta$  vznikají, když jsou přidány alfa i beta stabilizátory k čistému titanu. Jedná se o nejpoužívanější typ slitin. Množství legur výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti slitin. Oproti slitinám typu  $\alpha$  se dají tepelně zpracovávat a vytvrzovat. To je ale také závislé na množství přísadových prvků, např. je možné kalit pouze do přibližně 20 % vanadu. Nejvyužívanější slitina typu  $\alpha + \beta$  je slitina Ti6Al4V. Až 50 % celkové produkce titanu se spotřebuje na výrobu této slitiny. Ta se využívá hlavně v leteckém a vojenském průmyslu. Pevnost v tahu je přibližně 900 MPa. [1]

Využíval se ve velkém i ve zdravotnictví, ale vědci dospěli k názoru, že vanad může mít negativní dopad na zdraví. Proto se v lékařství víc využívá slitina Ti6Al7Nb. [4; 5]

### **1.2.3. Slitiny typu $\beta$**

Legující prvky se nazývají  $\beta$  stabilizátory a patří mezi ně například vanad, molybden a niob. Jsou dobře svařitelné a dobře tvářitelné za studena, ale nejsou vhodné pro kryogenické aplikace. Mají vysokou hodnotu meze kluzu, kolem 1172 MPa. Oproti slitinám  $\alpha + \beta$  mají  $\beta$  slitiny vyšší hustotu a nižší pevnost při tečení. [4]

## **1.3. Grade**

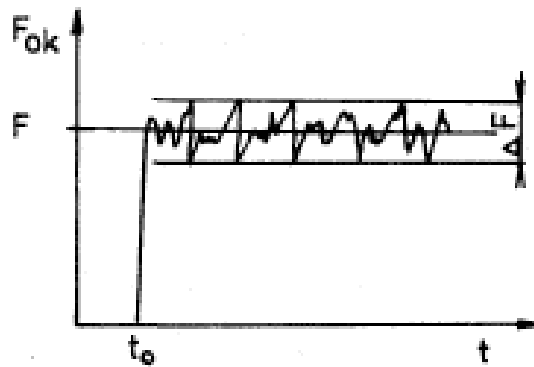
Další rozdělení titanu a jeho slitin je na, volně přeloženo, jakosti. Titan Grade 1 až 4 jsou druhy komerčně čistého titanu. Ti6Al4V je označován jako Titan Grade 5. Do slitiny Titan Grade 7 je přidáno palladium (0,12–0,25 %), jež výrazně zvyšuje odolnost proti korozi. Využívá se hlavně v chemickém průmyslu. Značení takto pokračuje až do čísla 12. [5]

## 2. Řezné síly při soustružení

Obráběný materiál klade břitu řezného nástroje řezný odpor  $R$ . Ten musí být neustále překonáván řeznou silou  $F$ , jinak by nedošlo k odebírání materiálu. Proto musí platit podmínka rovnováhy sil.

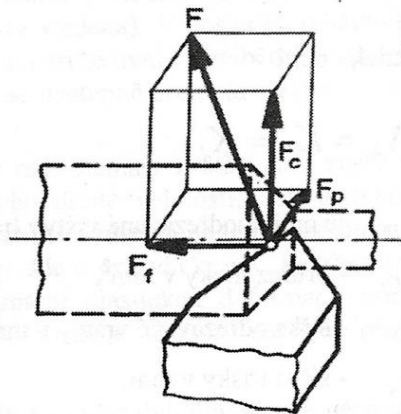
$$F = -R [N] \quad (2.1)$$

Jedná se o dynamický jev, tzn. při obrábění se hodnota řezné síly mění v závislosti na čase i při konstantních řezných podmínkách. To je ovlivněno mnoha faktory např. drsností obráběné plochy, mechanikou tvorby třísky a mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu. Na obr. 2 je graf závislosti okamžité řezné síly na čase.



Obr. 2 – graf závislosti řezné síly na čase [6]

Z tohoto grafu je zřejmé, že po zahájení obrábění v čase  $t_0$  začne okamžitá velikost řezné síly kolísat kolem střední hodnoty síly  $F$ . Tento rozptyl je označen  $\Delta F$ . Hodnota této síly se rovná několika procentům řezné síly  $F$ . [6; 7] Řezná síla  $F$  se dále rozděluje na tři složky, a to řeznou sílu  $F_c$ , posuvovou sílu  $F_f$  a pasivní sílu  $F_p$ . Na obr. 3 je znázorněn rozklad řezné síly při soustružení. [8]



Obr. 3 – rozklad řezných sil [8]

Pokud je úhel nastavení  $\kappa_R$  roven  $45^\circ$ , pak je poměr mezi těmito silami přibližně

$$F_c : F_f : F_p = 1 : 0,25 : 0,4.$$

Celková řezná síla se spočítá pomocí vztahu

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}, \quad (2.2)$$

kde síly jsou uvažovány v N. [8] Další možnost, jak spočítat složky řezné síly, spočívá ve využití empirických vztahů, které jsou mocninového typu

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}}, \quad (2.3)$$

kde  $C_{Fc}$ ,  $x_{Fc}$  a  $y_{Fc}$  jsou empirické konstanty.  $x_{Fc}$  je při soustružení obvykle rovno 1 a  $y_{Fc}$  se přibližně uvažuje 0,75. [8] Vztah pro  $C_{Fc}$  vypadá následovně

$$C_{Fc} = \frac{C_{ap}}{f^{y_{Fc}}} = \frac{C_f}{a_p^{x_{Fc}}}. \quad (2.4)$$

## 2.1. Řezná síla

Řezná (tangenciální) síla působí ve směru vektoru řezné rychlosti. Jedná se o největší složku řezné síly. Určuje efektivní výkon obrábění a slouží k určování optimálních řezných podmínek. Také se z 99 % podílí na celkovém příkonu při obrábění. [8]

## 2.2. Posuvová síla

Posuvová (axiální) síla působí ve směru posuvu nástroje, a tudíž ve směru osy obrobku. Její velikost obvykle tvoří 25 % řezné síly. Má malý vliv na příkon při obrábění, protože rychlost posuvu je ve srovnání s řeznou rychlostí velmi malá. Je nejvíc ovlivněna tuhostí soustavy stroj-nástroj-obrobek a vyvolává deformace tohoto systému. [8]

## 2.3. Pasivní síla

Pasivní (radiální) síla působí při řezání na obráběnou plochu. Její velikost obvykle tvoří 40 % řezné síly. Působí ve směru nejmenší tuhosti soustavy. Kvůli tomu je ovlivněna výsledná přesnost obrobené plochy a také chvění při obrábění. To se přímo úměrně zvyšuje se snižující se tuhostí soustavy. [8] Také je silně ovlivněna velikostí poloměru

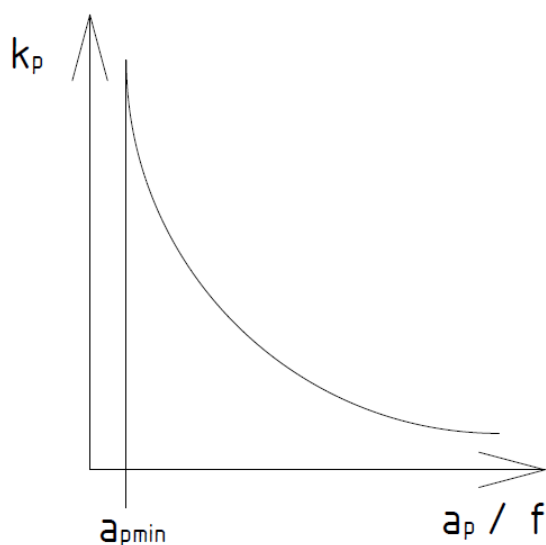
špičky. Příliš vysoká radiální síla může vést k vibracím, což dále vede ke zhoršení obráběného povrchu. Proto je doporučováno, aby poloměr špičky byl stejný nebo menší, než je hloubka řezu. [9]

## 2.4. Měrný řezný odpor

Měrný řezný odpor (také měrná řezná síla) představuje sílu potřebnou k obrobení třísky o ploše 1 mm<sup>2</sup>. Tato hodnota je ovlivněna vlastnostmi obráběného materiálu, rychlostí posuvu, řeznou rychlostí a geometrií nástroje. Největší vliv má právě posuv  $f$  a hloubka řezu  $a_p$ . [8; 10] Je dána vztahem,

$$k_c = \frac{F_c}{A_D}, \quad (2.5)$$

kde  $F_c$  je celková řezná síla a  $A_D$  je průřez odřezávané vrstvy (obvykle se jedná o součin posuvu a hloubky řezu) v mm<sup>2</sup>. Graf závislosti měrného řezného odporu je identický pro hodnoty posuvu i hodnoty hloubky řezu, jelikož ovlivňují měrný řezný odpor stejnou měrou. Na obr. 4 je vidět závislost mezi měrným řezným odporem a posuvem/hloubkou řezu. [6]



Obr. 4 – závislost měrného řezného odporu na posuvu/hloubce řezu [6]

Pro spočítání hodnoty  $k_c$  se dá také využít empirických vztahů, např.

$$k_c = \frac{C_{kc}}{f^{u_{kc}}}, \quad (2.6)$$

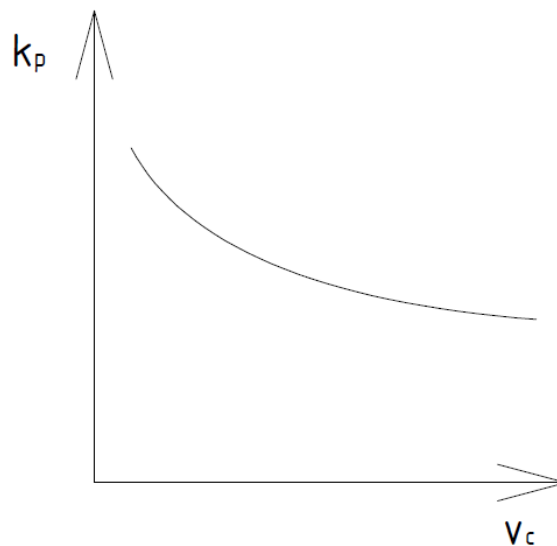
kde  $f$  je posuv na otáčku a  $C_{kc}$ ,  $u_{kc}$  jsou empirické konstanty. Hodnota exponentu  $u_{kc}$  se obvykle pohybuje v rozsahu 0,15–0,30.

Jelikož je měrná řezná síla ovlivňována i vlastnostmi materiálu, dá se vyjádřit vztahem

$$k_c = C_k \cdot R_m, \quad (2.7)$$

kde  $R_m$  je mez pevnosti v tahu a  $C_k$  konstanta (pro soustružení je 3–5). [8]

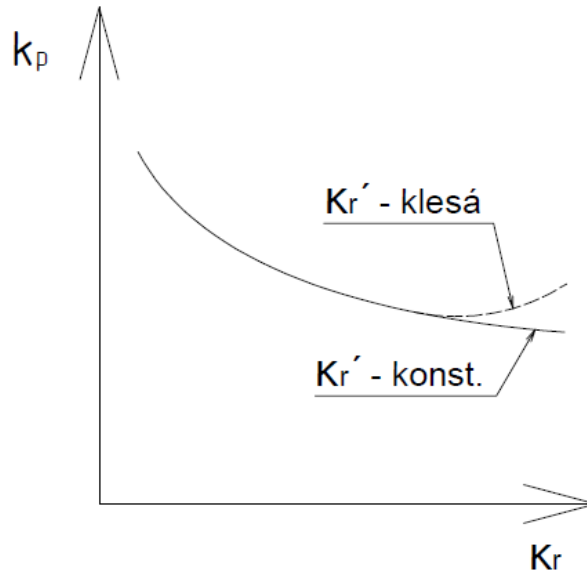
Měrný řezný odpor je také ovlivňován řeznou rychlostí. Tato závislost má obvykle klesající charakter, pokud nedochází ke změnám mechanických vlastností obrobku nebo tvorbě nárůstku. Klesá ovšem pomaleji než u závislosti na posuvu, jak je vidět na obr. 5. [6]



Obr. 5 – závislost měrného řezného odporu na řezné rychlosti [6]

Podobně klesající je i závislost měrného řezného odporu na úhlu nastavení. Při zvětšování úhlu  $\kappa_r$  se zmenšuje vedlejší úhel nastavení  $\kappa_r'$ . To může vést ke zvětšování sil na vedlejším ostří a měrný řezný odpor může růst. To naznačuje přerušovaná čára na obr. 6. [6]





Obr. 6 – závislost měrného řezného odporu na úhlu nastavení [6]

## 2.5. Měření řezných sil

Existují dva způsoby měření řezných sil, a to přímý a nepřímý. Při měření nepřímou metodou vycházíme z výkonu elektromotoru obráběcího stroje a vztahu pro užitkový výkon při obrábění

$$P_{už} = F_c \cdot v_c, \quad (2.8)$$

kde  $P_{už}$  je užitkový výkon,  $F_c$  je řezná (tangenciální) síla a  $v_c$  řezná rychlost. Také je potřeba zjistit hodnotu užitkového výkonu. Ten spočítáme pomocí vztahu

$$P_{už} = P_c - P_o, \quad (2.9)$$

kde  $P_c$  je celkový výkon obráběcího stroje v záběru a  $P_o$  označuje výkon při chodu naprázdno. Obě tyto hodnoty se měří wattmetrem.

Tato metoda měření je jednoduchá, nevyžaduje nákladnou speciální měřicí techniku a je možné ji využít u všech způsobů obrábění. Nevýhodou je, že tímto způsobem zjistíme pouze řeznou složku síly při obrábění (s velice omezenou přesností), zatímco pasivní a posuvová síla je neznámá. [7]

### 2.5.1. Dynamometry

Dynamometry slouží k přímému měření složek řezné síly. Pracují na principu měření deformací v soustavě stroj-nástroj-obrobek. Musí být vyrobeny tak, aby

neovlivňovaly měření provozními vlastnostmi. Z toho následně plynou požadavky na tuhost, citlivost dynamometrů, stálost a reprodukovatelnost údajů.

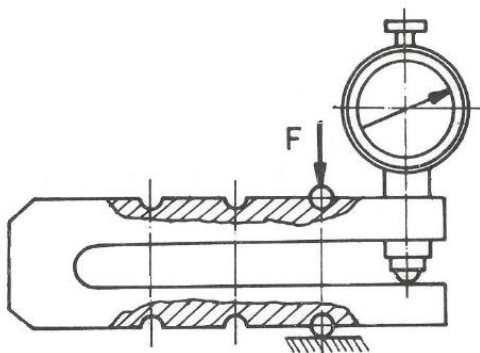
Tuhost je dána velikostí zatěžující síly, která způsobuje deformaci. Velikost této deformace závisí na tvaru a provedení deformačního elementu. [7]

Citlivost dynamometru souvisí s citlivostí použité měřicí metody a s tuhostí konstrukčního provedení dynamometru. Kvalitní výzkumné dynamometry by měly dosahovat citlivosti v rozmezí  $\pm 1$  %. V praxi to znamená, že pokud měříme sílu o velikosti 100 N, tak by měl být znát rozdíl v síle o velikosti 1 N. [11]

Dále je nutné dbát na konstrukci dynamometru, aby nedocházelo k ovlivňování jednotlivých složek řezné síly.

