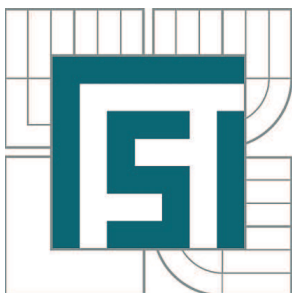


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## OBRÁBĚNÍ TITANOVÝCH SLITIN

MACHINING OF TITANIUM ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ KINC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jiří Kinc

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

### **Obrábění titanových slitin**

v anglickém jazyce:

### **Machining of titanium alloys**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá rozdělením a obráběním titanových slitin pomocí moderních řezných nástrojů.

Cíle bakalářské práce:

Úvod.

Teoretický rozbor problému.

Návrh experimentálních zkoušek.

Realizace experimentů, jejich statistické vyhodnocení.

Diskuze.

Závěry.

Seznam odborné literatury:

- HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. Praha. Scientia, s. r. o. 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook.
- SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-19-514206-3
- BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 1.vyd., Slovensko, Trenčin, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.
- BARÁNEK, I., ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín, 2004 s. 212, ISBN 80-8075-013-0.
- MARINESCU, I.D. et al. Tribology of abrasive machining processes. 1st ed. William Andrew, Norwich, 2004, pp.724, ISBN 0-8155-1490-5.
- LEYENS, Ch., PETERS, M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. 2nd ed., Willet-VCH, Köln, 2005, p. 513. ISBN 3-527-30534-3.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Tato práce popisuje titan a slitiny titanu z hlediska vlastností, výroby a použití. Informuje o problematice spojené s obráběním titanu, základními obráběcími metodami. V praktické části práce byla soustružena titanová slitina Ti6Al4V s cílem měřit řezné síly a měrnou řeznou sílu.

**Klíčová slova**

Titan, slitiny titanu, obrábění, řezné síly, měrná řezná síla

**ABSTRACT**

This thesis describe titanium and titanium alloys from the perspective of character, production and use. Thesis gives information about difficulty connected with machining titanium by basic machining methods. Titanium alloy Ti6Al4V was turned in practical part. Intention was to measure cutting force and specific cutting force.

**Keywords**

Titanium, titanium alloys, machining, cutting force, specific cutting force

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KINC, J. Obrábění titanových slitin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 53 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Obrábění titanových slitin** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Jiří Kinc

### **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále vedoucímu školních dílen panu Milanu Rusiňákovi za pomoc při měření experimentu. Martině Nagyové za pomoc při tisku práce. A nakonec chci poděkovat mým rodičům Haně a Ing. Jířímu Kincovi za veškerou podporu při studiu.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 TITAN A JEHO SLITINY .....	10
1.1 Slitiny titanu .....	11
1.1.1 Rozdělení titanových slitin. ....	11
1.1.2 Přísadové prvky ve slitinách titanu .....	14
1.2 Vlastnosti titanu .....	15
1.2.1 Základní fyzikální vlastnosti.....	15
1.2.2 Mechanické vlastnosti titanu .....	16
1.2.3 Základní chemické a elektrochemické vlastnosti titanu .....	16
1.2.5 Tabulka souhrnných vlastností titanu .....	17
1.3 Výroba titanu.....	17
1.3.1 Suroviny pro výrobu titanu .....	17
1.3.2 Způsoby výroby .....	18
1.4 Použití titanu .....	20
1.4.1 Titan v letectví .....	20
1.4.2 Titan v chemickém průmyslu .....	22
1.4.3 Titan ve strojírenství .....	23
1.4.4 Titan v dalších odvětvích.....	24
2 OBROBITELNOST TITANOVÝCH SLITIN.....	26
2.1 Obrobitelnost materiálu.....	26
2.1.1 Hodnocení obrobitelnosti.....	26
2.2 Vlastnosti materiálů obrobku .....	28
2.3 Soustružení titanových slitin.....	29
2.4 Frézování titanových slitin.....	30
2.5 Vrtání titanových slitin.....	32
2.6 Broušení titanových slitin .....	33
3 PRAKTICKÁ ČÁST .....	35
3.1 Materiál obrobku.....	35
3.2 Řezný nástroj.....	35
3.3 Řezné podmínky.....	36

3.4	Metodika měření experimentu .....	37
3.5	Realizace experimentu .....	38
3.5.1	Síly působící při soustružení.....	38
3.5.2	Stanovení měrné řezné síly .....	41
3.5.3	Opotřebení nástroje.....	41
3.5.4	Tříska .....	42
3.6	Diskuze výsledků experimentu .....	43
	ZÁVĚR .....	45
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	46
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	48
	SEZNAM PŘÍLOH.....	50

## ÚVOD

Téma bakalářské práce obrábění titanových slitin bylo poskytnuto Vysokým učením technickým v Brně.

O téma práce jsem požádal lektora fakulty strojního inženýrství v Brně pana profesora Píšku. Profesor Píška mi zadání potvrdil a stal se i mým konzultantem.

V teoretické části práce popisují titan a jeho slitin z hlediska vlastností, použití a výroby a tyto jednotlivé části dále dělím do dalších podkapitol.

V druhé části práce popisují problematiku obrábění titanových slitin základními metodami obrábění, jako jsou soustružení, frézování, broušení a vrtání. Přibližuji specifické problémy, které mohou při těchto operacích nastat a přidávám doporučení výrobců řezných nástrojů pro co nejlepší obrábění titanových slitin.

Po konzultaci s profesorem Píškou bylo rozhodnuto, že práce bude obsahovat i experiment. Zadání experimentu bylo sledovat měnící se parametry u některého způsobu obrábění titanové slitiny, vybral jsem si podélné vnější soustružení titanové slitiny a při jeho průběhu sledoval velikosti i změny silového zatížení a na jejich základě určil měrnou řeznou sílu při soustružení.

Titanové slitiny jsou hojně využívány ve všech oborech zabývajících se nejen strojní výrobou. Slitiny jsou uplatňovány pro svoje skvělé mechanické vlastnosti, odolnosti vůči korozi a pro svoji menší hmotnost v porovnání s ocelí. Obrábění tohoto materiálu není ovšem nikterak snadné a právě tento fakt byl důvodem, proč jsem si zvolil téma práce obrábění titanových slitin. Více se dozvědět o problematice obrábění titanových slitin je pro mě inspirativní a poučné. Navíc mi škola umožnila provést vlastní experiment a měření s vybavením, ke kterému nemám jinak přístup.

## 1 TITAN A JEHO SLITINY

V roce 1791 britský chemik William Gregor izoloval magnetický písek v řece Helford v Anglii a pojmenoval ho „Černý písek“ dnes známý jako minerál Ilmenit. Gregorovi bylo tímto aktem připsáno objevení titanu. O čtyři roky později v roce 1795 německý vědec Martin Heinrich Klaproth izoloval oxid titanu z minerálu Rutil. Klaproth měl velkou zálibu v řecké mytologii. Našel jistou spojitost mezi rudou vytaženou ze země a titány, kteří byli uvězněni v podzemí svými protivníky Bohy na Olympu. Na počest titánů Nebe (Úranos) a Země (Gaia) pojmenoval tento kov Titan. O více jak sto let později v roce 1910 Matthew Albert Hunter z Rensselaer Polytechnic Institute v Troy, izoloval titan z chloridu titaničitého ( $\text{TiCl}_4$ ) v ocelové tlakové nádobě a od toho okamžiku se datuje jeho využití v technické praxi<sup>1</sup>.

Titan je šedý až stříbřitě bílý, lehký a tvrdý kov. Je dobrým vodičem tepla i elektřiny. Vyznačuje se mimořádnou chemickou stálostí – je zcela netečný k působení vody a atmosférických plynů a odolává působení většiny běžných minerálních kyselin i roztoků alkalických hydroxidů<sup>2</sup>.

Za zvýšených teplot titan přímo reaguje s většinou nekovů, například s vodíkem, kyslíkem, dusíkem, uhlíkem, borem, křemíkem, sírou a halogeny<sup>2</sup>.

Ve sloučeninách se vyskytuje v mocenství  $\text{Ti}^{\text{III}}$  a  $\text{Ti}^{\text{IV}}$ . Sloučeniny čtyřmocného titanu jsou neomezeně stálé, sloučeniny  $\text{Ti}^{\text{III}}$  jsou silnými redukčními činidly a působením vzdušného kyslíku ( $\text{O}_2$ ) rychle přecházejí na  $\text{Ti}^{\text{V}}$  [2].

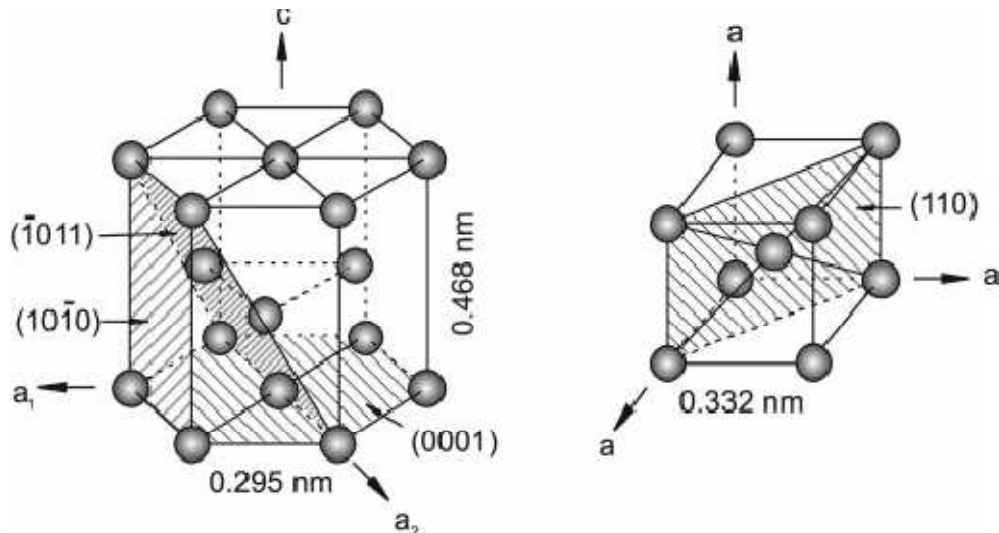


Obr. 1 Titan<sup>4</sup>.

## 1.1 Slitiny titanu

### 1.1.1 Rozdělení titanových slitin.

Titan může krystalizovat v mnoha variacích, stabilní je však pouze ve dvou případech,  $\alpha$ -titan a  $\beta$ -titan.  $\alpha$ -titan krystalizuje v hexagonální mřížce (hcp) a je stálý do teploty 882°C. Mřížkové parametry  $\alpha$ -titanu jsou rovny:  $a = 2,95 \text{ nm}$  a  $c = 4,683 \text{ nm}$ .  $\beta$ -titan krystalizuje v krychlové prostorově středěné mřížce (bcc) a je stálý při teplotách nad 882°C. Mřížkové parametry  $\beta$ -titanu jsou rovny:  $a = 3,32 \text{ nm}$ . Titan je jedním z kovů s nejtěsněji uloženými atomy<sup>3</sup>.



Obr. 2 Krystalová struktura  $\alpha$ -titanu a  $\beta$ -titanu<sup>1</sup>.

Přísadové prvky se v obou modifikacích titanu rozpouštějí úplně nebo částečně a tvoří roztoky  $\alpha$  a  $\beta$ , které mají zachovanou mřížku dle dané modifikace titanu. Některé prvky se navíc s titanem slučují a tvoří intermetalické sloučeniny. Podobně jako v ocelích mohou ve slitinách titanu existovat při nerovnovážných podmínkách fázových přeměn nestabilní fáze martenzitického typu<sup>5</sup>.

Rovnovážné stavy soustavy Ti-přísadový prvek jsou vyjádřeny rovnovážnými diagramy. Pro popis fázových přeměn v tuhém stavu, které vedou ke stavům rovnovážným, se obvykle používají spodní části těchto diagramů, které slouží klasifikaci charakteru působení přísadových prvků:<sup>5</sup>

#### $\alpha$ stabilizátory

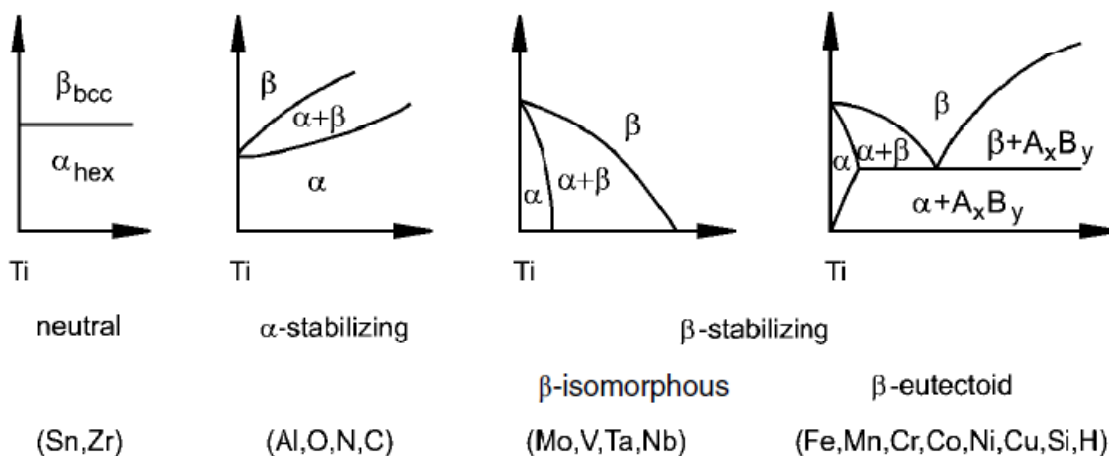
(Al, O, N, C) teplotu fázové přeměny  $\alpha \Leftrightarrow \beta$  zvyšují, tedy stabilizují, tuhý roztok  $\alpha$ . Nekovy O, N a C jsou nečistoty, jejichž obsah je potřeba udržet minimální, protože i jejich velmi malá množství značně zvyšují tvrdost a křehkost slitin. Praktický význam jako  $\alpha$  stabilizátor má pouze hliník. Je použit téměř ve všech průmyslově vyráběných slitinách titanu<sup>5</sup>.

#### $\beta$ stabilizátory

Teplotu fázové přeměny  $\alpha \Leftrightarrow \beta$  snižují, tj. stabilizují tuhý roztok  $\beta$ . Při dostatečně vysokém obsahu těchto prvků tuhý roztok  $\beta$  zůstává zachován až do normální teploty jako fáze stabilní<sup>5</sup>.

### Neutrální prvky

(Sn, Zr) na teplotu fázové přeměny  $\alpha \leftrightarrow \beta$  nemají vliv<sup>5</sup>.



Obr. 3 Vliv přísadových prvků na teplotu přeměny ve slitinách titanu<sup>1</sup>.

Podle konečné struktury vytvořené při pomalém ochlazení z teploty žhání se slitiny titanu dělí na:

- Slitiny  $\alpha$ ,
- slitiny pseudo  $\alpha$  (obsahují max. 6 hm% fáze  $\beta$ ),
- slitiny  $\alpha + \beta$ ,
- slitiny  $\beta$ ,
- slitiny pseudo  $\beta$  (obsahují malá množství fáze  $\alpha$ ),
- žárovečné pseudoslitiny titanu,
- materiály s tvarovou pamětí.

