



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF METAL SCIENCE AND ENGINEERING

MECHANICKÉ VLASTNOSTI TITANOVÝCH SLITIN

MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ALENA KLAPKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. STANISLAV VĚCHET, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student(ka): Alena Klapková

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:

Mechanické vlastnosti titanových slitin

v anglickém jazyce:

Mechanical properties of titanium alloys

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě literární rešerše zhodnotit a vzájemně porovnat základní mechanické vlastnosti vybraných titanových slitin. Mechanické vlastnosti dát do souvislosti s tepelným zpracováním a strukturou studovaných slitin.

Cíle bakalářské práce:

1. Literární rešerše dané problematiky
2. Analýza literárních údajů
3. Provedení mechanických zkoušek
4. Diskuze
5. Závěry

Seznam odborné literatury:

1. Pluhař,J., Koritta,J.: Strojírenské materiály, SNTL/ALFA Praha, 1977
2. Ptáček,L. a kol.: Nauka o materiálu I, CERM, s.r.o., Brno, 2001
3. Veles,P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, SNTL Praha, 1985
4. Matthew,J., Donachie, Jr.: Titanium - a Technical Guide, Materials Park, Ohio

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 1.2.2012

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce byla vytvořena formou literární rešerše a shrnuje základní informace o titanu a jeho slitinách. V úvodních kapitolách jsou uvedeny nejdůležitější vlastnosti čistého titanu, jako je například zařazení v periodické tabulce prvků, alotropické modifikace a jejich krystalové mřížky, dále pak chemické či fyzikální vlastnosti. Pozornost byla věnována též mechanickým a technologickým vlastnostem včetně vlivu nečistot na tyto vlastnosti, který může být u titanu velmi výrazný. K vytvoření uceleného přehledu informací patří také kapitola věnovaná historii titanu a současným směrům ve vývoji jeho slitin. Následují informace o výrobě a používaných postupech. Výrazná část práce byla věnována rozdělení a charakteristice jednotlivých slitin titanu a jejich tepelnému zpracování. Slitina TiAl6V4 byla rozebrána podrobněji, protože je nejpoužívanější, a tedy i nejvíce vyráběnou titanovou slitinou.

Abstract

This bachelor thesis was created in a form of literary search and it summarizes the basic information of Titanium and its alloys. The most significant features, such as its position in Periodic Table of the Elements, allotropic modifications and their crystal lattices, chemical or physical qualities, are mentioned in the first chapters. The attention was also paid to both the mechanical and the technological qualities of titanium as such, including the effect of impurities that may be very significant. General and summarized information about the history of titanium, as well as current directions in the development of its alloys are discussed in chapter 1.3. As a following, the information about production and the methods used during the production are discussed in chapter 2. Distinct part of the thesis depicts the partition of concrete titanium alloys and the heat treatment of them. The TiAl6V4 alloy was described in details, since it is the most widely used, therefore the most often produced titanium alloy.

Klíčová slova

neželezné kovy, titan, slitiny titanu, fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti titanu, biokompatibilita, tvarová paměť

Keywords

nonferrous metals, titanium, titanium alloys, physical, chemical and mechanical properties of titanium, biokompatibility, shape memory effect

Bibliografická citace

KLAPKOVÁ, A. *Mechanické vlastnosti titanových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 54 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Mechanické vlastnosti titanových slitin“ vypracovala samostatně, pouze s použitím uvedené odborné literatury.

V Brně dne

.....

Alena Klapková

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat panu prof. Ing. Stanislavu Věchtovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady při tvorbě této bakalářské práce.

Obsah

ÚVOD	5
1. TITAN A JEHO SLITINY	7
1.1. VLASTNOSTI TITANU A JEHO SLITIN	7
1.1.1. Zařazení v periodické soustavě prvků	8
1.1.2. Některé fyzikální vlastnosti titanu	9
1.1.3. Chemické vlastnosti titanu	9
1.1.4. Mechanické vlastnosti titanu	10
1.1.5. Technologické vlastnosti titanu	13
1.1.6. Deformační vlastnosti titanu	15
1.1.7. Příznivé vlastnosti titanu a jeho slitin	17
1.1.8. Nepříznivé vlastnosti titanu a jeho slitin	17
1.2. KOMERČNĚ ČISTÝ TITAN	17
1.3. HISTORIE TITANU A JEHO SLITIN	18
1.3.1. Historie výroby titanu	18
1.3.2. Současná výroba titanu	18
1.4. SOUČASNÉ SMĚRY VE VÝVOJI TITANOVÝCH SLITIN	19
2. VÝROBA TITANU	20
2.1. SUROVINY PRO VÝROBU TITANU	20
2.2. ZPŮSOBY VÝROBY TITANU	22
2.2.1. Krollův proces	22
2.2.2. Výroba titanu elektrolýzou	24
2.2.3. Ostatní způsoby výroby titanu	25
2.2.4. Tavení titanu a jeho slitin	25
3. SLITINY TITANU	27
3.1. ROZDĚLENÍ SLITIN TITANU	27
3.1.1. Slitiny typu α	29
3.1.2. Slitiny typu pseudo α	30
3.1.3. Slitiny $\alpha + \beta$	30
3.1.4. Slitiny typu β -	30
3.1.5. Slitiny pseudo β	30
3.1.6. Slévárenské slitiny titanu	32
3.2. BIOKOMPATIBILNÍ SLITINY TITANU	32
3.2.1. Biokompatibilita	32
3.2.2. Titan v lékařství	33
3.2.3. Povrchová úprava implantátů z titanu	34
3.2.4. Konkrétní příklady použití titanu v lékařství	35
3.3. INTERMETALIKA	36
3.3.1. Titanová intermetalika	36

3.3.2.	Slitiny Ti-Ni.....	36
3.3.3.	Žáropevné pseudoslitiny.....	38
3.4.	POUŽITÍ SLITIN TITANU	40
4.	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ TITANU A JEHO SLITIN	41
4.1.	DRUHY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ TITANU.....	42
4.1.1.	Žihání.....	42
4.1.2.	Zušlechťování	43
4.1.3.	Kalení a titanu.....	44
4.1.4.	Chemicko-tepelné zpracování titanu	45
4.1.5.	Tepelně mechanické zpracování.....	46
5.	SLITINA TIAL6V4.....	46
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50
7.	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK	54

Úvod

V technické praxi se setkáváme s velkým množstvím konstrukčních materiálů. Nejvýraznější skupinou jsou však kovy, které jsou také nejpočetnější skupinou prvků v periodické tabulce. Některé kovy jsou pro nás naprosto běžné, například výrobky z oceli nalézáme téměř na každém kroku, avšak existují i materiály, jejichž použití již zcela běžné není. Neželezné kovy se často vyznačují ojedinělými vlastnostmi, které se využívají ve speciálních aplikacích. Do skupiny neželezných kovů se řadí také titan. Tento šedý až stříbřitě bílý lehký kov vykazuje jedinečnou kombinaci vlastností, díky kterým se stal v moderní době nepostradatelným v mnoha odvětvích průmyslu. Tato bakalářská práce by měla sloužit pro bližší seznámení čtenářů s tematikou týkající titanu, rozdělení jeho slitin a nejčastějších oblastí použití.

Cílem této práce bylo sestavení uceleného přehledu nejdůležitějších charakteristik titanu a jeho slitin. V úvodních kapitolách jsou rozebrány především fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti. Z hlediska chemických vlastností se titan vyznačuje výbornou korozivzdorností, se kterou souvisí také jeho biokompatibilní vlastnosti. Z mechanických vlastností titanu je výjimečná jeho vysoká pevnost v kombinaci s nízkou hmotností. Důležité jsou i vlastnosti technologické, které však mohou způsobovat určité obtíže při zpracování tohoto materiálu. Titan nemá příliš dobrou obrobitelnost, ani třecí vlastnosti. Při svařování je nutné použití inertní atmosféry, či vakua, aby nedocházelo k reakcím s atmosférickými plyny. Zvláštností titanu je, že jak komerčně čistý titan, tak jeho slitiny s krystalickým uspořádáním α , tedy hexagonální mřížkou jsou dobře tvárné a to i za studena, přestože kovy s krystalickou mřížkou HCP obecně bývají špatně tvařitelné.

Titan je v současné době moderní materiál, který je i přes svoji vysokou cenu nenahraditelný v některých především speciálních aplikacích. Historie titanu začíná na sklonku 18. století, kdy byl poprvé objeven v minerálu ilmenitu. Cesta k jeho produkci ve větším měřítku však byla ještě dlouhá. Největším problémem bylo nalezení metody, která by umožnila výrobu titanu ve větším množství a byla pokud možno co nejméně ekonomicky náročná. Prvním, kdo vypracoval provozní metodu výroby, byl Wiliam J. Kroll. Ve svých počátcích byl titan považován za strategický materiál a uplatňoval se především ve vojenské technice, později se jeho využití ovšem velmi rozšířilo.

Následuje kapitola věnovaná výrobě, jejíž obtížnost, způsobená především vysokou reaktivitou titanu má nezanedbatelný vliv na jeho výslednou cenu. Již dříve zmíněná Krollova metoda je dodnes nejpoužívanějším způsobem výroby, avšak byly vypracovány i další postupy, například redukce chloridu titaničitého vodíkem či termický rozklad chloridu titanatého. Titan je perspektivním materiálem, který má široké možnosti použití, proto jsou i v současné době hledány především nové postupy v jeho zpracování, které by umožnily zkvalitnění výsledných výrobků.

Hlavní pozornost byla věnována titanovým slitinám, které mohou mít velmi rozmanité použití v závislosti na jejich specifických vlastnostech. V této bakalářské práci je možno

nalézt jejich rozdělení podle struktury, charakteristiku, ale také uvedení jejich nejdůležitějších oblastí použití. Velký význam má použití titanových slitin především v lékařství, avšak významné jsou také například žárovevné pseudoslitiny titanu, či jeho slitiny s tvarovou pamětí.

Mechanické vlastnosti titanových slitin, stejně tak jako i jiných kovů, je možné upravovat tepelným zpracováním. Postupům tepelného zpracování byla věnována závěrečná kapitola této práce. Mezi postupy používané u tepelného zpracování titanu a jeho slitin, patří žíhání, kalení, zušlechťování, ale také chemicko-tepelné, či tepelně mechanické zpracování. Druh tepelného zpracování je nutné volit s ohledem na typ slitiny, protože jednotlivé titanové slitiny byly vyvinuty pro různé účely a tedy se vyznačují rozdílnými vlastnostmi i strukturou.

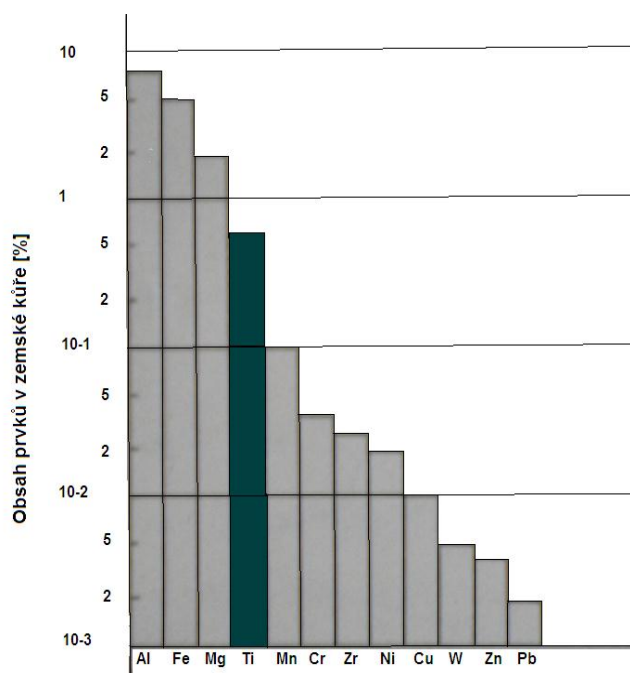
V závěru práce je také zmíněna slitina TiA6V4, protože je nejčastěji využívanou slitinou titanu a je významným biokompatibilním materiálem.