### 2.5.2. Mechanické dynamometry

Jedná se dynamometry s jednoduchou konstrukcí, s dobrou stálostí údajů a přesností v rozmezí 0,5–2 %. Velikost síly je přenášena přímo na měřicí prvek, kterým je např. číselníkový úchylkoměr. Síla se usuzuje z deformací silových pružin, třmenů nebo kroužků. Na obr. 7 je vidět třmenový dynamometr, který je nejčastěji používaným



Obr. 7 – mechanický dynamometr třmenový [7]

druhem mechanických dynamometrů. Využívají se převážně na cejchování jiných dynamometrů. Pro běžné měření nejsou vhodné kvůli vysokému vlivu teplot na měření a kvůli únavě materiálu. [7]

### 2.5.3. Hydraulické dynamometry

Tyto dynamometry měří manometrem změnu tlaku v kapalině, která nastane při působení síly nebo momentu na píst. Výhodou je jednoduchá konstrukce a možnost

snadného měření více složek řezné síly najednou. Nevýhodou je nízká citlivost a vysoké požadavky na utěsnění systému. Proto se v současné době tolik nepoužívají. [7; 11]

#### **2.5.4. Pneumatické dynamometry**

Pneumatické dynamometry využívají dynamických vlastností vzduchu procházejícího štěrbinou. Princip spočívá v měření změny tlaku nebo průtoku vzduchu v závislosti na mezeře mezi klapkou a tryskou. Jedná se o jednoduché a spolehlivé měřicí systémy. Na druhou stranu jejich konstrukce bývá robustní. [7; 11]

#### **2.5.5. Indukční dynamometry**

Indukční dynamometry fungují na principu změny indukčnosti v obvodu. Kvůli působení síly se mění šířka vzduchové mezery, čímž dochází ke změně impedance magnetického obvodu, a tudíž se mění i indukčnost cívky. [7]

#### **2.5.6. Kapacitní dynamometry**

Kapacitní dynamometry využívají pro měření změny kapacity snímačů, ke které dochází kvůli vzniklým deformacím. Jsou však velice náročné na měřicí techniku a prostředí, a proto se příliš nepoužívají. [7]

#### **2.5.7. Odporové dynamometry**

U odporových dynamometrů se využívá pro měření deformací změny odporu snímačů. Nejpoužívanějším druhem odporových snímačů jsou odporové tenzometry. Tenzometr je přímo spojen s deformačním elementem, proto se deformují společně. Kvůli deformacím dochází i k měřitelným změnám odporu.

Rozdělují se na kovové a polovodičové tenzometry, kde u kovových se jako materiál využívá slitina mědi a niklu, tzv. konstantan, zatímco u polovodičových tenzometrů se využívá křemík nebo germanium. Kovové se dále dělí podle technologie výroby na drátkové, fóliové a napařované. [7]

### 2.5.8. Piezoelektrické dynamometry

Při vystavení vnějšímu namáhání vzniká na povrchu určitých materiálů elektrický náboj. Tento jev se nazývá piezoelektrický a lze jej využít u dynamometrů pro snímání deformací. [12]



Obr. 8 – piezoelektrický dynamometr [35]

Tento jev objevili Pierre a Jacques Curie v roce 1880, ale až v 60. letech se začal hojně využívat právě v dynamometrech. Za nejpoužívanější materiál se považuje křemen, dále pak materiály na bázi titaničitanu barnatého nebo Seignettovy soli. Při zatížení je velikost náboje na krystalu přímo úměrná velikosti působící síly. [7; 11] V současné době vyrábí moderní piezoelektrické dynamometry firma KISTLER. Ten také využiji v praktické části této bakalářské práce.

### 3. Obrábění titanových slitin

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2., titan je obtížně obrobitelný materiál. V této kapitole se dopodrobna zaměřím na vlastnosti titanových slitin, které ovlivňují obrábění, jaké jsou možnosti řešení těchto problémů a trendy v obrábění titanových slitin.

#### 3.1. Obrobitelnost titanových slitin

Hlavním problémem při obrábění titanových slitin je vznik větších řezných sil než při obrábění ocelí s ekvivalentní tvrdostí. Také je potřeba použít nástroj s pozitivnější geometrií než při obrábění ocelí. [1]

Kvůli většímu řeznému odporu se generuje mnohem více tepla, které kvůli nízké tepelné vodivosti titanu mnohem více namáhá nástroj. Pokud jsou třísky příliš malé, hrozí vzplanutí. Navíc vznikají kráterové výmoly podél břitu.

V následující tabulce je porovnání slitiny Ti6Al4V a oceli C45 (12 050 dle ČSN). [13; 14; 15]

Tabulka 1 – vlastnosti slitiny Ti6Al4V a oceli C45

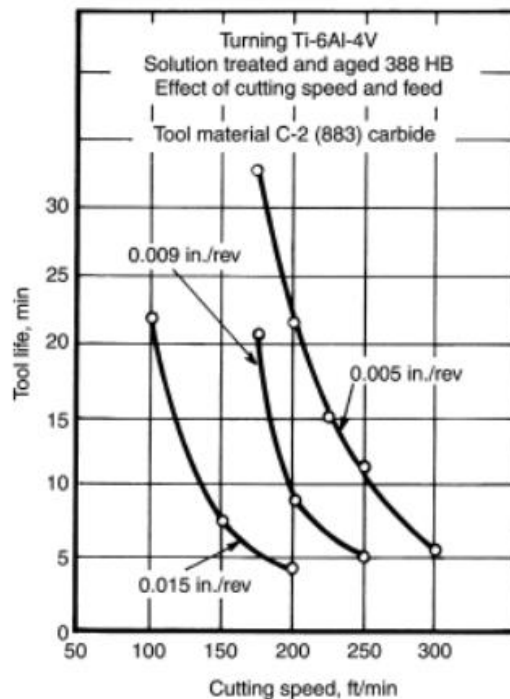
	Ti6Al4V	C45
Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	4 503	7 800
Mez pevnosti [MPa]	900	540
Tvrdost dle Brinella	330	191
Modul pružnosti v tahu [GPa]	113	211
Tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	7,1	42,5

Titan má také nižší modul pružnosti než ocel. Pokud není dostatečně velká plocha obráběné třísky, nástroj nezabírá a je odtlačován od obrobku. Dochází tak k přerušovanému řezu a nežádoucímu růstu pasivní síly. Při obrábění tenkostěnných profilů může nastat borcení a vznik nežádoucích vibrací. To negativně ovlivňuje jak nástroj, tak i rozměrovou přesnost. [16]

Dále má titan tendenci vytvářet adhezivní spoje s materiály nástroje během obrábění. To způsobuje vytváření nárůstku, ořez a lámání nástroje spojené s kompletní destrukcí. [1]

### 3.2. Řezné podmínky při obrábění titanu

Pravděpodobně nejdůležitějším parametrem ve výrobě je životnost nástroje. Doporučují se nižší řezné rychlosti, aby se minimalizovala teplota na hraně nástroje, což vede ke zvýšení životnosti. Na obr. 9 je vidět graf popisující vliv řezné rychlosti



Obr. 9 – vliv životnosti nástroje na řezné rychlosti a posuvu [1]

a posuvu na životnost nástroje. Pro slitiny titanu se doporučují nižší rychlosti než pro čistý titan. Pro nástroj z rychlořezné oceli se řezná rychlost pohybuje kolem 15–25 m/min, pro slinuté karbidy se zdroje rozcházejí ohledně vhodné rychlosti. Jako nejvhodnější se ukazuje řezná rychlost 50–80 m/min. Při různých experimentech, kdy se měří životnost destiček, se volí rychlosti až kolem 120–300 m/min, aby se zrychlil průběh pokusu. [7]

Dalším doporučením jsou vysoké hodnoty posuvu v rozmezí od 0,05 mm/ot. až do 0,5 mm/ot. Velikost posuvu má malý vliv na teplotu při obrábění, proto si můžeme

dovolit vyšší. Zároveň by měla být hloubka řezu větší než zpevněná vrstva po předchozím obrábění.

Při obrábění titanu by se mělo používat dostatečné množství chladicí kapaliny. Ta nejen že pomáhá odvádět teplo z místa řezu, ale také odplavuje třísky a snižuje řezné síly, tudíž prodlužuje životnost nástroje. [17]

Měli bychom se snažit o kontinuální obrábění. Pokud bychom zastavili v řezu, dochází k nežádoucímu otěru a může dojít ke zničení nástroje. Zároveň by se měla věnovat pozornost ostrosti nástroje. Ten by se měl měnit při prvních známkách opotřebení.

Také je důležitá tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek. [1; 18]

### **3.3. Doporučené nástrojové materiály**

V této kapitole se zaměřím na téma materiálů nástrojů a vyměnitelných břitových destiček (VBD). Jak již bylo zmíněno, titan se kvůli svým vlastnostem řadí mezi těžkoobrobitelné kovy, a proto je třeba dbát na vhodně zvolený materiál nástroje, se kterým se bude obrábět. Nástroj musí být odolný vůči abrazi a teplotním vlivům. V oblasti obrábění ocelí se využívají novější materiály, jako např. speciální keramiky, povlakované karbidy, kubické nitridy boru (CBN) nebo polykrystalické diamanty, které postupně nahrazují rychlořezné oceli. Pro obrábění titanu se však ukázaly jako nevhodné. Všeobecně se používají slinuté karbidy nebo rychlořezné oceli. Pro soustružení a frézování jsou lepší slinuté karbidy s vyšším podílem wolfram karbidu, zatímco pro vrtání nebo dokončování jsou lepší houževnatější karbidy s vyšším podílem kobaltu a rychlořezné oceli. [1; 17]

Firma ISCAR doporučuje obyčejné nepovlakované karbidy, díky čemuž je zachována ostrá řezná hrana. V případě použití povlaku je vhodnější použít povlak PVD, který je mnohem tenčí než CVD povlak a na hraně nevzniká tak velký rádius. [19] Ostrá hrana nám zaručuje snadné oddělování materiálu a nižší řeznou sílu. Nevydrží sice tak vysoká napětí jako honovaná hrana ve tvaru rádiusu, ale ta je nevhodná kvůli špatnému vnikání do materiálu a vznikají tak mnohem větší síly, než takový nástroj snese. [4; 18]

Firma Sandvik Coromant doporučuje PVD i CVD povlakované destičky, které jsou odolné vůči většině opotřebení, např. nárůstku a plastické deformaci. Destičky jakosti S205 mají CVD povlak ( $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$ ) a jsou určeny převážně pro dokončování, kde se svými vlastnostmi blíží CBN. Destičky jakosti GC1105 mají PVD povlak ( $\text{TiAlN}$ ) a jsou určeny pro běžné operace soustružení. [20]



## 4. Inovace v oblasti obrábění titanu

V této kapitole se zaměřím na vědecké práce, které se zabývají soustružením titanu, novými materiály destiček a ekologií při obrábění.

### 4.1. Progresivní materiály

I když se moderní materiály používají pro obrábění titanu jen výjimečně, stále se provádí výzkum v oblasti jejich využití. Titan je oficiálně zařazen do skupiny kovů neobrobitelných diamantem. Do této skupiny patří společně s ocelí, niklem, kobaltem a dalšími prvky. Skrze chemické analýzy bylo zjištěno, že je tento efekt způsoben vznikem vazeb mezi uhlíkem a daným kovem. K tomu dochází, protože tyto kovy mají jeden až pět volných nespárovaných elektronů ve třetím orbitalu. Zároveň při obrábění titanu vzniká velké množství tepla a diamant vydrží pouze teploty do 600°C. Poté ztrácí své vlastnosti a mění se na obyčejný uhlík. [21] [22]

Proběhlo již několik výzkumů, které se pokoušely o ultra přesné obrábění slitiny Ti6Al4V. Při běžném vysoce přesném obrábění se přesností blížíme jednotkám mikrometrů a Ra přibližně 0,1 mikrometru. Při ultra přesném obrábění se přesností blížíme jednotkám nanometrů a Ra až 0,5 nanometru. Vzdálenost mezi dvěma atomy je přibližně 0,2–0,4 nm, proto při úběru musí nástroj překonávat energii atomových vazeb. To by většina konvenčních nástrojů nevydržela, proto se vždy používá monokrystalický diamant. [23] Otáčky se pohybují v tisících za minutu, hloubka řezu je obvykle v řádu mikrometrů a posuv se udává v jednotkách milimetrů za minutu. Aby se umožnilo obrábění všech materiálů diamantem, na nástroj se nanáší niklový povlak. [24; 25; 26]

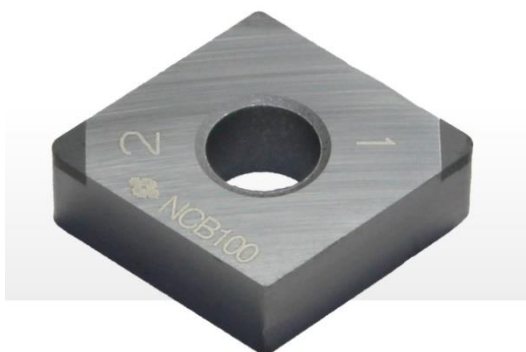
Kubický nitrid boru byl také podroben několika testům při obrábění Ti6Al4V. Několik druhů CBN bylo porovnáváno s nepovlakovaným slinutým karbidem. Ten se nakonec ukázal jako mnohem vhodnější volba, co se týče životnosti nástroje, protože destičky z CBN se mnohem rychleji vylamovaly, pravděpodobně kvůli difúzi. [27]

Také je možné použít keramickou destičku s whiskery, která má vhodné vlastnosti pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů a žáruvzdorných slitin. Pro titanové slitiny jsou ale vhodnější destičky s pozitivním úhlem čela, zatímco nástroje z rezné

keramiky mají obvykle úhel čela nulový. [20; 28] Výzkum také potvrzuje, že klasické slinuté karbidy mají lepší vlastnosti než keramika, která je mnohem náchylnější na lámání řezné hrany i při použití různých druhů chlazení. [29]

#### 4.2. NCB100

Vědci z Oregon Manufacturing Innovation Center (OMIC) vytvořili a otestovali nový druh CBN. Ten byl vytvořen slinováním zrn CBN bez využití pojiva, které bylo často důvodem vylamování, protože je měkkší než tvrdá složka destičky. Nový materiál byl otestován společně s nepovlakovanou destičkou ze slinutého karbidu. Při řezné rychlosti 60 m/min ukázala po 45 minutách opotřebení na špičce, které ale bylo předvídatelné. Destička z CBN při rychlosti 120 m/min, vykazovala ve stejném čase poloviční opotřebení. Hloubka řezu byla v obou případech 0,5 mm. Další test provedli při rychlosti 180 m/min a destička z CBN až po 7 hodinách vykazovala stejné poškození, jako karbidová destička po 45 minutách. Nakonec destička vydržela 9 hodin, než došlo k úplnému uštípnutí špičky. Na obr. 10 je vidět daná destička.



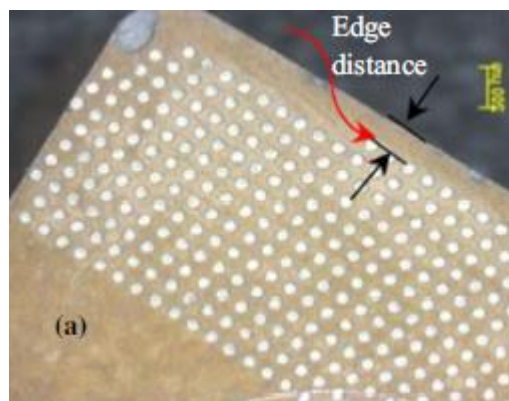
Obr. 10 – destička z NCB100 [36]

Výhodou je, že NCB100 se dá využít pro všechny možné druhy obrábění i materiály. Již byly provedeny úspěšné testy při obrábění kalených ocelí nebo slitin kobaltu a chromu. Vědci z OMIC se nyní zaměřují na vytvoření polykrystalického diamantu bez pojiva. [30]

#### 4.3. Drážkování na nástroji

Vědci z Indian Institute of Technology Delhi testovali hladkou destičku s nulovým úhlem čela a destičku s texturovaným povrchem. Ten je upraven buď drážkováním nebo mělkým děrováním. Na obr. 11 je vidět nástroj použitý při konkrétním testu.

