



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

POUŽITÍ SLITIN TITANU

APPLICATIONS OF TITANIUM ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN KOŠTÁL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL NĚMEC, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Košťál

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

Použití slitin titanu

v anglickém jazyce:

Applications of titanium alloys

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování přehledu o slitinách titanu v současnosti používaných zejména ve strojírenství a následné vyhodnocení výhod a nevýhod různých slitin pro konkrétní aplikace.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Zpracování přehledu o dané problematice
- 2) Popis slitin titanu používaných ve strojírenství a dalších odvětvích
- 3) Formulace závěru o vhodnosti použití slitin titanu pro konkrétní aplikace

Seznam odborné literatury:

- 1) Leyens, Ch., Peters, M. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, 513 s. ISBN 3-527-30534-3
- 2) Sedláček, V.: Neželezné kovy a slitiny. 1.vyd. Praha: SNTL, 1979. 398 s.
- 3) Sedláček, V.: Únava hliníkových a titanových slitin. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989. 351s.
- 4) Ptáček, L.: Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN80-7204-248-Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Němec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 2.2.2015

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se bude zabývat titanem a titanovými slitinami, jejich vlastnostmi a vhodným použitím ve strojírenství a dalších odvětvích. Úvodní část práce je věnována čistému titanu, popisuje technologie jeho výroby, dále jsou krátce zmíněny fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti a podle nich pozice titanu mezi ostatními prvky. Hlavní část práce je zaměřena na jednotlivé typy titanových slitiny, na jejich vlastnosti výrobu a zpracování. Závěr je věnován využití čistého titanu a jeho slitin v různých odvětvích průmyslu.

ABSTRACT

This bachelor thesis will deal with titanium and titanium alloys, their properties and appropriate application in mechanical engineering and other branches. The first part is devoted to the pure titanium, describes technology of production, there are also briefly mentioned physical, chemical and mechanical properties, and according to them the position of titanium among other elements. The main part is focused on the different types of titanium alloys, their properties, production and processing. The conclusion is devoted to the use of pure titanium and its alloys in different industries.

KLÍČOVÁ SLOVA

titan, titanová slitina, konstrukční materiál

KEY WORDS

titanium, titanium alloy, construction material

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOŠŤÁL, J. *Použití slitin titanu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 41s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „*POUŽITÍ SLITIN TITANU*“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jan Košťál

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za vedení a za cenné rady při tvorbě této bakalářské práce.

Obsah

ÚVOD	10
1 TITAN	11
1.1 Historie	11
1.2 Titan jako chemický prvek.....	11
1.3 Výroba čistého titanu	13
1.3.1 Krollův proces výroby titanu	14
1.3.2 Maddexův-Eastwoodův postup výroby titanu.....	15
1.3.3 Výroba kovového titanu elektrolýzou.....	16
1.3.4 Tavení titanu	16
1.4 Vlastnosti titanu	17
1.4.1 Fyzikální a chemické vlastnosti.	17
1.4.2 Materiálové a mechanické vlastnosti.....	18
1.5 Titan jako konstrukční materiál	19
2 SLITINY TITANU	21
2.1 Vliv přísadových prvků na teplotu fázové přeměny $\alpha \Leftrightarrow \beta$:.....	22
2.2 Slitiny α	22
2.3 Slitiny pseudo α	23
2.4 Slitiny $\alpha + \beta$	24
2.5 Slitiny β a pseudo β	26
2.6 Vlastnosti titanových slitin	27
2.6.1 Fyzikální a chemické vlastnosti	27
2.6.2 Mechanické vlastnosti.....	27
3 ZPRACOVÁNÍ TITANU A SLITIN TITANU	30
3.1 Tváření za studena	30
3.2 Tváření za tepla	30
3.3 Tepelné zpracování	31
3.3.1 Žihání.....	31
3.3.2 Zušlechťování	31
3.3.3 Chemicko- tepelné zpracování.....	31
4 VYUŽITÍ TITANU A SLITIN TITANU V PRŮMYSLU	32

4.1	Titan v letectví a kosmonautice	32
4.1.1	Trup letadla	33
4.1.2	Motory.....	33
4.1.3	Kosmonautika.....	34
4.2	Výroba dalších dopravních prostředků	34
4.2.1	Automobilový průmysl	34
4.2.2	Lodní průmysl.....	35
4.3	Lékařství	35
4.4	Chemický a petrochemický průmysl	36
4.5	Energetický průmysl.....	37
4.6	Sportovní potřeby	37
4.7	Další využití.....	38
5	ZÁVĚR.....	39
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	40

ÚVOD

Titan se řadí mezi prvky, které tvoří největší část periodické tabulky, a tou jsou kovy. Titan zatím není úplně nejpoužívanější kov, jako například železo, se kterým se setkáváme na každém kroku, ať už si potřebujeme ukrojit krajíc chleba nebo cestujeme vlakem, ale to se postupně mění a výrobky z titanu nahrazují výrobky z běžných materiálů. Titan patří mezi neželezné kovy, jako je například hliník, měď, hořčík nebo nikl, které mohou být díky svým jedinečným vlastnostem používány v různých speciálních aplikacích a v dnešní době mají čím dál větší využití ve všech možných odvětvích průmyslu.

Titan a jeho slitiny jsou díky zajímavé kombinaci fyzikálních, chemických a mechanických vlastností vhodný pro použití i v případech, kde běžně užívané konstrukční materiály nevyhovují. Ať už je to z důvodu extrémních okolních podmínek, jako je teplota, agresivní chemické sloučeniny nebo je to jen z důvodu úspory použitého materiálu. Velkou nevýhodou je naopak náročná výroba, která se promítá v jeho ceně.

Jedná se o materiál, který je v dnešní době vyhledávaný. S velkou pravděpodobností se však jedná hlavně o materiál s perspektivním výhledem do budoucnosti, protože na vývoji nových titanových slitin se neustále pracuje a hledají se kombinace vlastností, jaké mezi konstrukčními materiály využívanými v současnosti nemají obdoby.

1 TITAN

1.1 Historie

Titan jako prvek objevil v roce 1791 anglický chemik William Gregor jako součást nerostu ilmenitu. Jméno nově objevenému prvku dal v roce 1795 německý chemik Martin Heinrich Klaproth, který titan objevil, nezávisle na svém předchůdci, jako součást jiné rudy, a to rutilu. Inspiroval se v řecké mytologii a tak vznikl název prvku titan. Čistý titan byl izolován až skoro o 120 let později v roce 1910, kdy jej ve Spojených státech izoloval Novozélandčan Matthew Albert Hunter zahříváním chloridu titaničitého TiCl_4 (Chloridu titaničitého) se sodíkem v ocelové tlakové nádobě. Za otce titanového průmyslu je považován Wilhelm Justin Kroll z Lucemburska, který v roce 1932 vyrobil výraznější množství titanu smíšením TiCl_4 s vápníkem. Na začátku druhé světové války odcestoval do Spojených států amerických, kde začal vyrábět titan ve větším množství, když doposud používaný vápník zaměnil za hořčík. Tato dodnes hojně používaná metoda je známá jako Krollův proces výroby titanu. Po druhé světové válce se slitiny na bázi titanu začaly prosazovat v průmyslu, a to zejména pro výrobu částí leteckých motorů. Dnes je využití titanu a jeho slitin rozšířeno do většiny odvětví průmyslu [1,6,8,16].

1.2 Titan jako chemický prvek

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	VIII	VIII	I B	II B	III A	IV A	V A	VI A	VII A	0	
Vodík 1 H 1,00794(7)																	Helium 2 He 4,0026032(5)	
Lithium 3 Li 6,941(2)	Beryllium 4 Be 9,012182(3)																	
Sodík 11 Na 22,989770(2)	Hořčík 12 Mg 24,305(8)																	
↑ ↑ ↑ název prvku protonové číslo značka prvku relativní atomová hmotnost																		
Drahlík 19 K 39,0983(1)	Vápník 20 Ca 40,078(4)	Skandium 21 Sc 44,955910(8)	Titan 22 Ti 47,867(1)	Vanad 23 V 50,9415(1)	Chrom 24 Cr 51,9961(8)	Mangan 25 Mn 54,938049(5)	Železo 26 Fe 55,845(2)	Kobalt 27 Co 58,933200(5)	Nikl 28 Ni 58,6934(2)	Měď 29 Cu 63,546(3)	Zinek 30 Zn 65,39(2)	Gallium 31 Ga 69,723(1)	Germanium 32 Ge 72,61(2)	Arzen 33 As 74,92160(2)	Selen 34 Se 78,96(3)	Brom 35 Br 79,904(1)	Krypton 36 Kr 83,80(1)	
Rubidium 37 Rb 85,4678(3)	Strontium 38 Sr 87,62(1)	Yttrium 39 Y 88,90586(2)	Zirkonium 40 Zr 91,224(2)	Niob 41 Nb 92,90638(2)	Molybden 42 Mo 95,94(1)	Technetium 43 Tc (98,9063)	Ruthenium 44 Ru 101,07(2)	Rhodium 45 Rh 102,90550(2)	Palladium 46 Pd 106,42(1)	Sťbr 47 Ag 107,8682(2)	Kadmium 48 Cd 112,411(8)	Indium 49 In 114,818(3)	Cín 50 Sn 118,710(7)	Antimon 51 Sb 121,760(1)	Tellur 52 Te 127,60(3)	Jod 53 I 126,90447(3)	Xenon 54 Xe 131,29(2)	
Cesium 55 Cs 132,90545(3)	Baryum 56 Ba 137,327(7)	57-70 Lanthanoidy		Hafnium 72 Hf 178,49(2)	Tantal 73 Ta 180,9479(1)	Wolfram 74 W 183,84(1)	Rhenium 75 Re 186,207(1)	Osmium 76 Os 190,23(3)	Iridium 77 Ir 192,217(3)	Platina 78 Pt 195,078(2)	Zlato 79 Au 196,966569(2)	Říť 80 Hg 200,59(2)	Thallium 81 Tl 204,3833(2)	Olovo 82 Pb 208,98038(2)	Bismut 83 Bi 208,98038(2)	Polonium 84 Po (209,9824)	Astat 85 At (208,987)	Radon 86 Rn (222,0176)
Francium 87 Fr (223,0197)	Rádium 88 Ra (226,0254)	89-102 Aktinoidy		Rutherfordium 104 Rf (261,10)	Dubnium 105 Db (262,1144)	Seaborgium 106 Sg (263,1168)	Bohrium 107 Bh (264,12)	Hassium 108 Hs (265,1308)	Ménerium 109 Mt (268)	Ununnilium 110 Uu (272)	Ununium 111 Uu (272)	Unbibium 112 Uu (277)						
↑ ↑ ↑ název prvku protonové číslo značka prvku relativní atomová hmotnost																		

nekovy

alkalické kovy

alkalické zemní kovy

vzácné plyny

halogeny

metalloidy

přechodné kovy

jiné kovy

vzácné zemní prvky

Bor 5 B 10,811(7)	Uhlík 6 C 12,0107(8)	Dusík 7 N 14,00643(7)	Kyslík 8 O 15,9994(2)	Fluor 9 F 18,9984032(5)	Neon 10 Ne 20,1797(2)
Hlábik 13 Al 26,9815386(2)	Křemík 14 Si 28,0855(3)	Fosfor 15 P 30,973761(2)	Síra 16 S 32,06(6)	Chlor 17 Cl 35,4527(7)	Argon 18 Ar 36,963(1)
Gallium 31 Ga 69,723(1)	Germanium 32 Ge 72,61(2)	Arzen 33 As 74,92160(2)	Selen 34 Se 78,96(3)	Brom 35 Br 79,904(1)	Krypton 36 Kr 83,80(1)
Indium 49 In 114,818(3)	Cín 50 Sn 118,710(7)	Antimon 51 Sb 121,760(1)	Tellur 52 Te 127,60(3)	Jod 53 I 126,90447(3)	Xenon 54 Xe 131,29(2)
Thallium 81 Tl 204,3833(2)	Olovo 82 Pb 208,98038(2)	Bismut 83 Bi 208,98038(2)	Polonium 84 Po (209,9824)	Astat 85 At (208,987)	Radon 86 Rn (222,0176)