1. Titan a jeho slitiny

Titan a jeho slitiny jsou relativně nové konstrukční materiály. Titan byl objeven na konci 18. století, ale po dlouhou dobu se nedařilo nalézt produktivní metodu jeho výroby. Dnes nejpoužívanější je Krollova metoda. I přesto, že výroba titanu a jeho slitin je poměrně náročná, jedná se o často používané materiály. Používají se v nejrůznějších odvětvích průmyslu, a to především díky jejich výjimečné kombinaci fyzikálních, mechanických i biokompatibilních vlastností.

1.1. Vlastnosti titanu a jeho slitin

Titan je šedý až stříbřitě bílý lehký kov hojně zastoupený v zemské kůře. Nejčastěji se uvádí na čtvrtém místě po hliníku, železu a hořčíku [1].



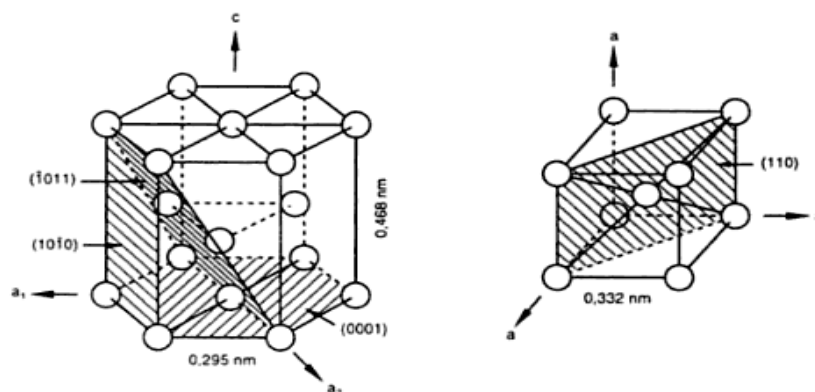
Obr. č. 1: Přehled výskytu kovů v zemské kůře [2]

Přes své vysoké zastoupení v zemské kůře byl čistý kovový titan po dlouhou dobu velmi vzácným a drahým materiálem. Důvodem je skutečnost, že běžné hutní metody, které se využívají k výrobě jiných kovů, jsou v případě titanu neúčinné, a to díky jeho vysoké reaktivitě za zvýšené teploty s kyslíkem, vodíkem, uhlíkem a dusíkem [3].

Čistý titan je charakterizován nízkou hustotou ($4\,500\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), střední pevností (400 MPa) a vynikající odolností proti některým prostředím, zejména chloru a chlorovým sloučeninám, jimž ostatní kovy a slitiny neodolávají. Výborná korozní odolnost titanu umožňuje jeho aplikaci pro výrobu náradí v chemickém průmyslu, dále zařízení, která dlouhodobě pracují ve styku s mořskou vodou (součásti lodí, ponorek – lodní šrouby) a biomedicínské implantáty, jako jsou kloubní náhrady. Titan je také důležitý materiál v kosmických technologiích (družice, vesmírné sondy, vesmírné stanice) a nalézá také uplatnění v konstrukcích letadel a součástech leteckých proudových motorů. Široké praktické využití nalézá amorfní prášková forma titanu, nazývaná titanová běloba (čistý TiO_2). Tento bílý

pigment je mimořádně stálý, zdravotně zcela nezávadný s vysokou krycí schopností a patří proto mezi nejvyšší dostupné bílé pigmenty [3, 4, 5].

Titan je alotropický materiál s mřížkou HCP¹ vyskytující se za nízkých teplot a BCC² nad teplotou 882°C. Přísadové prvky dodávají tuhému roztoku pevnost a mění teplotu alotropické (fázové) přeměny. Je-li titan kombinován například s niobem, vytvoří se supravodivé intermetalické sloučeniny. Pokud je kombinován s niklem, výsledná slitina bude vykazovat efekt tvarové paměti³. Titanové slitiny jsou používány také pro výrobu sportovního náčiní, jako jsou například hlavice golfových holí [5].



Obr. č. 2: Krystalové mřížky modifikací titanu: 1) HCP α -Ti, 2) BCC β -Ti [6]

1.1.1. Zařazení v periodické soustavě prvků

Periodická tabulka prvků

Mendělejeva periodická tabulka prvků

	I.A	II.A	III.B	IV.B	V.B	VI.B	VII.B	VIII.B	VIII.B	VIII.B	I.B	II.B	III.A	IV.A	V.A	VI.A	VII.A	VIII.A
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cp	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
6	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
7	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				
nekovy			alkalické kovy			kovy alkalických zemin			vzácné plyny			halogeny						
polokovy			přechodné kovy			ostatní kovy			lanthanoidy			aktinoidy						

Obr. č. 3: Periodická tabulka prvků [7]

¹ HCP – mřížka hexagonální (šesterečná) [8]

² BCC – mřížka kubická, prostorově středěná [8]

³ Efekt tvarové paměti – Pokud je součástka ze slitiny s tvarovou pamětí ochlazena a zdeformována tak, že se podstatně změní její tvar, po zahřátí nad určitou charakteristickou teplotu se opět samovolně vrátí ke svému původnímu stavu. Také hodnota elastické deformace dosahuje u kovů s tvarovou pamětí vysokých hodnot [9]

Z periodické tabulky prvků je zřejmé, že titan se nachází ve stejné periodě jako železo, nikl a měď a jeho vlastnosti jsou podobné zirkoniu. Atom titanu má elektrony neúplně obsazenou třetí vrstvu, ve které se nachází 10 elektronů i čtvrtou vrstvu, která je obsazena 2 elektrony. V závislosti na poloze kovů v periodické soustavě, lze odvodit některé další vlastnosti titanu. Oproti ostatním kovům ve stejné periodě má menší měrnou hmotnost a vyšší teplotu tání. Nejčastěji se vyskytuje jako čtyřmocný [2].

1.1.2. Některé fyzikální vlastnosti titanu

atomové číslo	22
atomová hmotnost	48,967
teplota tání	1668°C
teplota varu	3260°C
teplota alotropické přeměny	882°C
hustota	4,51 g/cm ³
skupenské teplo tání	104cal/g
skupenské teplo fázové přeměny	17,7 cal/g
elektronová konfigurace	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 3d ² 4s ²
oxidační čísla	+II, +III, +IV

Tab. č. 1: Některé fyzikální vlastnosti titanu [2, 10, 11]

1.1.3. Chemické vlastnosti titanu

Chemicky je titan velmi reaktivní kov. V řadě prvků se nachází mezi hořčíkem a beryliem, přesto je však dobře známa jeho velká odolnost proti korozi, která převyšuje v některých prostředích i speciální nerezavějící oceli a anitkorozivní slitiny [2].

Pasivaci titanu (vytvoření povrchové ochranné vrstvy) napomáhá přítomnost oxidačních látek. Působí tak kyslík (i vzdušný) nebo např. kyselina dusičná, které na titanu vytvoří ochrannou vrstvu oxidu. Na pasivaci titanu dobře působí také vlhkost. Dobrá korozní odolnost ve vodných roztocích je způsobena disociací⁴ vody [11].

Dále titan odolává působení většiny běžných minerálních kyselin i roztoků alkalických hydroxidů. Zvolna se rozpouští v horké HCl. Pro jeho rozpouštění je nejúčinnější kyselina fluorovodíková HF nebo její směs s jinými minerálními kyselinami [3].

Výborná korozní odolnost titanu jej předurčuje k použití například v lékařství (biokompatibilní materiál) a v dalších náročných prostředích, jako je mořská voda, popřípadě použití v chemickém průmyslu. Výhodou je také dobrá odolnost vůči elektrochemické korozi. Ochranná vrstva TiO₂ se ovšem za vysokých teplot rozpadá a titan se stává velmi reaktivním, což se nepříznivě projevuje na jeho výrobě a zpracování.

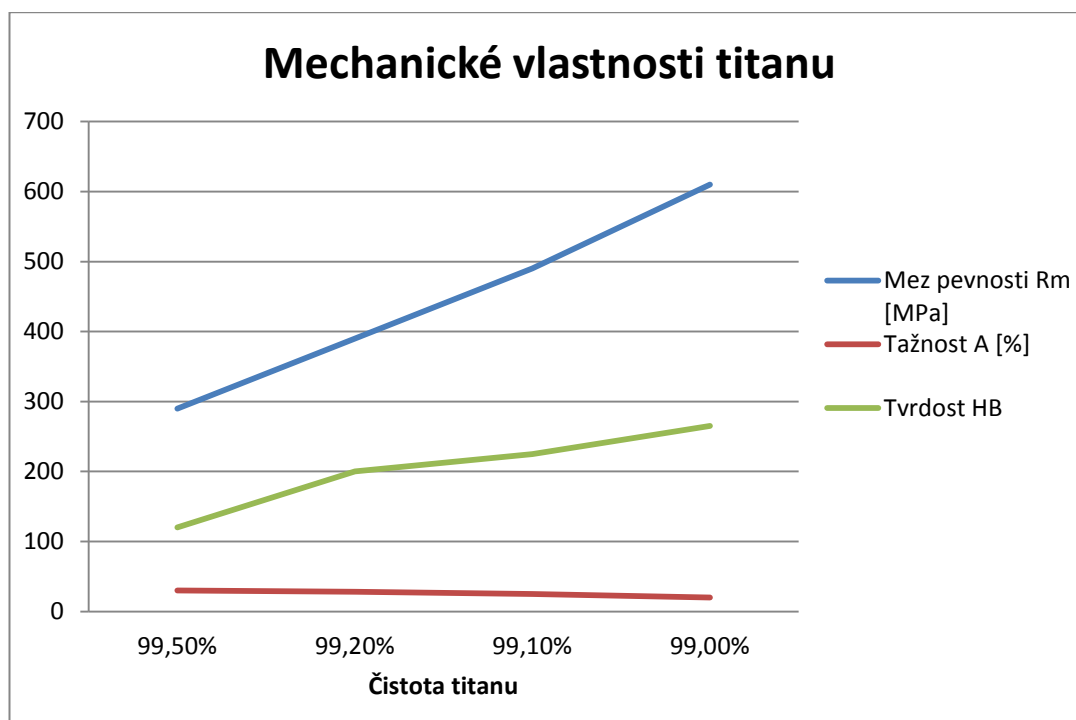
⁴ disociace – rozštěpení, rozklad látek [12]

1.1.4. Mechanické vlastnosti titanu

Čistý titan by s ohledem na dosahované hodnoty pevnosti patřil do skupiny kovů se střední pevností. Jeho vlastnosti však značně závisí na čistotě, především na obsahu kyslíku, uhlíku, dusíku, ale i železa. Tvářením za studena lze jeho pevnost podstatně zvýšit. Vlastnosti titanu mnohem více závisí na rychlosti zatěžování než u oceli, hliníku a jiných technických materiálů [2, 13].