Zároveň využívali metodu konečných prvků a porovnávali výsledky simulace se skutečným obráběním. Výhodou simulací je, že lze provádět libovolné testy bez nutnosti pořizovat nákladná zařízení a materiál. Výsledky ukázaly, že simulace má velice blízko ke skutečným naměřeným hodnotám. Tým vědců dospěl k výsledku, že díky nižšímu tření texturovaný nástroj výrazně zlepšuje obrobiteľnosť slitiny Ti6Al4V. Kvůli lepšímu odchodu třísky má nižší drsnost povrchu než destička s hladkým povrchem. Také došlo k výraznému snížení řezné síly a teploty špičky nástroje při suchém obrábění. Zatímco u hladkého nástroje převládalo vrubové opotřebenění a abrazivní otěr, texturovaný nástroj měl výraznější tvorbu nárůstků. [31]

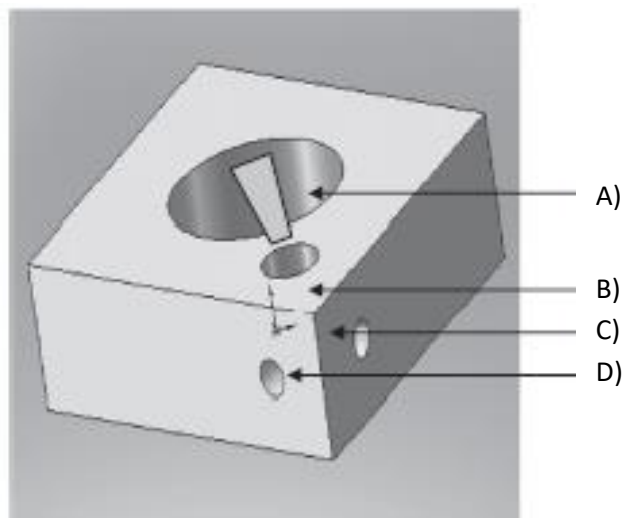


Obr. 11 – upravený povrch destičky [31]

#### 4.4. Kryogenické chlazení při obrábění

Využívání emulzí složených z vody a oleje je v poslední době přísně regulováno, kvůli škodlivému vlivu na životní prostředí. Při suchém obrábění vznikají vysoké teploty, které negativně ovlivňují životnost nástroje. Musí se proto využívat jiné způsoby chlazení. Jednou z možností je chlazení tekutým dusíkem, které je šetrné k životnímu prostředí a výrazně prodlužuje životnost nástroje. [32] Další variantou kryogenického chlazení je využití tekutého CO<sub>2</sub>. [33] Vědci z Anna University, Chennai provedli test, v němž porovnávali kryogenické chlazení a chlazení pomocí emulze oleje a vody v poměru 1:20. Využili destičku ze slinutého karbidu od firmy Kennametal s PVD povlakem (TiAlN). Na obr. 12 je viditelná úprava destičky, která byla provedena pomocí elektroerozivního obrábění. Vytvořily se tak tři díry pro optimální chlazení v okolí špičky nástroje. Díra na čele (obr. 12–B) slouží pro přívod tekutého

dusíku (obr. 12–A), zbylé dvě díry slouží pro chlazení hlavního (obr. 12–C) a vedlejšího ostří (obr. 12–D). Teplota v místě řezu byla 504 °C a 192 °C pro chlazení emulzí, respektive kryogenicky. Takto výrazné snížení teploty má za následek snížení řezné síly, drsnosti povrchu a prodloužení životnosti nástroje. [32] Tento způsob chlazení se dá zkombinovat s metodou MQL (Minimum Quantity Lubrication), při níž je emulze dodávána po kapkách, které jsou rozprášeny proudem vzduchu na aerosol. Při použití v kombinaci s kryogenickým chlazením zaručuje dostatečné mazání v místě řezu a snížení tření na řezné hraně. [33; 34]



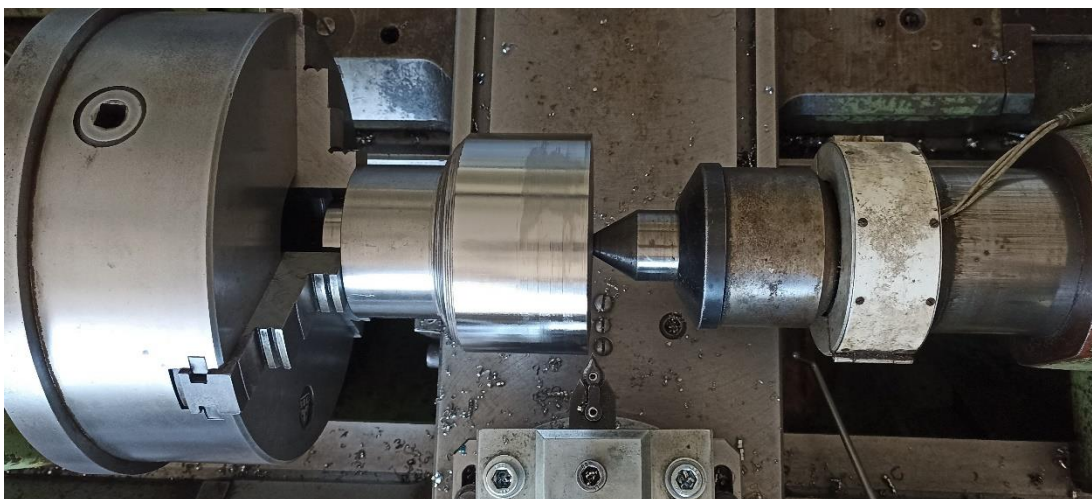
Obr. 12 – upravená destička pro kryogenické obrábění [32]

## 5. Praktická část

V praktické části bakalářské práce jsem se zaměřil na měření řezných sil při suchém obrábění slitiny Ti6Al4V a jak na ně působí změna řezných podmínek. Naměřené hodnoty jsou následně vyneseny do grafů. Díky tomu byly spočítány hodnoty koeficientů  $C_{FC}$ ,  $x_{FC}$ ,  $y_{FC}$  a byl vytvořen vlastní empirický vztah pro výpočet řezné síly. Spočítané hodnoty byly porovnány s naměřenými a určila se odchylka. Totéž bylo provedeno s ocelí C45 a byly porovnány výsledky obrábění.

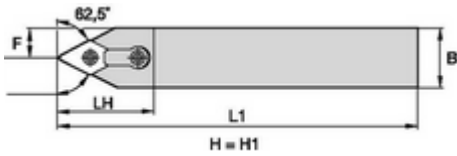
### 5.1. Pracovní podmínky experimentu

Experiment byl prováděn ve školních laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Pro urychlení experimentu se obrábělo na konvenčním soustruhu SU 50 A. Na CNC soustruhu by se pro každou změnu podmínek musel upravovat program, což by zabralo příliš času. Ke změření složek řezných sil byl použit tříoskový piezoelektrický dynamometr 9265 od firmy KISTLER. Jako další příslušenství k dynamometru byl potřeba zesilovač náboje a převodník signálu na volty, který tento signál posílá do počítače. Také je potřeba pracovní software DynoWare. V tomto programu jsou složky řezné síly přejmenovány.  $F_x$  představuje posuvovou sílu,  $F_y$  je síla pasivní a  $F_z$  řezná síla. Polotovar z Ti6Al4V měl průměr přibližně 150 mm. Na obr. 13 je vidět upnutí polotovaru i dynamometru. Pro lepší stabilitu a snížení házení byl polotovar podepřen koníkem.

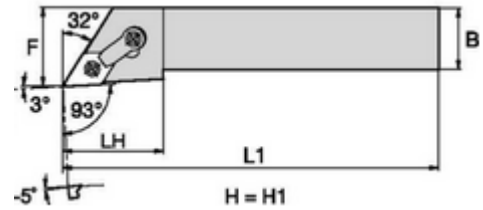


Obr. 13 - upnutí polotovaru Ti6Al4V

Byly použity nožové držáky od firmy Kennametal MDNNR-2525M15 NJ0 s úhlem  $\kappa_R$  62,5° a MDJNR-2020K15 NB1 s úhlem  $\kappa_R$  93°.



Obr. 14 – držák MDNNR-2525M15 NJ0 [37]



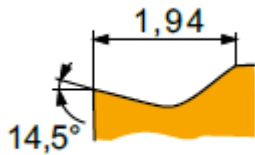
Obr. 15 – držák MDJNR-2020K15 NB1 [38]

Byly použity tři různé destičky. Jedna (DNMG150608FN) od firmy Kennametal a zbylé (DNMG150604E-SF, DNMG150608EL-SI) od firmy Dormer Pramet.



Obr. 16 – Destičky v pořadí dle typu utvařeče– SF, FN, SI

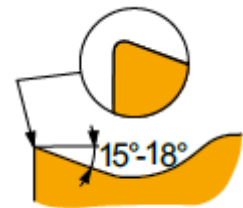
Na obr. 17, 18 a 19 jsou uvedeny tvary utvařečů jednotlivých destiček.



Obr. 17 – utvařeč SF [39]



Obr. 18 – utvařeč FN [40]



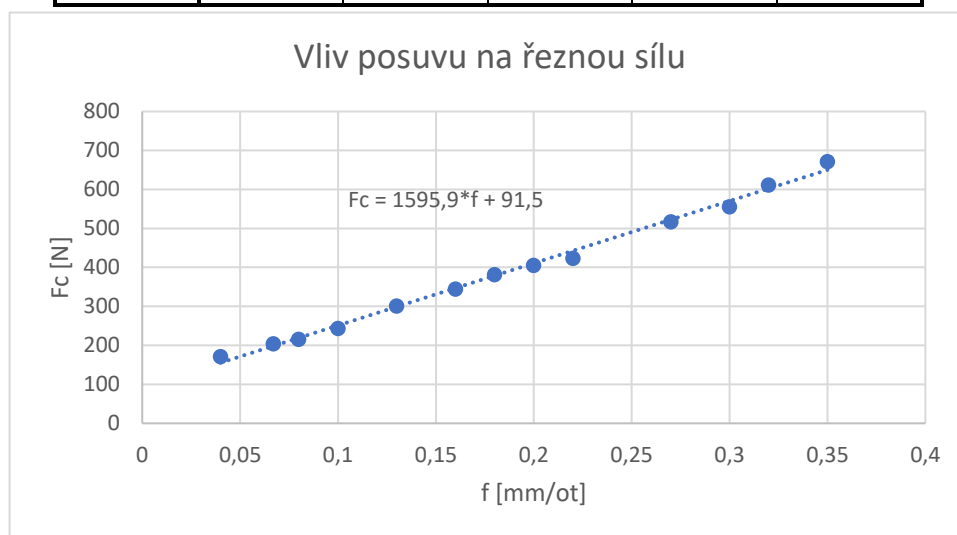
Obr. 19 – utvařeč SI [39]

## 5.2. Vliv posuvu na řeznou sílu

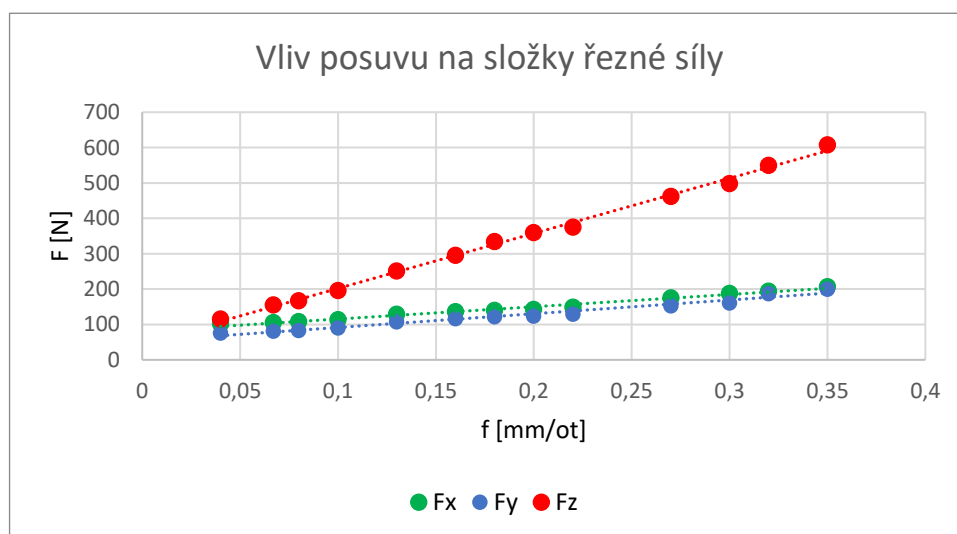
Pro tento experiment byly po dohodě s vedoucím práce zvoleny hodnoty hloubky řezu 1 mm a řezné rychlosti 45 m/min jako konstantní. Hodnoty posuvu jsou uvedené v tabulce 2. Použitá destička byla DNMG 150604E-SF s úhlem  $\kappa_R$  62,5°. Destička byla vždy v řezu přibližně 10 sekund a pomocí programu byly zjištěny ze vzniklé amplitudy průměrné hodnoty složek řezné síly. V tabulce 2 jsou uvedeny naměřené hodnoty a v grafech 1 a 2 jsou zaneseny.

Tabulka 2 – naměřené hodnoty složek řezné síly

f [mm/ot]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>c</sub> [N]	k <sub>c</sub> [MPa]
0,04	101,9	75,23	115,5	171,4	2887,5
0,067	105,3	80,38	154,8	203,7	2310,4
0,08	108	82,23	167,1	215,3	2088,8
0,1	113,3	89,73	195,9	243,4	1959,0
0,13	128,6	107,1	250,5	301,3	1926,9
0,16	136,1	116,1	294,9	344,9	1843,1
0,18	139,5	121,9	333,9	381,8	1855,0
0,2	142,3	123,6	359,2	405,6	1796,0
0,22	149	129,2	375	423,7	1704,5
0,27	175,2	152,1	461,9	516,9	1710,7
0,3	187,7	160,5	498	555,9	1660,0
0,32	194,3	186,3	549,3	611,7	1716,6
0,35	206,7	199,4	607,2	671,7	1734,9

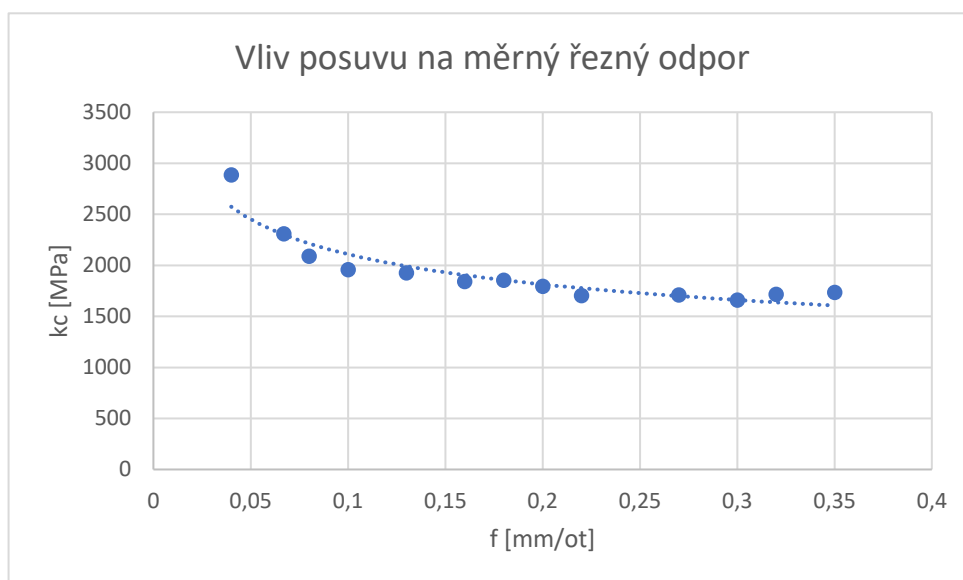


Graf 1 – vliv posuvu na řeznou sílu



Graf 2 – vliv posuvu na složky řezné síly

Všechny tři složky řezné síly rostou lineárně, jak bylo předpokládáno. Zatímco na začátku byly všechny tři složky velice blízko, řezná složka rostla mnohem rychleji než pasivní a posuvová. Tyto dvě složky byly se postupně přibližovali. Při nejnižší hodnotě posuvu byl poměr sil 1:0,88:0,65 pro řeznou složku síly, posuvovou sílu a sílu pasivní. Při nejvyšší hodnotě byl tento poměr 1:0,34:0,33. Při nižších rychlostech posuvu dochází k nesouvislému řezu. To je pravděpodobně způsobeno tím, že hodnota měrného řezného odporu je příliš velká. Tento odpor exponenciálně roste se snižující se hodnotou posuvové rychlosti, až dosáhne teoretického nekonečna při nulovém posuvu, jak je vidět v následujícím grafu.