Lanthanoidy:

Lanthan 57 La 138,9054(7)	Cer 58 Ce 140,116(1)	Praseodym 59 Pr 140,90766(2)	Neodym 60 Nd 144,242(1)	Prometium 61 Pm (144,9127)	Samarium 62 Sm 150,36(3)	Europium 63 Eu 151,964(1)	Gadolinium 64 Gd 157,25(2)	Terbium 65 Tb 158,92534(2)	Dysprosium 66 Dy 162,50(1)	Holetium 67 Ho 164,93032(2)	Erbium 68 Er 167,26(3)	Thulium 69 Tm 168,93421(2)	Ytterbium 70 Yb 173,04(3)	Lutecium 71 Lu 174,967(1)
------------------------------------	-------------------------------	---------------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------

Aktinoidy:

Aktinium 89 Ac 227,0277	Thorium 90 Th 232,0381(1)	Protaktinium 91 Pa 231,03688(2)	Uran 92 U 238,02891(3)	Neptunium 93 Np 237,04817	Plutonium 94 Pu 244,06423	Amerikium 95 Am 243,06145	Kurium 96 Cm 247,07039	Berkelium 97 Bk 247,07039	Kalifornium 98 Cf 251,07958	Einsteinium 99 Es 252,0833	Fermium 100 Fm 257,0951	Mendelevium 101 Md 258,10374	Nobelium 102 No 259,10111	Lavrentium 103 Lr 262,1011
----------------------------------	------------------------------------	--	---------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------

nekovy

alkalické kovy

alkalické zemní kovy

vzácné plyny

halogeny

metalloidy

přechodné kovy

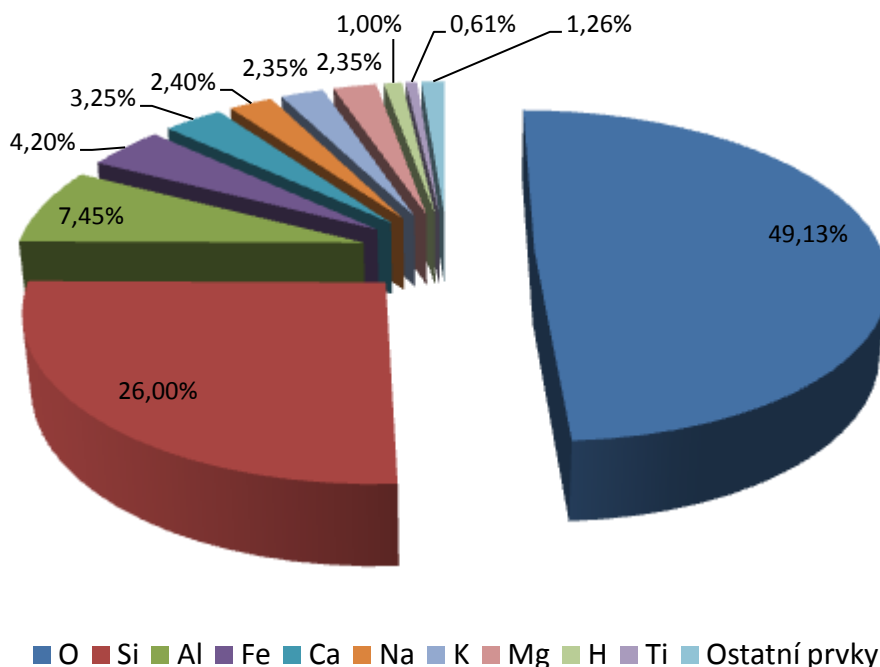
jiné kovy

vzácné zemní prvky

Obr. č. 1: Titan v periodické tabulce prvků [10]

Titan je chemický prvek se značkou Ti, který má protonové číslo 22 a v periodické tabulce patří do skupiny přechodných kovů. V přírodě se vyskytuje v pěti izotopech. Jedná se o lehký kov šedé až stříbrně bílé barvy, je kujný, tažný a odolný vůči korozi. Titan není zase až tak vzácným prvkem jak

by se mohlo na první pohled zdát, jeho průměrné zastoupení v zemské kůře je 0,61% a tak je titan řazen nejčastěji jako 10. nejrozšířenější prvek a je 4. nejrozšířenějším konstrukčním kovem v zemské kůře, z konstrukčních kovů má větší zastoupení jen hliník, železo a hořčík.



Obr. č. 2: Zastoupení kovů v zemské kůře [19]

Nevýhodou titanu je to, že se jen zřídka kdy najde ve vysokých koncentracích a bohužel jako čistý kov se titan v přírodě nevyskytuje vůbec. V malé koncentraci je titan obsažen v mořské vodě, částečně je zastoupen ve většině minerálů a nerostů, zatím bylo popsáno více než 400 nerostů, které obsahovaly titan, ale nejdůležitější je jeho výskyt v rudách: ilmenitu (FeTiO_3 – oxidu železnatotitaničitého), známého též jako „černý písek“ a rutilu (TiO_2 – oxidu titaničitého), ze kterých se vyrábí čistý titan.



Obr. č. 3: Ilmenit [12]



Obr. č. 4: Rutil [13]

Celosvětové zásoby těchto dvou rud titanu jsou přibližně 770 Mt, z toho ilmenitu je přibližně 720 Mt a zbytek rutilu. Největší zásoby titanových rud na světě má Čína. Z dalších zemí, které mají nezanedbatelné zásoby těchto rud, jsou to Austrálie, Kanada, Jihoafrická republika, Indie. Z evropských zemí je to hlavně Ukrajina a také Norsko. Největšími producenty titanových rud jsou v současné době Jihoafrická republika, Austrálie, Čína, Indie a Kanada. Velké množství obsahuje například povrch měsíce, kde je obsah oxidu titanu větší než 10%, měsíc by se tak v budoucnu mohl stát velmi významným zdrojem titanových rud. V České republice není žádné ložisko titanových rud, veškerý titan je k nám dovážen ze zahraničí [6].

Ilmenit				Ilmenit			
	Vytěženo v 1000 tun		Rezervy		Vytěženo v 1000 tun		Rezervy
Země	2013	2014	2015	Země	2013	2014	2015
JAR	1190	1100	63000	Austrálie	423	480	28000
Čína	1020	1000	200000	Indie	24	26	7400
Austrálie	960	1100	170000	Madagaskar	8	7	-
Kanada	770	900	31000	Malajsie	14	14	-
Vietnam	720	500	1600	Sierra Leone	81	120	-
Norsko	498	400	37000	JAR	59	65	8300
Mosambik	430	500	14000	Ukrajina	50	50	2500
Indie	340	340	85000	Ostatní země	8	8	400
Madagaskar	264	340	40000	Celkem	667	770	46600
USA	200	100	2000				
Ukrajina	150	210	5900				
Brazílie	100	70	43000				
Ostatní země	92	122	26000				
Celkem	6734	6682	718500				

Tab. č. 1 Světové zásoby titanových rud [11]

1.3 Výroba čistého titanu

Chemicky čistý titan se v přírodě nevyskytuje, nebo se vyskytuje jen velmi vzácně, proto je nutná jeho průmyslová výroba z titanových rud. Tím se z titanu stává poměrně drahý materiál, protože jeho výroba je nesmírně náročná. Titan se stává velmi reaktivním při vysokých teplotách (nad 700°C), kdy reaguje s plyny a s žáruvzdornými materiály. To vede k nutnosti výroby v ochranné atmosféře argonu.

Výrobní postupy

Krollův proces výroby titanu

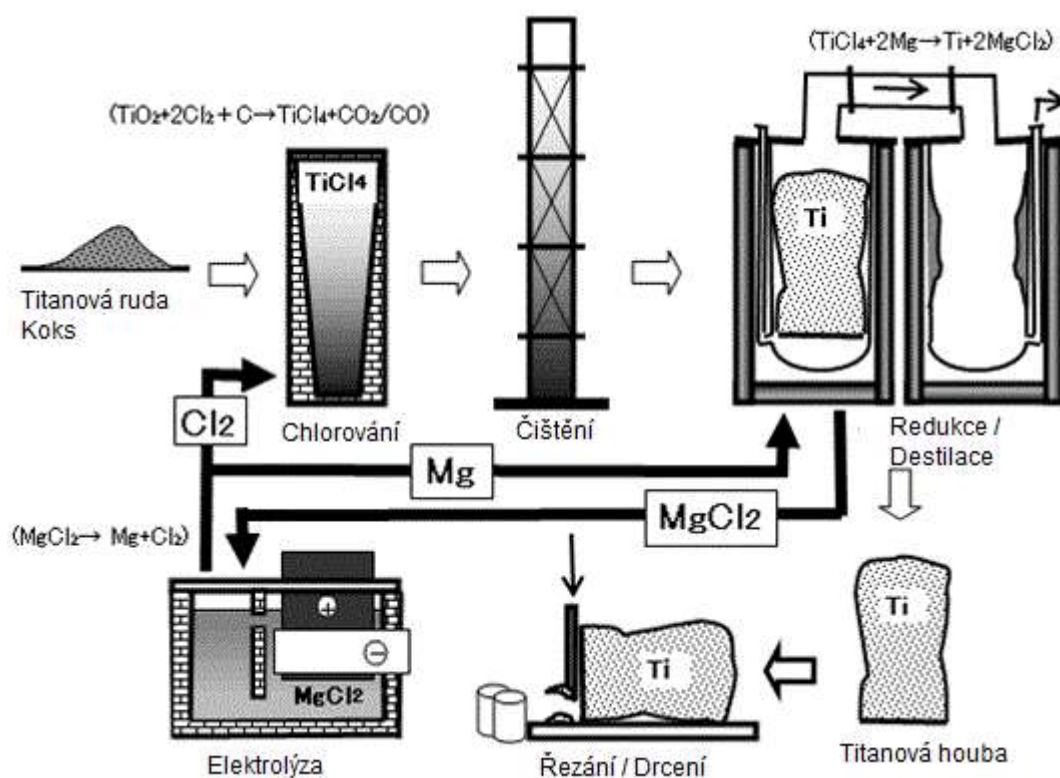
Maddexův-Eastwoodův postup

Výroba kovového titanu elektrolýzou

1.3.1 Krollův proces výroby titanu

Výroba titanu Krollovým procesem je složitý a velmi energeticky náročný proces, při němž se TiCl_4 chlorid titaničitý redukuje roztaveným sodíkem nebo hořčíkem.

TiCl_4 , který potřebujeme k výrobě Krollovým procesem, získáváme dvěma způsoby, a to podle toho, který typ titanové rudy máme k dispozici.