Podle použití se slitiny titanu dělí na slitiny pro tváření a slitiny pro odlitky<sup>5</sup>.

### Slitiny $\alpha$

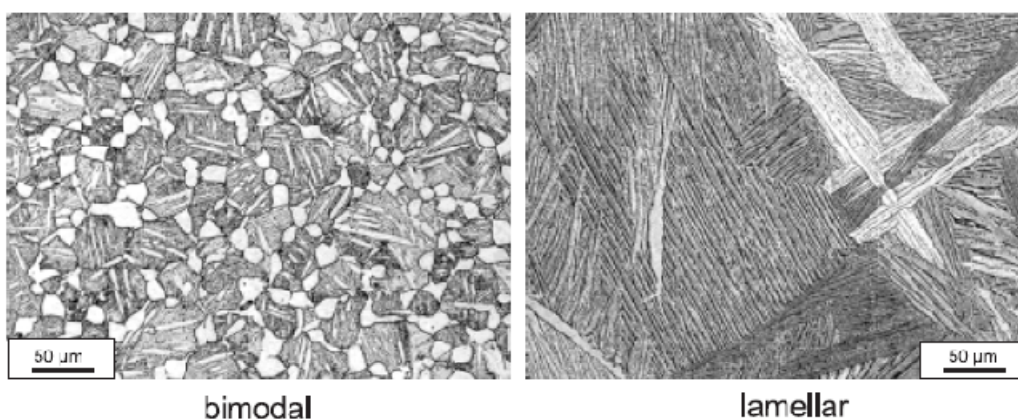
Kromě  $\alpha$  stabilizátoru hliníku obvykle obsahují neutrálně působící cín a zirkon. Jsou to slitiny s velkou tepelnou stabilitou, dobrou pevností a odolností proti křehkému porušení i za nízkých teplot. Mají dobrou žárovečnost do 300°C. Optimální vlastnosti mají slitiny asi 5 hm% Al a 2 až 3 hm% Sn<sup>5</sup>.

### Slitiny pseudo $\alpha$

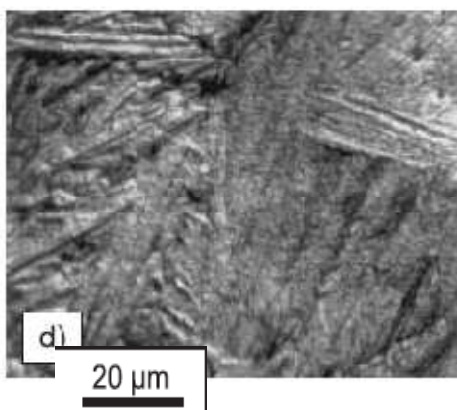
Do základní báze Ti-Al jsou přidány prvky stabilizující zpevňující fázi  $\beta$ . Dalšího zpevnění se dosahuje neutrálně působícím Zr a Sn. Obsah fáze  $\beta$  bývá 2 až 6 hm %. Jsou to slitiny mající pevnost o 10 až 20 % větší než slitiny  $\alpha$  a lepší tvárnost za pokojové teploty v důsledku přítomnosti fáze  $\beta$  s větší plasticitou než má fáze  $\alpha$ <sup>5</sup>.

### Slitiny $\alpha + \beta$

Vyznačují se širokou škálou struktur a tedy i vlastností závislých na podmínkách tváření a tepelného zpracování. Mohou být tvořeny buď rovnoosými zrny, nebo lamelami obou tuhých roztoků, případně směsí obou těchto morfologií. Jsou to nejčastěji používané slitiny (slitina Ti-6Al-4V s pevností v tahu až 1125 MPa je nejvíce používanou slitinou titanu) mají lepší tvářitelnosti v žíhaném stavu než slitiny  $\alpha$  a pseudo  $\alpha$ , lepší odolnost proti únavovému namáhání a lze je tepelným zpracováním vytvrdit (do průměru max. 25 mm). Vytvrzené slitiny však mají sníženou lomovou houževnatost. Svařitelnost a odolnost proti tečení je horší než u slitin  $\alpha$  a pseudo  $\alpha$ . Slitiny se používají pro silově zatížené součásti jako lopatky turbín a kompresorů, spojovací elementy, součásti leteckých draků, části podvozku letadel, jízdni kola, sportovní nářadí aj.



Obr. 4 Rovnoosá zrna (bimodal) a lamely (lamellar) ve struktuře tuhých roztoků  $\alpha + \beta$ <sup>1</sup>.



Obr. 5 Struktura Ti-6Al-4V<sup>1</sup>.

### Slitiny $\beta$ a pseudo $\beta$

Jejich hlavní předností je vysoká odolnost proti korozi a velmi dobrá tvářitelnost za pokojové teploty, dána bcc mřížkou fáze  $\beta$ . Nedostatkem je větší hmotnost než u jiných slitin titanu a značná cena, protože přísadovými prvky ve velké koncentraci jsou kovy s velkou měrnou hmotností a vysokou teplotou tání, jejichž výroba v požadované čistotě je velmi obtížná a nákladná. Pevnost v tahu u těchto slitin je po vytvrzení až 1400 Mpa<sup>5</sup>.

### Žáropevné pseudoslitiny titanu

Základ tvoří intermetalické sloučeniny, aluminidy titanu  $Ti_3Al$  a  $TiAl$ . Oba aluminidy mají dobrou žárovzdornost. Jejich maximální žárovevnost je vyšší než u slitin titanu,

srovnatelná se žárovevností slitin niklu. Jsou však asi 2,5x méně hmotné (měrná hmotnost kolem  $3\,500\text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) Mohly by být použity jako žárovevné součásti při teplotě až  $900^\circ\text{C}$ . Jejich nedostatkem je velmi malá tvárnost za teplot do  $600^\circ\text{C}$ , tedy obtížné zpracování na požadovaný tvar součásti<sup>5</sup>.

### **Slitiny s tvarovou pamětí**

Základem materiálů tohoto druhu je intermetalid TiNi, který lze tvářet i za studena. Projevuje se v něm jev zvaný „marmem“ (MARTenziteMEMory), který je založen na orientované vratné martenzitické přeměně a je podstatou schopnosti materiálu ohřevem výrobku obnovit původní tvar polotovaru, ze kterého byl zhotoven. Příkladem praktického použití těchto materiálů s tvarovou pamětí jsou nýty pro otvory přístupné pouze z jedné strany, pouzdra pro spojování hydraulických potrubí, dráty pro fixaci frakturovaných čelistí apod<sup>5</sup>.

### **1.1.2 Přísadové prvky ve slitinách titanu**

#### **Hliník Al**

Je jednou z nejdůležitějších přísad do slitin titanu, snižuje jeho hmotnost i cenu a zvyšuje žárovevnost materiálu. Ve slitinách  $\alpha$  zvyšuje modul pružnosti a pevnosti, zároveň stabilizuje tyto slitiny<sup>6</sup>.

#### **Železo Fe**

Titan se ve slitinách železa považuje za nečistotu vzniklou při jeho výrobě, některé jeho vlastnosti se dají využít i pozitivně. Slitina TiFe<sub>2</sub> (ferotitan) se používá při výrobě oceli pro svoji vlastnost pohlcovat kyslík a dusík<sup>6</sup>.

#### **Měď Cu**

Více jak 5% titanu v mědi ji výrazně znehodnotí, ale malé množství titanu v mědi zvyšuje její žárovevnost<sup>6</sup>.

#### **Mangan Mn**

Ve slitinách titanu zvyšuje plasticitu a pevnost. Zlepšuje vlastnosti slitin určených pro válcování<sup>6</sup>.

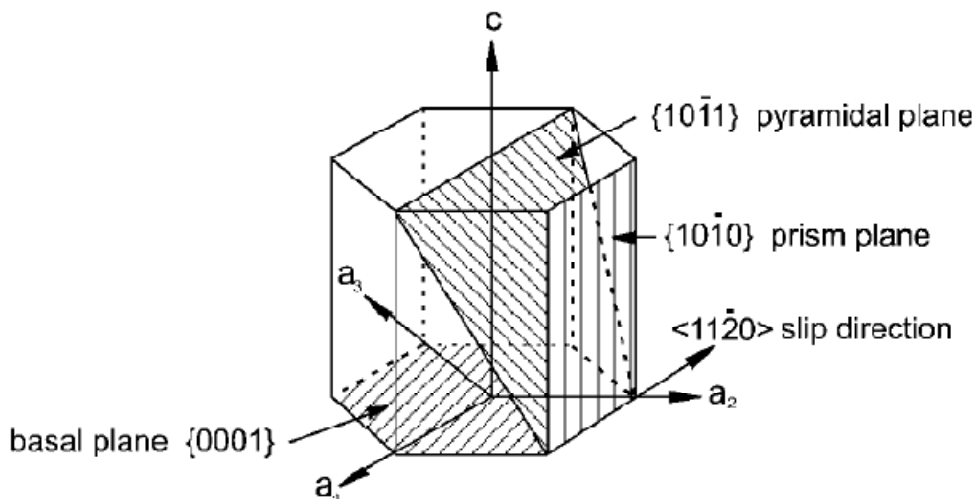
#### **Molibden Mo, Chrom Cr**

Ve slitinách titanu zvyšují chemickou stabilitu a odolnosti proti korozi, zároveň mají kladný vliv na pevnost a žárovevnost<sup>6</sup>.

## 1.2 Vlastnosti titanu

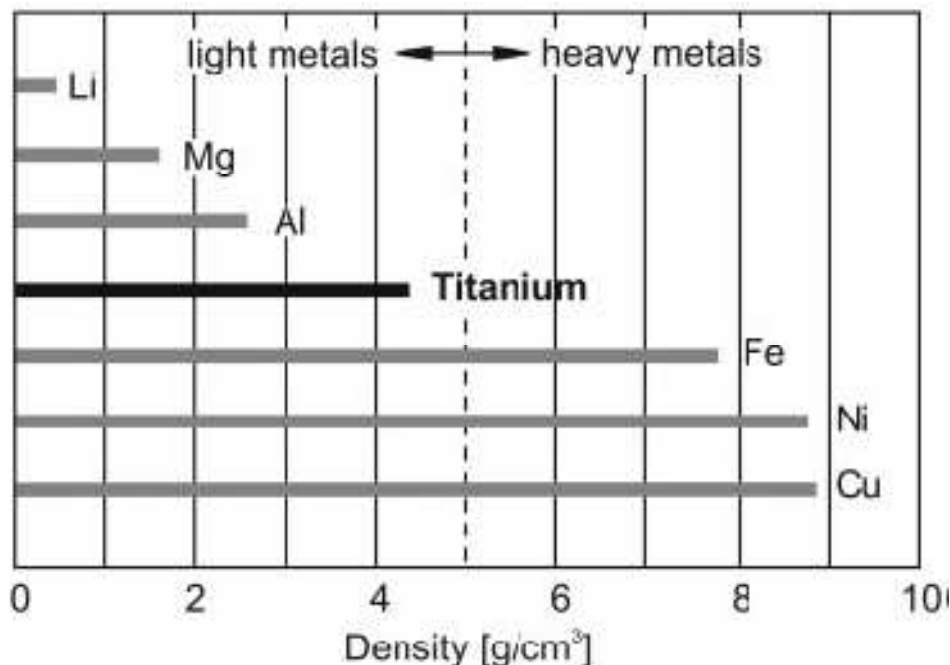
### 1.2.1 Základní fyzikální vlastnosti

Lepších plastických vlastností dosahuje modifikace  $\alpha$  krystalizující v hcp mřížce. Má více skluzových rovin a rovin dvojčatění, než modifikace  $\beta$  krystalizující v bcc mřížce. Při normální teplotě je u titanu 12 skluzových systémů a 18 rovin dvojčatění [3].



Obr. 5 Systém skluzných rovin v hcp mřížce modifikace  $\alpha$  titanu<sup>1</sup>.

Zajímavou vlastností titanu je jeho nízká hustota dosahující  $4530 \text{ kg/m}^3$  [3].



Obr. 6 Hustota titanu v porovnání s některými kovy<sup>1</sup>.

Hodnota elektrické vodivosti je asi 40x nižší než u hliníku a asi 5x menší než u oceli. Elektrická vodivost titanu je velmi závislá na jeho teplotě a je potřeba tento fakt brát v úvahu při použití titanu. Elektrická vodivost se udává v hodnotě  $2,6 \cdot 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$  [4].

Z magnetického hlediska je titan nemagnetický<sup>3</sup>.

Z běžně se vyskytujících kovů má titan nejvyšší bod tání. Konkrétní hodnoty se udávají 1668 °C pro teplotu tání a 3287 °C pro teplotu varu<sup>3,4</sup>.

Tepelná vodivost titanu se udává  $21,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Vodivost je tedy velmi malá<sup>4</sup>.

Tepelná roztažnost je také dosti nízká, její součinitel nabývá hodnoty  $8,15\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Lze ji tedy přirovnat k hodnotám, jež vykazují chrom či platina<sup>3</sup>.

### **1.2.2 Mechanické vlastnosti titanu**

Mechanické vlastnosti titanu jsou značně závislé na jeho čistotě, tedy na výskytu příměsí a nečistot v jeho struktuře. Největší čistoty, tedy nejlepších mechanických vlastností, lze dosáhnout u titanu vyrobeného jodidovou rafinací. Takový titan nejčastěji obsahuje po 0,03% uhlíku, železa a křemíku a asi 0,01% vodíku<sup>7</sup>.

#### **Tvrдост**

Hodnota tvrdosti titanu se nejpřesněji zjišťuje metodou podle Brinella, kdy kalenou ocelovou kuličku o průměru 10 mm vtlačujeme váhou 3000Kg do zkoušeného materiálu a měříme získaný otisk. Hodnota tvrdosti titanu je touto metodou stanovena na 716 MPa [7].

#### **Mez pevnosti a kluzu**

Hodnoty meze kluzu lze srovnávat s hodnotami středně legovaných ocelí. Youngův modul pružnosti v tahu se udává jako 116 MPa. Modul pružnosti ve smyku je potom 44 MPa [7].

#### **Vrubová houževnatost**

Vrubová houževnatost je citlivým ukazatelem jakosti titanu. Podle její velikost nebo změny nelze předpovídat ostatní mechanické vlastnosti. Je to způsobeno tím, že na pevnost a tažnost nejvíce působí kyslík, dusík a uhlík, kdežto na vrubovou houževnatost vodík, který naopak nemá skoro žádný vliv na pevnost a tažnost. Vrubová houževnatost se u titanu vyrobeného z titanové houby pohybuje okolo hranice  $5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ , u technicky čistého titanu se dostaneme na hodnotu vrubové houževnatosti okolo  $10 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ [7].

#### **Mez únavy**

Při cyklickém namáhání vykazuje titan poměrně značnou odolnost. U hladkých povrchů bývá větší než 50% meze pevnosti v tahu. Zaleží však na jakosti povrchu součástí, nejlepší je povrch leštěný, případně broušený. Vrubem se hodnota meze únavy zmenší o 25%. Ostrými vruby se sice mez únavy rychle zmenšuje, ale přitom citlivost na vrub je u titanu menší, než u uhlíkových, nebo nerezových ocelí<sup>7</sup>.