Graf 3 - vliv posuvu na měrný řezný odpor

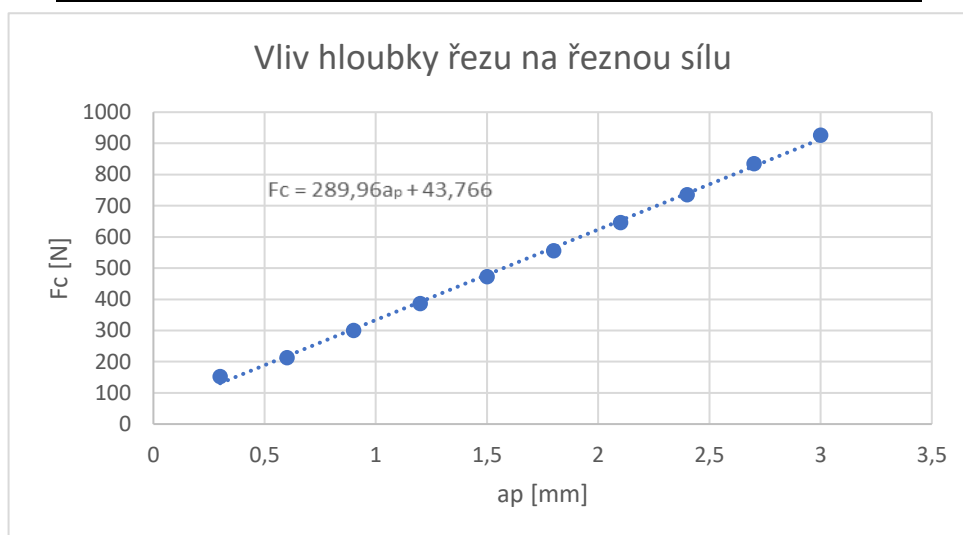
### 5.3. Vliv hloubky řezu na řeznou sílu

Pro tento experiment byly zvoleny hodnoty posuvu 0,15 mm/ot a řeznou rychlost 45 m/min jako konstantní. Hodnoty hloubky řezu jsou uvedeny v tabulce 3. Destička byla zvolena DNMG 150604E-SF, pro kterou výrobce doporučuje maximální hloubku řezu 2,4 mm. Tato hodnota byla v rámci experimentu překročena. Úhel  $\kappa_R$  byl 62,5°.

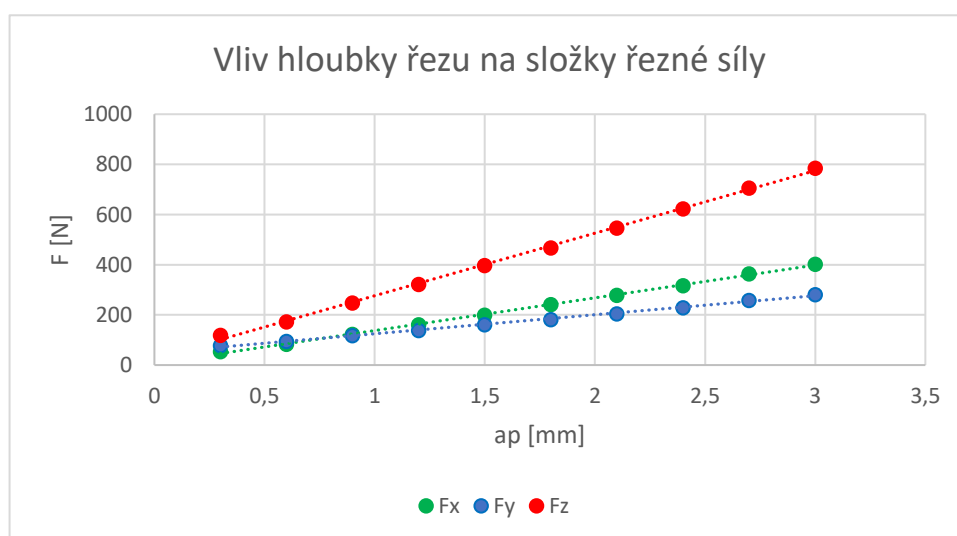


Tabulka 3 – naměřené hodnoty

ap [mm]	F <sub>c</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	k <sub>c</sub> [MPa]
0,3	152,1	54,05	77,4	119,2	2648,9
0,6	213,1	83	94,81	171,8	1908,9
0,9	300,4	123	117	247,8	1835,6
1,2	385,8	161	138,1	322,3	1790,6
1,5	472,8	199,8	160,4	397,4	1766,2
1,8	556,0	241,1	181,8	466,8	1728,9
2,1	646,1	278	204,5	546,2	1734,0
2,4	735,4	317	229,1	622,8	1730,0
2,7	834,6	363,3	258,1	705,7	1742,5
3	925,7	402,6	280,6	784,9	1744,2

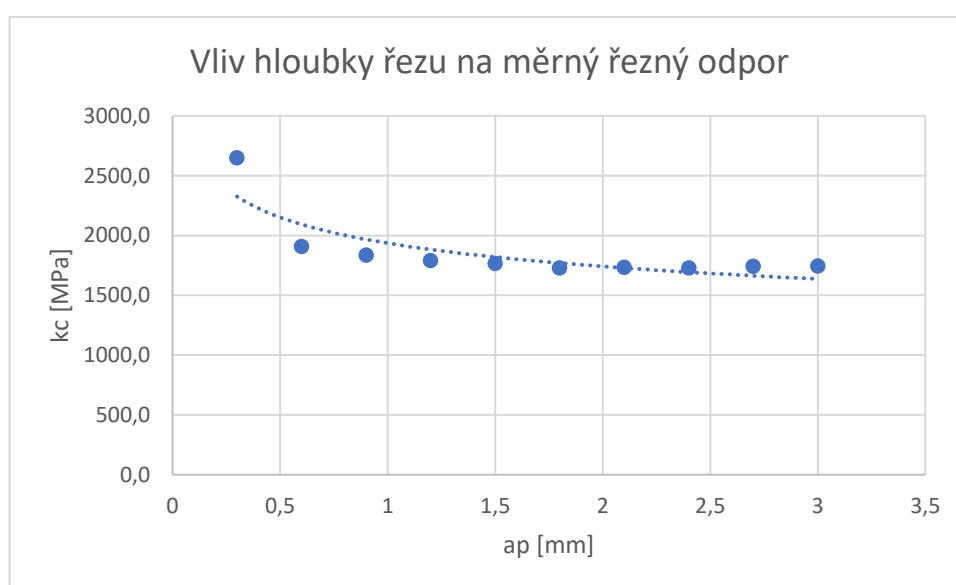


Graf 3 – vliv hloubky řezu na řeznou sílu



Graf 4 – vliv hloubky řezu na složky řezné síly

Stejně jako u předchozího experimentu je zřetelný lineární růst řezné síly. Zároveň je vidět, že při hodnotách hloubky řezu nižších, než je rádius nástroje (0,8 mm), je pasivní síla větší než posuvová. To je způsobeno tím, že při nižší hloubce řezu, než je rádius destičky, dochází ke změně úhlu nastavení hlavního ostří a zvýšení pasivní síly. To může vést k nežádoucím vibracím. Měrný řezný odpor roste exponenciálně s klesající hloubkou řezu, stejně jako u posuvu, protože hodnota plochy třísky se počítá ze součinu posuvu a hloubky řezu. Proto je měrný řezný odpor ovlivněn hloubkou řezu jako posuvem.



Graf 5 – vliv hloubky řezu na měrný řezný odpor

#### 5.4. Vliv úhlu nastavení hlavního ostří na řeznou sílu

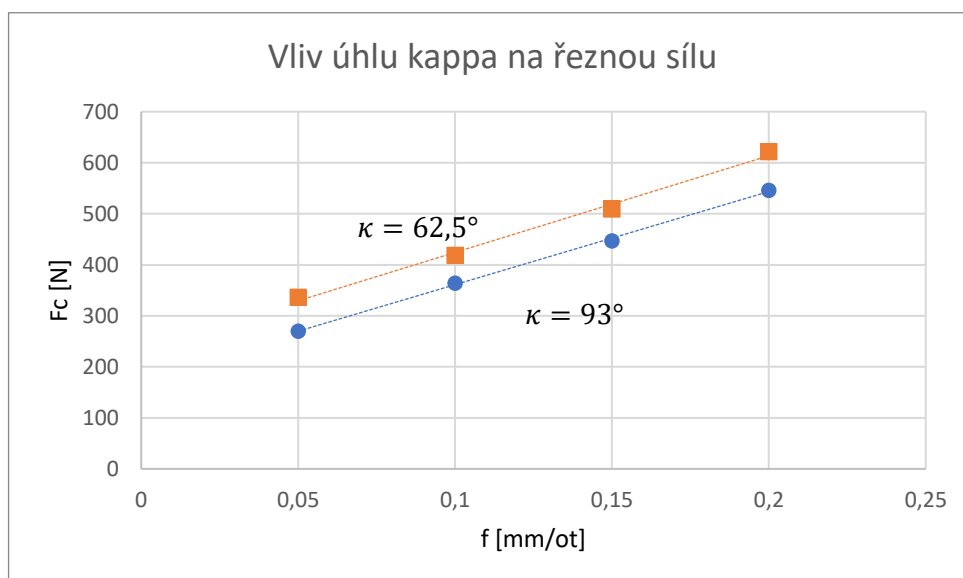
Při tomto experimentu se určoval vliv dvou různých úhlů nastavení na řeznou sílu. Byly využity dva různé nožové držáky s úhly  $\kappa_R$  62,5° a 93°. Použitá destička byla DNMG150608FN. Měření bylo prováděno dvakrát, v obou případech se stejnou hloubkou řezu 1 mm. V prvním případě byl určen stálý posuv 0,1 mm/ot a měnily se hodnoty řezné rychlosti, ve druhém případě byla nastavena hodnota řezné rychlosti 40 m/min a měnila se posuvová rychlost. V následujících tabulkách jsou zaneseny hodnoty složek řezné síly a hodnota dt, která označuje dobu, za jakou řezná síla dosáhla maxima od začátku obrábění.

Tabulka 4 – naměřené hodnoty při  $\kappa_r = 62,5^\circ$

f	$F_c$	$F_x$	$F_y$	$F_z$	dt
0,05	336,5	197,3	211,4	172	1,106
0,1	418,5	219,4	249,5	254,5	1,023
0,15	509,3	256,7	287,6	332,8	0,878
0,2	622,0	306,7	331,9	427,4	0,968

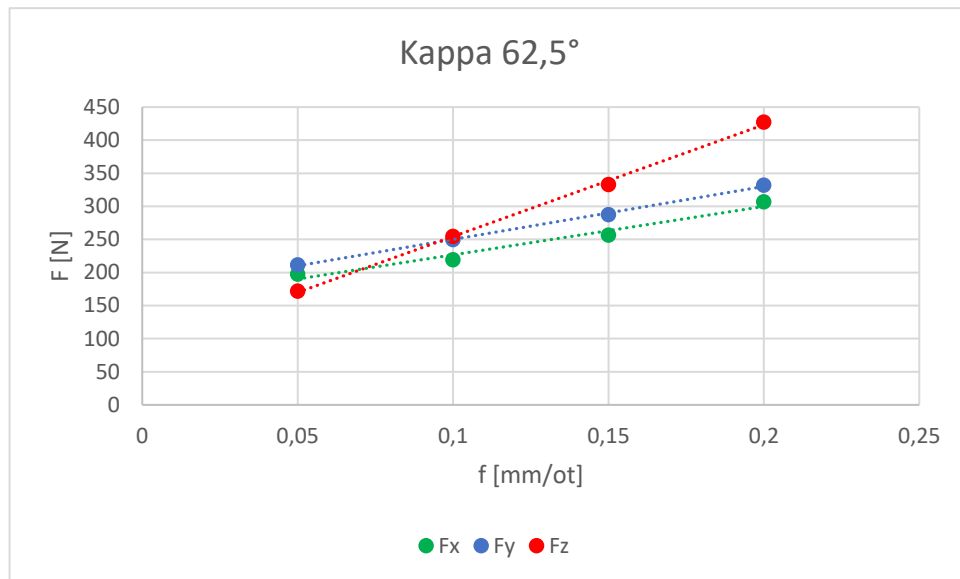
Tabulka 5 – naměřené hodnoty při  $\kappa_r = 93^\circ$

f	$F_c$	$F_x$	$F_y$	$F_z$	dt
0,05	269,6	174,1	135,2	155,3	1,038
0,1	363,9	204,9	166,9	250,2	0,987
0,15	446,9	226,5	187,9	336,3	0,859
0,2	546,1	258,6	214,9	430,3	0,87

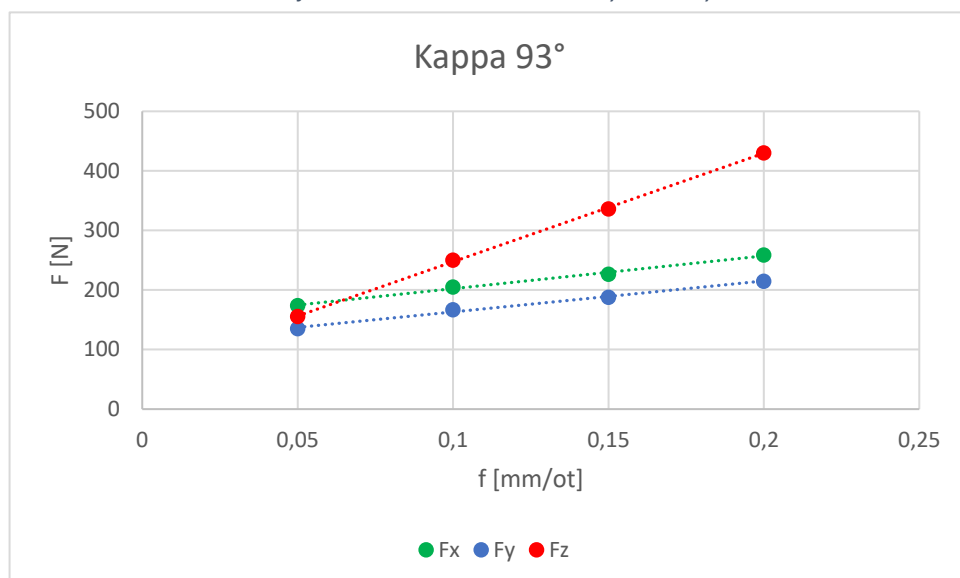


Graf 6 – vliv úhlu nastavení na řeznou sílu

Řezná síla má opět stoupající tendenci, jelikož proměnnou hodnotou je posuv. Platí zde, že menší úhel nastavení hlavního ostří znamená větší sílu a naopak. Zároveň je vidět, že destička s úhlem  $93^\circ$  vnikne do materiálu rychleji, byť je rozdíl jen v řádu milisekund. Kvůli tomu je ale destička s větším úhlem nastavení více náchylná na poškození. Také znát vliv úhlu nastavení na posuvovou a pasivní sílu. Čím menší je úhel nastavení, tím větší je pasivní složka řezné síly. Následující dva grafy zobrazují vliv posuvu na všechny složky řezné síly.



Graf 7 – vliv úhlu nastavení na složky řezné síly



Graf 8 – vliv úhlu nastavení na složky řezné síly

Je vidět, že při menších posuvech je řezná síla menší u destičky s větším úhlem nastavení. Při vyšších hodnotách posuvu je ale řezná síla pro obě destičky podobná. Zároveň je vidět, vliv úhlu nastavení na pasivní složku síly, kdy při úhlu 62,5° je větší než při úhlu 93°.

Tabulka 6 – poměr složek řezné síly při úhlu nastavení 62,5°

vc	Fx	Fy	Fz
35	1,15	1,23	1
45	0,86	0,98	1
55	0,77	0,86	1
65	0,72	0,78	1

Tabulka 7 – poměr složek řezné síly při úhlu nastavení 93°

vc	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>
35	1,12	0,87	1
45	0,82	0,67	1
55	0,67	0,56	1
65	0,60	0,50	1

Zde je vidět vliv úhlu nastavení na pasivní sílu. Zároveň se zvyšující se řeznou rychlostí se zmenšuje poměr mezi řeznou silou a pasivní silou. To je ale způsobeno tím, že řezná síla roste mnohem rychleji než pasivní síla.

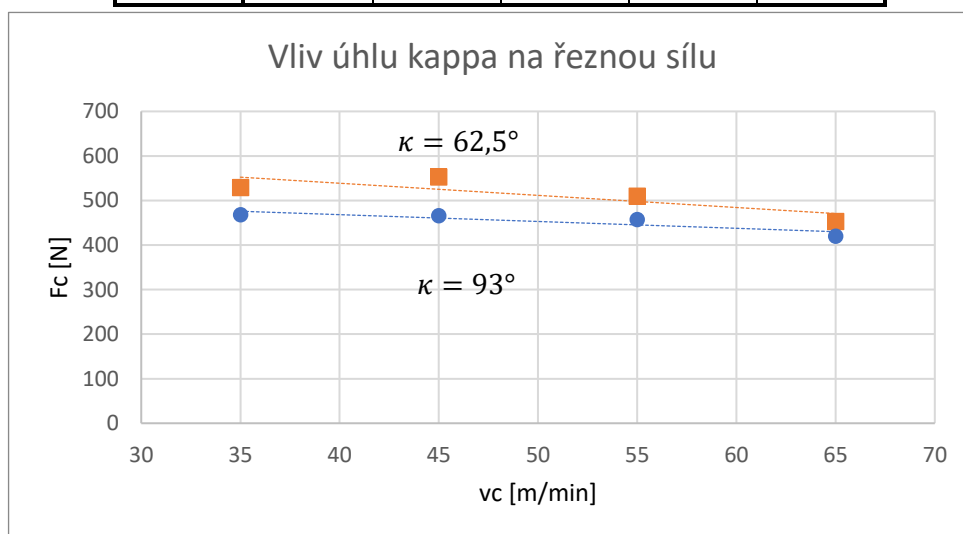
V následujících tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty složek řezné síly, při konstantním posuvu, hloubce řezu a různých řezných rychlostech.