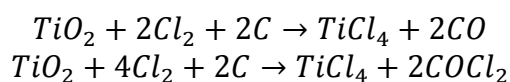


Obr. č. 5: Výroba titanu [14]

Výroba TiCl_4

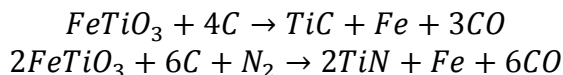
Jako výchozí surovina je používán TiO_2 rutil (jednodušší) : Obsah titanu v rutilu je okolo 60%

Smícháme rutil s uhlím v poměru 3:1, směs musíme briketovat a poté kalcinovat v redukční atmosféře při teplotě 700°C . Chlorace poté probíhá ve vytápěné šachtové peci při teplotách $800-1200^\circ\text{C}$. Výsledkem jsou páry chloridu titaničitého, které následně kondenzují na nažloutlou kapalinu, ta se musí před samotnou výrobou titanu Krollovým procesem chemicky vyčistit a destilovat.

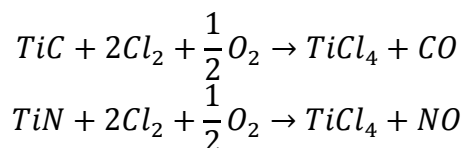


Jako výchozí surovinu používáme FeTiO_3 ilmenit (složitější) : Obsah titanu v rutilu je okolo 31%.

Nejdříve je nutné provést v elektrické obloukové peci selektivní redukci na surové železo, titan pak přechází do snadno chlorovatelného karbidu nebo je li při redukci přiváděn vzduch do snadno chlorovatelného nitridu.

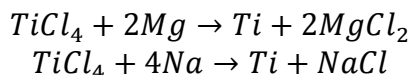


Poté může proběhnout samotná chlorace vzniklých karbidů a nitridů.



Krollův proces

Když máme připravený TiCl_4 , může začít samotný Krollův proces výroby titanu. Probíhá za teplot 850-900°C v ochranné atmosféře argonu nebo hélia, v ocelových nádobách.



Výsledkem tohoto procesu je titan, který se ve formě titanové houby uchycuje na stěnách kelímku. Čištění se provádí pomocí promývání kyselinou chlorovodíkovou nebo pomocí vakuové destilace, čímž se odstraňuje jak hořčík, který nereagoval tak chlorid hořečnatý který je vedlejším produktem Krollova procesu.

Při redukci sodíkem existují dvě velké výhody. Jednou je to, že neprobíhá za tak vysokých teplot, tudíž lze titanovou houbu snáze odebrat z kelímku a druhou je výsledná větší čistota titanové houby. Nevýhodou je nutná příprava sodíku vakuovou destilací.

Během jednoho procesu lze vyrobit přibližně 200-1000 kg titanové houby. Nevýhodou Krollova procesu je to že neprobíhá kontinuálně, titanová houba se musí chladit v argonové atmosféře, než ji lze z kelímku odebrat. Redukce trvá asi 12-18 hodin, plus musíme započítat čas, který je potřebný k čištění titanové houby a to může být až 48 hodin [6,8]

1.3.2 Maddexův-Eastwoodův postup výroby titanu

Je modifikací zmíněného Krollova procesu. Na rozdíl od něj se redukuje plynný chlorid titaničitý kapalným hořčíkem při zvýšeném tlaku. Výsledkem reakce je titanová suspenze v tavenině chloridu hořečnatého, která průběžně odtéká do pece, kde se odpařuje nezreagovaný hořčík i chlorid hořečnatý [6]

1.3.3 Výroba kovového titanu elektrolýzou

Výroba titanu redukcí je složitý a drahý proces výroby. Proto byla snaha vymyslet jiné způsoby. Začala se zkoumat možnost využití elektrolýzy. Ale problémem byl roztok, titan díky jeho vlastnostem vyloučil využití vodních roztoků, proto se musely zkoušet různé solné lázně, se kterými to také nebylo jednoduché. Titanové soli jsou špatnými vodiči. Nakonec se začaly používat fosfátové a boritanové lázně. Do elektrolytu se přidává chlorid titaničitý. Problémem zde je odstranění oxidu titaničitého, který zůstává ve vzniklých malých částicích titanu. Zabránit jeho tvorbě se dá používáním bezkyslíkatých solí.

Elektrolýzou se dá vyrobit titan vysoké kvality, avšak tento postup není zdaleka tak dobře propracovaný jako redukční metoda [6,7,8,9]



Obr. č 6, 7: Titanová houba [15,17]

1.3.4 Tavení titanu

Ať už je titan ve formě titanové houby získaný redukční metodou nebo jako kovový titan získaný při elektrolýze, není vhodný pro využití. Nejdříve je třeba takovýto titan přetavit buď na ingoty, nebo rovnou na nějaké odlitky. Jelikož má titan vysokou teplotu tavení a je vysoce reaktivní při vysokých teplotách je potřeba ho tavit v ochranné atmosféře a ve vhodné peci, která je vyrobena z vhodného materiálu. Nejčastěji se využívá argonová ochranná atmosféra a elektrická oblouková pec při přetavování do měděných, vodou chlazených kokil a indukční pec s grafitovým kelímkem při recyklaci nebo výrobě odlitků [7]



Obr. č. 8: Titanové ingoty [18]

1.4 Vlastnosti titanu

1.4.1 Fyzikální a chemické vlastnosti.

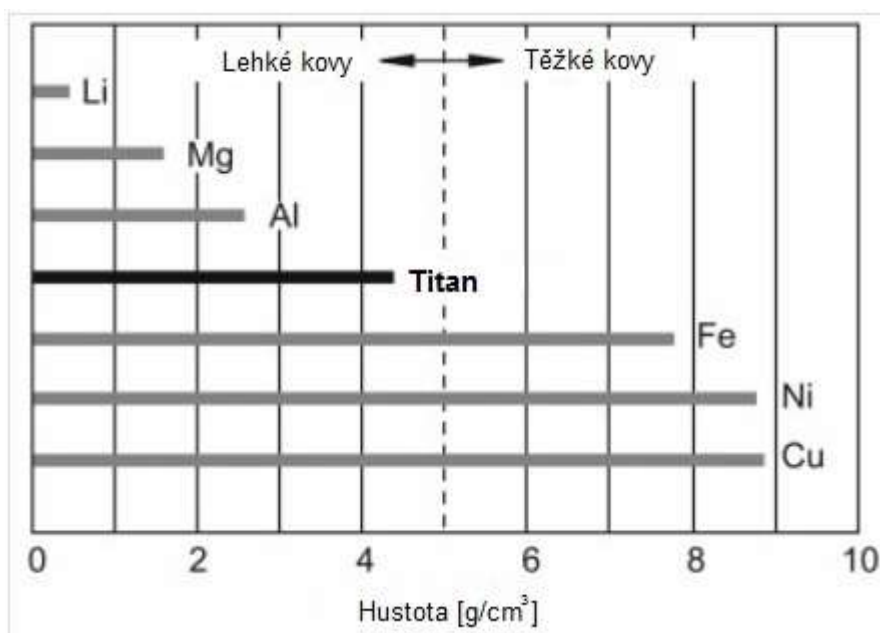
Protonové číslo	22
Oxidační stavy	I, II, III, IV
Atomová hmotnost	47,88
Elektronová konfigurace	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$, [Ar]3d ² 4s ²

Tab. č. 2: Vlastnosti atomu titanu [6,16]

Titan je pevný kov šedé až stříbřité barvy, který má poměrně nízkou měrnou hmotnost, její hodnota leží někde v polovině mezi měrnou hmotností lehkého hliníku a těžkého železa. Titan je paramagnetický kov, to znamená, že je magnetický jen za přítomnosti vnějšího magnetického pole. Za extrémně nízkých teplot 0,4 K se titan stává supravodivým materiálem.

Hustota	4506 [kg m ⁻³]
Hustota při tavení	4110 [kg m ⁻³]
Teplota tání	1668 [°C], 1941 [K]
Teplota varu	3287 [°C], 3560 [K]
Teplota alotropické přeměny	882 [°C], 1155 [K]

Tab. č. 3: Fyzikální vlastnosti titanu [6,16]



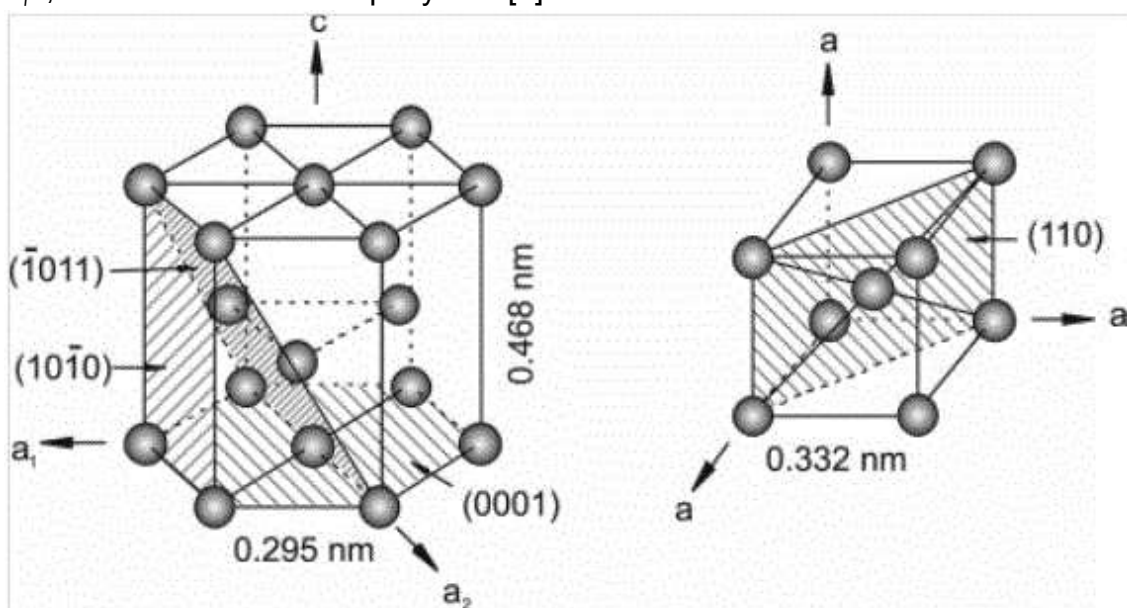
Obr. č. 9: Pozice titanu mezi kovy podle měrné hmotnosti [1]

Za běžných podmínek se na povrchu titanu utváří vrstva oxidů, což způsobuje jeho chemickou stálost. Má vynikající odolnost vůči korozi ve většině přirozených prostředí. Reaktivním se stává až při zvyšování teploty, například při 150°C začíná reagovat s fluorem, při 300°C reaguje s chlorem,

s ostatními nekovy reaguje až při mnohem vyšších teplotách. Je odolný vůči většině kyselin a hydroxidů. Rozpouští se jen v ohřáté kyselině fluorovodíkové a kyselině chlorovodíkové [6]

1.4.2 Materiálové a mechanické vlastnosti

Titan je podobně jako železo polymorfní kov, což znamená, že v tuhém stavu má dva typy krystalových mřížek. Do teploty 882°C (1155K) má hexagonální mřížku (HCP), která je fází α a nad teplotou alotropické přeměny se mřížka mění na prostorově středěnou kubickou mřížku (BCC), která je fází β , kterou si drží až do teploty tání [9]



Obr. č. 10: Krystalické mřížky titanu [1]

Pevnost a tažnost

Čistý titan by díky jeho pevnosti měl patřit do skupiny kovů se střední pevností, ale vlastnosti titanu hodně závisí na jeho čistotě a to zejména na obsahu nekovových prvků jako je uhlíku, dusíku, kyslíku, ale také na obsahu železa. Velmi čistý titan má pevnost v tahu až 250 MPa, přidáváním příměsí lze dosáhnout u pevnosti v tahu hodnot 550-600 MPa. Hodnoty meze pevnosti a meze kluzu jsou srovnatelné s hodnotami středně legovaných konstrukčních ocelí.