#### **Tečení**

Titan má dosti malou odolnost proti tečení. Tečení nastává již při dlouhodobém zatížení napětím odpovídajícím 60% meze kluzu. Odpor proti tečení zvyšují příměsí kyslíku a dusíku<sup>7</sup>.

### **1.2.3 Základní chemické a elektrochemické vlastnosti titanu**

Titan je velmi reaktivní kov, naproti tomu má nadprůměrnou odolnost proti korozi, která převyšuje v některých prostředích i nerezové oceli<sup>7</sup>.

Korozi titanu lze posoudit na základě potenciálu. Čistý povrch titanu, například hned po broušení má standardní napětí -0,27 V. Během tří hodin na vzduchu se při normální teplotě dostane na hodnotu -0,1 V, a za stejnou dobu při teplotě 125°C se dostane na hodnotu -0,01V [7].

Přítomnost oxidačních látek má za následek tvorbu povrchových vrstev, které mohou titan pasivovat (vytvoření povrchové ochranné vrstvy). Kromě kyslíku (i vzdušného) působí stejně například i kyselina dusičná nebo chromová, které vytvoří na povrchu titanu ochranou oxidační vrstvu a zabrání tak další korozi<sup>7</sup>.

Povrchová vrstva vytvořená na titanu je tvořena oxidem titaničitým. Ve styku se vzduchem se povrchová vrstva tvoří prakticky okamžitě a nabývá tloušťky 12 až 17 nm, během čtyř let a vlhkosti 40 – 45% se oxidační vrstva dostane na tloušťku 50 až 60 nm. Povrchová oxidační vrstva pevně lpí na základním kovu a vytváří dobou pasivační vrstvu<sup>7</sup>.

V přírodních podmínkách vykazuje titan nadprůměrnou odolnosti proti korozi. Ve srovnání s nerezovou ocelí vykazuje titan po pěti letech v průmyslových podmínkách prakticky nezměněný povrch. Oproti tomu nerezová ocel vykazuje lehké známky koroze již po jednom roce<sup>7</sup>.

Mořská voda a přímořská atmosféra jsou velmi agresivní; titan však zůstává i v těchto podmínkách naprosto nezměněn. V řadě laboratorních zkoušek byl titan porovnáván s jinými kovy, nejčastěji s nerezovou ocelí. Titan vykázal 88x lepší odolnost proti korozi než nerezová ocel. Také svary a pájené spoje titanu vyhověly přírodním podmínkám<sup>7</sup>.

Korozní účinek na titan mají jen čtyři kyseliny: fluorovodíková, sírová, solná a ortofosforečná. Za vyšších teplot má titan menší odolnost ještě vůči kyselinám: šťavelové, mravenčí, trichloroctové a trifluoroctové. Nejnebezpečnější je pro titan kyselina fluorovodíková, poškozuje titan a slitiny titanu již při koncentraci 1% [7].

### **1.2.5 Tabulka souhrnných vlastností titanu**

Tabulka je uvedena v příloze práce.

## **1.3 Výroba titanu**

Nedostatkem titanu a slitin titanu jsou vysoké náklady na jejich výrobu a zpracování, vycházejícího z obtížného obrábění, vysoké reaktivity titanu za teplot nad 700°C s plyny a žáruvzdornými hmotami. Z nutnosti nákladného tavení a odlévání ve vakuu, nebo ochranné atmosféře argonu, z obtížného tavného svařování, provázeného hrubnutím zrna a nepříznivými fázovými změnami při chladnutí spoje. Nedostatkem může být i nízký modul pružnosti v tahu, špatné třecí vlastnosti a nemožnost zpracování vratného odpadu drahého materiálu ve velkém množství<sup>8</sup>.

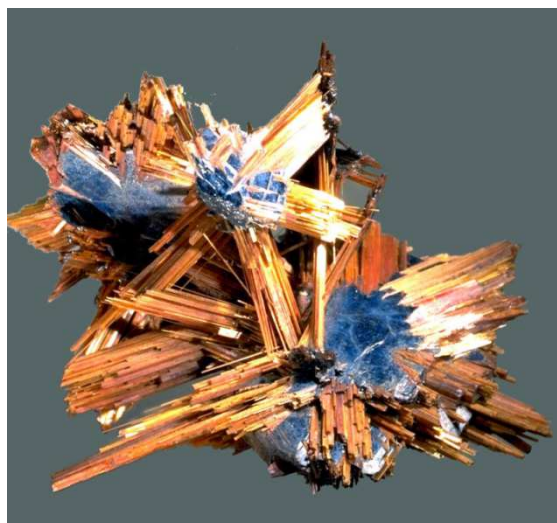
V České republice titan a slitiny titanu nejsou normovány. Používají se materiály dovážené, a to i s převzatým označením<sup>8</sup>.

### **1.3.1 Suroviny pro výrobu titanu**

Obsah titanu v zemské kůře dosahuje hodnoty 5,7 až 6,3 g.kg<sup>-1</sup> a je sedmým nejrozšířenějším kovem po Al, Fe, Ca, K a Mg. Je významně zastoupen i na povrchu Měsíce – horniny, které získala mise Apollo 17, obsahují přibližně 12% TiO<sub>3</sub>. V malých množstvích je rozšířen téměř ve všech typech nerostů. Právě z materiálů, které obsahují TiO<sub>3</sub> se titan vyrábí nejčastěji, mezi na TiO<sub>3</sub> bohaté suroviny patří hlavně rutil a ilmenit<sup>8</sup>.

#### **Rutil**

Rutil je nejbohatším titanovým materiálem. Jedná se v podstatě o znečištěný oxid titaničitý. Bohatá ložiska rutilu se však objevují jen ojediněle. Hlavní místa těžby jsou v Austrálii a v Brazílii. Nejvíce rutilu se spotřebuje k výrobě titanové houby<sup>7</sup>.

Obr. 7 Rutil<sup>9</sup>.

### **Ilmenit**

Ilmenit je titaničitan železnatý ( $\text{FeTiO}_3$ ) s obsahem 40 až 60%  $\text{TiO}_3$ . Naleziště ilmenitu jsou v Rusku, USA, Indii, Norsku, Kanadě, Finsku a Švédsku. Výhodou je levná těžba, neboť doly jsou většinou povrchové a ložiska jsou v malé hloubce pod povrchem<sup>7</sup>.

Obr. 8 Ilmenit<sup>10</sup>.

### **1.3.2 Způsoby výroby**

#### **Výroba titanu krollovou metodou**

Titan vyráběný krollovou metodou se získává z chloridu titaničitého. Chlorid titaničitý je bezbarvá, na vzduchu dýmající těkavá kapalina, která se připravuje zahříváním rutilu s uhlíkem ( $900\div 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ) v proudu chloru dle rovnice<sup>7,8</sup>:



Chlorid titaničitý lze redukovat na kovový titan buď hořčíkem, nebo sodíkem, přičemž redukce hořčíkem je běžnější. Metoda je založena na pozvolném připouštění chloridu titaničitého do roztaveného hořčíku a reakce probíhá dle rovnice:



Reakce probíhá při teplotě 800°C. Aby se předešlo znečištění titanu kyslíkem a dusíkem, je nutno provádět redukci bez přístupu vzduchu, tj. ve vakuové nádobě a pod ochrannou atmosférou inertního plynu, většinou argonu. Roztavený hořčík je ve vnitřním železném kelímku. Při redukci vzniká titan na stěnách kelímku i nad hladinou roztaveného hořčíku v podobě titanové houby. Titanová houba se postupně hromadí a plní vnitřek kelímku<sup>7,8</sup>.

Vnikající chlorid hořečnatý je při teplotě reakce tekutý, hromadí se na spodku kelímku a prostupuje i narůstající titanovou houbou. Jeho objem je mnohem větší, než objem vznikající titanové houby, a je nutno ho během reakce postupně odstranit slivnou trubicou a přetlakem argonu<sup>7</sup>.

Vyrobená titanová houba je do značné míry prostoupena chloridem hořečnatým a nadbytečným hořčíkem, a pro další zpracování je nutno ji ihned po redukci upravit. Chlorid hořečnatý a hořčík se oddělují nejčastěji vakuovou separací při teplotě 900°C. Po separaci je nutno titanovou houbu ihned uložit do uzavřených nádob a chránit ji před vlhkostí<sup>7</sup>.



Obr. 9 Titanová houba<sup>1</sup>.

### **Výroba titanu elektrolýzou**

Chemické vlastnosti titanu předem vylučují možnost výroby titanu elektrolýzou vodních roztoků. Proto se při výrobě titanu elektrolýzou využívá elektrolýza bezkyslíkatých solí. Nejvíce se osvědčil fluoratitaničitan draselný, který je rozpustný v roztavené směsi fluoridu sodného a draselného<sup>7</sup>.

Samotná elektrolýza probíhá ve dvoustupňovém elektrolyzáru. Elektrolyzáru má jednu speciální katodu a dvě anody. Anody jsou grafitové a katoda je v podobně perforované nádoby z ocelového plechu<sup>7</sup>.

### **Rafinace titanu**

Výše popsanými metodami nedosáhneme čistoty titanu vhodného pro vědecké, anebo i některé speciální technické účely. Pro výrobu nejčistšího titanu se používá rafinace, jejíž podstatou je vytvoření jodidu titaničitého a jeho opětovné rozložení na čistý titan a jód<sup>7</sup>.

V základním prostoru válce se nejprve vytvoří vysoké vakuum pro odplynění. Umístí se do něho surový titan (nejčastěji titanová houba) a přivádí se jód, který s titanem vytváří jodid titaničitý. V prostoru válce je tenký wolframový, nebo titanový drát (o průměru 0,1 až 0,5 mm), který se průchodem elektrického proudu ohřeje na teplotu 1400°C. Ve styku se

žhaveným drátem se jodid titaničitý rozloží na čistý titan a jód. Titan se usadí na drátu a jód reaguje s dalším titanem. Konečný průměr drátu bývá 19mm [7].

Čistota takto vyrobeného titanu se dosahuje 99,95%. Většina nečistot obsažených v titanové houbě tvoří jodidy, které by při rozkladu přecházely na čistý titan<sup>7</sup>.

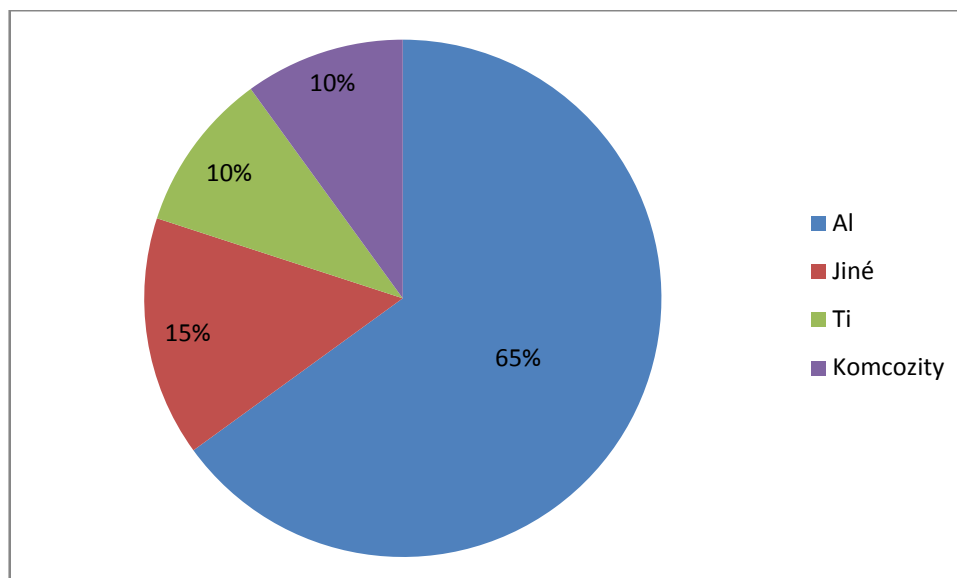
#### 1.4 Použití titanu

Titan nachází uplatnění zejména kvůli svému poměru mezi vahou a pevností. Dále je používán pro svoji vysokou chemickou odolnost<sup>7</sup>.

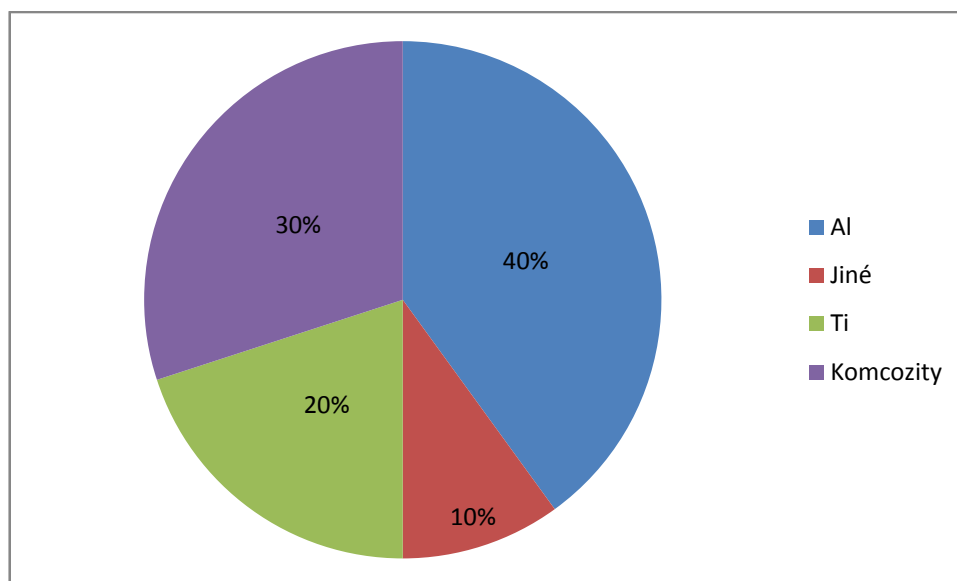
Titan se začal používat nejprve jenom ve vojenských technologiích na letadla, rakety a balistické střely. Jeho zásoby byly z tohoto důvodu přísně střeženy. Do ostatních odvětví se titan dostával až postupně. Nejrychleji se rozšířil v letectví, kde bylo možno převzít získané poznatky od armádních složek. Titan, jako konstrukční materiál se používá hlavně v chemickém, papírenském a textilním průmyslu. Je vhodný zejména tam, kde se pracuje s vlhkým chlorem a jeho sloučeninami, při výrobě umělých hmot, kyseliny dusičné, sody a hnojiv. Výborně odolává mořské vodě (oplášťování lodí, lodní kování). V galvanotechnice a mořnách se osvědčil na koše, drážky elektrod, topné a chladicí hady. Zdravotní nezávadnost titanu dovoluje jeho použití v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, v lékařství pro chirurgické nástroje, šrouby, protézy, v dentální technice pro zubní implantáty<sup>7,8</sup>.