Tabulka 8 – naměřené hodnoty při  $\kappa_r = 62,5^\circ$

vc	F <sub>c</sub>	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	dt
35	529,5	325,3	299,4	291,4	1,158
45	553,2	350,6	317,7	286,6	0,96
55	510,1	304,3	291	288	0,88
65	453,1	240,1	252,5	289,7	0,719

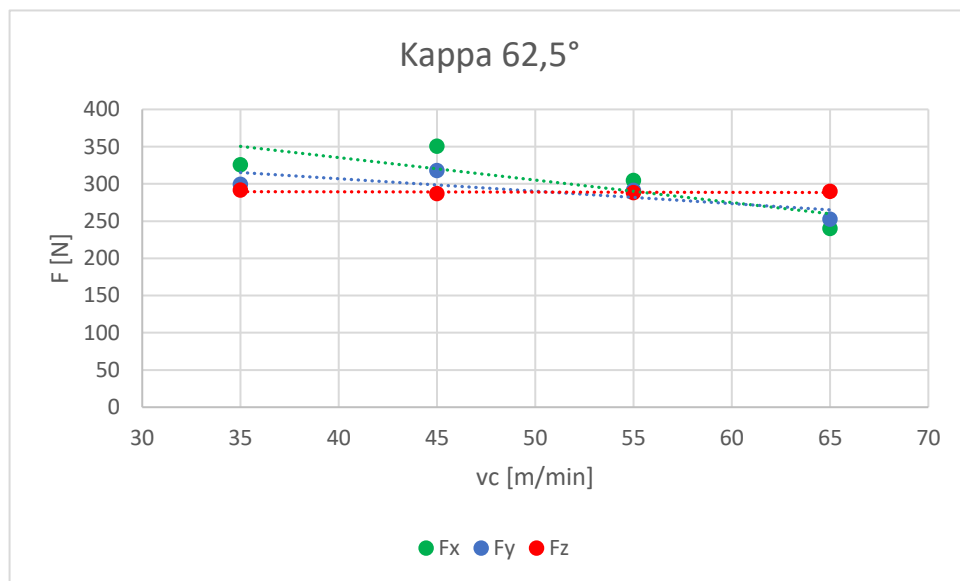
Tabulka 9 – naměřené hodnoty při  $\kappa_r = 93^\circ$

vc	F <sub>c</sub>	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	dt
35	468,2	290,7	216,9	296,1	1,14
45	465,9	291,6	216,9	291,5	0,888
55	457,6	284,2	214,2	287,6	0,775
65	419,9	241,2	195,3	282,9	0,642

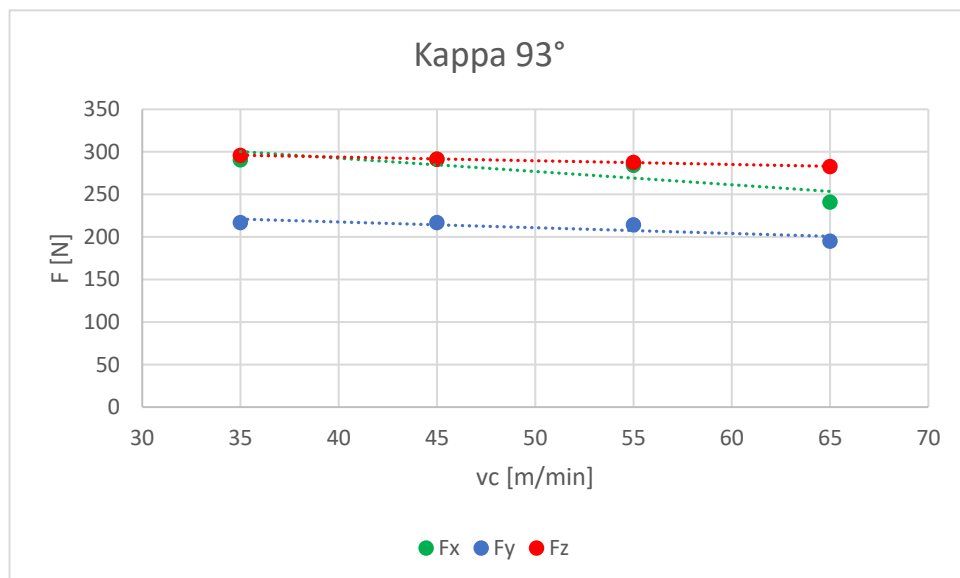


Graf 9 – vliv úhlu nastavení na řeznou sílu

Zde je proměnnou veličinou řezná rychlost. Při zvyšování řezné rychlosti dochází k poklesu řezné síly. Opět jako v předchozím experimentu se potvrdilo, že větší úhel nastavení hlavního ostří znamená menší řeznou sílu a menší pasivní síly. Nástroj s větším úhlem  $\kappa_r$ , dosáhne maximální hodnoty řezné síly rychleji než druhý nástroj. Rozdíl je však opět minimální. Výhodou nástroje s úhlem  $93^\circ$  je menší pasivní síla a schopnost vytvořit ostrý roh. Nástroj s menším úhlem zase mnohem víc vydrží, náběh na maximální hodnotu síly je sice delší ale plynulejší a má lepší rozložení tepla.



Graf 10 – vliv úhlu nastavení na složky řezné síly



Graf 11 – vliv úhlu nastavení na složky řezné síly

Také poměry složek řezných sil se liší s jiným úhlem nastavení. Ty jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 10 – poměr složek řezné síly při úhlu nastavení 62,5°

vc	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>
35	1,12	1,03	1
45	1,22	1,11	1
55	1,06	1,01	1
65	0,83	0,87	1

Tabulka 11 – poměr složek řezné síly při úhlu nastavení 93°

vc	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>
35	0,98	0,73	1
45	1,00	0,74	1
55	0,99	0,74	1
65	0,85	0,69	1

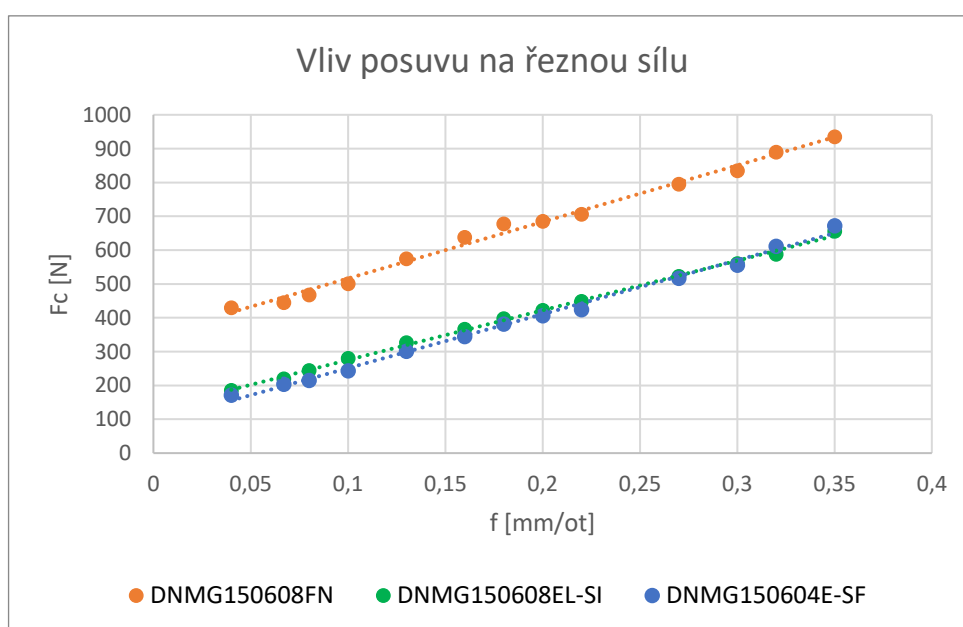
Tyto poměry ukazují, že při menším úhlu nastavení a nižších rychlostech jsou posuvová a pasivní složka síly větší řezná síla. Až při nejvyšší řezné rychlosti klesly hodnoty posuvové a pasivní síly. Podobně tomu je i u úhlu nastavení 93°, kdy při nejvyšší rychlosti došlo k poklesu těchto dvou složek řezné síly.

## 5.5. Vliv destičky na řeznou sílu

Při tomto experimentu se určoval vliv destiček na řeznou sílu. Použité destičky již byly představeny na začátku kapitoly. Na začátku každého měření byla použita zcela nová destička. Jako proměnná veličina se zvolil posuv, hloubka řezu byla 1 mm a řezná rychlost byla 45 m/min. Úhel  $\kappa_R$  byl 62,5°. Jelikož jsou destičky oboustranné bylo potřeba použít vykloněný nůž. Ten má ortogonální úhel čela 6°, který upravuje úhel na utvařeči. V tabulce 8 jsou již spočítané hodnoty řezné síly  $F_c$ , které jsou následně převedeny do grafu 6.  $F_{c1}$  označuje destičku DNMG150608FN,  $F_{c2}$  označuje DNMG150608EL-SI a  $F_{c3}$  je řezná síla destičky DNMG150604E-SF.

Tabulka 8 – naměřené hodnoty

f [mm/ot]	F <sub>c1</sub> [N]	F <sub>c2</sub> [N]	F <sub>c3</sub> [N]
0,04	429,9	185,9	171,4
0,067	445,0	219,6	203,7
0,08	467,3	244,4	215,3
0,1	500,6	279,9	243,4
0,13	574,8	326,6	301,3
0,16	637,7	366,2	344,9
0,18	678,0	397,5	381,8
0,2	684,9	422,0	405,6
0,22	706,0	448,4	423,7
0,27	794,5	522,7	516,9
0,3	835,0	560,7	555,9
0,32	889,3	588,1	611,7
0,35	935,1	656,2	671,7



Graf 12 - vliv destičky na řeznou sílu

Jak již bylo potvrzeno, řezná síla roste lineárně s rostoucím posuvem. Zřetelný je též rozdíl u destičky typu FN oproti ostatním. Tento rozdíl je daný tím, že utvařeč tohoto typu má rovnou fazetku a až poté se svažuje pod úhlem 10°. Na titan jsou mnohem vhodnější destičky s ostrou hranou a větším úhlem čela. Tato destička je určena pro dokončování kalených a nerezových ocelí. Zbylé dvě destičky měly lepší výsledky, jelikož jsou přímo určené na obrábění titanových slitin a mají ostřejší úhel čela na utvařeči třisek, konkrétně 14,5° pro utvařeč SF a 15-18° pro utvařeč SI. Zároveň mají obě ostrou hranu.

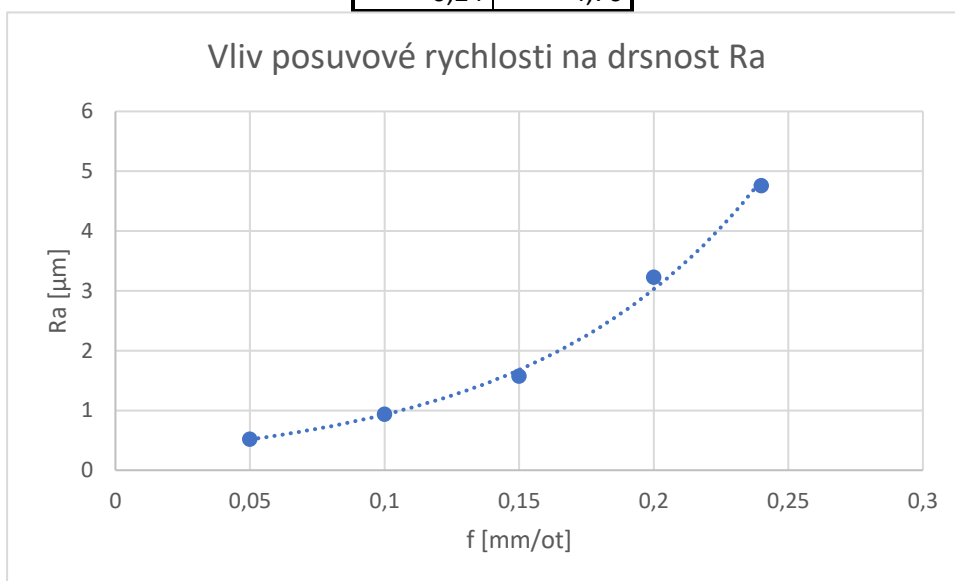


## 5.6. Vliv posuvové rychlosti na drsnost

Při tomto experimentu bylo zvoleno pět rychlostí posuvu, hloubka řezu 1 mm a řezná rychlost 45 m/min. Každá obrobená oblast byla dlouhá přibližně 8 mm. K měření drsnosti byl použit drsnoměr MarSurf PS10 od firmy Mahr. Základní délka  $\lambda_c$  je daná na 0,8 mm. Měřená délka se rovná pětinasobku základní a k tomu je ještě přičtená dvakrát polovina délky na rozběh a doběh. Měřená délka tak byla 4,8 mm a každé měření bylo provedeno dvakrát. V tabulce 9 jsou uvedené hodnoty posuvu a průměr z měřených hodnot.

Tabulka 9 – naměřené hodnoty drsnosti

f [mm/ot]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
0,05	0,522
0,1	0,938
0,15	1,575
0,2	3,227
0,24	4,76



Graf 13 – vliv posuvové rychlosti na drsnost Ra

Jak je vidět na grafu 13, dochází k exponenciálnímu růstu drsnosti Ra při zvyšování posuvové rychlosti. Velký vliv na tuto hodnotu má také rádius destičky, který je v tomto případě velmi malý (0,4 mm). Kvůli zvyšování posuvové rychlosti nedochází k překrývání jednotlivých drah. S vyšší posuvovou rychlostí vznikají vyšší výstupky, což má vliv na velikost drsnosti Ra. Protokoly z měření drsnosti jsou uvedeny v příloze.

## 5.7. Experimentální zjištění řezné síly

Při tomto experimentu byly změřeny řezné síly při různých hodnotách řezné rychlosti, hloubce řezu a posuvové rychlosti. Z výsledných závislostí se spočítaly koeficienty  $C_{FC}$ ,  $x_{FC}$  a  $y_{FC}$ . Ty byly poté dosazeny do rovnice 2.3 a porovnány s naměřenými hodnotami. Tento experiment byl proveden dvakrát. V prvním případě byl obráběný materiál slitina Ti6Al4V, v případě druhém byla obráběna ocel C45 (12 050 dle ČSN). Úhel  $\kappa_R$  byl 62,5°. Použitá destička pro obě měření byla DNMG150604E-SF.

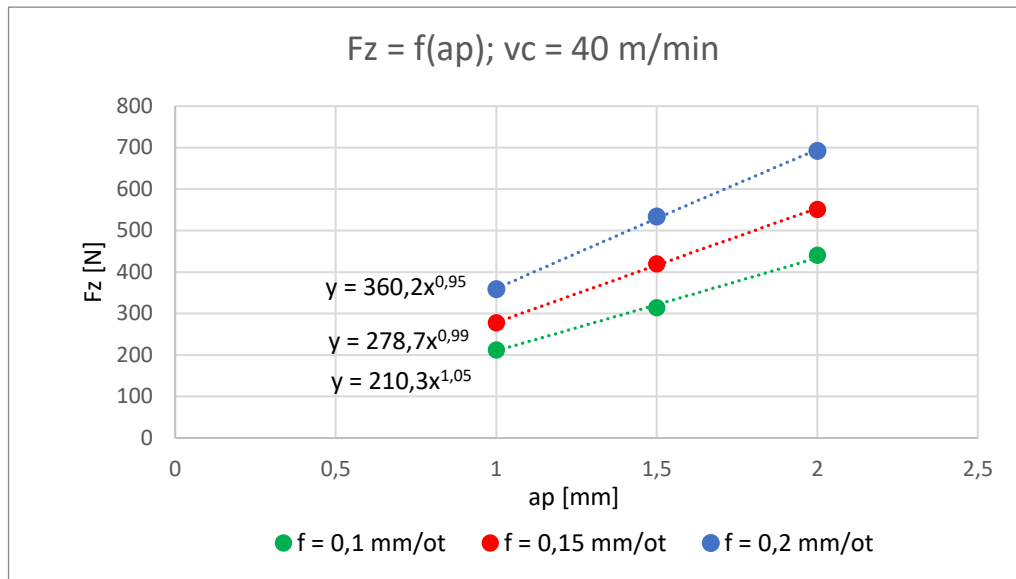
### 5.7.1. Ti6Al4V

V tabulce 10 jsou uvedené hodnoty pro řeznou rychlost 40 m/min.