S pevností je spojena i tažnost materiálu, která naopak s přidáváním příměsí klesá. Tažnost titanu je vyšší než u ocelí se stejnou pevností [9]

Tvrдость

Titan je poměrně tvrdý materiál, jeho tvrdost však také závisí na jeho čistotě. Tvrdost při zkoušce podle Brinela, která je u měření tvrdosti titanu nepřesnější, bývá většinou v rozmezí 130 a 240 HB.

Pružnost

Pružnost je nedostatkem titanu, jeho Youngův modul pružnosti se pohybuje kolem 106-115 GPa, modul pružnosti ve smyku bývá kolem 40 GPa. Což je rozhodně méně oproti ocelím [9]

Lomová houževnatost

Nezávisí na ostatních vlastnostech, které jsou závislé na obsahu uhlíku, dusíku a kyslíku. Pro lomovou houževnatost je důležitý obsah vodíku [9]

Únavová pevnost

Titan je poměrně odolný vůči cyklickému zatěžování, jeho mez únavy bývá při stejném složení větší než 50% meze pevnosti v tahu. Tato hodnota závisí na tvaru tělesa a typu povrchu, nejvyšší bývá u leštěného povrchu. V případě přítomnosti vrubu na povrchu materiálu tato hodnota klesá až o 25%. Zvýšení meze únavy lze dosáhnout chlazením. Mez únavy u titanu se nezmenší ani v korozním prostředí [9]

Creep (Tečení)

V tečení je nevýhoda titanu, protože nastává již při dlouhodobém zatížení odpovídajícímu 60% meze kluzu. Tečení lze snížit přidáváním kyslíku a dusíku.

1.5 Titan jako konstrukční materiál

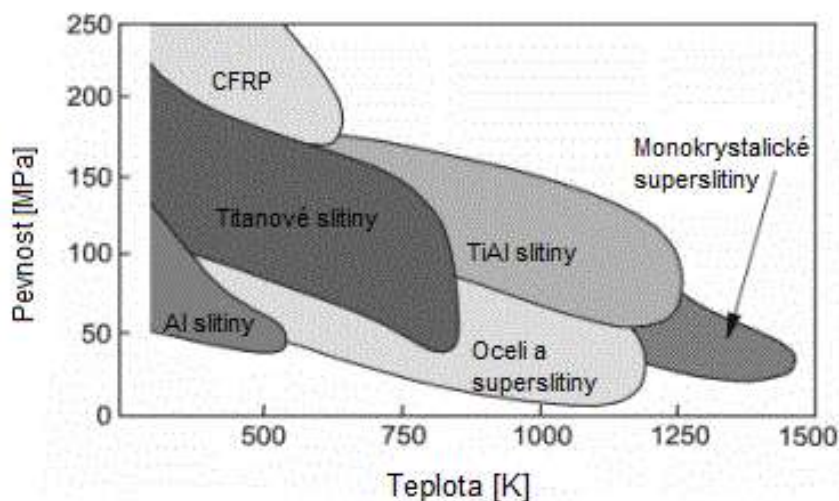


Obr. č. 11: Mikrostruktura technicky čistého titanu Ti99,5 [20]

Titan technické čistoty se jako konstrukční materiál využívá zejména v chemickém, papírenském a textilním průmyslu. Jeho použití je voleno hlavně tam kde se pracuje s chlórem a jeho sloučeninami, v podnicích kde se vyrábí kyselina dusičná, hnojiva, sody a ve výrobnách umělých hmot. Díky jeho odolnosti vůči mořské vodě se využívá při stavbě lodí. Titan je zdravotně nezávadný, a proto je vhodným materiálem pro využití v lékařství, farmaceutickém a potravinářském průmyslu. Díky jeho dalším vlastnostem jako je svařitelnost a tvářitelnost, lze použít titan na výrobu různých čerpadel tlakových nádob měřících a regulačních přístrojů. Pevnost ve spojení s nízkou měrnou hmotností dělá z titanu žádaný materiál hlavně v leteckém průmyslu, v raketové technice, ale i v jiných odvětvích průmyslu [4].

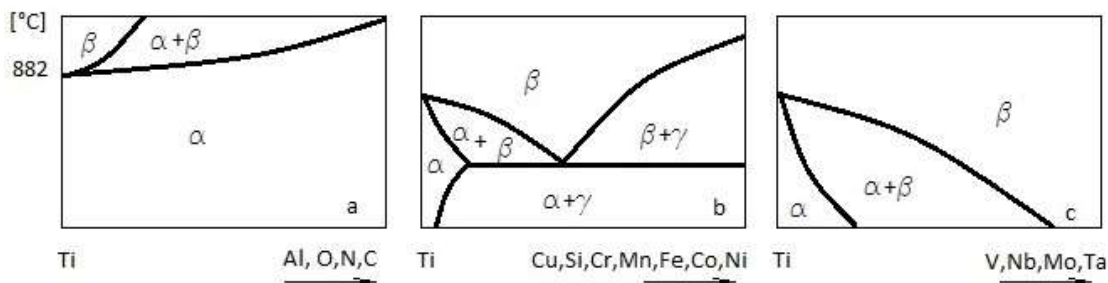
2 SLITINY TITANU

Další využití mají slitiny titanu, které díky různým přísadám získávají ještě lepší vlastnosti než samotný technicky čistý titan. Dnes je známo něco kolem 100 druhů slitin, z nichž má komerční využití jen něco kolem 20 až 30.



Obr. č. 12: Porovnání s ostatními kovy – Závislost pevnosti na teplotě (CFRP – polymer vyztužený vlákny uhlíku) [1]

Titanové slitiny stejně jako čistý titan existují v tuhém stavu ve dvou alotropických modifikacích. Přidávané legující prvky se mohou v obou modifikacích titanu rozpouštět buďto částečně nebo úplně, čímž vytváří tuhé roztoky. Do teploty 882,5°C se jedná o tuhé roztoky α , nad touto teplotou jsou to tuhé roztoky β . Titan může slučováním s některými prvky vytvářet intermetalické sloučeniny. Pro popis rovnovážných stavů soustav Ti+přísada se používají rovnovážné diagramy a to hlavně spodní část diagramů, která ukazuje fázové přeměny v tuhém stavu [2,4].



Obr. č. 13: Vliv přísadových prvků na teplotu fázové přeměny $\alpha \rightleftharpoons \beta$ [4]

2.1 Vliv přísadových prvků na teplotu fázové přeměny $\alpha \rightleftharpoons \beta$:

- α stabilizátory (O, C, N, Al) – zvyšují teplotu fázové přeměny a tím stabilizují tuhý roztok α . V případě nekovů O, C, N je třeba dávat pozor a jejich koncentraci hlídat a držet na minimu, protože zvyšují tvrdost a křehkost výsledných slitin. Z tohoto důvodu má význam používat jen hliník, který je součástí skoro všech slitin titanu.
- β stabilizátory (Nb, Ta, Mo, V, Cu, Fe, Cr, Ni, Mn, Co, Si) – snižují teplotu fázové přeměny a tím stabilizují tuhý roztok β . Pokud je koncentrace takovýchto prvků dostatečně velká může (v případě použití přísad Nb, Ta, Mo, V) tuhý roztok β zůstat i při normální teplotě jako stabilní fáze. Nebo se při normální teplotě rozpadne eutektickou přeměnou (při použití přísad Cu, Fe, Cr, Ni, Mn, Co, Si)
- neutrální prvky (Zr, Sn) – nemají vliv na teplotu fázové přeměny

Slitiny titanu se dělí:

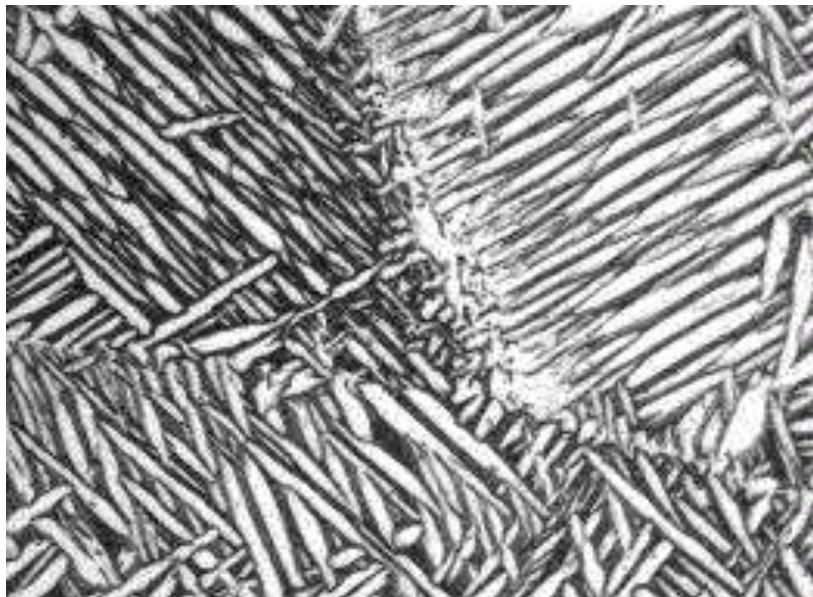
- Podle konečné struktury, která vznikne při pomalém ochlazování z žíhací teploty:
 - Slitiny α
 - Slitiny β
 - Slitiny pseudo α (malé množství fáze β)
 - Slitiny pseudo β (malé množství fáze α)
 - Slitiny $\alpha+\beta$
- Podle použití slitiny titanu:
 - Slitiny pro tváření
 - Slitiny pro odlitky [4]

2.2 Slitiny α

U tohoto typu titanových slitin je hlavním legujícím prvkem hliník Al, který stabilizuje fázi α . Ostatní prvky α stabilizátory (O, C, N) negativně ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti a z toho důvodu jsou považovány za nežádoucí. Tuhý roztok titanu s hliníkem, se utváří až do 26 hm. %. V praxi se množství hliníku omezuje do 7 hm. %, protože slitiny se po překročení této hodnoty stávají křehkými při vyšších teplotách a jsou obtížně tvářitelné za studena i za tepla. Slitiny titanu s hliníkem dosahují velmi dobrých mechanických vlastností a to až do teploty 600 °C. Vedle hliníku bývají dalšími přísadami cín Sn a zirkon Zr, které působí neutrálně a neovlivňují teplotu transformace ani rozpustnost hliníku a to i při větším obsahu těchto přísad a v malém množství také Ni a Ta.

Mezi nejvýznamnější slitiny tohoto typu patří Ti-5Al-2,5Sn, která obsahuje 5% hliníku a 2,5% cínu, tímto složením se je dosaženo ideálního poměru mezi tvářitelností za tepla a mechanickými vlastnostmi. Další významnou slitinou je

Ti-2,75Al-13Sn s obsahem 2,75% hliníku a 13% cínu, která dosahuje vysokých hodnot u meze tečení. Třetí a poslední významná slitina typu α je Ti-8Al-8Zr s obsahem 8% hliníku a 8% zirkonia. Právě přidáním zirkonia je možno zvýšit obsah hliníku na 8% což umožňuje výrobu slitin, které se vyznačují vysokou pevností za tepla.