Druh titanu	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrdość HB
Ti 99,5	290	30	120
Ti 99,2	390	28	200
Ti 99,1	490	25	225
Ti 99,0	610	20	265

Tab. č. 2: Druhy a mechanické vlastnosti chemicky čistého titanu [8]



Obr. č. 4: Mechanické vlastnosti titanu

Z grafu vyplývá, že mez pevnosti a tvrdost podle Brinella s klesající čistotou titanu vzrůstají, naopak tažnost mírně klesá.

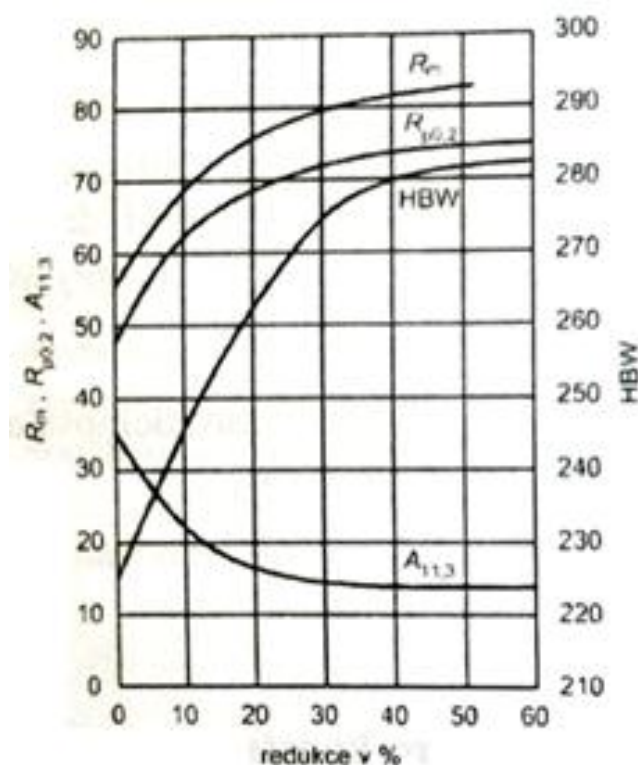
Mez kluzu – u titanu je možné ji dobře srovnávat s hodnotami středně, nebo málo legovaných konstrukčních ocelí. Stejně tak se hodnotám konstrukčních ocelí podobají i hodnoty **meze pevnosti** [2].

Tažnost a kontrakce – značně závisí na obsahu nečistot, na rozdíl od legovaných ocelí stejné pevnosti má titan vyšší hodnoty tažnosti [2].

Vrbová houževnatost – je citlivým ukazatelem jakosti titanu. Na její velikost nebo změnu nelze usuzovat podle změny ostatních mechanických vlastností, protože je nejvíce závislá na obsahu vodíku v titanu. Za minimální hodnotu vrbové houževnatosti je možné považovat 50 J/cm^2 avšak u dostatečně čistého titanu může tato hodnota překročit i 100 J/cm^2 [2].

Mez únavy – u hladkých vzorků bývá hodnota meze únavy v ohybu větší než 50 % meze pevnosti v tahu. Záleží však velmi mnoho na jakosti povrchu. Vrubem se hodnota meze únavy snižuje v závislosti na jeho tvaru asi o 25 až 30 %. Předností titanu však je, že mez únavy se v korozních prostředích nesnižuje [2].

Změna vlastností při vyšších teplotách – ačkoli má titan vysoký bod tání, není vhodným materiálem pro vyšší teploty, protože rychle ztrácí pevnost. Proti ostatním technickým kovům je pokles mnohem výraznější a při teplotách vyšších než 300°C je pevnost titanu nižší než u běžných nízkouhlíkových ocelí i niklu. Klesá také hodnota modulu pružnosti [2].



Obr. č. 5: Mechanické vlastnosti titanu po tváření zastudena [14]

1.1.4.1. Vliv nečistot na vlastnosti titanu

Již malé množství přímíšenin výrazně ovlivňuje vlastnosti titanu. Přímíšeniny, které tvoří s titanem intersticiální tuhé roztoky⁵, jako je kyslík, dusík, uhlík a vodík, ovlivňují jeho vlastnosti podstatně intenzivněji než přímíšeniny, které s ním tvoří substituční tuhé roztoky⁶ [15].

Kyslík a dusík – dobře se rozpouštějí v obou krystalových modifikacích titanu. Výrazně stabilizují fázi α . Již při malé koncentraci (desetiny %) výrazně zvyšují pevnost, tvrdost a snižují tažnost a houževnatost. Dále snižují plastické vlastnosti titanu za studena a způsobují zkřehnutí. Vliv dusíku na mechanické vlastnosti je intenzivnější než vliv kyslíku [15, 16].

Uhlík – rozpouští se v titanu α i β pouze omezeně. Jeho rozpustnost je za normální teploty nižší než 0,25 %. Do tohoto obsahu uhlík mechanické vlastnosti titanu zvyšuje. Při vyšších koncentracích vytváří karbid titanu TiC. Protože má uhlík nepříznivý vliv na svařitelnost titanu, je obvykle jeho obsah ve slitinách udržován pod hodnotou 0,1 % [15, 16].

Vodík – nemá podstatný vliv na pevnost a tvrdost, pokud jeho obsah nepřekročí 0,03 %. Má však velký vliv na vrubovou houževnatost. Pokles vrubové houževnatosti je způsoben především stárnutím titanu obsahujícím vodík. Při stárnutí dochází k precipitaci hydridu titanu, jemuž je přisuzován nepříznivý vliv na zkřehnutí titanu, proto bývá obsah vodíku omezován na hodnoty menší než 0,01 %. Vodík lze z titanu odstranit žíháním ve vakuu při 800 až 900 °C po dobu 6 až 10 hodin [2, 15].

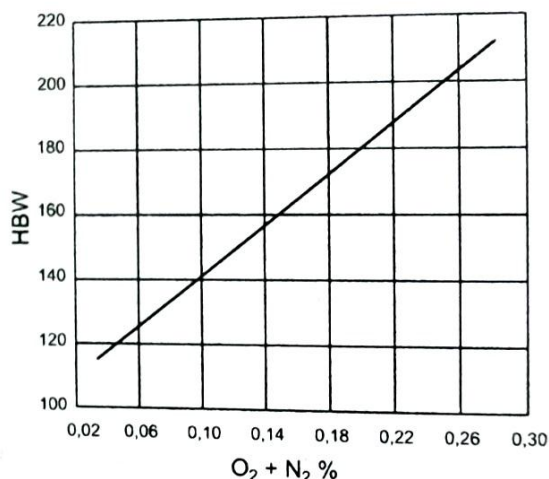
Železo – je obvyklou nečistotou technického titanu, do něhož se dostává při jeho redukci hořčíkem z kysličníku. Železo poněkud zvyšuje pevnost a tvrdost titanu a zhoršuje jeho tvárnost. Pokud ovšem obsah železa nepřekročí koncentraci 0,1 %, je jeho vliv na výsledné vlastnosti je zanedbatelný [15].

Křemík – do titanu se dostává podobně jako železo při jeho výrobě. Na pevnostní vlastnosti nepůsobí nikterak podstatně, má spíše vliv na zhoršování houževnatosti. Jeho obsah obvykle nebývá vyšší než 0,1 % [15].

Schopnost titanu reagovat za vyšších teplot a tím způsobený vysoký obsah nečistot, činily po dlouhou dobu obtíže při výrobě. Je nutné dbát na to, aby se obsahy příměsných prvků ve vyrobeném titanu pohybovaly v určeném intervalu, protože nečistoty mohou negativně ovlivnit výsledné vlastnosti. Jak již bylo uvedeno v předcházejícím textu, dovolené obsahy nečistot u titanu jsou velmi nízké, obvykle se pohybují v desetínách %. Nízký obsah především vzdušných plynů v titanu je možné dodržet za předpokladu jeho výroby a zpracování ve vakuu, či netečných atmosférách, což je příčinou jeho vysoké ceny. Technologické postupy při výrobě titanu budou podrobněji rozebrány v kapitole 2.

⁵ Intersticiální tuhý roztok - atomy přísadových prvků se umísťují do volných prostor krystalové mřížky základního kovu [12]

⁶ Substituční tuhý roztok - slitina, v níž atomy přísadového prvku nahrazují atomy základního prvku, nacházející se v uzlových bodech krystalové mřížky [12]



Obr. č. 6: Vliv obsahu O₂ a N₂ na tvrdost titanu [14]

1.1.5. Technologické vlastnosti titanu

Kromě mechanických vlastností jsou pro použití a zpracování titanových polotovarů neméně důležité i vlastnosti technologické [2].

Obrobitelnost – obrobitelnost titanu je horší než obrobitelnost ostatních kovů. Důvodem toho je poměrně vysoká pevnost, malá tepelná vodivost a velká schopnost pohlcovat kyslík a dusík při ohřevu v místě tvořící se třísky (absorpce kyslíku a dusíku způsobuje zkřehnutí povrchové vrstvy, viz. 1.1.4.1 Kyslík a dusík). Při obrábění titanu a jeho slitin nastává rychlé zpevnění povrchu, které způsobuje značné otupování nástrojů. Tvar třísky u titanu je takový, že styková plocha mezi nástrojem a obrobkem je malá. Tato okolnost, spolu s nízkou tepelnou vodivostí a vysokým koeficientem tření, způsobuje silné přehřívání slabé povrchové vrstvy na teploty až nad 1000 °C. Částičky titanu se tak při nevhodné geometrii bříty navařují na břit nástroje [2, 15].

Také broušení titanu je obtížné, protože zrna brusiva se brzy otupují, popřípadě vylupují. Kromě toho titan často chemicky reaguje s některými typy brusiva, což zavinuje rychlé opotřebování brusných kotoučů.

Běžné tekutiny používané k mazání i chlazení při obrábění oceli nezmenšují podstatně tření u titanu a také účinek většiny tuhých maziv, osvědčujících se u ocelí, je u titanu velmi malý.

Nástroje pro soustružení titanu jsou nejčastěji vyrobeny ze slinutých karbidů na bázi karbidu wolframu s kobaltem. Při frézování byly původní rychlořezné oceli nahrazeny speciálními nástroji s vložkami ze slinutých karbidů stejného typu jako při soustružení. Někteří autoři též doporučují lité nástroje ze stellitu⁷.

Další nepříznivou okolností při obrábění titanu je snadná vznětlivost vznikajícího titanového prachu, popřípadě jemných třísek.

Obrábění titanu je možné i přes tyto nepříznivé okolnosti za předpokladu, že jsou použity silnější stroje, které umožňují nízké rychlosti obrábění a větší posuvy, a že oblast řezu je intenzivně ochlazována. Důležité je také časté ostření nástrojů [2, 15].

⁷ Stellit – slitina kobaltu a chromu, může také obsahovat prvky jako W, Mo nebo C [17].

Obrábění titanu je obtížné, což je dalším faktorem zvyšujícím cenu výsledné součásti. Při přesném dodržení technologických postupů je však možné dosáhnout kvalitních výrobků.

Třecí vlastnosti – třecí vlastnosti titanu nejsou dobré. Chování materiálu při tření je obvykle určeno třemi veličinami, a to součinitelem tření, otěrem a náchylností k zadírání [2].