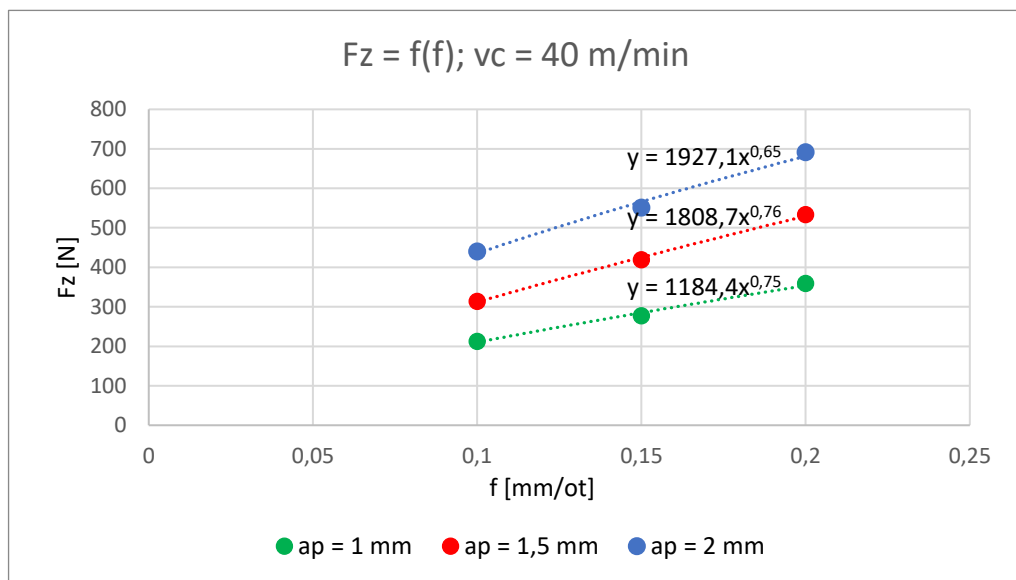
Tabulka 10 – hodnoty řezné síly

$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
$f$ [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_x$ [N]	119	129,5	140,7	228,8	246,3	261	335,1	318,6	336,7
$F_y$ [N]	104,3	120,8	131,8	170	189,4	208	230,9	231,2	252
$F_z$ [N]	212,4	277,8	359	313,7	419,7	533,6	440,3	551,3	692

Z těchto hodnot byly vytvořeny dva grafy závislosti řezné síly na hloubce řezu (graf 8) a posuvu (graf 9). Následně byla vytvořena mocninná spojnice trendu a rovnice dané přímkou. Ze závislosti na hloubce řezu se zjistily hodnoty exponentu  $x_{FCi}$  a ze závislosti na posuvu se zjistily hodnoty  $y_{FCi}$ . Poté byl spočítán aritmetický průměr z těchto hodnot a zjistila se výsledná velikost mocnitelů  $x_{FC}$  a  $y_{FC}$ . Pomocí těchto exponentů se následně spočítá hodnota koeficientů  $C_{FCi}$  podle vzorce 2.4 a z nich se spočítá průměrná hodnota. Spočítané hodnoty jsou v tabulce 11.



Graf 14 – závislost řezné síly na hloubce řezu



Graf 15 – závislost řezné síly na posuvu

Tabulka 11 – hodnoty koeficientů

	$x_{Fc}$	$y_{Fc}$	$C_{ap}$	$C_f$
1	1,05	0,75	210	1184
2	0,99	0,76	279	1809
3	0,95	0,65	360	1927
$\bar{x}$	<b>1,00</b>	<b>0,72</b>		

Následně se spočítají hodnoty koeficientu  $C_{Fc}$ .

$$C_{Fc1} = \frac{C_{ap1}}{f^{y_{Fc}}} = \frac{210}{0,1^{0,72}} = 1102,2$$

$$C_{Fc2} = \frac{279}{0,15^{0,72}} = 1093,6$$

$$C_{Fc3} = \frac{360}{0,2^{0,72}} = 1147,1$$

$$C_{Fc4} = \frac{C_{f1}}{a_p^{x_{Fc}}} = \frac{1184}{1^1} = 1184$$

$$C_{Fc5} = \frac{1809}{1,5^1} = 1208,4$$

$$C_{Fc6} = \frac{1927}{2^1} = 966,8$$

$$C_{Fc} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=6} C_{Fci} = \mathbf{1117}$$

Výsledný empirický vztah pro spočítání řezné síly, při řezné rychlosti 40 m/min, vypadá následovně.

$$F_c = 1117 \cdot a_p^1 \cdot f^{0,72}$$

V následující tabulce 12 je porovnání spočítaných hodnot s naměřenými hodnotami a spočítaná odchylka.

Tabulka 12 – spočítané hodnoty řezné síly

$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
$f$ [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_{změřeno}$ [N]	212,4	277,8	359	313,7	419,7	533,6	440,3	551,3	692
$F_{spočítáno}$ [N]	212,8	285,0	350,6	318,6	426,6	524,8	424,2	568,0	698,8
odchylka [%]	0,20	2,52	2,41	1,54	1,62	1,68	3,79	2,94	0,97

Obvykle jsou hodnoty exponentů uvažovány 1 a 0,75 pro  $x_{Fc}$  a  $y_{Fc}$ , respektive. Spočítaná hodnota exponentu  $x_{Fc}$  a  $y_{Fc}$  se blíží teoretické hodnotě uvedené v literatuře. Odchylka oproti naměřeným hodnotám je maximálně 4 %. Tento

experiment byl zopakován i pro řezné rychlosti 50 a 60 m/min. V tabulce 13 a 14 jsou zanesené naměřené hodnoty.

Tabulka 13 – naměřené hodnoty při řezné rychlosti 50 m/min

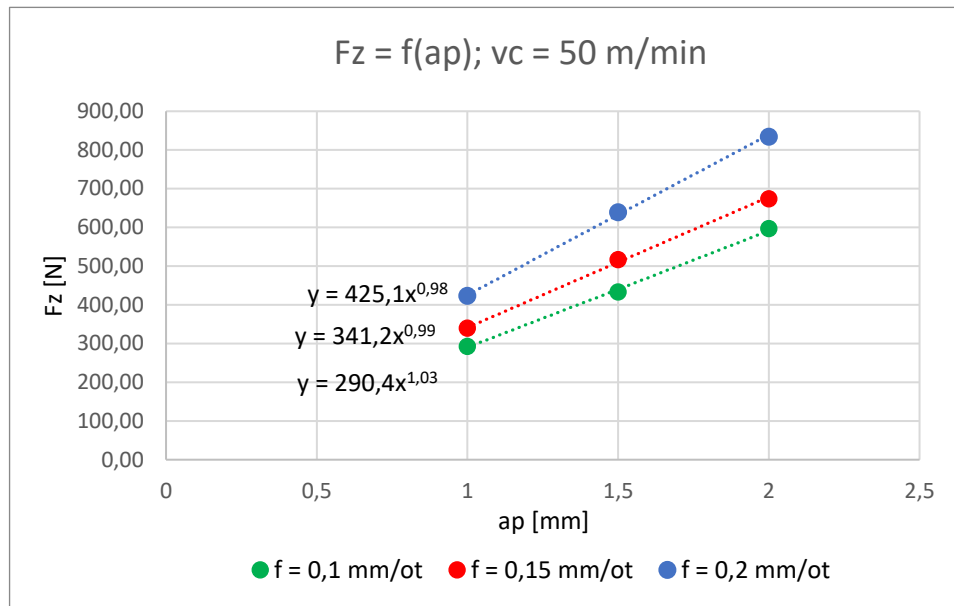
$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
$f$ [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_x$ [N]	145,7	140,3	152,9	234,5	240	267,1	331,9	317,2	353,9
$F_y$ [N]	119,6	124,3	143,2	174,3	186,3	216,1	227,8	229,5	263,6
$F_z$ [N]	223,5	282,9	367,9	319,6	418	539	440,8	547,8	708

Tabulka 14 – naměřené hodnoty při řezné rychlosti 60 m/min

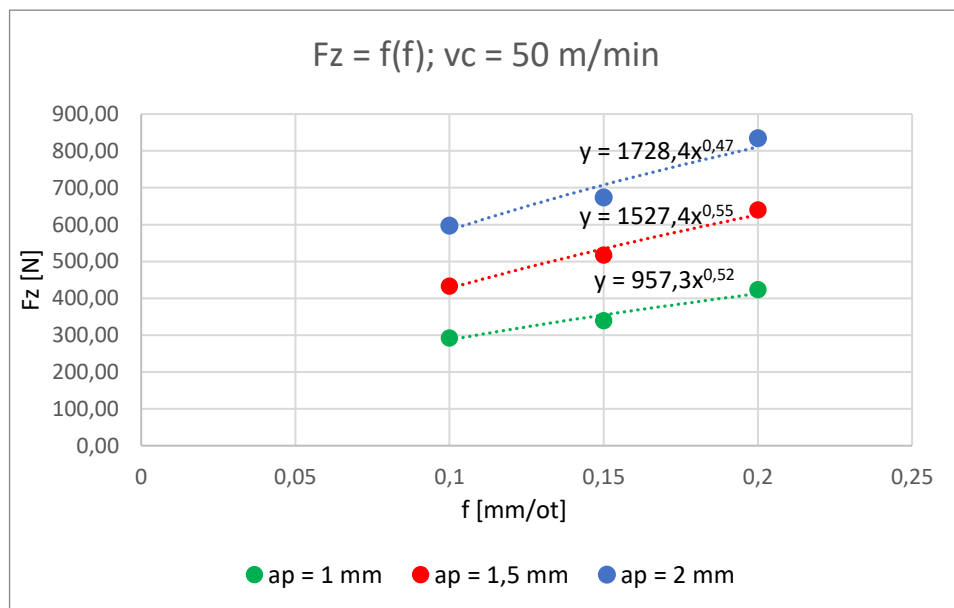
$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
$f$ [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_x$ [N]	165,5	160,3	177,6	241,4	243,8	262,5	272,7	305,5	335,9
$F_y$ [N]	136,6	141,6	164	178	188,7	211,3	194,8	222,7	252,8
$F_z$ [N]	227,1	282,7	369,9	324,7	416,3	531	403,7	534,6	699

Při porovnání jednotlivých měření jsou znatelné drobné výkyvy. Při nízké hloubce řezu je růst lineární a velice malý, přibližně 15 N. Při hloubce řezu 1,5 mm a hloubce posuvu 0,1 mm/ot šlo stále o lineární růst ale pouze o 5 N. Při posuvu 0,15 mm/ot byla hodnota řezné síly nejvyšší při nejnižší rychlosti. Při posuvu 0,2 mm/ot byla síla nejnižší při nejvyšší rychlosti ale téměř stejné hodnoty dosáhla při rychlosti 40 m/min. Maxima dosáhla při rychlosti 50 m/min. Při nejvyšší hloubce řezu došlo vždy k poklesu řezné síly při změně rychlosti z 50 na 60 m/min. Při nízkých hodnotách posuvu byla

síla menší při rychlosti 40 m/min než při 50 m/min. Následující grafy zobrazují průběhy sil při rychlostech 50 m/min (graf 10 a 11) a 60 m/min (graf 12 a 13).



Graf 10 – závislost řezné síly na hloubce řezu při řezné rychlosti 50 m/min



Graf 11 – závislost řezné síly na posuvu při řezné rychlosti 50 m/min

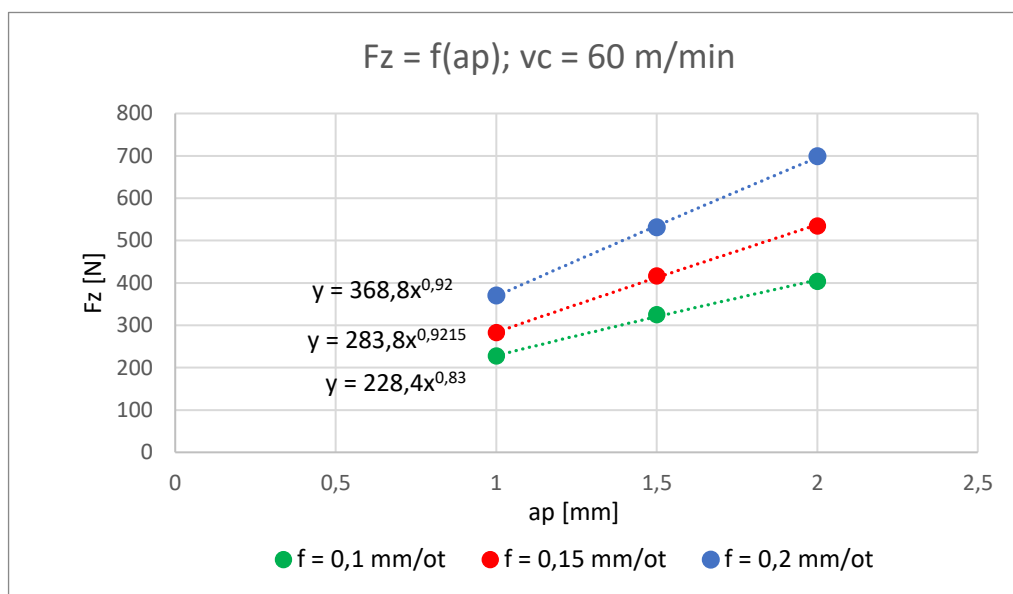
Hodnota mocnitelů  $x_{FC}$  a  $y_{FC}$  se rovná 0,96, respektive 0,71. Koeficient  $C_{FC}$  nabývá hodnoty 1174. Empirický vztah tak vypadá následovně

$$F_c = 1129 \cdot a_p^{0,96} \cdot f^{0,71}$$

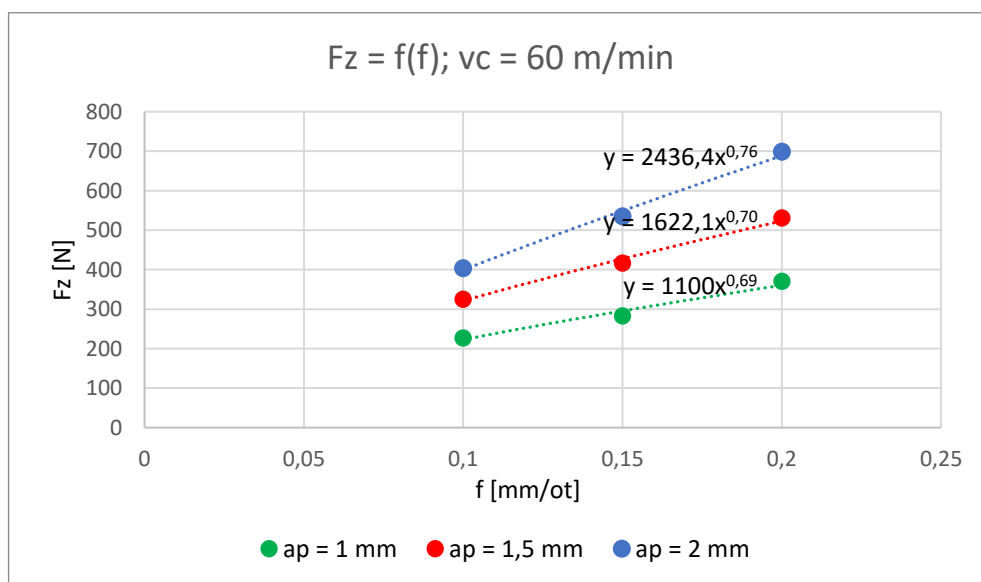
V tabulce 15 je porovnání změřených a spočítaných hodnot. Odchylka mezi jednotlivými hodnotami je kolem 4 %.