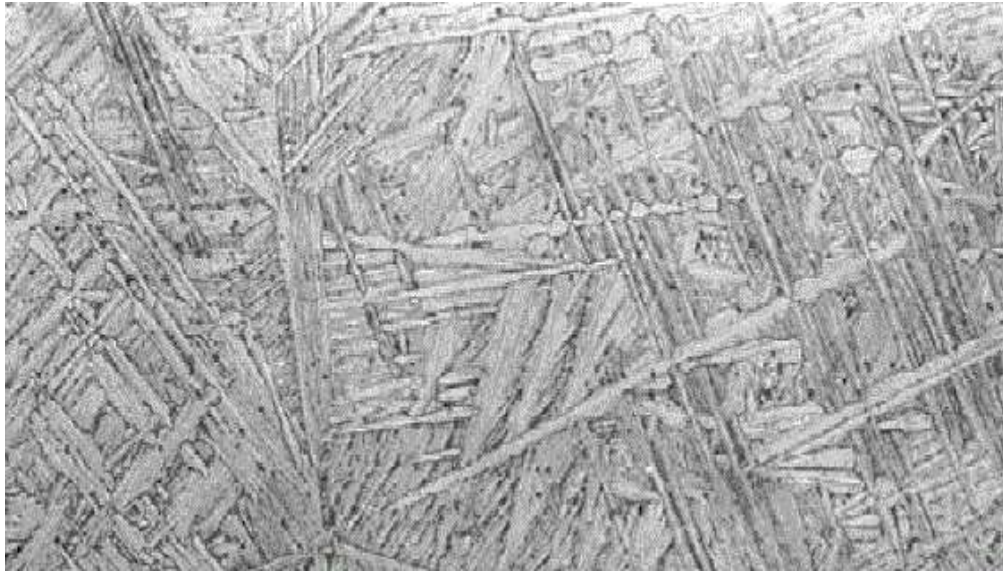
Obr. č. 14: Příklad slitiny typu α [22]

Množství kombinací tohoto typu slitin je velice omezené množstvím prvků stabilizujících fázi α , na druhou stranu se jedná o jedny z nejvýznamnějších titanových slitin.

Slitiny α mají vysokou tepelnou stabilitu, dobrou pevnost v tahu (240 až 740 MPa) a také vysokou odolnost vůči křehkému porušování a to i za nízkých teplot. Jsou žárovečné do 300°C. Nejlepší kombinace vlastností se uvádí u slitin s 5 hm. % hliníku a 2 až 3 hm. % cínu [4,5]

2.3 Slitiny pseudo α

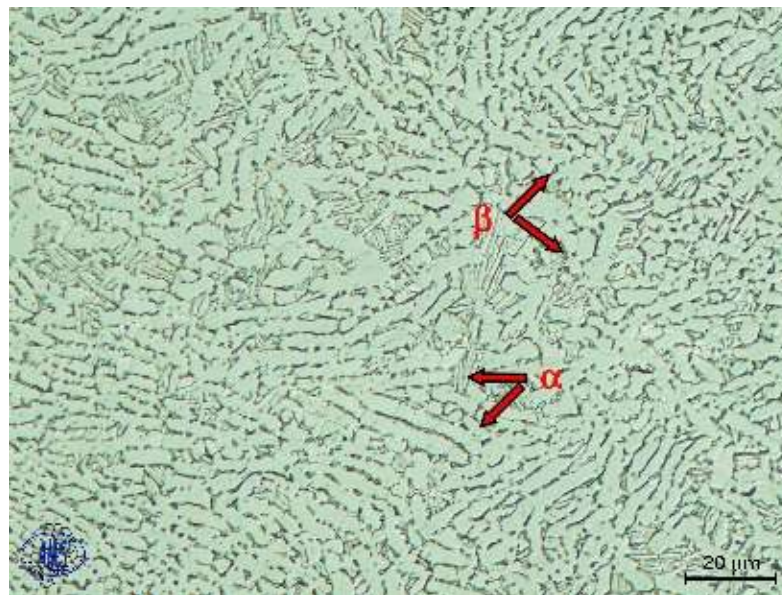
Jsou takové slitiny, u kterých se do slitin α založených na bázi Ti-Sn, přidávají prvky, které stabilizují fázi β . Obsah přidané fáze β se pohybuje od 2 do 6 hm. %. Takovéto slitiny mají až o 20 % vyšší pevnost než samotné slitiny α , zpevnění je způsobeno jak přidáním fáze β , tak dalším přidáním neutrálních prvků Sn a Zr. Jsou vhodné pro použití za vysokých teplot (až do 550°C). Například slitiny Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-8Al-11Zr-1Nb-Mo-Si nebo Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,25Si. Další změnou vlastností v důsledku přidání fáze β je lepší tvářitelnost za normálních teplot [1,4].



Obr. č. 15: Příklad slitiny typu pseudo α Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,25Si [21]

2.4 Slitiny $\alpha+\beta$

Jedná se o nejpoužívanější typ z titanových slitin, struktura složená ze dvou fází vzniká velice jednoduše a tím pádem existuje velké množství slitin tohoto typu (tvoří až 50 % současných titanových slitin), které mají širokou škálu struktur a tím pádem i velké množství vlastností, odvíjejících se od charakteru rovnovážného diagramu, podmínek výroby, množství legujících prvků a podmínek tepelného zpracování.



Obr. č. 16: Mikrostruktura slitiny Ti-6Al-4V [20]

Důležitou roli hraje také to, má-li β -stabilizátor malou nebo velkou rozpustnost ve fázi β . Některé prvky jako tantal, molybden, niob, vanad vytvářejí velký rozsah fází $\alpha+\beta$ bez intermediárních sloučenin, protože mají neomezenou rozpustnost ve fázi β a jen malou rozpustnost ve fázi α . Ostatní β -stabilizátory mají malou rozpustnost jak ve fázi α tak i ve fázi β , a tak vzniknou intermetalické sloučeniny, při určitém obsahu legujícího prvku a určité teplotě potom dochází k eutektoidnímu rozpadu fáze β na sloučeninu přídatného prvku s titanem a tuhý roztok α . Abychom získali alespoň část fáze β v nerovnovážném stavu i za normální teploty, musíme slitinu prudce zakalit z oblasti β . Eutektoidní rozpad ovlivňuje eutektoidní teplota a eutektoidní obsah u daného legujícího prvku, čím vyšší je teplota a čím nižší je obsah tím snáze může rozpad proběhnout.



Obr. č. 17: Mikrostruktura slitiny Ti-7Al-4Mo [20]

Protože dvoufázových slitin je velké množství, můžeme je pro přehlednění rozdělit na silně a slabě β -stabilizované. Ty, které neobsahují žádný hliník, jsou silně β -stabilizované, např. Ti-8Mn nebo Ti-2Cr-2Fe-2Mo.

Tyto slitiny jsou ale citlivé na tepelné zpracování a mají nízkou pevnost za tepla. A z toho důvodu se postupně začaly nahrazovat jinými a lepšími slitinami, ve kterých už se mezi legujícími prvky objevuje i hliník. Naopak ty slitiny, které mají vysoký obsah hliníku, jsou slabě β -stabilizované. Nejprve se využívaly slitiny na stejné bázi jako silně β -stabilizované jen s přidáním hliníkem, např. Ti-3Al-5Cr nebo Ti-5Al-2,75Cr-1,25Fe, ale později se začaly vyrábět složitější slitiny na bázi přísad s neomezenou rozpustností ve fázi β (molybden vanad). A tak vznikly slitiny jako Ti-6Al-4V, Ti-2,5Al-16V, Ti-7Al-4Mo a další, které mají velice dobré vlastnosti a proto jsou hodně používány.

α – stabilizátory jako jsou kyslík, uhlík a dusík ve dvoufázových slitinách zhoršují mechanické vlastnosti, strukturu a mají špatný vliv na zpracování. A

proto jsou považovány za nečistoty a jejich obsah se hlídá, například uhlíku by nemělo být více jak 0,2 %, protože nad touto hranicí se začíná tvořit karbid titanu. Dalším nežádoucím prvkem je vodík, patří sice mezi β – stabilizátory, ale má velmi omezenou rozpustnost ve fázi β a tvoří už při malém obsahu hydrid titanu a způsobuje křehkost. Rozpustnost vodíku lze zvýšit přidáváním hliníku a tím snížit citlivost slitiny na obsah vodíku.

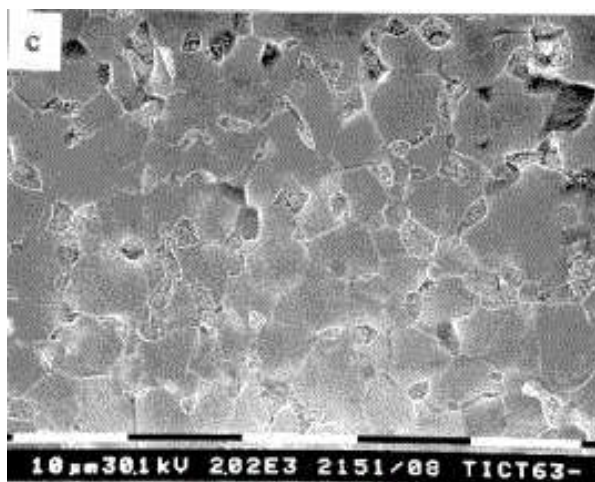
Dvoufázové slitiny mají velkou pevnost při normální teplotě, při vyšších teplotách nad 400°C tato pevnost klesá. Některé slitiny mají dobrou tvářitelnost za studena. Silně stabilizované slitiny mají však omezenou svařitelnost a malou tepelnou stabilitu.[1,4,5]

2.5 Slitiny β a pseudo β

Slitiny, u kterých je titan legován β stabilizátory. K dosažení β struktury i při normální teplotě je třeba výrazně snížit teplotu fázové přeměny $\alpha \rightarrow \beta$, toho lze dosáhnout přidáním velkého množství legujících prvků (30 hm. %) nebo jejich výhodnou kombinací. Slitiny tohoto typu se vyznačují velmi dobrou odolností vůči korozi, dále je to dobrá tvářitelnost za normálních teplot, která je způsobena typem krystalické mřížky (BCC). Dále pak také vysoká pevnost až do teplot kolem 500°C, dají se docela dobře svařovat a není potřeba je dlouhodobě vytvrzovat. Pevnost se po vytvrzení pohybuje až na 1400 MPa.

Nevýhodou těchto slitin je vyšší měrná hmotnost, která je způsobena přísadami, což jsou hlavně kovy s vysokou měrnou hmotností a vysokou teplotou tání, tato nevýhoda se následně promítá také na vysoké ceně způsobené jejich nákladnější výrobou. Další významnou nevýhodou je citlivost na nečistoty, které ovlivňují stabilitu fáze β , hlavně jsou to uhlík a kyslík. První takovou slitinou, vyráběnou ve výraznějším množství byla Ti-3Al-11Cr-13V, další slitina tohoto typu je Ti-11Mo-6Zr-5Sn [4,5].

Slitiny typu pseudo β vzniknou tak, že se do slitin typu β přidávají prvky stabilizující fázi α , například slitina Ti-8V-8Mo-2Fe-3Al nebo Ti-10V-2Fe-3Al. Vlastnosti jsou podobné jako u slitin β [4,5].



Obr. č. 18: Příklad slitiny typu β Ti-10V-2Fe-3Al

2.6 Vlastnosti titanových slitin

2.6.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Fyzikální vlastnosti slitin titanu jsou vesměs podobné vlastnostem čistého titanu. Pro porovnání např. měrná hmotnost se většinou pohybuje v rozmezí od -3% do 6% měrné hmotnosti čistého titanu. To že odchylka je jen takto malá je zřejmé, protože slitiny titanu obsahují jen malé množství legujících prvků a jsou tak tvořeny převážně titanem. Možné větší odchylky by mohly být u slitin typu β , které by obsahovaly větší množství přídavných prvků.