##### 1.4.1 Titan v letectví

Postupně, zvyšováním rychlosti letadel, které přišlo po druhé světové válce s vynálezem nadzvukových strojů, začaly do té doby běžně používané materiály, nedostačovat tepelnému zatížení od tření vzduchu o části letadel. Titan má oproti slitinám hořčíku a hliníku (do té doby používaných v letectví) vyšší odolnost proti teplotám a srovnatelnou měrnou hmotnost<sup>7</sup>.



Obr. 10 Použité materiály v civilním leteckém průmyslu<sup>11</sup>.



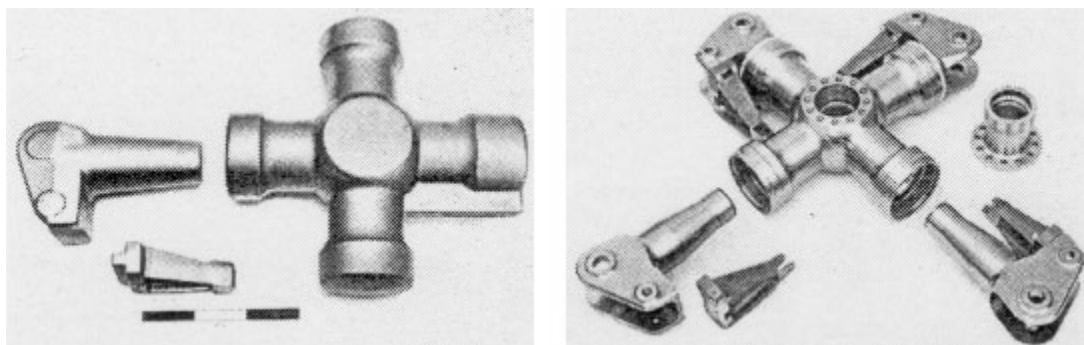
Obr. 11 Použité materiály ve vojenském leteckém průmyslu<sup>11</sup>.

Titan a jeho slitiny se používají na součástky motorů, draků i přístrojů. U motorů jsou to především různé části kompresorů, disky, rotory, prstence a skříňe kompresorů, dále rotační i stacionární lopatky, písty, ojnice, stírací i distanční kroužky, převodové a turbínové skříňe, na spojovací elementy jako nýty, šrouby a matice, na pružiny a armatury. Při stavbě draků se titan používá na potahy, křídla, ocasní plochy, krytování motoru i kabiny, dále na palivové nádrže, ohnivzdorné přepážky, zásobníky, kryty výfukových trubek<sup>7</sup>.

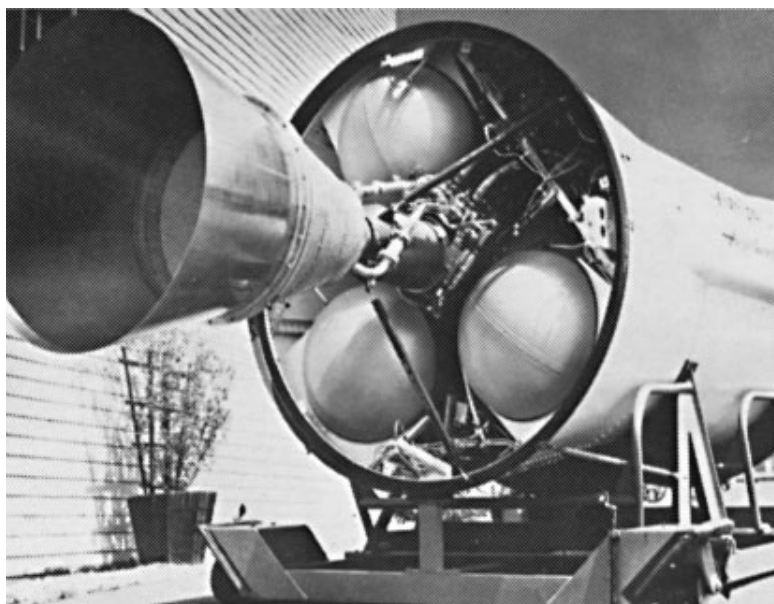


Obr. 12 Rámy oken v kokpitu letadla<sup>1</sup>.

S výhodou se titan používá taky u vrtulníků na vrtulové lisy, různé přístroje včetně radarového zařízení, zařízení na vrhání bomb apod<sup>7</sup>.

Obr. 13 Titanový rotor vrtulníku<sup>1</sup>.

V raketovém průmyslu se titan uplatňuje na pláště raket, kroužky, přívěsné části, palivové nádrže, ale i na raketové motory apod<sup>7</sup>.

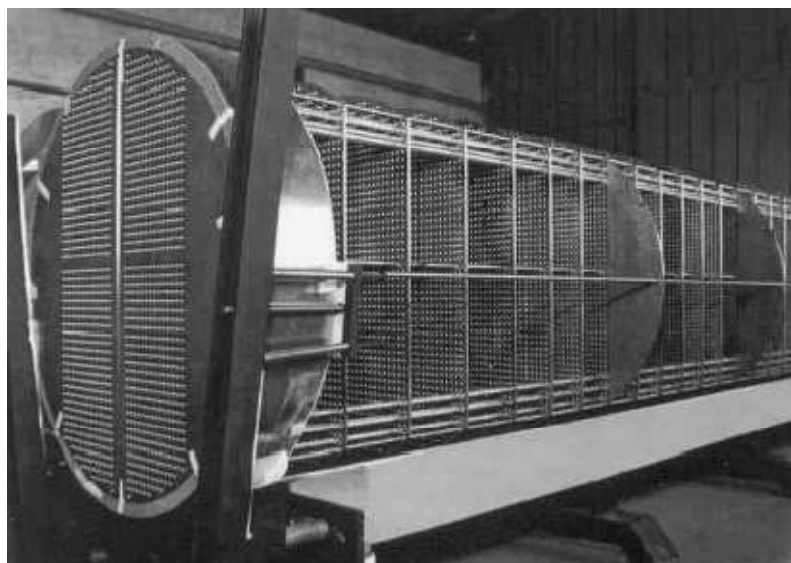
Obr. 14 Palivové nádrže rakety<sup>1</sup>.

#### 1.4.2 Titan v chemickém průmyslu

Titan se v chemickém průmyslu uplatňuje především díky své mimořádné odolnosti proti korozi, anorganickým chloridům, kyslíkatým kyselinám, solím apod<sup>7</sup>. Dále se titan využívá v této oblasti díky své pevnosti i za vyšších teplot<sup>7</sup>.

Díky odolnosti proti působení anorganických chloridům, se titan uplatňuje zejména v chemii chlóru a to v úseku výroby, zpracování i použití. Dále na výrobu kyselin dusičné, dusíkaté, solné, komplexních hnojiv, celulózy a papíru<sup>7</sup>.

Titan lze s výhodou používat jako konstrukční materiál na výrobu zařízení nebo součástí pro chemický průmysl, jako reaktory, výměníky, chladiče a kondenzátory, dále pro prací věže, destinační kolony, odpařovače, rošty, bubny odstředivek, míchadla, popřípadě součásti čerpadel, armatur a nejrůznějších měřících a regulačních přístrojů<sup>7</sup>.

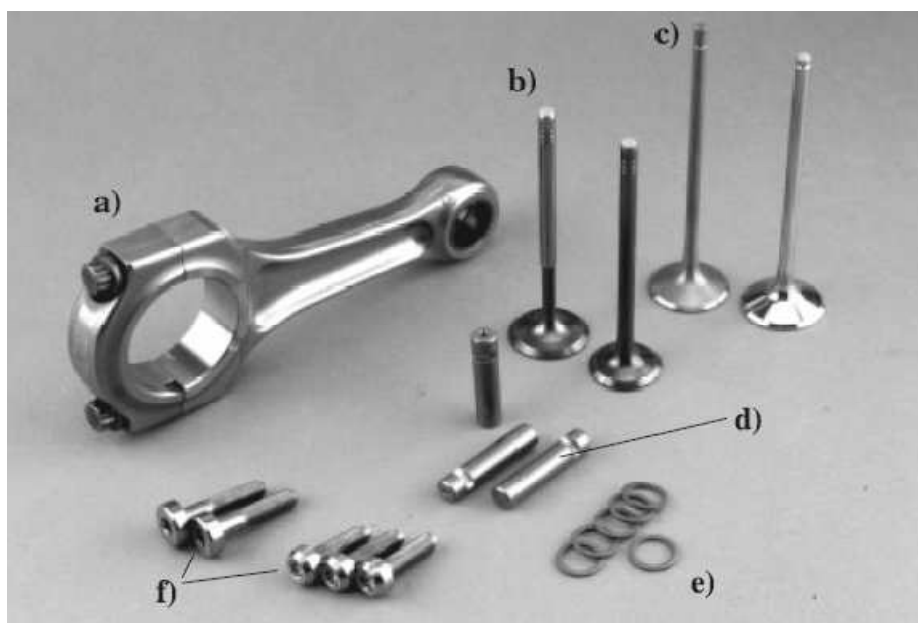
Obr. 15 Titanový výměník tepla<sup>1</sup>.

### 1.4.3 Titan ve strojírenství

Ve strojírenství, podobně jako v letectví, se při volbě titanu soustředí hlavní pozornost na ty případy, v nichž lze využít malé měrné váhy a dobrých mechanických vlastností, popřípadě i dobré korozní odolnosti titanu<sup>7</sup>.

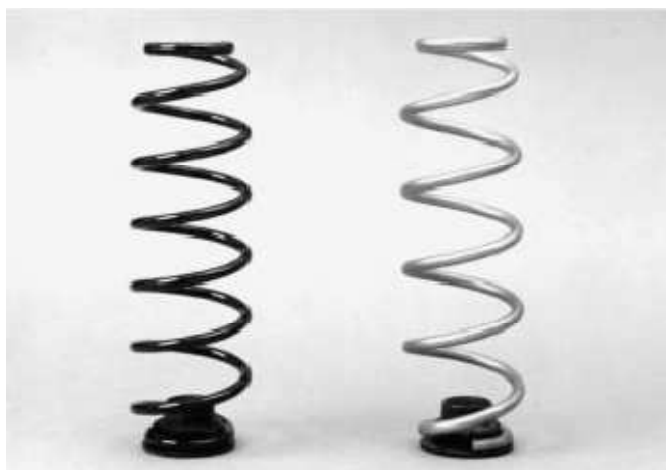
Titan se velmi osvědčil u výroby turbín, kde vlivem poklesu hmotnosti titanové turbíny, oproti turbíně ocelové, dojde ke snížení odstředivé síly a tím pádem se titanová turbína může zatížit větší silou v jiných oblastech<sup>7</sup>.

Titanové slitiny se osvědčily v konstrukcích závodních aut a motocyklů, kde není pořizovací cena titanu rozhodující. Zde jde především o snížení hmotnosti monopostů a zachování, nebo zlepšení mechanických vlastností. U osobních vozů a autobusů se menší hmotnost titanových součástek oproti ocelovým projeví v lepší hospodárnosti provozu<sup>7</sup>.

Obr. 16 Příklady součástek vyráběných z titanu pro automobilový průmysl<sup>1</sup>.

V říční a námořní dopravě se kromě snížení hmotnosti využívá i odolnost titanu proti korozi. Při stavbě lodí, plachetnic, člunů a ponorek se titan a jeho slitiny hodí na výrobu např. napáječek pro kotle, výfukové tlumiče, výměníky, kondenzátory, lodní šrouby, anténní stožáry, radarová zařízení apod<sup>7</sup>.

Titan a titanové slitiny lze použít na součástky nejrůznějších strojů a zařízení, jako: člunky v textilním průmyslu, na výrobu pružin, kde je možno při stejném útlumu zmenšit hmotnost. Ve vojenské technice na části pýchotních zbraní na pancéřování vozidel atd<sup>7</sup>.



Obr. 17 Titanová (vlevo) a ocelová (vpravo) pružina<sup>1</sup>.

#### 1.4.4 Titan v dalších odvětvích

##### Titan v potravinářství

Titan lze využít na zařízení k výrobě ovocných šťáv, sirupů i nakládané zeleniny. Kromě chemických odolností má titan další výhodu, že nemá vliv na chuť, ani barvu roztoků. Také při výrobě léčiv lze použít titanu na všechny zařízení, s výjimkou těch, v nichž by přišel do styku s jódem<sup>7</sup>.

##### Titan v lékařství

Uplatňuje se chemická stálost, dobré mechanické vlastnosti i malá měrná hmotnost titanu. Titan se nemění ve styku s tkání, dá se dobře spojit s kostí, přičemž není žádné nebezpečí vzájemných reakcí. Z titanu se tedy vyrábějí různé šrouby, destičky, dlahy, lékařské nástroje, pátridla, protézy, kloubní náhrady apod<sup>7</sup>.

Obr. 18 Titanová dlaha<sup>12</sup>.

### Titan ve spotřebním průmyslu

Titan se i přes svoji vysokou cenu používá na klenoty, náramkové hodinky, různé druhy sportovního nářadí (tenisové rakety, golfové hole, rámy jízdních kol). Dále na kuchyňské a kutilské nástroje (nože, sekáčky, kladiva, sekery,...)<sup>3</sup>.

Obr. 19 Příkladů výrobků z titanu<sup>1</sup>.

Bylo by možné uvést ještě řadu příkladů použití titanu a titanových slitin. Použití titanu je velmi rozmanité a svoje místo si nachází ve velkém množství odvětví a oborů<sup>7</sup>.

## 2 OBROBITELNOST TITANOVÝCH SLITIN

### 2.1 Obrobitelnost materiálu

Obrobitelnost není obecně platnou definovanou standardizovanou vlastností. Pod pojmem obrobitelnost materiálu se rozumí souhrn vlastností obráběného materiálu z hlediska jeho vhodnosti pro výrobu součástí konkrétním způsobem obrábění. Myslí se tím, jak jednoduché, případně složité je opracovat obrobek při použití řezných nástrojů<sup>13</sup>.

Podstatně přesnější, avšak o to náročnější je, sestavit vlastnosti materiálu obrobku, které ovlivňují proces obrábění, jsou to vlastnosti jako:

- Způsob výroby obrobku,
- tepelné zpracování obrobku,
- chemické a mechanické vlastnosti obrobku,
- povrch materiálu obrobku,
- kvalita a geometrie řezného nástroje.

Hodnoty relevantní pro obrobitelnost materiálu mohou posloužit pouze jako směrné hodnoty, určené pro další optimalizaci<sup>13</sup>.

Při obrábění dochází k oddělování částic materiálu obrobku břitem nástroje. Vlastní proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu obrobku se specifikuje jako řezání, respektive řezný proces. V závislosti na způsobu oddělování materiálu se rozlišuje řezný proces kontinuální (soustružení, vrtání, vyvrtávání), diskontinuální (hoblování, obrážení) a cyklický (frézování, broušení). Reálný řezný proces probíhá za určitých podmínek, které jsou součástí obráběcích podmínek<sup>14</sup>.

#### 2.1.1 Hodnocení obrobitelnosti

V praxi se pro jednotlivé metody obrábění nejčastěji používá relativní hodnocení obrobitelnosti. Jako kritérium pro hodnocení kvality obrobitelnosti se používá kritérium kinetické, tj. podle řezné rychlosti<sup>14</sup>.