Tabulka 15 – spočítané hodnoty řezné síly

$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
$f$ [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_{z\text{měřeno}}$ [N]	223,5	282,9	367,9	319,6	418	539	440,8	547,8	708
$F_{z\text{spočítáno}}$ [N]	219,9	293,3	359,8	324,1	432,4	530,4	426,9	569,4	698,6
odchylka [%]	1,66	3,54	2,25	1,39	3,32	1,62	3,26	3,80	1,35



Graf 12 – závislost řezné síly na hloubce řezu při řezné rychlosti 60 m/min



Graf 13 – závislost řezné síly na posuvu při řezné rychlosti 60 m/min

Po výpočtu hodnoty mocnitelů zjistíme, že  $x_{FC}$  se rovná 0,89 a  $y_{FC}$  je 0,73. Opět je hodnota  $y_{FC}$  rozdílná od teoretické hodnoty 0,75, která se udává pro soustružení. V tomto případě se liší i hodnota  $x_{FC}$  od své teoretické hodnoty 1. Koeficient  $C_{FC}$  se rovná 1041,377. Empirický vztah pak vypadá následovně.

$$F_c = 1174 \cdot a_p^{0,89} \cdot f^{0,73}$$

V tabulce 16 jsou uvedené hodnoty získané dosazením do empirického vztahu.

Tabulka 16 – spočítané hodnoty řezné síly

$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
f [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_{\text{změřeno}}$ [N]	227,1	282,7	369,9	324,7	416,3	531	403,7	534,6	699
$F_{\text{spočítáno}}$ [N]	219,9	295,3	364,1	315,5	423,8	522,4	407,7	547,5	674,9
odchylka [%]	3,27	4,28	1,60	2,91	1,76	1,65	0,97	2,35	3,57

Spočítané hodnoty se příliš neliší od naměřených, většina hodnot je vychýlena o maximálně 5 %.

### 5.7.2. Ocel C45

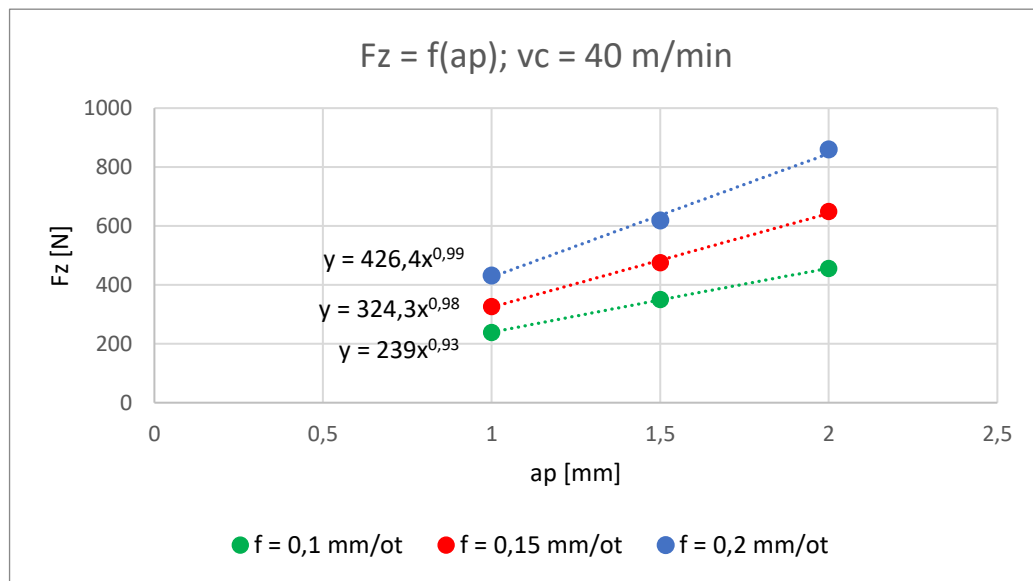
Experiment probíhal naprosto identicky jako při obrábění Ti6Al4V. V tabulce 17 jsou uvedeny naměřené hodnoty složek řezné síly.

Tabulka 17 – hodnoty řezné síly při obrábění oceli

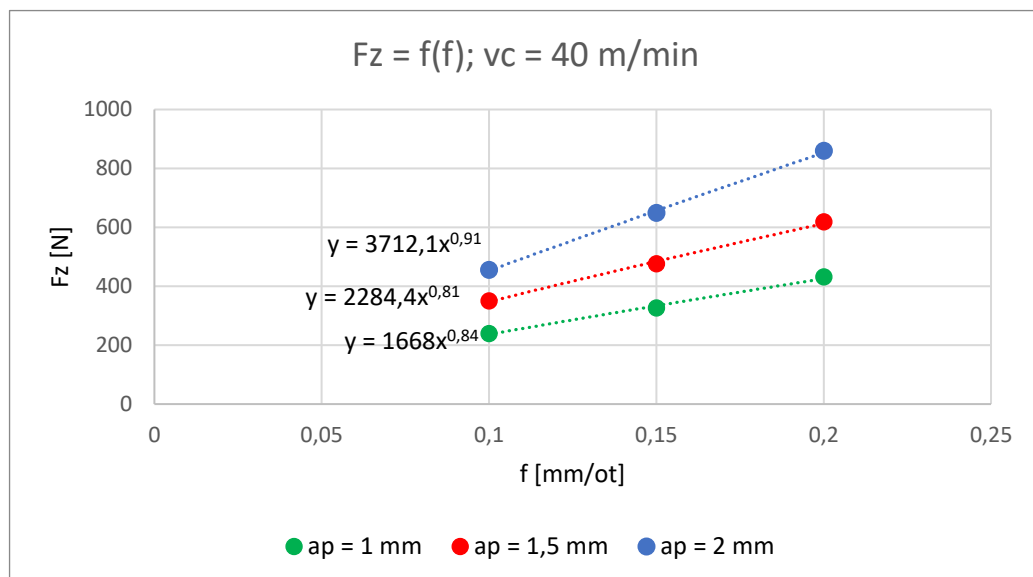
$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
f [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_x$ [N]	91,54	117,2	149,5	136,6	173,3	217,9	174,4	242,8	317,9
$F_y$ [N]	72,41	95,27	122,3	95,782	127,5	162,3	115,6	161,6	225,5
$F_z$ [N]	238,7	326,6	431,3	350,1	475,6	619	455,4	648,7	859,4



Při porovnání údajů s hodnotami při obrábění Ti6Al4V, je vidět znatelný rozdíl ve složkách řezné síly. Celková řezná síla  $F_c$  dosahuje při obrábění oceli vyšších hodnot než při obrábění Ti6Al4V. U oceli je mnohem výraznější růst posuvové a pasivní složky síly při zvyšování rychlosti posuvu, na rozdíl od titanu, kde je posuvová síla vysoká už při nízkých posuvech a nedochází k vysokému nárůstu. Řezná složka síly je ve většině případů větší než při obrábění Ti6Al4V. Z toho důvodu je celková řezná síla vyšší při obrábění oceli než při obrábění titanové slitiny. Graf 14 a 15 zobrazují vliv hloubky řezu a posuvu na řeznou sílu při soustružení oceli.



Graf 14 – závislost řezné síly na hloubce řezu



Graf 15 – závislost řezné síly na posuvu

V těchto grafech je dobře viditelný rozdílný růst při zvyšování posuvové rychlosti a hloubky řezu. Při obrábění Ti6Al4V byly spojnice více rovnoběžné, zde je růst strmější. Při výpočtu koeficientů je postup naprosto stejný jako v předchozím experimentu. Výsledná hodnota mocnitelů  $x_{FC}$  a  $y_{FC}$  je 0,97, respektive 0,86. Koeficient  $C_{FC}$  vyšel 1692. Empirický vztah má tím pádem následující tvar.

$$F_C = 1692 \cdot a_p^{0,97} \cdot f^{0,86}$$

V tomto případě se blížíme teoretickým hodnotám exponentů  $x_{FC}$  a  $y_{FC}$ , které jsou 1 a 0,75. V tabulce 18 jsou hodnoty spočítané dosazením do vytvořeného vztahu a odchylka od změřených hodnot.

Tabulka 18 – spočítané hodnoty řezné síly

$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
f [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_{\text{změřeno}}$ [N]	238,7	326,6	431,3	350,1	475,6	619	455,4	648,7	859,4
$F_{\text{spočítáno}}$ [N]	233,73	331,22	424,16	346,29	490,73	628,44	457,70	648,60	830,61
odchylka [%]	2,13	1,39	1,68	1,10	3,08	1,50	0,50	0,01	3,47

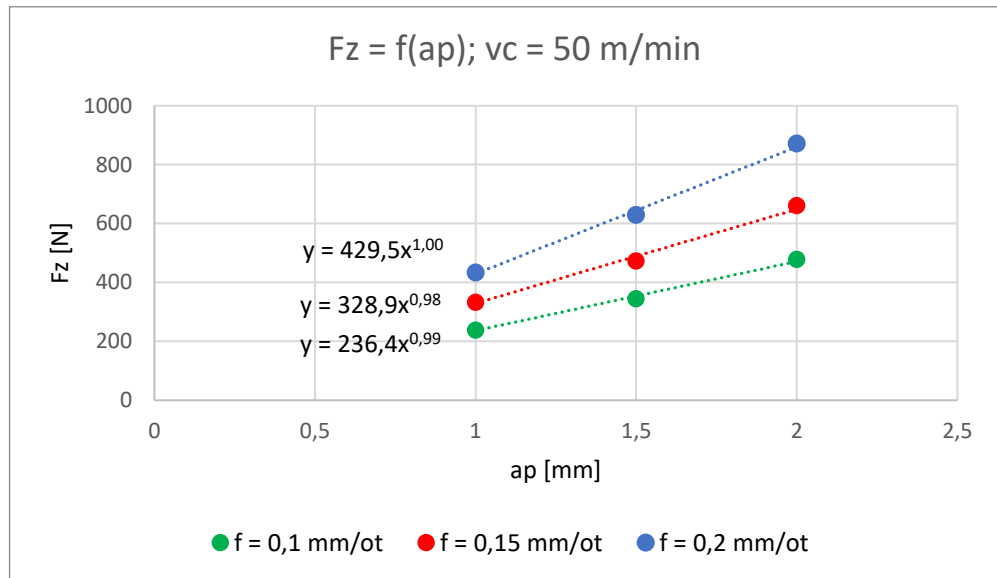
Odchylka dosahovala v tomto případě maximální hodnoty 3,5 %. V jednom případě naopak dosahuje téměř nulové hodnoty.

V tabulce 19 jsou zaneseny naměřené hodnoty složek řezné síly při řezné rychlosti 50 m/min.

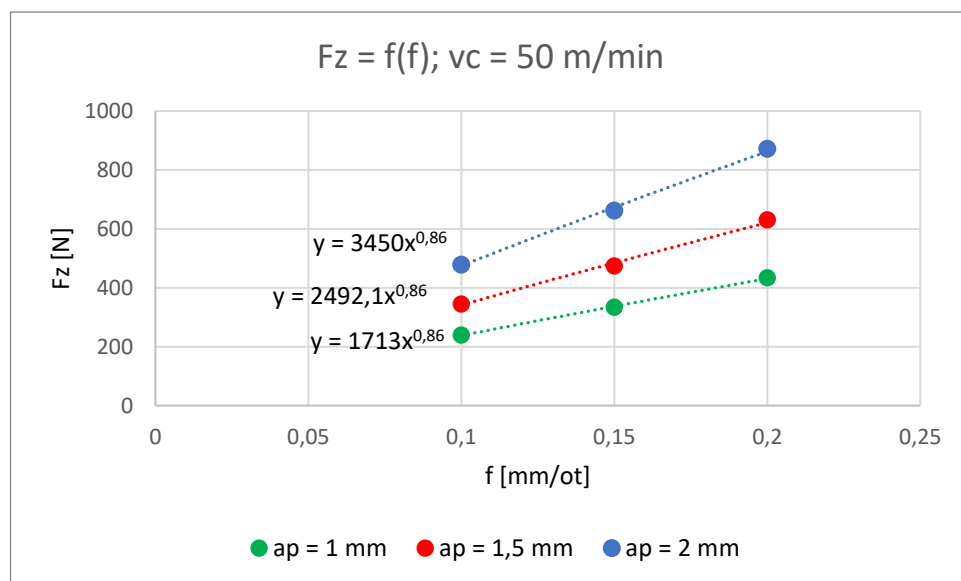
Tabulka 19 – hodnoty řezné síly při obrábění oceli

$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
f [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_x$ [N]	97,69	127,8	161	138	183,5	239,6	195,1	267,5	340,5
$F_y$ [N]	75,23	101,6	128,4	99,4	134,3	174,8	132,7	185,8	242,5
$F_z$ [N]	239	333,5	433,7	344,8	473,1	629,8	478,4	661,1	871,8

Při porovnání s předchozími výsledky, dochází k výraznějšímu růstu posuvové a pasivní složky síly v řádu desítek N, oproti řezné složce síly, u které je růst pomalejší. V grafech 16 a 17 je zobrazena závislost řezné síly na hloubce řezu a posuvu při řezné rychlosti 50 m/min.



Graf 16 – závislost řezné síly na hloubce řezu při řezné rychlosti 50 m/min



Graf 17 – závislost řezné síly na posuvu při řezné rychlosti 50 m/min

Je vidět podobný lineární růst jako při nižší řezné rychlosti. Ze spojnic trendu je spočítána hodnota mocnitele  $x_{Fc}$ , který se rovná 0,99 a mocnitel  $y_{Fc}$ , jehož hodnota je 0,86. Koeficient  $C_{Fc}$  byl spočítán jako v předchozích případech a vychází 1704.

Empirická rovnice vypadá následovně.

$$F_c = 1704 \cdot a_p^{0,99} \cdot f^{0,86}$$

Oproti koeficientům při řezné rychlosti 40 m/min se liší minimálně. Exponent  $x_{F_c}$  se téměř rovná teoretické hodnotě 1. Exponent  $y_{F_c}$  je totožný jako v předchozím případě a liší se od teoretické hodnoty 0,75. V tabulce 20 jsou uvedené spočítané hodnoty dosažením do empirického vztahu.

Tabulka 20 – spočítané hodnoty řezné síly

$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
f [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_{z\text{měřeno}}$ [N]	239	333,5	433,7	344,8	473,1	629,8	478,4	661,1	871,8
$F_{z\text{spočítáno}}$ [N]	234,92	333,02	426,57	351,21	497,87	637,73	467,18	662,26	848,30
odchylka [%]	1,74	0,15	1,67	1,83	4,97	1,24	2,40	0,17	2,77

Spočítané hodnoty se liší málo od hodnot naměřených. Maximální odchylka je 5 %, a to pouze v jednom případě. V ostatních případech je odchylka v rozmezí 0, – 3 %.

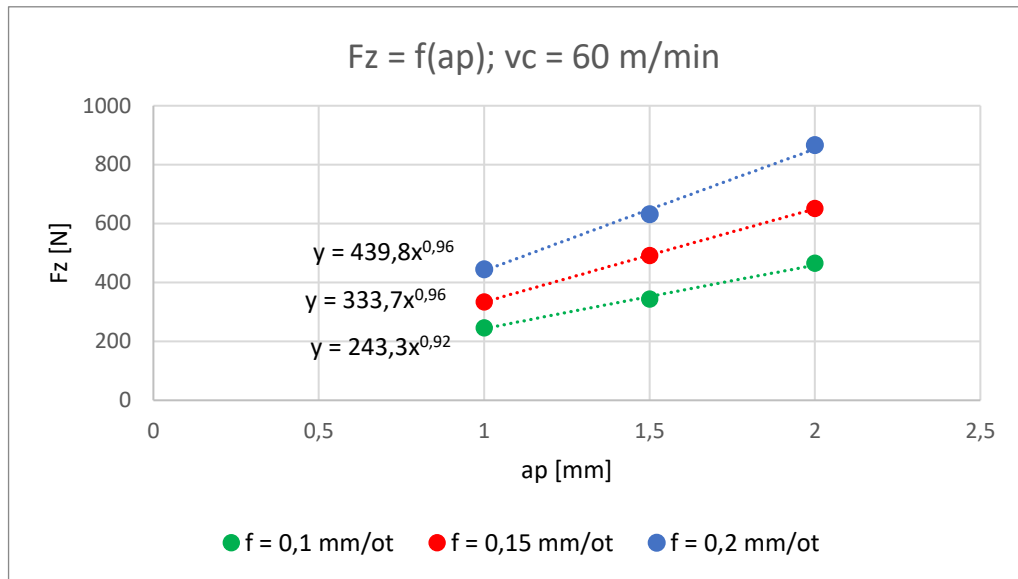
V tabulce 21 jsou uvedené naměřené složky řezné síly při rychlosti 60 m/min.