Tepelná roztažnost je u slitin větší než u čistého titanu, ale maximální rozdíl jen výjimečně dosahuje 30%. Co se tepelné vodivosti týče, dosahují slitiny titanu asi čtyřikrát až pětkrát menších hodnot než je tomu u ocelí [5].

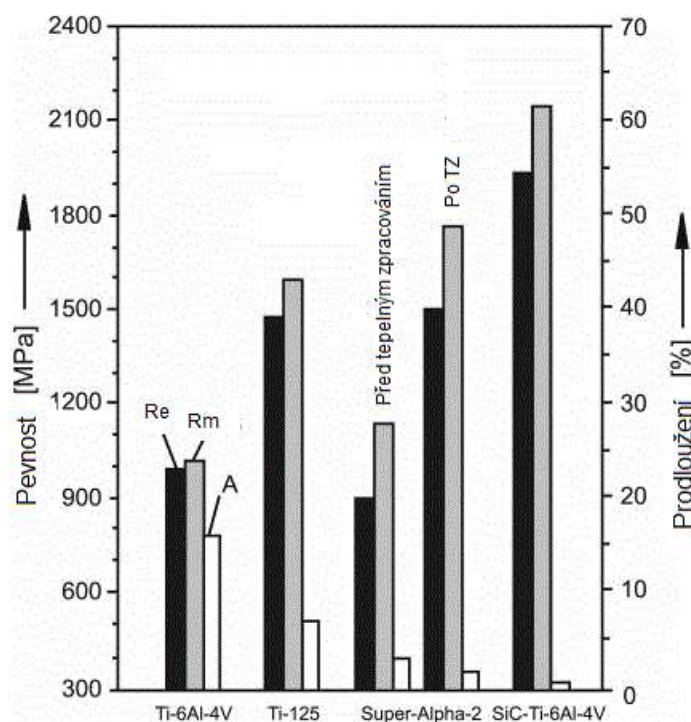
2.6.2 Mechanické vlastnosti

Důležitější roli při vývoji slitin hrají vlastnosti mechanické, jako jsou pevnost, pružnost nebo pevnost za zvýšených teplot.

Ze všech konstrukčních kovů dosahují stejně vysokých hodnot u pevnosti pouze vysoko pevnostní oceli. Pevnost u běžných slitin titanu dosahuje hodnot mezi 800 a 1200 MPa, ale u speciálních aplikací je jsou někdy potřeba daleko vyšší pevnosti. Pevnost lze u titanových slitin zvýšit pomocí legování, tepelného zpracování a výrobou titanových kompozitů.

Legování se u titanových slitin používá jen ojediněle, příkladem je třeba slitina Ti-6V-6Mo-6Fe-3Al (TIMETAL 125), která může dosáhnout pevnosti až 1620 MPa při stále přijatelném prodloužení do 6%.

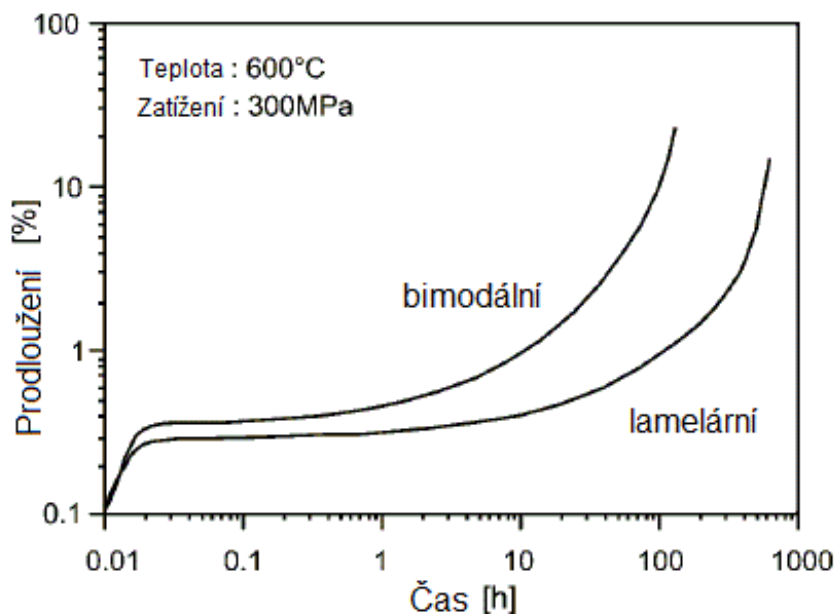
Tepelným zpracováním se vyrábí slitina Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo (Super-Alpha-2), u které dojde ke zvýšení pevnosti z 1100 MPa až na 1800 MPa.



Obr. č. 19: Pevnosti vybraných slitin titanu [1]

Zcela nejvyšší hodnoty pevnosti ale najdeme u speciálních titanových kompozitů, kde se lze dostat až na hodnoty přesahující 2000 MPa ve směru vláken, příkladem takového materiálu je kompozit SiC-Ti-6Al-4V, jedná se o slitinu vyztuženou vlákny karbidu křemíku.

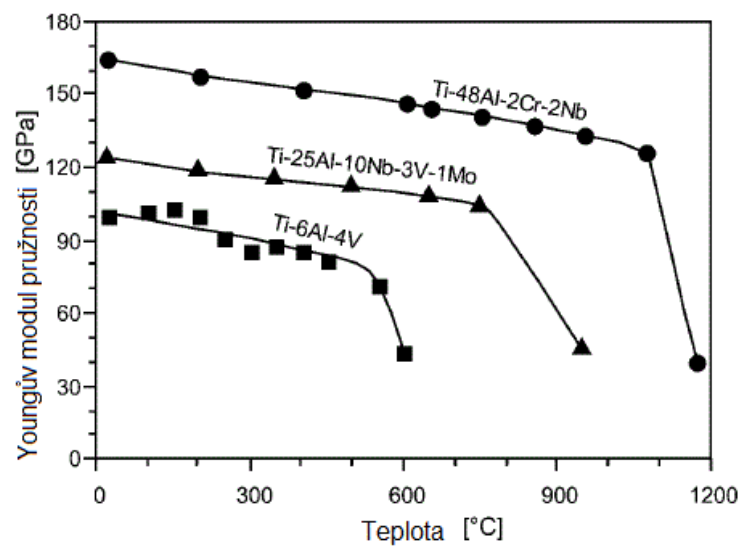
Pevnost za zvýšených teplot je důležitou vlastností titanových slitin, protože právě pro použití v extrémních podmínkách jsou tyto slitiny vyvíjeny. Pevnost za tepla je ovlivněna různým složením, nejvyšších hodnot dosahují podobně jako za normálních teplot slitiny α , které obsahují vysoké množství hliníku a také slitiny s obsahem křemíku. Křemík má spolu s mikrostrukturou vliv také na creepové chování.



Obr. č. 19: Vliv mikrostruktury na creep pro slitinu TIMETAL 1100 (Ti-6Al-2.7Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si) [1]

U slitin titanu dochází k mírnému navýšení Youngova modulu pružnosti oproti čistému titanu. U některých slitin (Ti-48Al-2Cr-2Nb) lze dosáhnout modulu pružnosti až 160 GPa za normálních teplot, což je v porovnání s konstrukčními ocelmi stále málo. S rostoucí teplotou navíc dochází k jeho poklesu. U dvoufázových slitin navíc záleží na směru zatěžování vůči poloze krystalické mřížky

Další nezanedbatelnou vlastností je odolnost vůči únavovému porušování (Jedná se o porušování vlivem cyklického zatěžování napětím menším než je mez kluzu) a vůči následnému únavovému lomu. V tomto ohledu jsou na tom titanové slitiny poměrně dobře ve srovnání s ostatními konstrukčními kovy, protože mají vysokou mez kluzu. [1,5].



Obr. č. 21: Vliv teploty na hodnotu modulu pružnosti u vybraných titanových slitin [1]

3 ZPRACOVÁNÍ TITANU A SLITIN TITANU

Poté co se z titanové houby tavením vyrobí ingoty, přichází na řadu výroba polotovarů a následně tepelné zpracování.

Na výrobu polotovarů z titanu a titanových slitin a jejich tepelné zpracování není ve většině případů třeba používat nějaké speciální postupy a zcela postačí běžná zařízení používaná například pro zpracování slitin niklu nebo nerezových ocelí. Najdou se však nějaké operace, při kterých vyžadují titanové slitiny zvláštní zacházení, kvůli některým speciálním vlastnostem.

Problém nastává při ohřevu pro tváření za tepla, kdy je potřeba se dostat do rozmezí teplot 800 až 1180 °C. Jenže titan i jeho slitiny reagují s plyny za zvýšených teplot a to nejen v oxidační atmosféře, kdy se při teplotách přesahujících 880 °C začínají tvořit oxidy na povrchu titanu a tím je ovlivněna i určitá vrstva pod povrchem. Při ohřevu v redukční atmosféře je zase povrch nasycován uhlíkem a dále probíhá difúze vodíku do ohřívaného kovu, čímž dochází ke zhoršování jeho plastických vlastností. Když si ale máme vybrat z těchto dvou možností, raději zvolíme ohřev v oxidačním prostředí, který nezpůsobí takové škody. Zamezit reakcím titanu s plyny lze také tím, že materiál zbytečně nepřehříváme více než je nutné. Při ohřevu používáme kovovou položku (nerezová ocel, nikl), aby nedošlo k reakci titanu s vyzdívkou pece [5].

3.1 Tváření za studena

Čistý titan je dobře tvárný za studena i za tepla. Tvárnost za studena závisí na obsahu nečistot (O, C, H, N), čím je titan čistší, tím lépe je tvářitelný. Zato slitiny titanu už omezenou tvářitelnost za studena, která je závislá na fázové struktuře a chemickém složení, poměrně dobře za studena tvářitelné jsou slitiny typu β , některé dvoufázové slitiny nelze z důvodu většího obsahu vodíku tvářet za studena vůbec.

Za studena můžeme válcovat pásy a plechy, titanové polotovary, které se vyrábí válcováním za studena, tvoří až třetinu titanových polotovarů. Dále lze vyrábět tyče, dráty a trubky tažením za studena, tato operace je složitější než jiných kovů protože titan má vysokou pevnost, velký přetvárný odpor a hodně se zadírá v maticích a na trnech [5].

3.2 Tváření za tepla

Na rozdíl od tváření za studena lze za tepla dobře tvářet jak čistý titan, tak i jeho slitiny, pokud se zvolí optimální teplota. Nečistoty v tvářeném materiálu mají jen malý vliv na tvářitelnost za tepla.

Teploty volené pro kování jsou rozdílné, podle toho jaký typ titanové slitiny chceme tvářet. Dále závisí na tom, v jaké fázi kování se nacházíme, protože při dokončování se volí nižší teploty.

Pro válcování se většinou volí teploty o 50 až 100 °C nižší než je tomu u kování. Snahou je vyrábět plechy, trubky a profily tak, aby se omezila výroba válcováním za studena [1,5].

3.3 Tepelné zpracování

Po tváření přichází na řadu tepelné zpracování polotovarů. Tepelné zpracování titanu a titanových slitin probíhá za nižších teplot, než které jsou potřebné pro tváření za tepla. Tím pádem se snižuje riziko reakce s plyny, nelze na to však spoléhat, protože i za nižších teplot hrozí zkřehnutí materiálu vlivem vodíku.