Dalším možným kritériem pro hodnocení relativní obrobitelnosti může být: dosažená drsnost povrchu obrobené plochy, velikost opotřebení břitu nástroje, množství energie potřebné k odřezání dané vrstvy materiálu, teplota řezání, druh a tvar třísek<sup>14</sup>.

Metodika zařazení strojírenských materiálů do určitých tříd obrobitelnosti je různá v závislosti na aplikovaných normativch a zkušenostech, zejména výrobců řezných nástrojů.

#### Zařazení strojírenských materiálů

Strojírenské materiály se pro potřeby určení jejich obrobitelnosti zařazují do devíti skupin, označených písmeny malé abecedy:

- a – litiny
- b – oceli
- c – těžké neželezné kovy a jejich slitiny
- d – lehké neželezné kovy a jejich slitiny
- e – tvrzené litiny

f – plastické hmoty

g – přírodní nerostné hmoty

h – vrstvené hmoty

i – pryže

pro každou skupinu materiálů je stanoven etalonový materiál, ke kterému se vztahuje relativní obrobiteľnost ostatních materiálů ve skupině<sup>14</sup>.

### Součinitel obrobiteľnosti

Hodnota součinitele obrobiteľnosti  $K_v$  je dána poměrem:

$$K_v = \frac{v_{cT/VB}}{v_{cT/VB}} \quad (3)$$

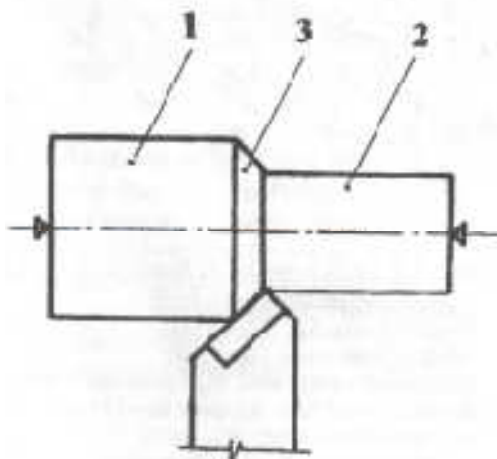
kde:  $v_{cT/VB}$  - řezná rychlost při trvanlivosti  $T$  po dobu obrábění  $VB$

Etalonové materiály v jednotlivých skupinách mají  $K_v = 1$

Pro soustružení se hodnota trvanlivosti obvykle volí  $T = 15 \text{ min}$  a opotřebení  $VB = 0,3 \text{ až } 0,4 \text{ mm}$ . Podle výsledku součinitele obrobiteľnosti se materiály zařezují do 20-ti tříd obrobiteľnosti př. 4b, 12d atd.

### Obrobek

Obrobek jako objekt obráběcího procesu je z hlediska geometrie popsán obráběnou, obrobenou a přechodovou plochou. Obráběná plocha je plocha, která má být obrobena řezáním. Obrobená plocha je získána jako výsledek řezného procesu. Přechodová plocha je část povrchu obrobku, která je vytvořena působením ostří nástroje během zdvihu nebo otáčky nástroje nebo obrobku<sup>14</sup>.



Obr. 20 Plochy na obrobku 1. Obráběná, 2. Obrobená, 3. Přechodová<sup>14</sup>.

### Nástroj

Nástroj v interakci s obrobkem umožňuje realizaci řezného procesu. Z geometrického hlediska je nástroj identifikován svými prvky, plochami, ostřími a rozměry ostří<sup>14</sup>.

## 2.2 Vlastnosti materiálů obrobku

Před zahájením procesu obrábění by se měla posoudit a ověřit obrobitelnost materiálu, do jaké míry tento materiál připouští optimalizaci podmínek obrábění. Při posuzování je nutné se soustředit na podstatné vlastnosti vztažené k materiálu a rovněž na to, jak tyto vlastnosti na obrobitelnost působí.

### Tvrdoost a pevnost

Všeobecně platí, že nízké hodnoty tvrdosti a pevnosti jsou výhodné. Výjimku tvoří materiály, tvořící dlouhou třísku, u nichž se vlivem vytváření nárůstku projevují problémy v podobě horší kvality obrobené plochy, vytváření otřepů a krátké trvanlivosti břitu. Vyšší tvrdost jako důsledek tváření za studena, má pozitivní účinek<sup>13</sup>.

### Tvárnost

Nízké hodnoty tažnosti mají zpravidla pozitivní vliv. Způsobují příznivé utváření třísky a umožňují lepší využití výkonu motoru obráběcího stroje. Při vyšší tvrdosti je tažnost malá a naopak. Dobrá obrobitelnost je často výsledkem kompromisu mezi tvrdostí a tažností.

### Tepelná vodivost

Vysoká tepelná vodivost znamená, že teplo vzniklé při obrábění je rychle odváděno ze zóny řezu. Z hlediska obrábění je proto možné vysokou hodnotu tepelné vodivosti považovat za výhodu<sup>13</sup>.

Během obráběcího procesu se téměř veškerá práce řezání transformuje na teplo. Hlavní zdroje tepla jsou v oblasti plastických deformací při tvoření třísky, v oblasti tření třísky po čele nástroje a v oblasti tření hřbetu po obrobené ploše. Vzniklé teplo řezného procesu  $Q_e$  je odváděno do jednotlivých prvků obráběcího systému<sup>14</sup>.

$$Q_e = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad (4)$$

Kde:  $Q_e$  – teplo řezného procesu [J]

$Q_t$  – teplo odvedené třískou [J]

$Q_o$  – teplo odvedené obrobkem [J]

$Q_n$  – teplo odvedené nástrojem [J]

$Q_{pr}$  – teplo dovedené řezným prostředím [J]

Podíl jednotlivých odváděných složek tepla řezného procesu do třísky, obrobku, nástroje a prostředí, závisí na tepelné vodivosti materiálů obrobku a nástroje, na řezných podmínkách (především na řezné rychlosti), řezném prostředí (způsobu chlazení a mazání) a na geometrii břitu řezného nástroje<sup>14</sup>.

Největší část tepla vzniklého při obrábění je v ideálním případě odváděna třískou. Teplota třísky zatěžuje řezný nástroj jen tak dlouho, dokud je s ním v kontaktu, proto se vyplatí tento kontakt minimalizovat<sup>14</sup>.

### Zpevňování materiálu zastudena

Při plastickém tváření kovů se jejich pevnost různou měrou zvětšuje. Zvýšení pevnosti je závislé na rychlosti, kterou tváření probíhá, a na tom, jaké sklony materiál obrobku ke zpevňování plastickou deformací má. Vysoká rychlost zpevňování znamená rychlé

zvyšování pevnosti v poměru k úbytku deformační rychlosti. Vysoké rychlosti zpevňování plastickou deformací za studena znamenají, že na utváření třísky musí být vynaloženo velké množství energie (velká měrná řezná síla). Současně s tím dochází k významnému zvýšení tvrdosti v povrchové zóně obráběné plochy<sup>14</sup>.

Je-li hloubka zastudena zpevněné zóny stejně velká jako posuv, znamená to vždy silné namáhání břitu. Hloubka zóny zpevněné za studena a stupeň tvrdosti jsou úměrné deformační rychlosti břitu. Ostrý břit s velkým úhlem čela způsobí snížení deformační rychlosti. Pozitivní geometrie břitu proto přispívá k tomu, že zóna vytvrzování není příliš silná, čímž se snižuje zatížení břitu nástroje. Zpevnění platinou deformací zastudena se může rovněž projevit jako složka redukující sklon k tvorbě nárůstku<sup>14</sup>.

### Vměstky

Makrovměstky jsou takové vměstky, jejichž velikost se pohybuje na 150  $\mu\text{m}$ . Často jsou velmi tvrdé a abrazivní. Vměstky vznikají nejčastěji pro výrobu materiálu. Velký počet náhlých porušení nástrojů lze pravděpodobně dodatečně vysvětlit jejich výskytem<sup>14</sup>.

V titanu se vměstky vyskytují ve formě karbidu titanu (TiC)<sup>14</sup>.

### 2.3 Soustružení titanových slitin

Většina titanových slitin se všeobecně zařazuje mezi těžkoobrobitelné materiály. Za nepříznivou obrobitelnost mohou tyto vlastnosti titanu:

- Udržují si vysokou pevnost i při obrábění, kdy je v místě řezu vysoká teplota,
- obráběcí nástroj je vystaven vysokému abrazivnímu účinku, vzhledem k přítomnosti vysoce tvrdých karbidů titanu v materiálu obrobku,
- při vysokých teplotách, charakteristických pro obrábění titanu, se vyskytují chemické reakce s materiálem nástroje, což vede k intenzivnímu opotřebení,
- při obrábění titanu je často přítomné vytváření nárůstku na řezné hraně, což vede k zhoršení kvality povrchu obrobené plochy,
- špatná tepelná vodivost titanových slitin má za následek koncentraci tepla v místě řezu,
- intenzivní tření třísky po nástroji.

Vzhledem k uvedeným faktorům, není možné obrábět titanové slitiny stejnými řeznými podmínkami, jako používáme u ocelí. Kritickou je především řezná rychlost. Těžkosti při obrábění titanových slitin jsou spojené s nízkými řeznými časy a dlouhým časem řezání<sup>11</sup>.

S ohledem na přesnost geometrického tvaru, rozměrovou přesnost a jakost obráběného povrchu je potřebné zvládnout problémy, které souvisí s obráběním titanových slitin a nastavit pracovní podmínky, při kterých bude obrábění co nejhospodárnější. Proto je dobré dodržovat při obrábění slitin titanu tyto zásady:

- Tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek musí být co největší, aby byly minimalizované kmity při obrábění,
- nevolit velmi malé hodnoty posuvu a šířky záběru ostří, protože hrozí nebezpečí zpevňování,
- volit nízkou přípustnou hodnotu opotřebení nástroje,

- musí být zajištěný pravidelný a stálý záběr,
- nástroj je potřeba kvalitně ostřit a správně nastavovat vzhledem k obrobku,
- používat řeznou kapalinu.

Při soustružení titanových slitin je charakteristické, že vysoká teplota v místě řezání je umístěna blíže k břítu nástroje. Vzhledem k tomu je použití rychlořezné oceli pro soustružení titanu nevhodné. Při jejím použití dochází k deformaci břítu nástroje. Při vysoké řezné rychlosti dochází k deformaci břítu nástroje i u nástrojů vyrobených ze slinutých karbidů. Při soustružení titanových slitin nástroji ze slinutého karbidu se dosahuje lepších výsledků trvanlivosti při použití WC. TiC, který úspěšně odolává difuznímu opotřebení u soustružení ocelí má při soustružení titanu opačný efekt. Intenzita difuzního opotřebení je při soustružení nástroji s obsahem TiC vyšší v porovnání s WC<sup>11</sup>.

Při obrábění titanových slitin je namáhání značně vysoké. Velmi často se vyskytuje plastická deformace řezné destičky. Požadavky na nástroj pro soustružení titanu by měly splňovat:

- Vysokou pevnost a houževnatost,
- dobrou odolnost proti opotřebení,
- vysokou pevnost při vysokých teplotách,
- odolnost proti tepelným rázům,
- dostatečnou chemickou stabilitu při vysokých teplotách.

Řezná kapalina je jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňující produktivitu obrábění titanových slitin. Snížení teploty v místě řezu použitím řezné kapaliny vede k prodloužení trvanlivosti nástroje. Použití řezné kapaliny snižuje tepelné napětí v nástroji, které je způsobeno různou tepelnou roztažností materiálu nástroje. Přívodem kapaliny do místa řezu pod tlakem pomáháme zkrátit kontakt třísky a nástroje<sup>11</sup>.

Doporučené řezné podmínky pro soustružení titanu jsou uvedeny v příloze této práce. Podmínky jsou od společnosti Pramet Tools s.r.o.

#### **2.4 Frézování titanových slitin**

Frézování je velmi častou metodou třískového obrábění titanových slitin. Její předností je poměrně velká výkonnost při dobré kvalitě obrobku. Frézování je metoda, kterou se dají vyrobit rovinné, rotační i tvarové plochy, dále ozubení, závity a drážky různých povrchů, proto je v technické praxi nejpoužívanější metodou obrábění. Frézování se od vrtání, soustružení a broušení odlišuje především přerušovaným řezem. U frézování je hlavní řezný pohyb otáčivý a koná ho nástroj, vedlejší pohyb je posuvný a koná ho obrobek, nebo nástroj<sup>11</sup>.

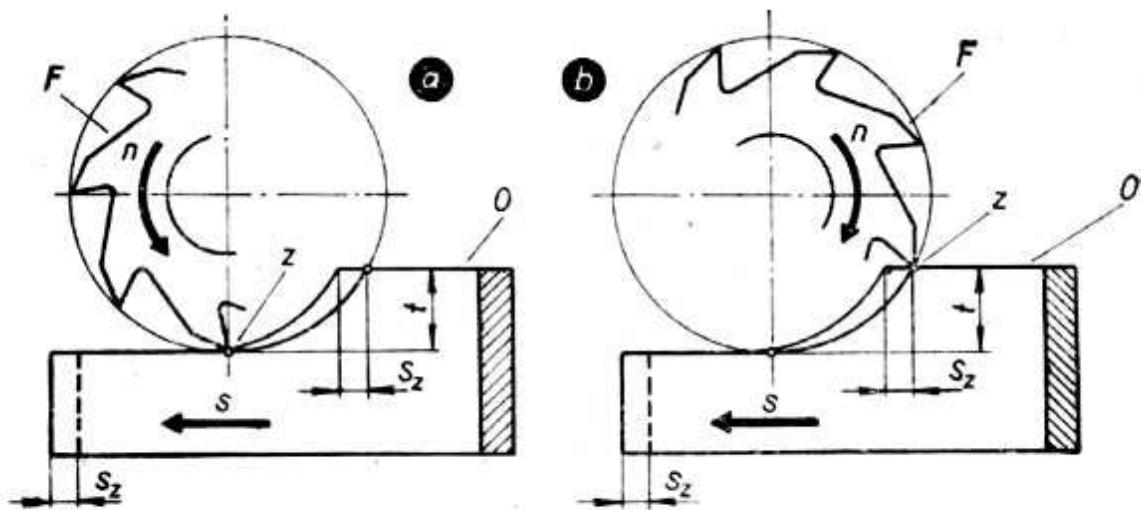
Podle směru otáčení nástroje a posuvu obrobku rozlišujeme frézování sousledné a nesousledné. Sousledné frézování vzniká při stejném smyslu otáčení nástroje a posuvu obrobku a má mnoho předností, např.:

- Řezná síla směřuje do materiálu, což pomáhá zmenšit sílu potřebnou na upnutí obrobku,
- zmenšuje se náchylnost stroje ke chvění,

- je možné zvýšení posuvu na zub, při zachování trvanlivosti nástroje.

Nevýhodou sousledného frézování je rázové zatížení řezného nástroje při počáteční fázi záběru, kdy se odřezává maximální tloušťka třísky<sup>11</sup>.