Součinitel tření – u titanu je koeficient tření vzhledem k většině ostatních kovů vysoký (0,65 až 0,68). Lze na něj standardními mazivy působit jen málo, což je způsobeno tím, že povrch titanu nemá dostatečnou absorpci molekul běžných maziv. Jako mazivo se tedy používá grafit, popřípadě sirník molybdeničitý, ale ani při použití těchto látek není mazání třecích ploch dostatečné. Součinitel tření lze také snížit povrchovou úpravou [2, 15].

Otěr – titan má ve srovnání s jinými běžnými materiály velký otěr. Tato vlastnost se prakticky nemění ani při různém obsahu nečistot, ani nezávisí na tvrdosti povrchu [2].

Náchylnost k zadírání - na rozdíl od většiny ostatních kovů se titan při pohybu často zadírá, což je způsobeno tím, že obvyklá povrchová vrstvička oxidu nebrání místnímu přivaření třecích ploch. Proto je výhodné zlepšit podmínky při tření buď umělým vytvořením kysličníkové vrstvy, nebo jinou chemickou úpravou titanu, například nitridací apod. [2].

Svařitelnost – za předpokladu, že svar je dokonale kryt ochrannou atmosférou, je svařitelnost dobrá. Díky jeho vysoké reaktivitě s plyny, není možné titan svařovat plamenem, dále nelze využít svařování obalenými elektrodami a ani svařování pod tavidlem, obsahuje-li tavidlo kyslíkaté sloučeniny. Nejčastěji se tedy používá svařování v argonu s wolframovou netavnou nebo tavnou elektrodou. Je však nutno používat obzvláště čistého argonu (99,7 % Ar) a jeho spotřeba je větší než při svařování jiných materiálů. Proto se někdy svařuje ve zvláštních komorách plněných netečným plynem. Vedle obloukového svařování se bez větších obtíží uplatňuje i svařování bodové nebo švové. Určité obtíže při svařování titanu pramení nejen z jeho velké reaktivní schopnosti, ale jsou také důsledkem jeho fyzikálních vlastností (nízká tepelná vodivost, velký měrný elektrický odpor, vysoká teplota tání) a v neposlední řadě také jeho fázové přeměny. Velmi obtížné je svařování titanu s jinými kovy [2, 15].

Pájení titanu – téměř ve všech případech je nutné pracovat s ochrannou atmosférou. Za použití vhodné pájky, například stříbrné, hliníkové, popřípadě jejich slitin, lze dobře spojovat titan s různými oceli i nerezavějícími a celou řadou neželezných kovů, což se běžně využívá i při plátování titanem [15].

Tvařitelnost – u titanu tvařitelnost závisí na chemickém složení, struktuře a podmínkách deformace. Čistý titan je dobře tvárný za tepla i za studena, kdežto většina jeho slitin má za studena tvařitelnost omezenou. Tvárnost při pokojové teplotě je obecně nižší, než u běžných konstrukčních materiálů, doprovodné prvky jako jsou kyslík a dusík ji však zvyšují. Podobně jako i u jiných kovů s hexagonální strukturou, vzniká i u titanu (α) při

tváření výrazná textura. Různé technologické postupy mohou rozsah textury omezit, avšak není možné ji zcela odstranit. Anizotropie vlastností způsobená texturou však může být i žádoucí. Je využívána například při konstrukci kotlů či tlakových nádob [2, 15, 18, 19].

Tváření za tepla – v zásadě lze říci, že při správné teplotě jsou čistý titan i jeho slitiny dobře tvárné a vhodné jak pro kování, tak i pro válcování. Obvyklé obsahy nečistot, zejména uhlíku, kyslíku a dusíku, nemají podstatný vliv na změnu tvářitelnosti za tepla [2].

Tváření za studena – protože při tváření titanu a jeho slitin za studena dochází k výraznému zpevňování, je nutné provádět žíhání. Žíháním se vrátí kovu jeho původní tvařitelnost [19].

1.1.6. Deformační vlastnosti titanu

Ve struktuře HCP se vyskytuje pouze jediný systém těsně uspořádaných rovin {0001} ve kterých leží tři směry s těsným uspořádáním. Pravděpodobnost, že při zatěžování zrna s touto strukturou bude úhel normály skluzové roviny Φ a úhel směru skluzu λ blízký 45° je malá. Z tohoto důvodu se krystal často poruší štěpně dříve, než může dojít k plastické deformaci. Dobrá tvárnost titanu a jeho slitin se strukturou α pozorovaná i za nízkých testovacích teplot, je výsledkem kombinace deformací skluzem dislokací a dvojčatění. Režimy dvojčatění jsou důležité pro deformační chování komerčně čistého titanu a některých jeho α slitin. Ačkoliv dvojčatění je potlačené téměř úplně ve dvoufázových $\alpha+\beta$ slitinách, díky vysokému obsahu přísadových prvků a přítomnosti Ti_3Al precipitátů, tyto slitiny mají dobrou tvárnost za nízkých teplot díky jejich jemnozrnné struktuře [8, 6, 20].

Deformace skluzem dislokací

Slip system	Burgers vector type	Slip direction	Slip plane	No. of slip systems	
				total	independent
1	$\bar{a}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	(0002)	3	2
2	$\bar{a}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{10\bar{1}0\}$	3	2
3	$\bar{a}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{10\bar{1}1\}$	6	4
4	$\bar{c} + \bar{a}$	$\langle 11\bar{2}3 \rangle$	$\{10\bar{1}1\}$	12	5

Tab. č. 3: Skluzové systémy v HCP struktuře α -Ti [6]

V tabulce č. 3 jsou uvedeny skluzové systémy ve struktuře α -Ti. Tři z těchto systémů, které mají stejný a typ Burgesova vektoru, dohromady tvoří 8 nezávislých skluzových systémů. Nicméně, toto číslo se sníží pouze na 4 systémy, protože změny tvaru, které jsou umožněny kombinací systémů 1 a 2 jsou stejné, jako změny tvaru možné díky systému 3. V žádném případě tedy není možné prodloužení rovnoběžné s osou c . Nicméně, aby bylo splněno von Misesovo kritérium, které požaduje nejméně 5 nezávislých skluzových systémů pro homogenní plastickou deformaci polykrystalů, musí být aktivována činnost jedno ze skluzových systémů {1011} který má $c+a$ Burgesův vektor. Toto deformační chování bylo pozorováno u mnoha titanových slitin [6].

Deformace dvojčatěním

Dvojčatění se uplatňuje jako doplňující deformační mechanismus tehdy, když nejsou funkční skluzové systémy. Typickým příkladem uplatnění deformace pomocí dvojčatění je

Krystalová mřížka	FCC	BCC	HCP
Kritické skluzové napětí [MPa]	0,3 až 0,8	30 až 80	0,3 až 0,8
Počet skluzových systémů	12 (> 5)	48 (> 5)	3 (< 5)
Příčný skluz je	možný	možný	nemožný
Výsledná materiálová vlastnost	tvárnost	pevnost	relativní křehkost

16

1.1.7. Příznivé vlastnosti titanu a jeho slitin [1, 21]

- nízká měrná hmotnost
- vysoká měrná pevnost - měrná pevnost titanu je srovnatelná, případně i vyšší, s měrnou pevností ocelí a to i za vyšších teplot
- výborná korozivzdornost - tvorba ochranné povrchové vrstvy oxidu TiO_2
- mimořádná chemická stálost - je netečný k působení vody a atmosférických plynů, odolává působení většiny běžných minerálních kyselin i roztoků alkalických hydroxidů. Pro jeho rozpouštění je nejúčinnější kyselina fluorovodíková HF.
- možnost konstrukčního použití i za teplot pod bodem mrazu
- výborná biokompatibilita

1.1.8. Nepříznivé vlastnosti titanu a jeho slitin [1, 21]

- vysoká reakční schopnost při zvýšených teplotách
- vzájemné působení téměř se všemi plyny nad teploty $600\text{ }^{\circ}\text{C}$
- obtížné obrábění
- vysoké náklady na výrobu a zpracování – nákladné tavení a odlévání ve vakuu nebo v ochranné atmosféře argonu
- obtížné tavné svařování
- nízký modul pružnosti ($E = 115\text{ GPa}$)
- špatné třecí vlastnosti
- nemožnost zpracování vratného odpadu drahého materiálu ve větším množství

1.2. Komerčně čistý titan

Komerčně čistého titanu se vyrábí několik druhů, které se odlišují dovozeným obsahem příměsných prvků a díky tomu i svými mechanickými vlastnostmi. V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé druhy titanu, jejich označení, mechanické vlastnosti a oblasti použití.

Druh titanu	R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A [%]	Vlastnosti a použití
Titan grade 1 3.7025	290 – 410	170 - 310	30	druhý nejpoužívanější, vynikající tažnost a svařitelnost, nižší pevnost
Titan grade 2 3.7035	390 – 540	275 – 450	22	nejpoužívanější, vyvážená kombinace tažnosti spolu s dostatečnou pevností, velmi dobrá svařitelnost
Titan grade 3 3.7055	460 - 590	380 – 550	18	méně obvyklý druh, střední tažnost, zvýšená pevnost, velmi dobrá svařitelnost
Titan grade 4 3.7065	540 – 740	483 – 655	16	méně obvyklý druh, nejnižší tažnost, zvýšená pevnost, velmi dobrá svařitelnost

Titan grade 7 3.7235	390 – 540	275 – 450	22	méně obvyklý druh, zvýšená korozní odolnost, mechanické hodnoty stejné jako grade 2, velmi dobrá svařitelnost
Titan grade 11 3.7225	290 - 410	170 - 310	30	méně obvyklý druh, zvýšená korozní odolnost, mechanické hodnoty stejné jako grade 1, velmi dobrá svařitelnost

Tab. č. 5: Druhy komerčně čistého titanu [22]

1.3. Historie titanu a jeho slitin

Titan byl objeven roku 1791 anglickým pastorem a amatérským geologem Williamem Gregorem v minerálu ilmenitu. Nezávisle byl německým chemikem Martinem Heinrichem Klaprothem objeven v roce 1795 oxid titanu v rutilu z Maďarska. Připravit dostatečně čistý kovový titan se však dlouho nedařilo. Podařilo se to teprve r. 1910 M. A. Hunterovi. Uplynulo však ještě dalších 40 let, než W. Kroll vypracoval provozní metodu výroby. Praktické průmyslové využití titanu se datuje až od roku 1948. Potom světová výroba prudce stoupala a v mnohém připomínala začátky výroby hliníku a hořčíku. Zprvu se využívalo vlastností titanu jen ve vojenské technice a byl považován za strategický kov. Teprve po roce 1957 se začal titan uplatňovat v některých oborech průmyslu. V roce 1961 byla světová výroba čistého titanu jen asi 15 000 t, avšak v letech 1970 až 1975 dosáhla nejméně 60 000 t ročně. Přibližně do 60. let minulého století byla výroba kovového titanu soustředěna pouze v bývalém SSSR [1, 2].

1.3.1. Historie výroby titanu

Rychlý rozvoj využití titanu zejména v letectví a raketové technice přinesl s sebou i rozsáhlý výzkum jeho vlastností a vývoj nejrůznějších slitin. Bylo vypracováno více než 100 typů slitin, do běžné výroby však bylo zavedeno pouze několik základních typů. Postupně se rozšířilo použití čistého titanu v například chemickém průmyslu a titanové slitiny začaly být hojně využívány také ve strojírenství. Sortiment vyráběných slitin se stabilizoval v sedmdesátých letech, pokračoval však výzkum nových slitin, zejména pro použití za zvýšených teplot [4].