3.3.1 Žihání

Žihání pro odstranění vnitřních pnutí je třeba provádět jak pro titan, tak pro jeho slitiny po jakémkoliv typu tváření, žihací teploty závisí na žíhaném materiálu. Pohybují se v rozmezí od 540 do 750 °C, vyšší teploty se používají u slitin typu α . Pokud při tváření došlo k výraznějším deformacím, je třeba přistoupit k rekrystalizačnímu žihání, to provedeme většinou prodloužením doby žihání nebo zvýšením teploty žihání až 800 °C. Pokud chceme optimalizovat vlastnosti dvoufázových slitin pro další zpracování, provádí se stabilizační žihání. Ochlazování probíhá na vzduchu [4,5].

3.3.2 Zušlechťování

Vytvrzování má větší význam jen u dvoufázových slitin $\alpha+\beta$ a slitiny typu β záleží na množství fáze β obsažené ve slitině. Významnější vytvrzování probíhá až u silně β -stabilizovaných slitin. Princip spočívá v rozpadu a vyloučení nebo eutektoidním rozpadu nestabilní fáze β poté dochází k nárůstu tvrdosti a pevnosti. Vytvrzování zahrnuje kalení a následné stárnutí.

Kalení probíhá po ohřevu z teplot vyšších než je teplota fázové přeměny (882 °C) u slitin typu α , u dvoufázových slitin se kalí při teplotách, kdy existují obě fáze a u slitin typu β se kalí, buď na horní hranici při existenci obou fází, případně nad teplotou fázové přeměny. Kalení probíhá většinou do vody, ale u některých slitin stačí kalit na vzduchu. Po kalení následuje stárnutí, kdy se znovu ohřívá ale na teploty nižší než kalící (500 až 600 °C) [4,5].

3.3.3 Chemicko- tepelné zpracování

Chemicko-tepelné zpracování využívá vysoké náchylnosti titanu na reakce s plyny. Tím dochází ke zlepšení vlastností na povrchu materiálu.

Oxidace probíhá ohříváním na vzduchu při teplotách nad 600 °C, vzniká tenká vrstva kyslíčků, jejíž tloušťka závisí na teplotě. Díky této vrstvě je titan odolnější vůči korozi a klesá součinitel tření.

Dalším, a u titanu používaným chemicko-tepelným zpracováním je nitridace, ta probíhá v atmosféře dusíku nebo čpavku. Dochází ke zvýšení odolnosti vůči opotřebení. Čpavek dále může sytit povrch vodíkem, vylučuje se hydrid titanu a klesá vrubová houževnatost [23].

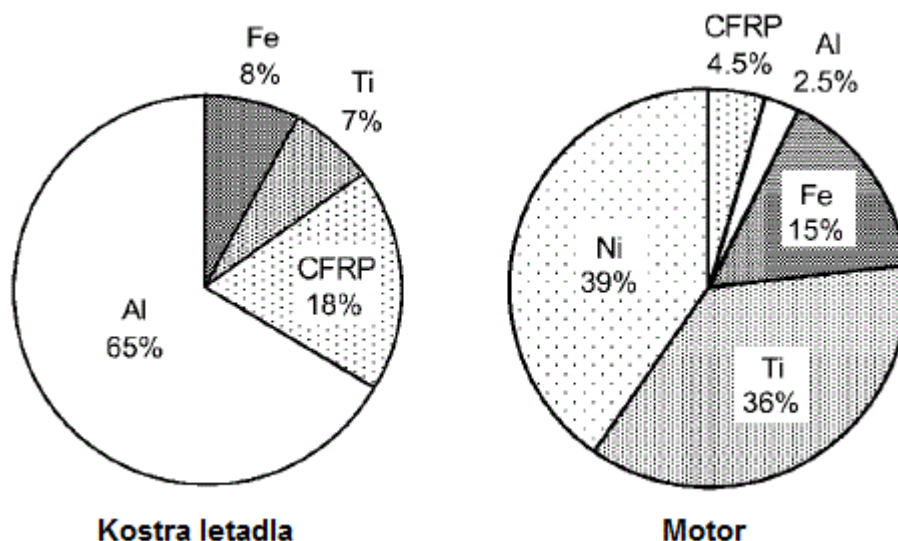
4 VYUŽITÍ TITANU A SLITIN TITANU V PRŮMYSLU

I když je výroba titanu a titanových slitin velmi náročná a hlavně drahá, jsou taková odvětví v průmyslu, kde se těchto materiálů hojně využívá a některá odvětví by se bez nich dokonce nemohla obejít. Je tomu tak díky specifickým vlastnostem, které titan má. Stává se tak náhradou za dosud používané konstrukční materiály jako oceli a niklové nebo hliníkové slitiny.

4.1 Titan v letectví a kosmonautice

Největší oblast (asi 50 %) využití titanových slitin tvoří letectví a kosmonautika. Hlavně pro toto odvětví se v polovině 20 století začaly vyvíjet titanové slitiny. Hlavním důvodem je, ač by se to na první pohled nemuselo zdát, úspora peněz. Investice do výroby nového stroje je sice díky titanu vyšší, ty ale převáží následný levnější provoz. Díky tomu že využijeme titanové slitiny, snížíme váhu celého stroje, uspoříme nějaké místo a tím snížíme provozní náklady.

Když je například letadlo lehčí nepotřebuje tak výkonné motory, spotřebuje méně paliva, dále lze zmenšit obrovské rozměry křídel, nebo zbytečně velký podvozek. Pokud dojde k úspoře hmotnosti na samotném stroji a je možno přepravit větší množství pasažérů nebo nákladu, čímž se zvýší výnosy z využívání stroje. Pro srovnání úspora jednoho kilogramu by například v automobilovém průmyslu znamenala přibližně 350 korun, v letectví už je tato částka 100 krát vyšší a při vývoji raket v kosmonautice se může jednat o stovky tisíc a to jsou peníze, které je možno využít daleko lepším způsobem [1].



Obr. č. 22: Procentuelní využití konstrukčních materiálů při stavbě letadla [1]

4.1.1 Trup letadla

Využití titanových slitin při výrobě kostry dopravního letadla není jen z důvodu snížení váhy, ale také díky vysoké pevnosti a odolnosti vůči únavovému porušování. Používá se například dvoufázová slitina Ti-3Al-2,5V.

Při konstrukci letadel se využívá i ostatních vlastností titanu. V místech jako je palubní kuchyně nebo toalety se pro výrobu podlah a zařízení využívá čistý titan a pro výrobu podvozku se stále častěji používají kované titanové slitiny, zde se využívá vysoké odolnosti vůči korozi.

Teplotní stálosti titanu je zase využíváno v potrubním systému odmrazovacího zařízení, kde teploty dosahují přes 200 °C.

Daleko více titanu je použito při stavbě trupů vojenských letadel, množství titanu, se u moderních bitevních letadel pohybuje kolem 35 až 50 % a u letadla typu SR-71 „Blackbird“ to bylo dokonce 95 %. Pro výrobu nejmodernějších typů bojových stíhaček jako je F-22 je použito nejnovějších titanových litin jako je Ti-6Al-2Zr-2Sn-2Mo-2Cr-0,25Si [1,5].

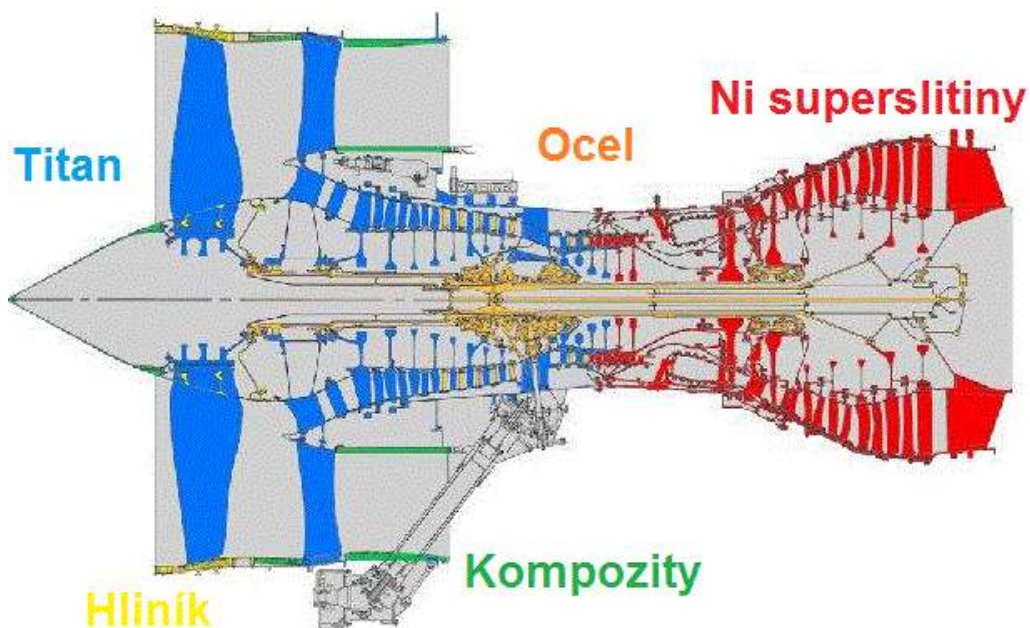


Obr. č. 23: SR-71 „Blackbird“ letadlo z 95 % titanu [24]

4.1.2 Motory

Titanové slitiny jsou důležité pro výrobu proudových motorů, díky své pevnosti a teplotní stálosti se používají pro výrobu lopatek proudových motorů a dalších součástí motorů v přední části motoru, kudy se přivádí vzduch. Využívá se slitina TIMETAL 834 (Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si).

Další využití převážně slitiny Ti-6Al-4V na součástky rotoru vrtulníků [1,5].



Obr. č. 24: Titanové lopatky proudového motoru [25]

4.1.3 Kosmonautika

Titanové slitiny byly poprvé použity pro vesmírné programy Apollo a Mercury. I při využití pro lety do vesmíru hraje velkou roli snížení váhy, vysoká pevnost, tepelná stabilita a také vysoká chemická odolnost titanu. Z titanových slitin se vyrábí nádrže na palivo a potrubní systém na rozvod paliva. Titanové slitiny ale najdou využití i v samotné kostře vesmírných zařízeních [1].

4.2 Výroba dalších dopravních prostředků

Titan však není využíváný pouze pro výrobu letadel zařízení pro lety do vesmíru. Můžeme se s ním setkat i v dalších dopravních prostředcích jako jsou automobily, motocykly nebo lodě.

4.2.1 Automobilový průmysl

V běžných automobilech můžeme najít jen nějaké menší součástky, které jsou vyrobeny z titanových slitin, například pružiny, u kterých je ekonomičtější nahradit ocel titanem. Větší využití má titan například u závodních speciálů, kde každý gram může být důležitý pro závodní vlastnosti vozu.

Podobně jako u automobilů i u motocyklů se používají titanové pružiny, na motocyklech můžeme najít i další součástky z titanu jako například výfukový systém.

Nejpoužívanější slitinou při výrobě součástek do automobilů a motocyklů je Ti-6Al-4V, ale postupně bývá nahrazována slitinou TIMETAL LCB (Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al), která je levnější [1].



Obr. č. 25: Titanový výfuk k motocyklu [1]

4.2.2 Lodní průmysl

Jelikož lodě jsou ve stálém kontaktu s vodou a to nejen se sladkou ale hlavně s mořskou, jedná se o prostředí, které výrazně přispívá ke korozi. Proto je i zde vhodné použití slitin titanu, ze kterých se vyrábí povrchy trupů lodí, ponorek, lodní šrouby, potrubí, ventily a další součásti [23].