Při nesousledném frézování se nástroj otáčí protisměru posuvu obrobku. Řezný nástroj při tomto způsobu frézování odřezává třísku od minimální do maximální tloušťky. Řez nastává tehdy, dostane-li se tloušťka odřezávané třísky nad hodnotu poloměru zaoblení ostří, do té doby řezný nástroj stlačuje obrobek pod sebe a dochází tak k velkému tlaku na břit nástroje a již obrobený povrch. V důsledku této skutečnosti může dojít k plastickému poškození povrchu obrobku a poškození řezného nástroje lomem<sup>11</sup>.



a - nesousledné frézování, b - sousledné frézování, F - fréza, O - obrobek, n - otáčení frézy, s - posuv obrobku,  $s_z$  - posuv na zub frézy, t - hloubka frézování, z - začátek záběru jednotlivých zubů frézy

Obr. 21 Schéma sousledného a nesousledného frézování<sup>15</sup>.

Při frézování titanu vzniká mnoho problémů, které vyplývají z vlastností titanu. Neklíčovější je, stejně jako u ostatních způsobů obrábění, vhodně zvolit řezný nástroj, obráběcí stroj, řezné podmínky a řezné prostředí. Řezné materiály pro frézovací nástroje se s ohledem na obráběný materiál volí zpravidla vyrobené ze spěkaných karbidů a s vysokou houževnatostí, tj. materiály s vyšším obsahem kobaltu<sup>11</sup>.

Při frézování, stejně jako při soustružení, není vhodné používat nástroje, které obsahují TiC. Při procesu řezání nástrojem s obsahem TiC je přítomno intenzivní difúzní působení obráběného a řezného materiálu<sup>11</sup>.

Při volbě řezného nástroje je potřeba správně zvolit geometrii nástroje. Při frézování titanových slitin se doporučuje tato geometrie nástroje:

- Úhel hřbetu v ortogonální rovině  $\alpha_o = 7$  až  $10^\circ$ ,
- úhel čela v ortogonální rovině  $\gamma_o = 10$  až  $15^\circ$ ,
- úhel sklonu hlavního ostří  $\lambda_s = -10^\circ$ ,
- pro frézovací hlavy se doporučený úhel hlavního ostří  $\chi_r = 60^\circ$ .

Další podmínkou pro správnou volbu nástroje při frézování titanových slitin je povlakování řezného materiálu. Vhodné je použít vícevrstevných povlaků při kombinaci s TiN. Tyto povlaky zajišťují vysokou otěruvzdornost a houževnatost<sup>11</sup>.

Řezné prostředí při frézování je dalším faktorem, kterým je možné výrazně ovlivnit proces řezání. Na obrábění titanových slitin je potřebné použít řeznou kapalinu s chladicí i mazací schopností, není dobré používat čistě chladicí, nebo čistě mazací kapalinu. Doporučuje se používat emulze s koncentrací 4 až 6 %, polysyntetické řezné kapaliny s koncentrací 8 až 12 % a syntetické řezné kapaliny s koncentrací 3 až 4 %. Koncentrace řezných kapalin též závisí na řezných podmínkách<sup>11</sup>.

Jako při soustružení, tak i při frézování je třeba aplikovat řezné podmínky, které při zabezpečení požadované kvality obroběných ploch a produktivity přinesou i ekonomicky akceptovatelnou trvanlivost nástroje<sup>11</sup>.

Doporučené řezné podmínky pro frézování titanových slitin podle firmy Pramet Tools s.r.o. jsou uvedeny v příloze práce.

## 2.5 Vrtání titanových slitin

Stejně jako při jiných způsobech obrábění titanových slitin, tak i při vrtání vznikají těžkosti spojené s vysokou houževnatostí a pevností, kterou si titan udržuje i za zvýšených teplot. Při vrtání titanu šroubovitým pohybem je hlavním problémem ten, že s narůstající hloubkou vrtané díry se zhoršuje přívod řezné kapaliny do místa řezu. V důsledku toho dochází k nedostatečnému mazání a chlazení místa řezu, zhoršuje se odvod třísky z vrtané díry, čímž se zhoršují podmínky obrábění a v krajním případě může dojít až ke znehodnocení nástroje<sup>11</sup>.

Vysoké řezné síly při vrtání, vysoké mechanické a tepelné namáhání řezného nástroje si vyžaduje zlepšení a zkvalitnění geometrie nástroje a zvyšování pevnosti a tuhosti vrtáku i soustavy nástroj – stroj – obrobek. Vyhovující tuhost a vyhovující dynamické vlastnosti soustavy jsou jednou ze základních podmínek pro úspěšné zvládnutí operací vrtání titanových slitin<sup>11</sup>.

Pro zabezpečení uspokojivé trvanlivosti vrtáku pro konkrétní vrtací operace musí být z hlediska hospodárnosti a produktivity vrtání splněno více všeobecných požadavků, jsou to požadavky jako:

- Při vrtání titanových slitin nástroji z rychlořezné oceli je třeba volit zmenšený průřez jádra vrtáku. To z důvodu lepšího odchodu třísek a zlepšení přívodu řezné kapaliny k místu řezu,
- upřednostňovat vrtáky z kvalitních kobaltových rychlořezných ocelí,
- pro nástroje z rychlořezné oceli se doporučuje vyleštit drážky držáku, zúžení příčné řezné hrany a zúžení vodících fazet vrtáku o 0,3 až 0,5 mm,
- pro vrtáky vyrobené ze slinutých karbidů se doporučuje volit negativní geometrii fazety na čele nástroje širokou 0,1 až 0,15 mm.

Pro vrtání titanových slitin se u nástrojů z rychlořezné oceli doporučuje volit vrcholový úhel vrtáku  $\varepsilon_r = 118^\circ$  nebo  $140^\circ$  a u větších průměrů vrtáků zvolit úhel hřbetu v ortogonální rovině  $\alpha_0 = 10 - 14^\circ$  [11].

Pro zvýšení trvanlivosti řezných nástrojů je podmínkou použití procesních kapalin, vzhledem k intenzivnímu tření mezi nástrojem a obráběným materiálem. Vhodnými procesními kapalinami pro vrtání titanových slitin jsou emulze a řezné oleje. Chlazení řeznými oleji je vyžadováno při vrtání hlubokých děr<sup>15</sup>.

Tab. 1 Řezné podmínky pro vrtání titanových slitin nástroji ze slinutých karbidů<sup>11</sup>.

Průměr vrtáku (mm)	1	2	3	5	8	12	15	20
<b>f</b> (mm)	0,006	0,012	0,015	0,03	0,05	0,07	0,1	0,12
<b>v<sub>c</sub></b> (m · mm <sup>-1</sup> )	37	37	32	25	24	19	21	17
	48	48	44	34	32	27	16,5	22,5

Tab. 2 Řezné podmínky pro vrtání titanových slitin nástroji z rychlořezné oceli<sup>11</sup>.

Průměr vrtáku (mm)	f (mm)	n (mm <sup>-1</sup> )	v <sub>c</sub> (m · mm <sup>-1</sup> )	Maximální hloubka vrtání (mm)	T (min)
<b>5</b>	0,06	478	7,5	35	5
<b>8</b>	0,07	278	7,2	50	10
<b>12</b>	0,1	184	6,9	60	15
<b>16</b>	0,13	132	6,6	70	20
<b>20</b>	0,16	100	6,3	85	25
<b>30</b>	0,22	64	6	100	30

Při vrtání titanových slitin s pevností nad 1000 MPa je potřeba snížit velikost posuvu a řezné rychlosti o 25 až 30% [11].

## 2.6 Broušení titanových slitin

Na kvalitu funkčních ploch z titanových slitin jsou kladeny vysoké požadavky jednak s hlediska geometrické přesnosti, tak i z hlediska drsnosti povrchu. Broušená vrstva nesmí být porušena mechanickými, fyzikálními nebo chemickými účinky, které jsou průvodním jevem při broušení titanu. Vzhledem k vysoké pevnosti je broušení titanu charakteristické zvýšením složek řezné síly, zvýšeným namáháním brusného kotouče, vzhledem ke koncentraci tepla v místě řezu. Koncentrace tepla při broušení může vést ke vzniku mikrotrhlin na obráběném povrchu. Proto je broušení titanových materiálů náročné na volbu řezných podmínek oproti broušení běžným kaleným ocelí. Všeobecně se doporučuje volit menší řezné rychlosti a malé hodnoty úběru (do 0,03 mm) [11].

Nejvýhodnější je broušení obvodem kotouče zapichovacím způsobem, při použití kotouče z AlO<sub>3</sub> nebo mikrokrytalického hnědého korundu s označením A 97 MK. Přičemž základním úspěchem pro úspěšné broušení titanových slitin je použití řezné kapaliny.

V případě, že se broušení konvečním brusivem jeví jako nedostatečně produktivní, je vhodné aplikovat brusné kotouče na bázi KNB a diamantu. Jejich aplikace vede k vysoké kvalitě broušených povrchů bez popálenin a trhlin, vysoké produktivitě a vyšší trvanlivosti v porovnání s konvenčním brusivem<sup>11</sup>.

### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části se věnuji měření řezných sil při vnějším podélném soustružení a následnému posouzení obrobitelnosti titanové slitiny Ti6Al4V. Obrobitelnost je posuzovaná pomocí měrné řezné síly  $k_c$ , která reprezentuje řeznou sílu vztaženou na průřez třísky.

#### 3.1 Materiál obrobku

Soustruženým obrobkem je válcová tyč o průměru 40 mm. Tyč je vyrobena s velmi používané titanové slitiny Ti6Al4V, která je tvořena fázemi  $\alpha$  a  $\beta$ . Materiál Ti6Al4V má všechny vlastnosti titanových slitin, jako dobrou korozivzdornost, vysokou pevnost, nízkou měrnou hmotnost. Mechanické vlastnosti a chemické složení materiálu je v tabulkách 3 a 4.

Tab. 3 Chemická zastoupení prvků v titanové slitině Ti6Al4V.

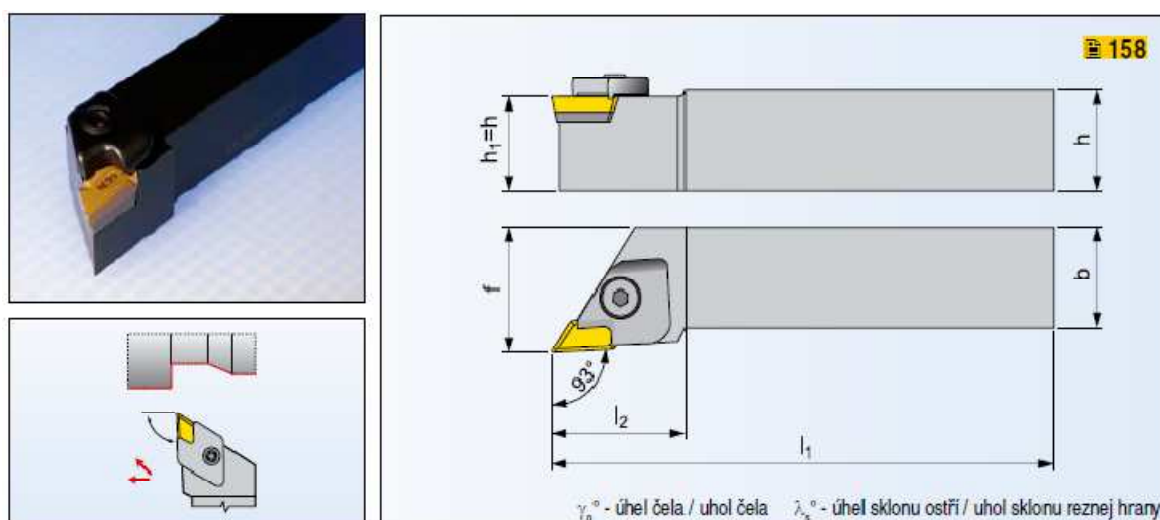
Prvek	Ti	Al	V	O <sub>2</sub>	Fe	H <sub>2</sub>	C	N <sub>2</sub>
Množství [hm%]	zbytek	5.5 – 6.75	3,5 – 4.5	<0.2	<0.25	<0.0125	<0.08	<0.05

Tab. 4 Mechanické vlastnosti titanové slitiny Ti6Al4V.

Vlastnost	Hodnota [jednotka]
Tvrdość HB	350 [-]
Mez pevnosti v tahu	950 MPa
Mez pružnosti v tahu	880 Mpa
Modul pružnosti	113,8 GPa
Tažnost	15 %

#### 3.2 Řezný nástroj

Pro soustružení byla vybrána vyměnitelná řezná destička od společnosti Pramet Tools s.r.o s označením KNUX 160405ER-72 společně s držákem s označením CKJNR 2020 K 16 rovněž od firmy Pramet Tools s.r.o. Velikost a rozměry držáku jsou dobře čitelné na obrázku 22. Velikost a rozměry destičky včetně rozsahu použitelného posuvu a hloubky řezu jsou rovněž dobře čitelné na obrázku 23.



NŮŽ PRO VNĚJŠÍ SOUSTRUŽENÍ / NŮŽ PRE VONKAJŠIE SÚSTRUŽENIE

ISO	R/L	Rozměry / Rozmery [mm]							kg	ND	VBD VRD		
		$h=h_1$	b	f	$l_1$	$l_{max}$	$\lambda_s$	$\gamma_0$					
CKJNR/L 2020 K 16	•/•	20	20	30	125	34			+1	-5	0,45	R1 / L1	KNUX 1604..

Obr. 22 Držák vyměnitelných řezných destiček CKJNR 2020 K 16 [17].

Velikost Veľkosť	(l)	$l_1$	d	s	KNUX	
					$r_E$	$\alpha$
1604	16,0	16,15	9,525	4,76		
1904	19,4	15,88	9,525	4,76		

Nástroje viz str. / Nástroje vid' str.: 7

Utvářec Utvárač	ISO	ANSI	Materiály / Materiály								Rádus Rádus	Posuv na ot. Posuv na ot.			Hĺbka řezu Hĺbka řezu	
			6630	6640	9230	9235						$r_z$	$f_{min}$	$f_{max}$	$a_{pmin}$	$a_{pmax}$
	KNUX 160405ER-72	KNUX -3xER-72	•	•	•						0,5	0,15	0,23	0,5	4,0	
	KNUX 160405EL-72	KNUX -3xEL-72	•	•	•						0,5	0,15	0,23	0,5	4,0	

Obr. 23 Řezná destička pro podélné vnější soustružení KNUX 160405ER-72 [17].

### 3.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky byly nastaveny podle doporučení výrobce břitové destičky KNUX 160405ER-72 Pramet Tools s.r.o. S ohledem na to, že soustružíme slitinu titanu Ti6Al4V, která se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály, byly řezné podmínky stanoveny na dolní hranici doporučení výrobce. Při soustružení nebyla použita žádná řezná kapalina.

Tab. 5 Nastavené řezné podmínky.

Řezná podmínky	Označení	Velikost [jednotka]
<b>Průměr obrobku</b>	D	40 mm
<b>Otáčky</b>	n	579 [min <sup>-1</sup> ]
<b>Posuv na otáčku</b>	f	0,15 [mm]
<b>Hloubka řezu</b>	a <sub>p</sub>	0,5 [mm]

Ze zvolených řezných podmínek si můžeme vypočítat řeznou rychlost  $v_c$  podle vzorce:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (5)$$

kde: D [mm] – průměr obrobku

n [min<sup>-1</sup>] – otáčky

kdy po dosazení dostaneme velikost  $v_c = 75,02$  m/min.