1.3.2. Současná výroba titanu

V české republice titan a slitiny titanu nejsou normovány. Používají se materiály dovážené přednostně z bývalého SSSR, a to i s převzatým označením. Výjimkou je slitina POLDI T90 (ruská VT6), POLDI T110 (ruská VT3-1) a titan technické čistoty POLDI T45 (ruský VT1-0), jejichž výroba z ruských surovin a tváření pro potřeby chemického průmyslu byly zvládnuty v nevelkém rozsahu, avšak ve vyhovující kvalitě v POLDI Kladno. Dnes však

již výroba v této huti neexistuje. V současné době jsou největšími producenty titanové houby⁸ Rusko, USA, Japonsko a Čína [21, 3, 2].

1.4. Současné směry ve vývoji titanových slitin

V současnosti titanové slitiny pracují do teploty 580°C. Vyvíjejí se však nové slitiny, které by mohly pracovat i za teplot vyšších, a to při aplikaci technologie výroby práškovou metalurgií. Pro součásti s teplotou funkce 600°C a vyšší by bylo možné použít i některé stávající slitiny s ochrannými povlaky proti oxidaci. Uvažuje se i o použití intermetalických sloučenin titanu, které mají vysokou žáruvzdornost až do 900°C [21].

Vývoj slitin titanu současně probíhá i v oblasti zpracovatelských technologií. Ukazuje se, že tato cesta k dosažení lepších vlastností je snadnější a slibnější než samotný materiálový vývoj. Výroba ingotů z titanových slitin dosud nedospěla do kontinuálního lité, i když základní předpoklad zavedení tohoto metalurgického postupu je vytvořen vakuovým tavením do zásobníku. Nové metalurgické postupy spočívají v tavení plazmatem nebo elektronovými paprsky s přeléváním taveniny do krystalizátoru [21, 23].

Podstatně větší tvarovou a rozměrovou přesnost spolu s lepšími vlastnostmi přináší izotermické tváření a tváření v superplastickém⁹ stavu. Také prášková metalurgie umožňuje vyrábět z běžných slitin titanu polotovary složitých tvarů blízkých ke tvarům a rozměrům finálního výrobku, jejichž mechanické vlastnosti se přinejmenším rovnají vlastnostem obvyklých polotovarů. Hlavním problémem je však obtížná a nákladná výroba prášků, které jsou charakteristické svou vysokou reaktivitou se vzdušnými plyny [21, 23].

Další očekávaný vývoj slitin titanu by tedy mohl být zaměřen do následujících směrů:

- zdokonalení klasické i práškové metalurgie
- vývoj a provozní ověření nových žáropevných slitin a materiálů na bázi intermetalických fází
- povrchové úpravy včetně povlakování a tepelných úprav koncentrovanými zdroji energie
- vývoj slitin TiNi na materiály s tvarovou pamětí
- tvorba matric Ti a jeho slitin pro kompozity s vlákny Be, Mo a SiC
- modifikace původní slitiny Ti64 (v ČR Poldi T90) na biomedicínské aplikace

[23, 22]

⁸ Titanová houba – základní produkt při výrobě titanu vzniklý redukcí chloridu titaničitého (viz. 2.2.1.2 Redukce titanové houby)

⁹ Superplasticita - anomálně vysoká tažnost do lomu některých materiálů, například slitin Zn, v jistém oboru teplot, rychlostí deformace a velikostí zrna (pod 10 μm). Potenciálně využitelná v průmyslu pro snadné tváření za studena [12]

2. Výroba titanu

Jak již bylo zmíněno, výroba titanu je náročná. Důvodem je zejména jeho vysoká reaktivita za vyšších teplot. Při nízkých teplotách je povrch titanu pokryt ochrannou vrstvou TiO_2 , která se ovšem po dosažení teploty 535°C rozpadá a titan se stává velmi náchylný k působení okolního prostředí. Titan silně reaguje s běžnými plyny, jako jsou uhlík, kyslík, dusík a vodík, ale i se žáruvzdornými materiály. Tyto reakce jsou nežádoucí, proto je nutno titan vyrábět ve vakuu, nebo v ochranné argonové atmosféře, což jeho výrobu prodražuje. Dnes nejčastěji využívaným postupem výroby je takzvaný Krollův proces [1, 5].

V České republice se titan nevyrábí, především z důvodů náročnosti výroby, ale také díky nedostatku surovin, který by měl za následek velmi vysokou cenu. Titan a jeho slitiny se tedy nakupují od zahraničních výrobců a to i s převzatým označením. Jednotlivé suroviny sloužící pro výrobu i používané způsoby výroby jsou podrobněji popsány v následujícím textu.

2.1. Suroviny pro výrobu titanu

Velký obsah titanu v zemské kůře lze snadno vysvětlit tím, že velmi mnoho minerálů obsahuje v různém množství jeho sloučeniny. Ty se vyskytují ve všech vyvřelinách, usazeninách, ale také v hlíně, v rašelině i v uhlí, a dokonce i v rostlinách. V přírodě existuje asi 80 základních titanových minerálů, v nichž se titan vyskytuje převážně v podobě TiO_2 nebo různých titaničitanů, v ostatních pak ponejvíce v podobě křemičitanů. Pro praktické využití mají však význam pouze rutil, ilmenit, perovskit a sfen. Ostatní suroviny pro průmyslovou praxi význam nemají [2].

- **rutil** – je nejbohatším titanovým minerálem, je to v podstatě kysličník titaničitý, znečištěný kysličníkem železnatoželezitým. Jedná se stejně jako u anatasu a brookitu o oxid titaničitý; liší se ovšem uspořádáním krystalové struktury, takže i jeho vlastnosti jsou odlišné. Bohatá ložiska rutilu se vyskytují jen ojediněle, proto je jeho cena vysoká. Nejvíce rutilu se spotřebuje k výrobě titanové houby a jako přísady do obalů svařovacích elektrod. Vzhledem k vysoké ceně se rutil nehodí k výrobě titanové běloby [2, 24].
- **ilmenit** – jedná se o titaničitan železnatý (FeTiO_3) s obsahem titanu 40 až 60 % podle konkrétního naleziště. Ilmenit se dostává do popředí zájmů jako titanová surovina jak pro výrobu titanové běloby, tak i ferotitanu¹⁰, kde se současně využívá i obsahu železa. Výhodou je levná těžba ilmenitu, neboť doly jsou většinou povrchové a ložiska jsou jen v malé hloubce pod povrchem. Cena ilmenitu se řídí obsahem TiO_2 , avšak můžeme říct, že cena výroby titanu z ilmenitu je 2 - 4 x levnější než z rutilu [2, 11].
- **titanit – sfen** – je titanokřemičitan vápenatý $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$. Obsah TiO_2 je menší než u ilmenitu a těžba i zpracování mají význam jen tehdy, lze-li jej těžít a komplexně využít zároveň s jinými rudami [2].

¹⁰ **ferotitan** - slitina železa s obsahem až 75 % titanu a 2 % hliníku. Používá se k dezoxidaci a jako přísada do korozivzdorných a žárovzdorných ocelí. [12]

- **perovskit** – je metatitaničitan vápenatý $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$. Jeho krystalická mřížka je rombická a jeho výskyt v přírodě není příliš častý. Naleziště tohoto minerálu jsou například v USA, Rusku, Švýcarsku nebo Německu [2, 25].
- **anatas a brookit** - uvedené minerály anatas a brookit, stejně tak jako rutil jsou chemicky naprosto totožné. Liší se tím, jak jsou atomy titanu a kyslíku v jejich krystalové struktuře uspořádány. Říkáme, že souměrnost krystalů anatasu a rutilu je tetragonální (jejich struktura se ovšem liší), souměrnost krystalů brookitu je rombická. Těmito rozdíly jsou dány i rozdílné vlastnosti všech tří minerálů, zejména jejich vzhled [24].



Obr. č. 9: Ilmenit [26]



Obr. č. 10: Rutil [27]



Obr. č. 11: Titanit - sfen [28]



Obr. č. 12: Perovskit [25]

V malé koncentraci se titan vyskytuje v mořské vodě, ale také v popelu z uhlí, v rostlinách nebo lidském těle. Významně je zastoupen také na měsíčním povrchu, horniny, které získala mise Apollo 17 obsahují přibližně 12 % TiO_2 . Titan se těží často z pobřežních písků, tzv. rozsypů, kde je možné nalézt až 50 % koncentrace veškerých titanových rud. Mezi největší producenty titanu patří Austrálie, Čína, Japonsko, Ukrajina, Kanada, Skandinávie nebo Malajsie. Významná ložiska titanových rud se dále nacházejí např. ve Velké Británii, Vietnamu, USA, Indii, Brazílii či Jižní Africe [3, 29].

2.2. Způsoby výroby titanu

První dvě tuny titanové houby se vyrobily v poloprovozním zařízení v USA v r. 1947. Převážná část kovového titanu se vyrábí tzv. Krollovým procesem. Stěžejní operací tohoto postupu je redukce chloridu titaničitého hořčíkem nebo sodíkem. Podobnou technologií se zpracovávají všechny minerály titanu. Rozkladu koncentrátů kyselinou sírovou dnes používají pouze chemické závody vyrábějící titanovou bělobu. Jak již bylo uvedeno, obtíže při výrobě titanu (průmyslová výroba titanu je jedna z nejmladších) působí jeho značná reaktivnost s kyslíkem, dusíkem a vodíkem, které i při velmi malém obsahu zvyšují jeho tvrdost a křehkost a snižují jeho tvařitelnost [3, 30].

2.2.1. Krollův proces

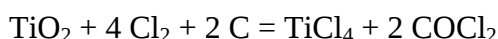
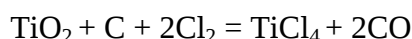
Tato metoda výroby titanu byla vypracována v letech 1937 – 1942 Lucemburským vědcem Wiliamem Justinem Krollem a jako první byla poloprovozně zavedena v USA v letech 1946 – 1948 [2, 31].

Průmyslová výroba titanu se skládá ze čtyř základních operací [3]:

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

2.2.1.1. Příprava surovin pro výrobu titanu

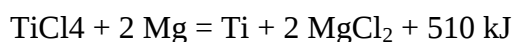
Chlorid titaničitý se volně v přírodě nevyskytuje, a proto, chceme-li z něho při výrobě titanu vyjít, je nutno ho předem vyrobit. Nejobvyklejší surovinou pro jeho výrobu je rutil a ilmenitová struska. Reakční schéma lze pak znázornit následujícími rovnicemi:



Chlorid titaničitý uniká v párách a jímá se v kondenzátorech jako nažloutlá kapalina. Před vlastní redukcí se chemicky čistí od průvodních kovů (Fe, V, Si) a znovu se destiluje [2, 30].