4.3 Lékařství

Materiály, které se mohou používat v medicíně, musí splňovat přísná kritéria.

- biokompatibilita s živou tkání
- odolnost vůči korozi způsobené tělními tekutinami
- dobré mechanické vlastnosti bioadheze – dobrá přilnavost k živé tkáni nebo kosti
- dostupnost materiálu
- možnost zpracování materiálu



Obr. č. 26: Titanová náhrada kolenního kloubu [26]

Tyto podmínky splňuje jen velmi malé množství materiálů (nerezové oceli, slitiny CoCr, CoNiCr, čistý niob a čistý tantal) a do tohoto výčtu patří i čistý titan a slitina titanu Ti-6Al4V.

Titanu a titanových slitin se v medicíně využívá na výrobu kloubních náhrad, kostních destiček, zubních implantátů, které se upevňují přímo do kosti (Při výměně kloubu se do kosti vyvrtá díra a umístí se umělý kloub, materiál musí mít podobné mechanické vlastnosti jako kost, jinak by docházelo k rychlému vydrolování a zničení kosti).



Obr. č. 27: Titanový zubní implantát [27]

Dále se titan používá na součástky do umělých orgánů, například chlopně umělého srdce, na součástky do kardiostimulátorů, na chirurgické nástroje a také na protézy a invalidní vozíky[1,23].

4.4 Chemický a petrochemický průmysl

Čistý titan je díky své odolnosti vůči korozi a nízké chemické stálosti, způsobené stálou vrstvou oxidů, za normálních teplot vhodný pro použití v chemickém průmyslu. Používá se v takových prostředích, kde ostatní konstrukční kovové materiály rychle degradují. Naopak oproti nekovovým materiálům je daleko pevnější. Titan lze použít pro různé chloridy, sírany, kyslíkaté kyseliny a další druhy solí.

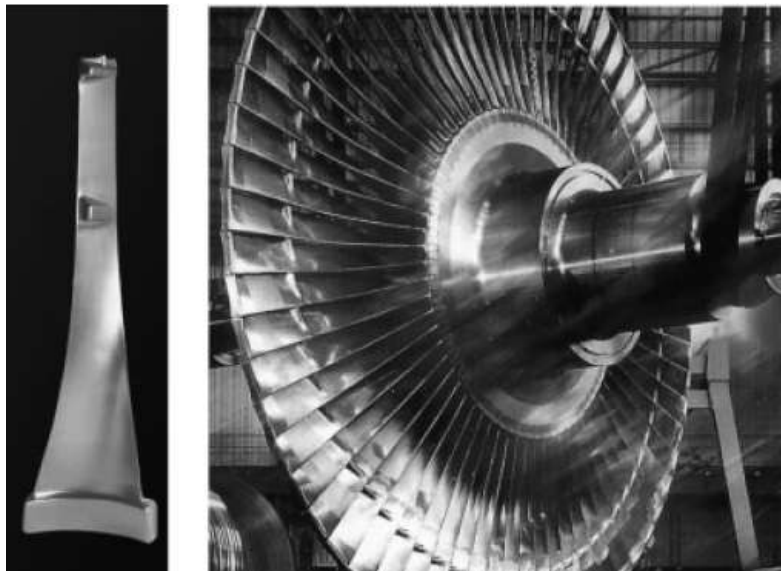
Nejčastější použití je při zpracování, výrobě a použití chlóru, chloridů, při výrobě kyselin, dusíkatých hnojiv, celulózy a papíru a dalších agresivních látek.

Z titanu se nejčastěji vyrábí různé součástky a zařízení, jako jsou armatury, potrubí, čerpadla, odstředivky, rošty, regulační a řídicí prvky, tlakové nádoby, nádrže chladiče, kondenzátory, výměníky, reaktory, míchací zařízení, které jsou určeny pro použití v chemickém průmyslu.

V petrochemickém průmyslu se titan používá například při výrobě acetonu, acetaldehydu. Dále se titan používá na výrobu zařízení pro těžbu ropy a zemního plynu a pro následné zpracování produktů z ropy (olejů, nafty, benzínů a jiných látek). Zde opět využijeme značnou úsporu materiálu a hmotnosti a také odolnost proti korozi [1,5].

4.5 Energetický průmysl

Titan a titanové slitiny se používají v energetice na výrobu součástí tlakových nádob reaktorů, horkovodních a parovodních potrubí pro elektrárny. Ale hlavně na výrobu lopatek pro parní turbíny, kde titanová slitina Ti-6Al-4V nahradila lopatky z nerezové oceli. Lopatky z titanové slitiny jsou dolnější a až o 60 % lehčí, čímž je umožněno vyrobít delší lopatky turbíny a dosáhnout tak větších účinností. V dnešní době je snaha vyrábět lopatky z nových slitin titanu, které dosahují ještě lepších vlastností, jako například slitina Ti-6Al-6V-2Sn [1].



Obr. č. 28 Titanové lopatky parní turbíny [1]

4.6 Sportovní potřeby

Opět je zde velice důležitou vlastností pevnost a úspora hmotnosti a materiálu. Z titanových slitin se vyrábí rámy závodních kola a různé součástky na kola, většinou ze slitin Ti-6Al-4V nebo Ti-3Al-2,5V.

Mezi další sportovní vybavení vyráběné z titanu nebo jeho slitin můžeme zařadit golfové hole, rakety na tenis, baseballové pálky, lukostřelecké potřeby, sportovní invalidní vozíky, lyže a pro odolnost vůči korozi jsou z titanu vyráběny tlakové láhve na potápění, nebo potřeby pro horolezce [1].



Obr. č. 29: Titanový rám jízdního kola [28]

4.7 Další využití

Mezi další využití titanových slitin můžeme zařadit výrobu šperků, hodinek, nožů, různého nářadí, kuchyňského nádobí, laboratorních zařízení, použití ve stavebním průmyslu, při výrobě zbraní a vojenské techniky apod [1].



Obr. č. 30: Titanové hodinky [29]

5 ZÁVĚR

V závěru bych rád zhodnotil výhody a nevýhody použití titanu a titanových slitin a shrnul možnosti použití.

Hlavní nevýhodou titanu je náročnost jeho výroby, která se negativně promítá do výsledné ceny produktu vyrobených z tohoto materiálu a jeho slitin z tohoto pohledu by se mohlo zdát, že použití bude nevýhodné a jen ojedinělé.

Tuto nevýhodu ale převažuje množství výhod, mezi které patří velmi dobrý poměr mezi měrnou hmotností a pevností, vysoká pevnost i za zvýšených teplot, dobrá odolnost proti únavovému porušování, odolnost proti korozi nebo teplotní stálost. Všechny tyto vlastnosti spolu s velkým množstvím různých typů slitin umožňují titanu a titanovým slitinám nahrazovat doposud používané konstrukční materiály snad ve všech odvětvích průmyslu.

Úsporou materiálu a dlouhou životností se dají ušetřit nemalé peníze, takže ve výsledku i s pořizovací cenou je toto použití výhodnější než použití běžných konstrukčních materiálů.

Krátký výčet možností využití titanu a titanových slitin:

- Letectví a kosmonautika – kostra letadla, proudové motory, rozvody paliva ...
- Ostatní dopravní prostředky – automobily, motocykly, lodě ...
- Lékařství – kloubní náhrady, součásti umělých orgánů, chirurgické nástroje ...
- Chemický průmysl – tlakové nádoby, potrubí, čerpadla, nádrže ...
- Energetický průmysl – tlakové nádoby, potrubí, turbíny ...
- Sportovní potřeby – kola, lyže, tenisové rakety, baseballové pálky ...
- A další – šperky, hodinky, nádobí, nářadí, zbraně ...

Je zřejmé, že použití titanu a jeho slitin je v současnosti na vzestupu a tím že se stále vyvíjejí nové a nové typy titanových slitin je velmi pravděpodobné že se tento trend bude držet i nadále. Titan a jeho slitiny jsou tak díky svým vyváženým vlastnostem materiálem budoucnosti.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Leyens, Ch., Peters, M.: *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, 513 s. ISBN 3-527-30534-3
- [2] Sedláček, V.: *Neželezné kovy a slitiny*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1979. 398 s.
- [3] Sedláček, V.: *Únava hliníkových a titanových slitin*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989. 351 s.
- [4] Ptáček, L.: *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
- [5] SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963, 205 s. Řada hutnické literatury.
- [6] Periodická tabulka: Titan. In: *Prvky* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/22.html>
- [7] Výroba Výroba titanové houby. In: *fd.cvut* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.fd.cvut.cz/personal/vojteond/vyroba.htm>
- [8] Titanium processing. In: *Britannica* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/597174/titanium-processing>
- [9] VAVRDA, Ondřej. Titan. In: *fd.cvut* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.fd.cvut.cz/personal/vavrdond/text1.html>
- [10] Laboratorní průvodce: Periodická tabulka. In: *labo* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.labo.cz/mft/pt.htm>
- [11] Titanium minerals concentrates. In: *USGS Minerals Information: Titanium: Statistics and Informations* [online]. 2015. vyd. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/mcs-2015-timin.pdf>
- [12] Ilmenite from Girardville. In: *AllMinerals/JohnBetts-FineMinerals: Mineral Museum* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.johnbetts-fineminerals.com/jhbnyc/mineralmuseum/picshow.php?id=55705>
- [13] Rutile Hematit Image. In: *Webmineral* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://webmineral.com/specimens/picshow.php?id=2755#.VRPjhOHPvmJ>
- [14] Titanium Metals: Titanium Sponge. In: *TOHO-Titanium* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: http://www.toho-titanium.co.jp/en/products/sponge_en.html
- [15] Titanium Sponge. In: *Wellmetusa* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.wellmetusa.com/titanium.html>

- [16] Titan: (Prvek). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_%28prvek%29
- [17] Osaka Titanium Technologies Seeks Stable Sponge Material Procurement. In: *Japanmetalbulletin* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.japanmetalbulletin.com/?p=17804>
- [18] Titanium ingot. In: *V2cl* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://v2cl.com/ingots.html>
- [19] Periodická tabulka: Výskyt prvků v zemské kůře. In: *Prvky* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/zemska-kura.html>
- [20] Ing. Lenka Klakurková, Ph.D. a kol.: Atlas materiálových struktur (multimediální atlas materiálů), 2009 Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/ke-stazeni>
- [21] Horník, V. *Únavové vlastnosti titanových slitin: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 49 s., Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53005
- [22] Titanové slitiny. In: *Ujp.cz* [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://www.ujp.cz/titanove-slitiny>
- [23] Horník, V. *Únavové vlastnosti titanových slitin: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 49 s., Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53005
- [24] *Aircrafts: SR-71* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://www.wallpaperup.com/182261/lockheed_sr-71_military_jet_d.html
- [25] doc. Ing. Vít Jan, Ph.D., *Neželezné kovy a jejich slitiny II*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 32s. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/fsi3sv/home>
- [26] Revizní totální náhrada kolenního kloubu typ SVR. *Beznoska: product* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.beznoska.cz/product/revizni-totalni-nahrada-kolenniho-kloubu-typ-svr/>
- [27] Zubní implantáty. *Granddentalclinic* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.graddentalclinic.com/zubni-implantaty>
- [28] Titanový rám kola. *Bikeandride* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.bikeandride.cz/2011/10/gt-xizang-titanovy-zazrak-se-vraci/>
- [29] Titanové hodinky. *Hodinky-klenoty* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.hodinky-klenoty.cz/titanove-hodinky-olympia-10110>