### 3.4 Metodika měření experimentu

Experiment proběhl na klasickém universálním soustruhu, na který byl připojen dynamometr pro měření silového zatížení. Obrobek, tyč o průměru 40 mm vyrobená ze slitiny Ti6Al4V, byla upnuta do vřetene stroje. Nástroj byl upevněn do držáku a vystředěn vůči ose obrobku. Cílem experimentu bylo zaznamenat dynamometrem silové zatížení při obrábění. Naměřené silové zatížení analyzovat a sestavit grafy řezných sil při soustružení titanové slitiny Ti6Al4V v závislosti na čase. Dále vypočítat měrnou řeznou sílu  $k_c$ , kterou použijeme jako ukazatel obrobitelnosti slitiny Ti6Al4V. Měrnou řeznou sílu rovněž analyzujeme a sestavíme graf se závislostí měrné řezné síly na čase.

Dynamometr zaznamená síly pasivní  $F_p$ , řeznou  $F_c$  a posuvovou  $F_f$  z těchto sil lze dopočítat celkovou řeznou sílu  $F$  podle vzorce:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (6)$$

kde: F [N] – celková řezná síla

$F_c$  [N] – řezná síla

$F_p$  [N] – pasivní řezná síla

$F_f$  [N] – posuvová řezná síla

Měrnou řeznou sílu vypočítáme ze vzorce:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (7)$$

kde:  $k_c$  [MPa] – měrná řezná síla

$F_c$  [N] – řezná síla

$A_D$  [mm<sup>2</sup>] – průřez třísky

Který reprezentuje řeznou sílu  $F_c$  vztáženou na průřez třísky  $A_D$ . Průřez třísky vypočítáme ze součinu hloubky řezu  $a_p$  a posuvu na otáčku  $f$ , které jsme si stanovili v řezných podmínkách, a to podle vzorce:

$$A_D = a_p \cdot f \quad (8)$$

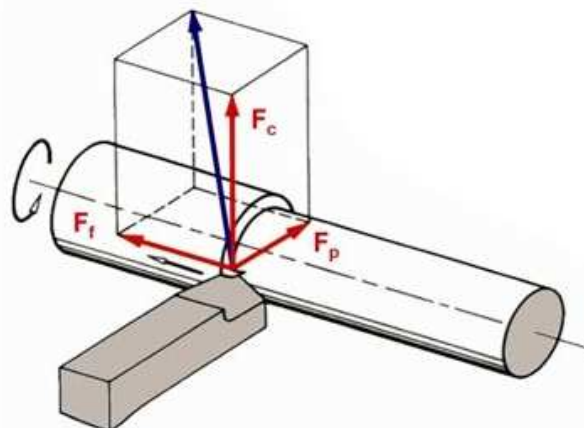
Záměrem bylo provést opakované měření a poté určit pomocí statistických metod reprezentativní hodnoty. Celkový počet metod byl stanoven na 10, přičemž se při změně průměru obrobku musela dopočítat nová hodnota otáček, aby byla zajištěna stále stejně velká řezná rychlost.

### 3.5 Realizace experimentu

Po realizaci experimentu bylo nuceno ustoupit od myšlenky použít opakovaně naměřená data. Při soustružení docházelo k plastickému poškozování břitu řezného nástroje a z obav o velké zkreslení výsledků byly pro potřeby této práce použity údaje jenom z prvního měření, kdy byl nástroj nový a jeho vlastnosti tedy odpovídaly vlastnostem garantovaným výrobcem.

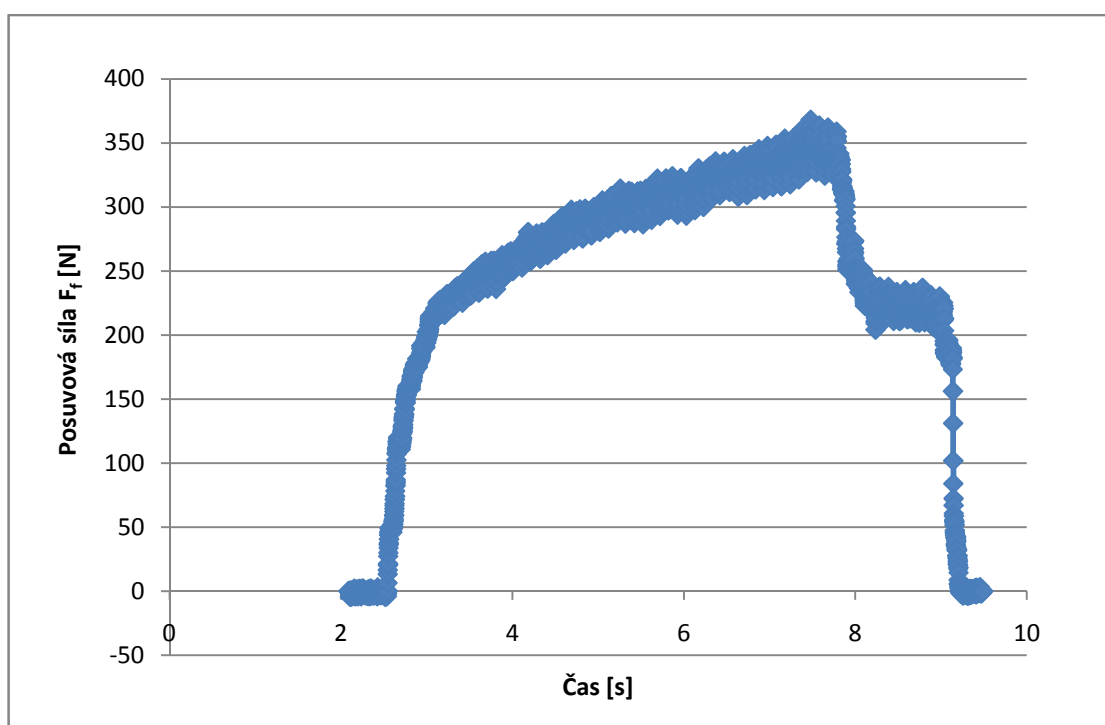
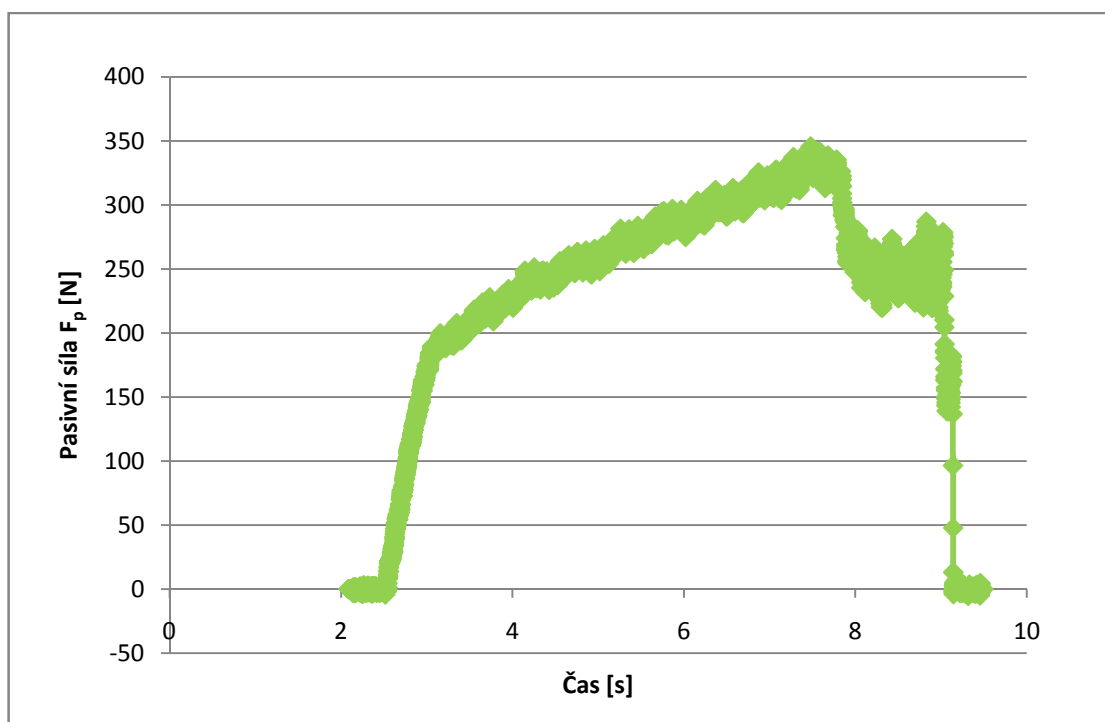
#### 3.5.1 Síly působící při soustružení

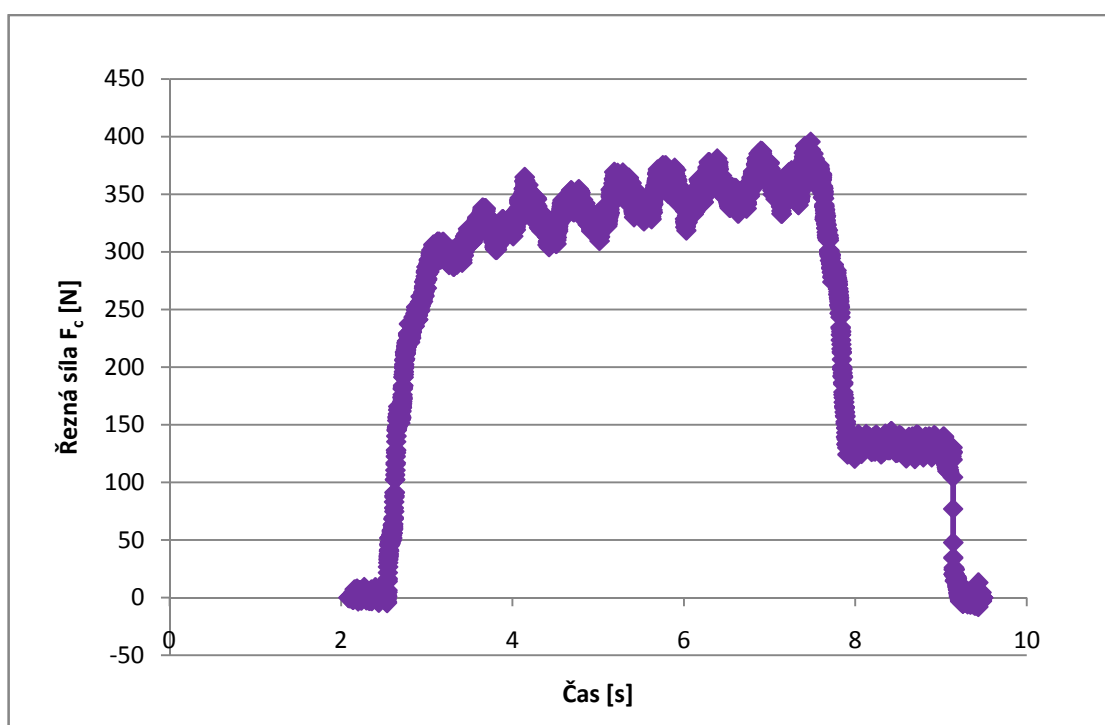
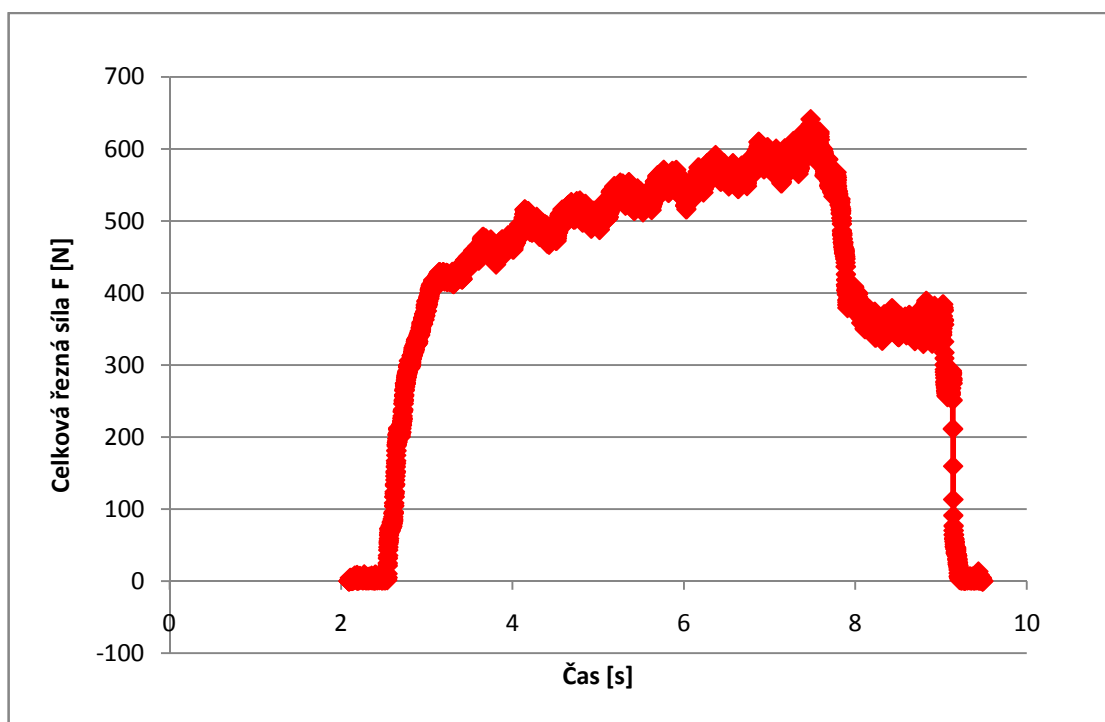
Pro správné čtení výpisu hodnot z dynamometru musíme rozpoznat, která síla působí v jaké ose. Umístění sil v zápisu dynamometru lze ztotožnit s obrázkem 24, který ukazuje rozložení sil při podélném soustružení, které bylo předmětem i tohoto experimentu. Lze z něj odečíst, že v ose x, která je totožná s osou obrobku, působí posuvová síla  $F_f$ , v ose y, působí síla pasivní  $F_p$  a v ose z, síla řezná  $F_c$ . Celková řezná síla  $F$ , je poté výslednicí těchto sil.



Obr. 24 Síly působící při soustružení<sup>19</sup>.

Získané průběhy řezných sil v závislosti na čase jsou zachyceny na obrázcích 25 až 28.