2.2.1.2. Redukce titanové houby

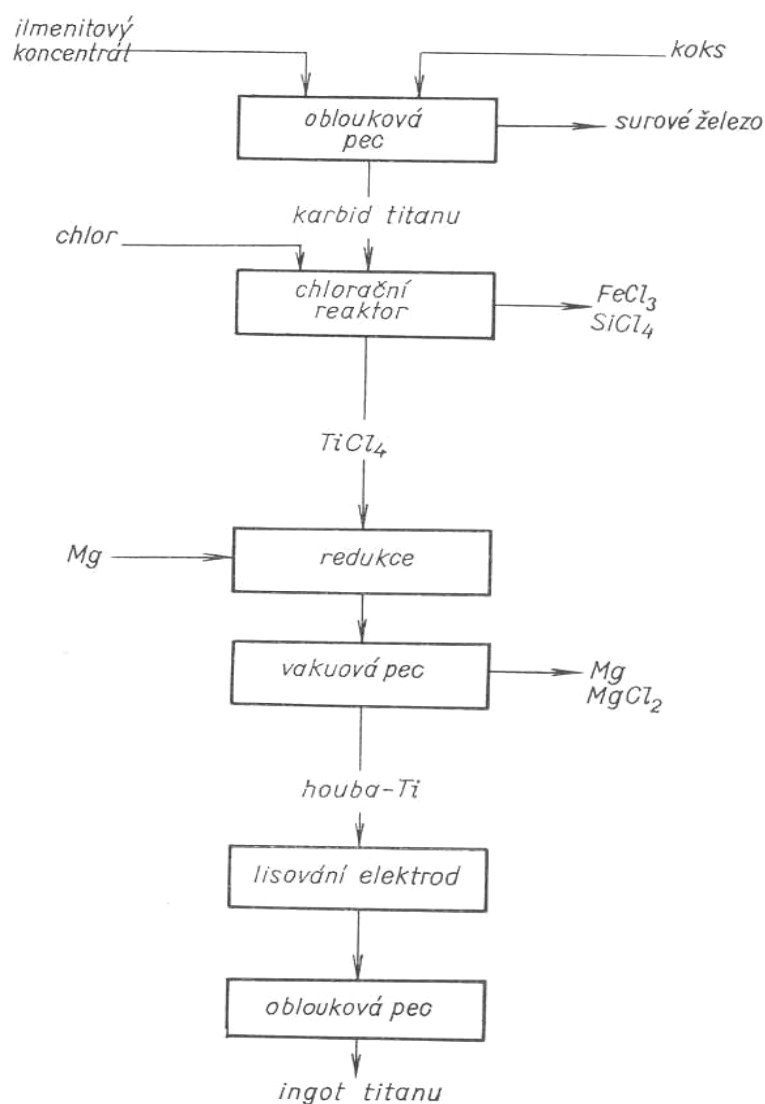
Chlorid titaničitý lze redukovat na kovový titan buď hořčíkem, nebo sodíkem. Nejrozšířenější je **redukce hořčíkem**, která probíhá v kelímcích pod ochrannou atmosférou argonu nebo hélia. Metoda je založena na pozvolném připouštění chloridu titaničitého do roztaveného hořčíku, při teplotě 850 až 920°C. Reakce probíhá podle následující rovnice:



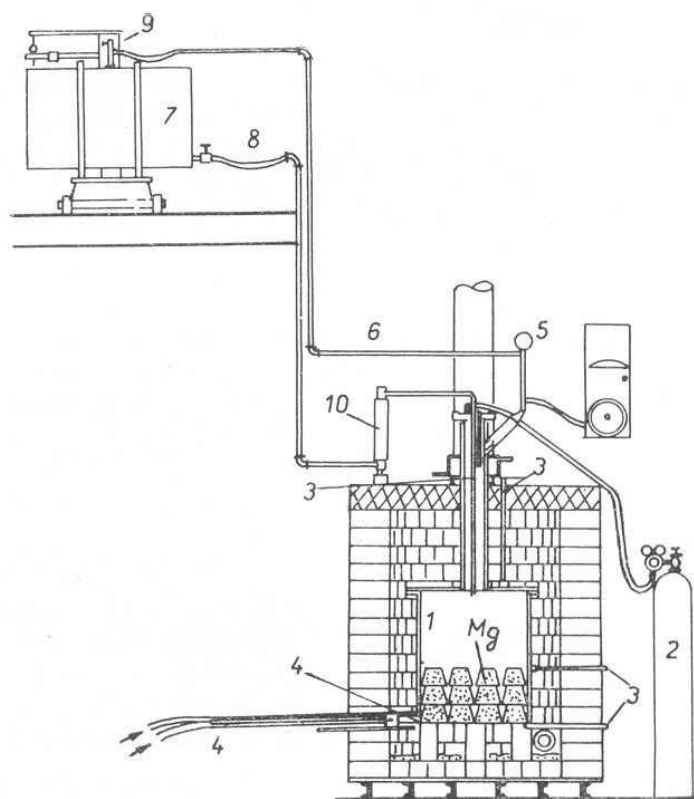
Po ukončení reakce musí titanová houba vychladnout v atmosféře inertního plynu. Při reakci vzniklý chlorid hořečnatý a zbytky hořčíku se odstraňují buď chemicky - loužením zředěnou

kyselinou solnou, nebo častěji vakuovou destilací. Vyredukovaný kov vytváří na stěnách kelímků nebo vložek vrstvu Ti houby [2, 30].

Druhou možností je **redukce chloridu titaničitého sodíkem (tzv. Hunterův proces)**, používaný především v USA a Velké Británii. Tento způsob se v podstatě podobá pochodu Krollovu, má však proti němu nevýhodu v tom, že je nutno těsně před redukcí sodík vakuově destilovat. Naproti tomu je výhodné, že redukce probíhá za nižší teploty a že se vznikající titan nepřivaruje na stěny reakční nádoby, takže je usnadněno jeho vyjímání [2, 30, 6].



Obr. č. 13: Schéma výroby titanu Krollovou metodou [30]



Obr. č. 14: Zařízení pro výrobu titanu podle Krolla

(1 - kelímek s víkem, 2 – bomba s argonem, 3 – termoelektrické články, 4 – otvor na odpouštění MgCl_2 s chladicím zařízením, 5 – manometr, 6 – trubka na vyrovnání tlaku, 7 – nádrž na TiCl_4 , 8 – trubka na dávkování TiCl_4 , 9 – ochranný uzávěr, 10 – měřidlo množství TiCl_4)

[30]

2.2.2. Výroba titanu elektrolýzou

Chemické vlastnosti titanu předem vylučují možnost elektrolýzy z vodných roztoků. Zkoumalo se tedy, zda nelze připravit titan elektrolýzou roztavených solí, přičemž výchozí látkou mohou být různé sloučeniny, například kysličník titaničitý, který je možno rozpustit v fosfátových, nebo boritanových lázních. Je ovšem obtížné odstraňovat kysličník titaničitý z vyloučeného titanu. Byly tedy vypracovány i metody elektrolýzy TiCl_4 ve dvoustupňovém elektrolýzéru. Elektrolýtem je roztavená lázeň chloridu strontnatého a sodného nebo jen chloridu sodného, do níž se přivádí chlorid titaničitý. Výhodou některých způsobů elektrolýzy je možnost dosáhnout velmi dobré jakosti titanu. Dosud však žádný elektrolýtický postup není tak propracován, aby mohl soutěžit s redukční cestou. V poloprovozním měřítku se uplatňuje elektrolýza ke zpracování odpadů polotovarů z titanu a zejména jeho slitin [2].

2.2.3. Ostatní způsoby výroby titanu

Ve snaze zlevnit i zjednodušit výrobu titanu bylo vypracováno mnoho dalších způsobů výroby. Za zmínku stojí rafinace titanu jodidovým způsobem, která se používá k výrobě velmi čistého titanu, hlavně pro laboratorní účely. Dalšími příklady mohou být redukce chloridu titaničitého vodíkem či termický rozklad chloridu titanatého TiCl_2 . Žádná z těchto metod však zatím nebyla vyvinuta do fáze použitelné v průmyslové výrobě a nemůže konkurovat redukcí hořčíkem nebo sodíkem. Zatím pouze elektrolýza by měla šanci uspět v širším měřítku, ale až po zdokonalení výrobních metod [2, 32].

2.2.3.1. Redukce chloridu titaničitého vodíkem – jedná se o redukci v elektrickém oblouku, která by umožňovala získávat přímo kovové ingoty. Největší problém ovšem je v regeneraci nadbytečného i vázaného vodíku, protože jinak je pochod nehospodárný [2].

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

2.2.4. Tavení titanu a jeho slitin

Redukcí vyrobená titanová houba i kovový titan získaný elektrolýzou nejsou vhodné přímo pro další využití, ale je třeba je převést tavením na hotové odlitky nebo ingoty, které se následně budou tvářet. Při tavení titanu působí velké potíže jak reakce s obecnými plyny, tak vysoká teplota tání a silná reakce se všemi běžnými materiály vyzdívek. Jako nejvhodnější materiál se ukázal grafit, a to díky jeho nízké ceně a možnosti jeho obrábění do požadovaných tvarů. Nevýhodou ovšem je, že se grafit v titanu rozpouští, čímž dochází ke zvýšení jeho tvrdosti a snížení tažnosti. Vyšší obsah uhlíku v titanu komplikuje jeho následné zpracování tvářením. W. Kroll volil k tavení titanu elektrickou obloukovou pec s měděným, vodou chlazeným krystalizátorem. Při tavení titanu se obvykle pracuje ve vakuu, nebo v atmosféře argonu, aby nedocházelo k reakcím se vzdušnými plyny [30, 2, 32].

V současnosti se slitiny titanu přetavují v těchto typech pecí [33]:

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

2.2.4.1. Elektronová pec – tavení titanových slitin v této peci se děje pomocí svazku elektronových paprsků, dopadajících na materiál určený k přetavení, který se díky vysoké kinetické energii elektronů zahřívá. Svazek elektronů se pohybuje pouze ve vysokém vakuu (min. 10^{-3} Pa), proto jde vždy o pece vakuové. Elektronové tavení je stále více používané, důvodem je získání kovu nejvyšší kvality [2].

2.2.4.2. Plasmová pec – pracuje na principu ionizace plynu. V plazmovém hořáku se molekuly přiváděného inertního plynu (argonu) ionizují a při

styku s kovem opět slučují. Proces slučování je doprovázen značným vývinem tepla, které se předává tavenému kovu [33].

2.2.4.3. Elektrická oblouková pec – v současnosti nejvyžívanější tavení titanu je ve vakuových elektrických obloukových pecích. Tavení je uskutečňováno elektrickým obloukem, hořícím z počátku mezi titanovou elektrodou a kouskem titanové houby položené na dně krystalizátoru. Teplem oblouku se vytvoří na dně krystalizátoru tavenina a oblouk nadále hoří mezi elektrodou a taveninou. Titanové elektrody jsou tavné a vyrábějí se lisováním z titanové houby [2, 6].

2.2.4.4. Elektrická indukční pec - při recyklaci titanu a výrobě odlitků je také používána pec indukční s grafitovým kelímkem. Princip i uspořádání je obdobné jako u elektrické obloukové pece, elektroda je však netavná, wolframová nebo grafitová. Oblouk hoří mezi touto elektrodou a taveninou, přičemž se do oblouku přidávají postupně (ze zvláštního zásobníku) kousky titanu, které se teplem oblouku taví [2, 32].

Tavení titanových slitin pomocí plasmy a elektronového paprsku řadíme mezi moderní způsoby tavení s přeléváním taveniny do krystalizátoru přes příhradový žlab, ze kterého vytéká klidný proud taveniny malého průřezu zabezpečující zlepšení metalurgické čistoty [33].