Tabulka 21 – hodnoty řezné síly při obrábění oceli

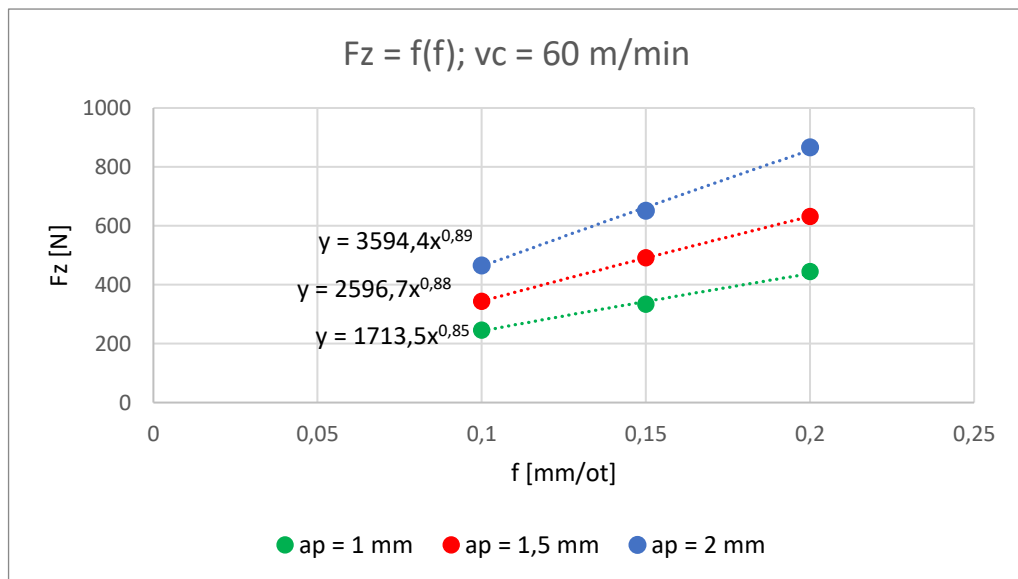
$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
f [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_x$ [N]	99,71	131,1	171,8	144,7	205,1	250,8	187,6	261	341,3
$F_y$ [N]	78,9	105	138	103,5	145,1	177,6	128,4	182,8	243,6
$F_z$ [N]	245,9	334	444,6	343,6	491,8	631,3	465,6	651	866,1

Vliv řezné rychlosti na řeznou sílu je velmi malý. Při vyšších rychlostech však dochází ke snižování řezné síly oproti nižším rychlostem. To je způsobeno zvyšováním teploty v místě řezu a následným tečením materiálu. Pokles řezné síly je však v tomto případě

téměř zanedbatelný. Graf 18 a 19 zobrazují závislost řezné síly na hloubce řezu a posuvu.



Graf 18 – závislost řezné síly na hloubce řezu při řezné rychlosti 60 m/min



Graf 19 – závislost řezné síly na posuvu při řezné rychlosti 60 m/min

Z grafů byly určeny hodnoty exponentů  $x_{FC}$  a  $y_{FC}$ . Jako v předchozích případech byly hodnoty podobné, konkrétně 0,94 pro  $x_{FC}$  a 0,87 pro  $y_{FC}$ . Koeficient  $C_{FC}$  vychází v tomto případě 1779. Rovnice pro řeznou sílu vypadá následovně.

$$F_c = 1779 \cdot a_p^{0,94} \cdot f^{0,87}$$

Přehled hodnot po dosazení do rovnice je v tabulce 22.

Tabulka 22 – spočítané hodnoty řezné síly

$a_p$ [mm]	1			1,5			2		
$f$ [mm/ot]	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
$F_{změřeno}$ [N]	245,9	334	444,6	343,6	491,8	631,3	465,6	651	866,1
$F_{spočítáno}$ [N]	238,7	340,0	437,0	350,1	498,7	640,9	459,4	654,3	840,9
odchylka [%]	3,00	1,78	1,73	1,86	1,37	1,50	1,35	0,50	3,00

V tomto případě je má rovnice nej přesnější výsledky v porovnání s předchozími. Nejvyšší odchylka je 3 % a většina není větší než 2 %.

V následující tabulce jsou uvedeny všechny vytvořené empirické rovnice. Je vidět, že s rostoucí hodnotou řezné rychlosti stoupá i koeficient  $C_{Fc}$ .

Tabulka 22 – Empirické vztahy

Materiál	Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	Empirický vztah
Ti6Al4V	40	$F_c = 1117 \cdot a_p^1 \cdot f^{0,72}$
	50	$F_c = 1129 \cdot a_p^{0,96} \cdot f^{0,71}$
	60	$F_c = 1174 \cdot a_p^{0,89} \cdot f^{0,73}$
Ocel C45	40	$F_c = 1692 \cdot a_p^{0,97} \cdot f^{0,86}$
	50	$F_c = 1704 \cdot a_p^{0,99} \cdot f^{0,86}$
	60	$F_c = 1779 \cdot a_p^{0,94} \cdot f^{0,87}$

## 6. Závěr

Úkolem této bakalářské bylo zpracovat obecné informace týkající se slitin titanu a jejich obrábění. V první části práce jsem se věnoval výrobě titanu, typům slitin titanu a fyzikálním vlastnostem. V další části jsem se zaměřil na řezné síly při soustružení a měření těchto sil přímou i nepřímou metodou. Podrobně jsem zpracoval data o vlivech působících na složky řezné síly nebo na měrný řezný odpor.

V další kapitole jsem se zaměřil na obrobitelnost titanových slitin. Titan se řadí mezi těžkoobrobitelné kovy, právě kvůli svým vlastnostem. Je sice lehčí a pevnější než ocel, ale má mnohem nižší modul pružnosti. Také má velice nízkou tepelnou vodivost, kvůli které jde většina tepla vzniklého při obrábění do nástroje a dochází tak k většímu namáhání břitu. Využil jsem informací a doporučení pro obrábění titanových slitin od firem zabývajících se výrobou nástrojových destiček.

V dnešní době se využívá hlavně nepovlakovaných slinutých karbidů nebo karbidů s PVD povlaky, díky kterým je zachována řezná hrana. Většina moderních materiálů jako CBN nebo PCD není vhodná pro obrábění titanu. Výzkum však stále pokračuje a už jsou vyrobené prototypy CBN, které vykazují mnohem lepší odolnost než destičky ze slinutých karbidů. Také se využívá chlazení pomocí tekutého dusíku, které je nejen ekologické ale mnohem efektivnější než chlazení klasickou emulzí.

V praktické části bakalářské práce jsem se věnoval měření řezných sil při suchém soustružení slitiny Ti6Al4V. Následně jsem vyhodnocoval vlivy různých řezných podmínek na obrábění a porovnával s hodnotami uvedenými v literatuře. Při zvyšování hloubky řezu a posuvové rychlosti docházelo ke stejnému lineárnímu růstu řezné síly. Jelikož se z těchto dvou hodnot počítá plocha odebírané třísky, respektive měrný řezný odpor, byla vytvořena i závislost měrného řezného odporu na těchto veličinách. Zde docházelo k předpokládanému exponenciálnímu poklesu. Jako další se měřil vliv úhlu nastavení hlavního ostří na řeznou sílu. U tohoto experimentu jsem potvrdil, že větší úhel nastavení znamená menší řeznou sílu. Menší úhel nastavení zase zaručuje delší výdrž nástroje. Pro další experiment se vybraly tři destičky s různými utvařeči a měřil se rozdíl řezných sil mezi jednotlivými nástroji. Zde se potvrdilo, že pro obrábění titanu je nutné používat nástroje s ostrou řeznou hranou

a větším úhlem čela. V následujícím pokusu jsem potvrdil, že při zvyšování posuvové rychlosti dochází k exponenciálnímu růstu střední hodnoty drsnosti Ra.

Při posledním experimentu jsem se zaměřil na experimentální zjištění řezné síly, konkrétně na zjištění empirických koeficientů  $C_{FC}$ ,  $x_{FC}$  a  $y_{FC}$ . Tento experiment probíhal při třech různých řezných rychlostech (40; 50; 60 m/min) a byl proveden jako pro slitiny Ti6Al4V, tak pro ocel C45 (12 050 dle ČSN) abych mohl výsledky vzájemně porovnat. Pro každou řeznou rychlost tak vznikl empirický vztah, se kterým můžeme spočítat hodnotu řezné síly při jakémkoliv posuvu nebo hloubce řezu. Níže jsou uvedeny vztahy pro Ti6Al4V a ocel C45 při řezné rychlosti 40 m/min.

$$F_c = 1117 \cdot a_p^1 \cdot f^{0,72}$$

$$F_c = 1692 \cdot a_p^{0,97} \cdot f^{0,86}$$

Nečekaně byly hodnoty řezné síly u oceli vyšší než u titanu. To je pravděpodobně způsobeno tím, že při obrábění titanu vzniká více tepla a dochází tak k poklesu pevnosti materiálu vlivem teploty.

Ve své bakalářské práci jsem splnil všechny vytyčené cíle.



## 7. Bibliografie

- [1] DONACHIE, Matthew J. *Titanium: A technical guide*. 2nd. Ohio: ASM International, 2000. ISBN 978-0-87170-686-7.
- [2] Titan. In: *Web o chemii, elektronice a programování* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <http://z-moravec.net/chemie/periodicka-soustava-prvku/titan/>
- [3] BAMFORD, Erik. *Tool wear in turning of titanium alloy Ti6Al4V*. Uppsala, 2016. Diplomová. Uppsala Universitet.
- [4] *Titanium Machining Guide* [online]. In: . Kennametal [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/content/kennametal/us/en/industries/aerospace/Titanium-Turning.html>
- [5] Titan a jeho slitiny. In: *Wolften, hutní materiály a speciální slitiny* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://wolften.pl/cs/titan-prvek/>
- [6] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1990.
- [7] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění*. První. Ostrava: VŠB, 2011. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [8] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-800-1037-522.
- [9] How to chose correct turning insert. In: *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx>
- [10] Specific cutting force. In: *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/specific-cutting-force.aspx>
- [11] SHAW, Milton C. *Metal cutting principles*. 2nd. Oxford: Oxford University Press, 2005. ISBN 0-19-514206-3.
- [12] *Piezoelektrický jev u jednotlivých molekul* [online]. **2018** [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/piezoelektricky-jev-u-jednotlivych-molekul/>
- [13] *Titanium alloys - Ti6Al4V Grade 5* [online]. 2002 [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1547>
- [14] *12 050.1* [online]. [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.lentus-ocel.cz/12-0503>

- [15] *Material Property Data: C45* [online]. [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=46399935e2ef430ab425680044125a92&ckck=1>
- [16] HORVÁTH, Evžen. Problematika obrábění dílů pro letecký průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. **2012** [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-obrabeni-titanovych-leteckych-dilu>
- [17] Cutter Considerations for Turning Titanium. *Production Machining* [online]. 2022 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.productionmachining.com/articles/cutter-considerations-for-turning-titanium>
- [18] *Troublesome Titanium - Tips on machining this tough material* [online]. 2014 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: [https://www.sandvik.coromant.com/us/news/technical\\_articles/pages/troublesome-titanium-tips-on-machining.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/us/news/technical_articles/pages/troublesome-titanium-tips-on-machining.aspx)
- [19] Obrábění titanu - řešení pro lékařský průmysl. *Technika a trh* [online]. 2010, **2010** [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/obrabeni/obrabeni-titanu>
- [20] *Turning inserts and grades for titanium and HRSA* [online]. [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/turning-inserts-grades-titanium-hrsa/pages/default.aspx>
- [21] ZHANG, X.Q., K.S. WOON a M. RAHMAN. Diamond Turning. *Comprehensive Materials Processing*. Elsevier, 2014, 201-220. ISBN 9780080965338. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.01110-9
- [22] *Polykrystalický diamant - PKD* [online]. [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/03009.html>
- [23] JOSHI, Suhas S. Ultraprecision Machining (UPM). *Encyclopedia of Nanotechnology* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016, 4253-4260 [cit. 2022-07-04]. ISBN 978-94-017-9779-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-017-9780-1\_365
- [24] SOLON, Tom. *Fundamentals of ultraprecision machining* [online]. [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/news/article/21829664/fundamentals-of-ultraprecision-machining>
- [25] RUIBIN, Xiong a Hongbing WU. Study on cutting mechanism of Ti6Al4V in ultra-precision machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, 1311-1317 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-8304-7

- [26] PEI, Lei a Hongbing WU. Effect of ultrasonic vibration on ultra-precision diamond turning of Ti6Al4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2019, 433-440 [cit. 2022-07-04]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-03563-y
- [27] EZUGWU, E.O., R.B. DA SILVA, J. BONNEY a Á.R. MACHADO. Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti–6Al–4V alloy with high pressure coolant supplies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2005, 1009-1014 [cit. 2022-07-04]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.11.027
- [28] *What are the benefits of machining with ceramic turning or milling inserts?* [online]. [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.cutwel.co.uk/blog/what-are-the-benefits-of-machining-with-ceramic-turning-or-milling-inserts>
- [29] EZUGWU, E., Alisson MACHADO a Rosemar DA SILVA. *Evaluation of the machinability of Ti-6Al-4V alloy with (SiCW) whisker reinforced alumina ceramic cutting tool under various cooling environments* [online]. [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/316282687\\_EVALUATION\\_OF\\_THE\\_MACHINABILITY\\_OF\\_Ti-6Al-4V\\_ALLOY\\_WITH\\_SiCW\\_WHISKER\\_REINFORCED\\_ALUMINA\\_CERAMIC\\_CUTTING\\_TOOL\\_UNDER\\_VARIOUS\\_COOLING\\_ENVIRONMENTS](https://www.researchgate.net/publication/316282687_EVALUATION_OF_THE_MACHINABILITY_OF_Ti-6Al-4V_ALLOY_WITH_SiCW_WHISKER_REINFORCED_ALUMINA_CERAMIC_CUTTING_TOOL_UNDER_VARIOUS_COOLING_ENVIRONMENTS)
- [30] DANFORD, Matt. Why binderless CBN inserts turn titanium faster. *Modern Machine Shop* [online]. 2021 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/why-binderless-cbn-inserts-turn-titanium-faster>
- [31] PARIDA, A., P. RAO a S. GHOSH. Performance of textured tool in turning of Ti–6Al–4V alloy: numerical analysis and experimental validation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2020 [cit. 2022-07-07]. ISSN 1678-5878. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-020-02333-2
- [32] DHANANCHEZIAN, M. a M. PRADEEP KUMAR. Cryogenic turning of the Ti–6Al–4V alloy with modified cutting tool inserts. *Cryogenics* [online]. 2011, 34-40 [cit. 2022-07-07]. ISSN 00112275. Dostupné z: doi:10.1016/j.cryogenics.2010.10.011
- [33] Kryogenické frézování těžkoobrobitelných materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/technicke-novinky/kryogenicke-frezovani-tezkoobrobitelnych-materialu>
- [34] GUPTA, Munish, Pardeep SOOD, Gurraj SINGH a Vishal SHARMA. Sustainable machining of aerospace material – Ti (grade-2) alloy: Modeling and optimization. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, 614-627 [cit. 2022-07-07]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.133

- [35] *Cutting Force Measurement* [online]. KISTLER, 2014 [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/solutions/research-and-development-testing/dynamometers-for-cutting-force-measurement/>
- [36] NCB100 binderless CBN grade. In: *SUMITOMO* [online]. [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.sumitomotool.com/products/details/ncb100-binderless-cbn-grade/>
- [37] Držák MDNN 62,5°. In: *Kennametal* [online]. [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/cz/cs/products/fam.mdn-625.100004628.html#tad>
- [38] Držák MDJN 93°. In: *Kennametal* [online]. [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/cz/cs/products/fam.mdjn-93.100004629.html#tad>
- [39] *Soustružení 2021-2022*. Dormer Pramet, 2021, s. 31.
- [40] *Turning / Tooling Catalog 8010*. Kennametal, 2008, s. 35.