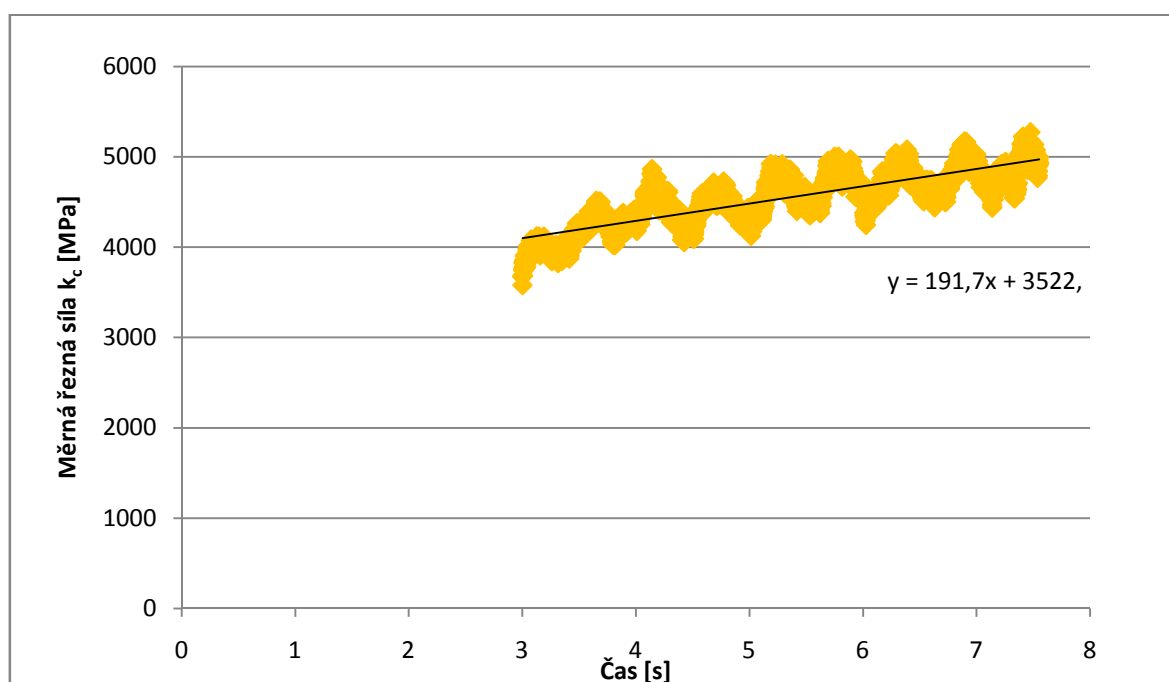
Obr. 25 Průběh posuvové síly  $F_f$ .Obr. 26 Průběh pasivní síly  $F_p$ .

Obr. 27 Průběh řezné síly  $F_c$ .Obr. 28 Průběh celkové řezné síly  $F$ .

Z průběhů sil je čitelné, že řezné síly se rychle dostanou na hodnotu potřebnou k oddělení třísky od obráběného materiálu a poté dále rostou s časem obrábění. Hodnoty sil kmitají společně s oddělováním třísky od materiálu.

### 3.5.2 Stanovení měrné řezné síly

Pro výpočet měrné řezné síly bylo vzato časové pásmo od 3 do 7,5 sekund, kdy řezná síla dosahuje největších hodnot. Výpočtem bylo dosaženo hodnoty  $k_c = 4534,279$  MPa. Růst měrné řezné síly v čase 3 až 7,5 sekund je znázorněn na obrázku 29. Růst měrné řezné síly lze aproximovat lineární funkcí. V našem případě dostaneme rovnici přímky, podle které můžeme vidět, že měrná řezná síla roste v průběhu obrábění o 191,7 MPa za jednu sekundu.



Obr. 29 Závislost měrné řezné síly na čase od 3 do 7,5 sekund

### 3.5.3 Opatření nástroje

Při experimentu docházelo k velikému plastickému porušování řezného nástroje. Řezným nástrojem pro tento experiment byla řezná destička od společnosti Pramet Tools s.r.o. s označením KNUX 160405ER-72. Její opotřebení v porovnání s výchozím stavem nástroje je znázorněno na obrázcích 30 a 31, které jsou pořízeny pod mikroskopem.



Obr. 30 Výchozí stav břítu nástroje.



Obr. 31 Stav břitu nástroje po experimentu.

### 3.5.4 Tříška

Třísky po obrábění titanové slitiny Ti6Al4V jsou zachyceny na obrázku 32 a 33. Tříška je dlouhá, což způsobuje veliké problémy a negativně působí při procesu řezání i po něm. Dlouhé třísky se děle třou o nástroj a přispívají tak k ohřevu nástroje. Dále může být dlouhá tříška nebezpečná pro obsluhu obráběcího stroje. Pro skladování odpadu po obrábění je dlouhá tříška také špatná. Odpadová nádoba naplněná dlouhými třískami obsahuje velké množství vzduchu a je tedy ekonomicky náročnější se tohoto odpadu zbavovat.



Obr. 32 Tříška po soustružení titanové slitiny Ti6Al4V.



Obr. 33 Tříska po soustružení titanové slitiny Ti6Al4V.

### 3.6 Diskuze výsledků experimentu

V rámci praktické části práce jsou měřeny řezné síly při podélném vnějším soustružení titanové slitiny Ti6Al4V, přičemž byly pomocí dynamometru zaznamenány hodnoty sil při soustružení a z těchto hodnot dopočítána měrná řezná síla. Pro stanovení průměrné velikosti silového působení při soustružení byly pro výpočet použity hodnoty z intervalu 3 až 7,5 sekund, v tomto intervalu bylo naměřeno největší silové zatížení a dochází v něm k vlastnímu procesu řezání.

Analýzou posuvové síly  $F_f$  byla zjištěna její průměrná hodnota a stanovena na velikost  $F_f = 292,368$  N. Průběh posuvové síly je patrný z obrázku 29. Je zde vidět rychlý narůst síly a poté její další, již pozvolný růst, až k okamžiku ukončení řezu, kdy hodnoty posuvové síly schodovitě padají k nule. Aproximací funkce bylo zjištěno, že síla krátce po zasetí nástroje do materiálu vzroste na 230 N a poté se zvětšuje o 27,2 N za jednu sekundu.

Analýzou pasivní síly  $F_p$  byla zjištěna její průměrná hodnota a stanovena na velikost  $F_p = 264,375$  N. Průběh pasivní síly je vyobrazen na obrázku 30 a její charakter je stejný jako u síly posuvové. Krátce po zasetí nástroje do materiálu se odměřila síla o velikosti 195,31 N a poté se zvětšuje o 30,27 N za jednu sekundu.

Analýzou řezné síly  $F_c$  byla zjištěna její průměrná hodnota a stanovena na velikost  $F_c = 340,175$  N. Je tedy největší ze složek celkové řezné síly. Její průběh je vyobrazen na obrázku 31. Krátce po zasetí nástroje do materiálu obrobku se řezná síla dostala na hodnotu 307,1 N a poté roste o 14,37 N za jednu sekundu. Charakter se rovněž podobá pasivní a posuvové síle.

Celková řezná síla je složena ze síly posuvové, pasivní a řezné, a má průměrnou hodnotu v oblasti vlastního řezu 521,393 N. Krátce po zasetí nástroje do materiálu obrobku se celková řezná síla dostane na hodnotu 430,09 N a poté roste o 39,93 N za sekundu.

Měrná řezná síla je jednou z možností, jak hodnotit obrobitelnost materiálu, zahrnuje vliv řezné síly vztahovaný na průřez třísky. Hodnoty pro získání měrné řezné síly byly rovněž vzaty z časového intervalu 3 až 7,5 sekund, kdy je zatížení maximální. Měrná řezná síla byla stanovena na hodnotu  $k_c = 4534,279$  MPa, kdy při zasetí nástroje do materiálu obrobku vzroste měrná řezná síla na 4097,1 MPa a poté roste o 191,7 MPa za sekundu.

V literatuře firmy Sandvik Coromat se měrná řezná síla pro titanové slitiny udávána v intervalu 1300 až 1400 MPa, získaná měrná řezná síla je tedy 3,5x větší než hodnota udávána v odborné literatuře.

Toto je způsobeno zejména tím, že udávaná měrná řezná síla firmou Sandvik Coromat je pro řezné podmínky  $a_p = 1$  mm a  $f = 0,1$  mm. V našem pokusu máme řezné podmínky nastaveny na  $a_p = 0,5$  mm a  $f = 0,15$  mm, což v konečném důsledku znamená nárůst měrné řezné síly až o 33% oproti tabulkovým hodnotám. Další nárůst řezné síly si lze vysvětlit nepoužitím řezné kapaliny při obrábění.

## ZÁVĚR

Z práce vyplynuly tyto závěry:

- v provedeném experimentu byla zjištěna měrná řezná síla  $k_c = 4534,279$  MPa, která je zhruba 3,5x větší, než hodnoty uvedeny v odborné literatuře,
- jedním z důvodů větší měrné řezné síly, oproti literatuře, jsou zvolené rozdílné řezné podmínky. Při zvolených řezných podmínkách může být zkreslení až 33%, dalším důvodem je nepoužití řezné kapaliny,
- měrná řezná síla se při procesu řezání zvětšuje o 191 MPa za sekundu,
- průměrná hodnota řezné síly je 340,175 N, v průběhu řezání se řezná síla zvětšuje o 14,37 N za sekundu,
- průměrná hodnota celkové řezné síly je 521,393 N, v průběhu řezání se zvětšuje o 39,93 N za sekundu.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. LEYENS, Christoph a Manfred PETERS. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, 513 s. ISBN 35-273-0534-3.
2. *Wikipedie. Otevřená encyklopedie: Titan* [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan\\_\(prvek\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_(prvek))
3. VAVRADA, Ondřej. *Ondřej Vavrda a jeho osobní - neosobní stránka: Titan* [online]. 2010. vyd. [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.fd.cvut.cz/personal/vavrdond/>
4. *Periodické tabulka* [online]. [2012] [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/periodicka-tabulka.html>
5. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
6. PERONČÍK, Martin. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. Brno, 2010. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_veřejne.php?file\\_id=25826](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=25826)  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojírenství. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
7. SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny*. Praha, 1963.
8. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
9. *Museum Reich der Kristalle Mineralogische Staatssammlung München* [online]. [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://mineralogische.staatssammlung.userweb.mwn.de/MSM.html>
10. *Mineralienatlas* [online]. [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?mineral=Ilmenit>
11. NESLUŠAN, M., CZAN, A. *Obrábanie titanových a niklových zliatin*. 1. vyd. Žilina: EDIS, 2001, 195 s. ISBN 80-7100-933-4.
12. *Medin*. [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.medin.cz/upload/katalogy/katalog-traumatologie-dlahy-uhlove-stabilni.pdf>
13. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o.: *Příručka obrábění - kniha pro praktiky*. 1. české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, 1997, 857 s. ISBN 91-97 22 99-4-6. Přel. z: *Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook*.
14. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vysoké učení technické v Brně: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o Brno, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
15. *STROJÍRENSTVÍ - FRÉZOVÁNÍ* [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-frezovani.blogspot.cz/2011/03/2-zpusoby-frezovani-frezovani-rovinnych.html>

16. KARASEK, J. Obrábění titanových slitin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 80 s., příloh 2. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
17. PRAMET: Katalog soustružení 2012 [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.pramet.com/download.php?id=80>
18. FOREJT, Milan. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
19. MM průmyslové spektrum [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

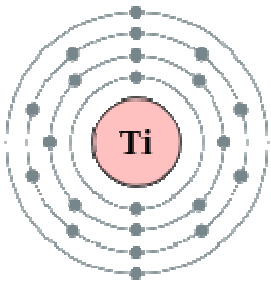
Zkratka	Jednotka	Popis
<b>Al</b>	[-]	Hliník
<b>bcc</b>	[-]	Prostorově středěná mřížka
<b>C</b>	[-]	Uhlík
<b>Ca</b>	[-]	Vápník
<b>Cr</b>	[-]	Chrom
<b>Fe</b>	[-]	Železo
<b>H</b>	[-]	Vodík
<b>HB</b>	[-]	Tvrdost podle Brinella
<b>hcp</b>	[-]	Hexagonální mřížka
<b>K</b>	[-]	Draslík
<b>KNB</b>	[-]	Kubický nitrid bóru
<b>Mg</b>	[-]	Mangan
<b>Mn</b>	[-]	Mangan
<b>Mo</b>	[-]	Molibden
<b>N</b>	[-]	Dusík
<b>Nb</b>	[-]	Niob
<b>O<sub>2</sub></b>	[-]	Kyslík
<b>s.</b>	[-]	Počet stran
<b>s.r.o</b>	[-]	Společnost ručením omezeným
<b>SK</b>	[-]	Slinutý karbid
<b>Sn</b>	[-]	Cín
<b>Ti</b>	[-]	Titan
<b>TiC</b>	[-]	Karbid titanu
<b>TiCl<sub>4</sub></b>	[-]	Chlorid titaničitý
<b>TiO<sub>3</sub></b>	[-]	Oxid titanu
<b>V</b>	[-]	Vanad
<b>WC</b>	[-]	Karbid wolframu
<b>Zr</b>	[-]	Zirkonium

Symbol	Jednotka	Popis
$A_D$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez třísky
$a_p$	[mm]	Hloubka řezu
$D$	[mm]	Průměr
$f$	[mm]	Posuv na otáčku
$F$	[N]	Celková řezná síla
$F_c$	[N]	Řezná síla
$F_f$	[N]	Posuvová síla
$F_p$	[N]	Pasivní síla
$k_c$	[Mpa]	Měrná řezná síla
$K_v$	[-]	Součinitel obrobitelnosti
$n$	[mm <sup>-1</sup> ]	Otáčky
$Q_e$	[J]	Teplo řezného procesu
$Q_n$	[J]	Teplo odvedené nástrojem
$Q_o$	[J]	Teplo odvedené obrobkem
$Q_{pg}$	[J]	Teplo dovedené řezným prostředím
$Q_t$	[J]	Teplo odvedené třískou
$T$	[min]	Trvanlivost
$VB$	[mm]	Opotřebení
$v_c$	[m.min-1]	Řezná rychlost
$v_{cT/VB}$	[m.min-1]	Řezná rychlost při trvanlivosti $T$ po dobu obrábění $VB$

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1      Tabulka souhrnný vlastností titanu.  
Příloha 2      Řezné podmínky pro soustružení titanu.  
Příloha 3      Řezné podmínky pro frézování titanu.  
Příloha 4      Fotodokumentace experimentu.

## PŘÍLOHA 1

Český název	Titan
Mezinárodní název	Titanium
Anglický název	Titanium
Chemická značka	Ti
Atomové schéma titanu	 <p>Atomové schéma titanu<sup>2</sup></p>
Protonové číslo	22
Relativní atomová hmotnost	47,88
Perioda	4
Skupina	IV.B
Zařazení	Přechodné kovy
Rok objevu	1791
Objevitel	William Gregor
Teplota tání [°C]	1668
Teplota varu [°C]	3287
Hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	4,5
Hustota při teplotě tání [g·cm <sup>-3</sup> ]	4,11
Elektronegativita	1,54
Oxidační stavy	II, III, IV
Elektronová konfigurace	[Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>
Tepelná vodivost [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	21,9
Měrný el. odpor [10 <sup>-6</sup> Ω·m]	0,42
1. ionizační potenciál [eV]	6,8282
2. ionizační potenciál [eV]	13,58
3. ionizační potenciál [eV]	27,491
Tvrдость podle Mohse	6,0
Tvrдость podle Vickerse [MPa]	970
Tvrдость podle Brinella [MPa]	716
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	44
Modul pružnosti v tahu [GPa]	116
Bod supravodivosti [K]	0,4
Skupenství za normálních podmínek	pevné





## PŘÍLOHA 4