Současná technologie výroby slitin titanu, dovoluje produkci ingotů, které mají průměr mezi 750 a 900 milimetry. Tyto ingoty mohou vážit až 5 000 Kg. Pro konstrukční použití je prvotně vyrobený ingot podruhé vakuově přetaven, aby došlo ke zlepšení jeho kvality a dosažení chemické homogenity. Pro vysoce namáhané konstrukční aplikace, jako jsou například rotační součásti proudových motorů, je materiál obvykle přetavován dvakrát. Tímto způsobem je dále zvyšována chemická homogenita a dojde k odstranění, či minimalizaci výskytu vad souvisejících s tavením [6].



Obr. č. 15: Titanová houba [34]



Obr. č. 16: Titanové ingoty [34]

Specifications

Grade A

(%)

Product No.	Mn	Fe	Mg	N	Si	C	H	O	Cl	Ti (min.)
	(max.)									
1 (TST-P)	0.005	0.04	0.04	0.008	0.02	0.01	0.003	0.04	0.08	99.7
2 (TST-1)	0.005	0.04	0.04	0.01	0.02	0.01	0.003	0.05	0.08	99.7
3 (TST-2)	0.005	0.06	0.05	0.01	0.02	0.01	0.004	0.05	0.10	99.6
4 (TST-3)	0.010	0.08	0.06	0.01	0.02	0.02	0.005	0.06	0.12	99.4

Tab. č. 6: Tabulka obsahu příměsných prvků v čistém titanu (výrobce TOHO Titanium CO.,LTD, Japonsko) [34]

3. Slitiny titanu

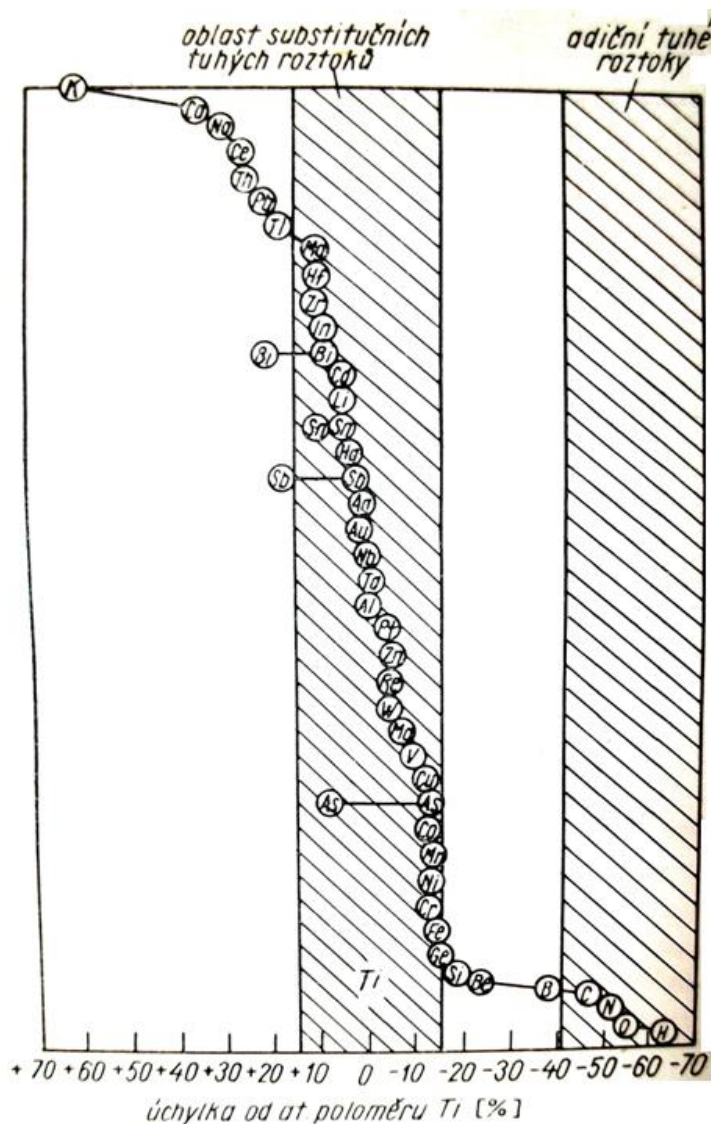
Jakmile byly zjištěny vlastnosti čistého titanu, začalo se zkoumat, jakými způsoby by bylo možné je zlepšit. Vývoj titanových slitin byl velmi rychlý a z počátku byl omezen pouze na SSSR a USA, teprve později se na rozvoji podílely i práce anglické. Po prvních úspěšných pracích se rozvinul rozsáhlý výzkum jednak základních rovnovážných diagramů s různými prvky, jednak některých jednoduchých i složitějších slitin empirického složení, z nichž mnohé se začaly vyrábět a jiné se dále zdokonalovaly. Přitom vývojové směry v jednotlivých zemích nebyly vzájemně propojeny, a tak pro poznání základních rovnovážných diagramů a vlivu prvků na vlastnosti slitin bylo v laboratořích připraveno velké množství slitin. Pro praktické využití bylo nutno zvládnout nejen řadu technologických problémů, ale důkladně ověřit vlastnosti, jejich reprodukovatelnost a stabilitu nejen na zkušebních tyčích, ale i součástkách nebo konstrukčních dílech, často značně rozměrných. Vývoj nových slitin titanu stále probíhá, jedná se především o slitiny pro zvláštní aplikace [21] [m3] [2].

3.1. Rozdělení slitin titanu

Titan tvoří slitiny s mnoha prvky. Z kovových prvků jen kovy alkalické a žíravých zemin a některé vzácné kovy (např. Th, Ce) se značně odchyľují velikostí svých atomových poloměrů od titanu a nejsou tedy vhodné pro přípravu slitin. Ostatní prvky tvoří s titanem substituční tuhé roztoky¹¹ (významné jsou především kovy V. a VI. třídy). Některé kovy se však pro legování nehodí z fyzikálních důvodů, buď pro velký rozdíl bodu tání, nebo pro vysoký parciální tlak par při legování. Jedná se zejména o antimon, arzén, kadmium, olovo,

¹¹ substituční tuhý roztok - slitina, v níž atomy přísadového prvku nahrazují nahodile atomy základního prvku, nacházející se v uzlových bodech krystalové mřížky [12].

rtuť a zinek. Plynné prvky jako vodík, kyslík, dusík a potom tvoří s titanem adiční tuhé roztoky¹² [2].



Obr. č. 17: Poměrné velikosti atomových poloměrů různých prvků k titanu [2]

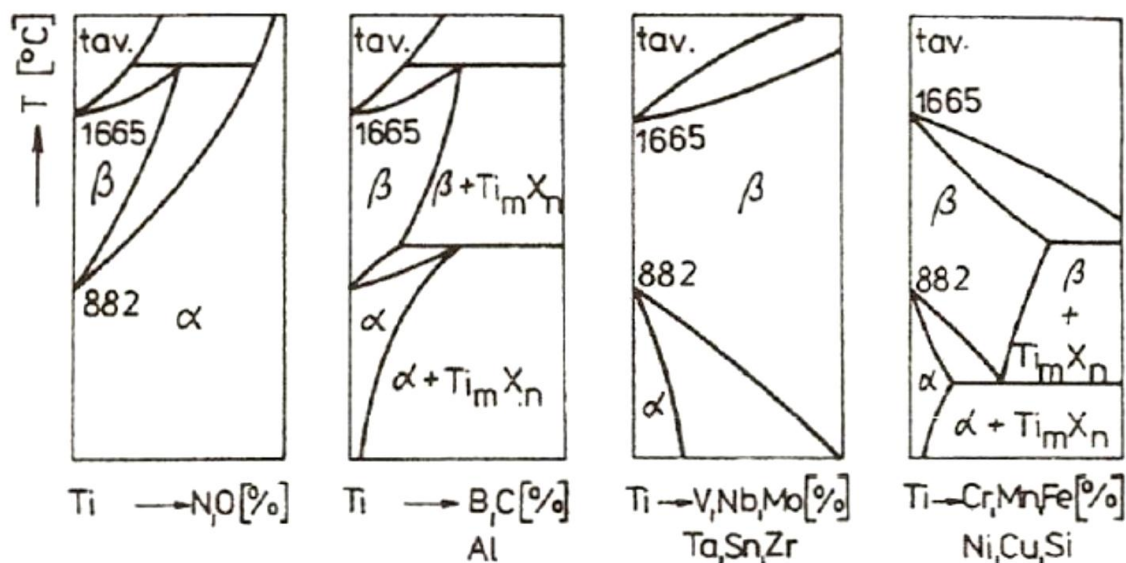
Při rozdělování titanových slitin lze vycházet z mnoha hledisek, avšak nejobvyklejší je rozdělení podle struktury v rovnovážném stavu. Titan má dvě alotropické modifikace, titan α s mřížkou HCP – hexagonální, stabilní do 882,5 °C a titan β s mřížkou BCC – kubická prostorově středěná, která je stabilní od 882,5 °C do teploty tání [21, 2].

Přísadové prvky se v obou modifikacích titanu rozpouštějí úplně nebo částečně a tvoří roztoky α a β , které mají zachovanou mřížku 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 metastabilní fáze martenzitického typu. Nerovnovázné fáze ve slitinách označujeme α' , α'' , ω , β' a β_m . Legující prvky mají silný vliv na teplotu alotropické přeměny. Některé prvky transformační teplotu zvyšují a tím rozšiřují oblast α , nazývají se pak α stabilizátory, jiné prvky naopak tuto teplotu

¹² adiční (intersticiální) tuhý roztok - atomy některých přísadových prvků umístěné do volných prostorů mřížky základního kovu [12].

snižují a rozšiřují oblast β fáze, nazývají se β stabilizátory. Žádný vliv na transformační teplotu nemají Sn a Zr [21, 23, 22].

- **α stabilizátory** – Al, O, N, C – praktický význam jako α stabilizátor má pouze hliník, protože ostatní prvky, jak již bylo uvedeno, jsou nečistoty zhoršující mechanické vlastnosti a je třeba udržet jejich obsah minimální [21].
- **β stabilizátory** – V, Nb, Mo, Ta – při dostatečně vysokém obsahu těchto prvků tuhý roztok β zůstává zachován až do normální teploty jako fáze stabilní, nebo se při nízké teplotě rozpadá eutektoidní přeměnou – Cu, Si, Cr, Mn, Fe, Co, Ni [21].



Obr. č. 18: Základní druhy binárních rovnovážných diagramů

(a), b) – prvky zvyšující transformační teplotu, c), d) – prvky snižující transformační teplotu) [23]

Přestože titan může vytvářet slitiny s mnoha prvky, praktické využití pro výrobu mají, jak již bylo uvedeno v předcházejícím textu, pouze některé. V následujících odstavcích bude podrobněji rozebráno rozdělení slitin titanu podle výsledné struktury, vlastnosti a chemické složení vybraných slitin, ale také speciální slitiny titanu, které jsou výjimečné jak svými vlastnostmi, tak i oblastí použití.

Podle konečné struktury, vytvořené při pomalém ochlazování z teploty žhání, se slitiny dělí na [21]:

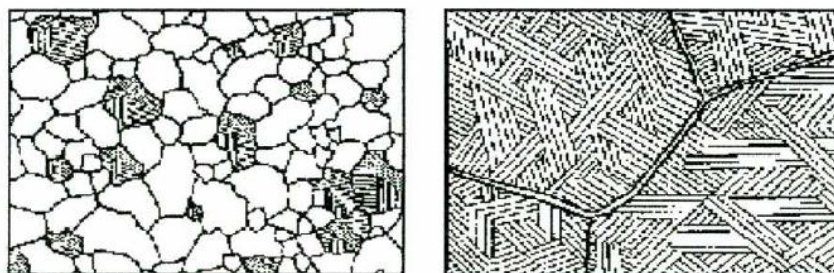
- slitiny α
- slitiny pseudo α (obsahují max. 6 hm. % fáze β)
- slitiny $\alpha + \beta$
- slitiny pseudo β (obsahují malá množství fáze α)
- slitiny β

3.1.1. Slitiny typu α – kromě α 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 velmi nízkých teplot. Mají dobrou žáropevnost do 300 °C. Jsou také dobře svařitelné. K jejich nepříznivým vlastnostem patří omezená tvárnost za studena. Obsah hliníku se obvykle pohybuje kolem 7 hm. %, protože při vyšších hodnotách se slitiny stávají

křehkými. Optimální vlastnosti mají tyto slitiny při obsahu asi 5 hm. % Al a 2 až 3 hm. % Sn. Nejvýznamnější slitinou této skupiny je TiAl5Sn2,5 [2, 14, 21] .

3.1.2. Slitiny typu pseudo α – do základní báze Ti – Al jsou přidány prvky stabilizující a zpevňující fázi β . Dalšího zpevnění se dosahuje neutrálně působícím Zr a Sn. Obsah fáze β bývá 2 až 6 hm. %. Jsou to slitiny mající pevnost o 10 až 20 % větší než slitiny α a lepší tvařitelnost za pokojové teploty v důsledku přítomnosti fáze β s větší plasticitou než má α . Tyto slitiny mají také menší citlivost vůči škodlivému vlivu vodíku. Do skupiny slitin pseudo α patří především americké slitiny Ti811, Ti6242S a ruská slitina VT18, později nahrazovaná méně legovanou VT20 (TiAl16Zr2Mo1V1) [21] [23].

3.1.3. 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. Jejich předností je poměrně velká pevnost při teplotách okolí a u některých slitin i dobrá tvařitelnost za studena. Vysoká pevnost ale s rostoucí teplotou klesá. Jejich svařitelnost a odolnost proti tečení je horší než u slitin s jednofázovou strukturou α . Naopak mají lepší odolnost proti únavovému namáhání a lze je tepelným zpracováním vytvrdit. Jedná se o nejčastěji používané slitiny. Základní slitinou nejen této skupiny, ale i všech slitin titanu se stala TiAl6V4, na jejíž výrobu se spotřebuje asi 50 % veškeré produkce titanu [21, 23, 14].



Obr. č. 19: Hlavní morfologické typy struktur slitin titanu $\alpha + \beta$ v žíhaném stavu (vlevo – rovnoosá zrna tuhých roztoků α a β , vpravo – lamely tuhých roztoků α a β) [21]

3.1.4. Slitiny typu β - tyto slitiny mají maximální obsah legujících prvků, který přesahuje 20 %. Často mají ve struktuře malý podíl fáze α a obvykle jsou legovány Fe, Cr, Mo, V nebo jejich kombinacemi. Jejich předností je velmi dobrá tvařitelnost za studena a vysoká pevnost, které se ale nad teplotou 350°C zhoršují. Slitiny typu β mají i vysokou odolnost proti korozi a dobrou svařitelnost. V porovnání s ostatními slitinami Ti mají větší hmotnost. Zpevňujícím popouštěním se dosáhne částečného rozpadu β fáze, čímž se zvýší mez kluzu až na 1300 MPa. Příkladem slitiny může být binární slitina TiMo15, nebo slitina TiV10Fe2Al3 [1, 14, 23].

3.1.5. Slitiny pseudo β – mají obsah β stabilizátorů přibližně 18 %, z čehož asi 2 % činí Fe a Cr, které tvoří intermetalické fáze. Obsah Al se udržuje na 3 %. Typickou slitinou je Ti882 s velmi dobrou tvařitelností, které se využívá při kování výrobků komplikovaného tvaru, anebo velkých rozměrů či při

izotermickém lisování. Slitina má též výhodnou kombinaci pevnosti s houževnatostí a lze ji použít též v žíhaném stavu, což je nejužívanější tepelné zpracování také slitiny VT22 [23].

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

Tab. č. 7: Vybrané tvářené slitiny titanu a jejich vlastnosti [33]

Pozn.: Jsou uvedeny střední hodnoty mechanických vlastností při 20 °C

Stav: ž – žíháno, dž – duplexně žíháno, kp – kaleno a popouštěno

3.1.6. Slévárenské slitiny titanu – některé druhy tvářených slitin titanu mají také uspokojivou slévateľnost vzhledem k tomu, že teplotní interval mezi likvidem a solidem je malý, což příznivě ovlivňuje segregaci¹³ přísad a nečistot, zabíhavost taveniny a hustotu odlitků. Slitiny titanu mají nízkou náchylnost ke vzniku trhlin za tepla a přijatelné smrštění (lineárně 1 %). Tavení a odlévání se musí vzhledem k vysoké chemické aktivitě taveniny dít v neutrálních ochranných atmosférách nebo ve vakuu. Problémem je také reaktivita taveniny se žáruvzdornými vyzdívkami i s většinou materiálů formy. Odlitky se tedy vyrábějí tvarovým litím do litinových, ocelových, či speciálních forem. Ke zlepšení mechanických vlastností se nově používá izostatického lisování při vysokých teplotách.

- Odlitky ze slitiny titanu mají charakteristickou Widmannstättenovu mikrostrukturu¹⁴ s propletenými lamelami a tenkými útvary fáze α na hranicích původních zrn fáze β . Odlitky mají horší plastické vlastnosti než tvářené výrobky, mez pevnosti se pohybuje v rozmezí 850 až 950 MPa [14, 23].

3.2. Biokompatibilní slitiny titanu

V oblasti použití kovů a biokompatibilních materiálů v lékařství probíhá neustálý vývoj. Ať už se jedná o zdokonalování konstrukce implantátů, či o vývoj a zkoušení biokompatibilních materiálů. Titan díky svým vlastnostem je velmi atraktivním materiálem pro použití v lékařství. Odolnost proti korozi zaručuje výbornou biokompatibilitu, i jeho mechanické vlastnosti jsou pro použití na výrobu implantátů výhodné. V lékařství naleznou své uplatnění také slitiny titanu s tvarovou pamětí, jejichž výjimečné vlastnosti budou podrobněji popsány v kapitole 3.3 Intermetalika.

3.2.1. Biokompatibilita

Jedná se o přijetí umělého implantátu okolní tkání a tělem jako celkem. Jakmile je nějaký cizí materiál uvedený do prostředí lidského těla, nastane odmítavá reakce. Závažnost této reakce může být v rozsahu od mírného podráždění nebo zánětu až po prudkou reakci, která může mít za následek i smrt. Každý materiál pro výrobu implantátů musí být biokompatibilní, což znamená, že musí způsobovat minimální stupeň odmítavé reakce. Produkty vyplývající z reakcí s tělními tekutinami musí být přípustné pro okolní tělní tkáň, tak že nedojde k porušení její normální funkce. Biokompatibilita je závislá na umístění implantátu v těle, stejně tak jako na jeho chemickém složení a tvaru [35].

Biokompatibilita materiálů je obvykle určována empiricky, to znamená, že jsou prováděny testy, kdy je materiál implantován laboratorním zvířatům a biokompatibilita je posuzována na základě odmítavé reakce, stupně koroze, vzniku toxických látek, atd. Tento proces je později opakován na lidech a to pro ty materiály, které jsou shledány jako biokompatibilní u zvířat. Dřívější chirurgické procedury, ať už zahrnovaly biomateriály nebo ne, byly celkově neúspěšné v důsledku infekce. Problémy infekce mají tendenci se zhoršovat

¹³ segregace - místní vylučování některých prvků nebo sloučenin (vměstků) ve slitinách [12]

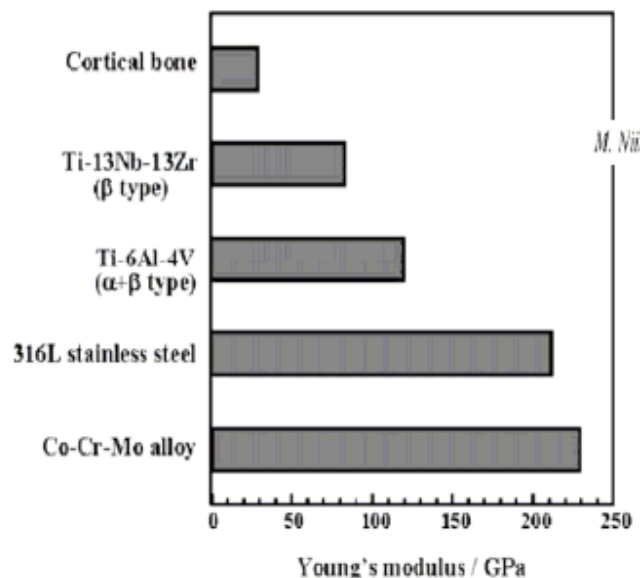
¹⁴ Widmannstättenova mikrostruktura – jedná se o jehlicovitou strukturu, která se vyskytuje především u ocelí [8].

v přítomnosti biomateriálů, poněvadž implantát může způsobit, že oblast se stane nepřístupná tělovým imunologicky kompetentním buňkám [35, 36].

V dnešní době bychom našli velké množství biokompatibilních materiálů. Z kovů do této kategorie patří zejména nikl, cín, molybden, tantal, zirkonium, stříbro, nerezavějící oceli a z nekovových materiálů jsou to bioinertní keramika, polymery, hydrogely¹⁵, kompozity nebo cermety. Výraznou a často používanou skupinou materiálů jsou titan a jeho slitiny [13, 37].

3.2.2. Titan v lékařství

Pokusy použít titan na výrobu implantátů se datují ke konci roku 1930. Jeho nízká váha, dobré mechanické a chemické vlastnosti mu dávají výborný předpoklad pro použití v lékařství. Titan se nemění ve styku s tkání a dá se dobře spojit s kostí, přičemž nehrozí žádné nebezpečí vzájemných reakcí. Pohltivost pro rentgenové paprsky je malá, což je výhodné při lékařské kontrole rentgenem. Titan má příznivé hodnoty vrubové houževnatosti a pevnosti při rázovém namáhání, díky nimž je zaručena bezpečnost implantátů. Důležitým hlediskem je blízkost modulu pružnosti titanu k lidské kosti. Výrazný rozdíl modulu pružnosti materiálu implantátu a kosti, může například u kloubních náhrad zapříčinit poškozování té části kosti, do které je implantát zasazen. Díky povlaku TiO_2 je titan odolný vůči korozi i v lidském těle, které je velmi agresivním korozním prostředím. Výhodou této vrstvičky oxidu je, že se při porušení sama snadno obnoví a zaručuje výbornou biokompatibilitu implantátu, jak ve vztahu k celému organismu, tak ve smyslu lokálním. Titan není toxický, karcinogenní a nemá ani alergizující účinek, slouží tedy pro výrobu nejrozličnějších implantátů, šroubů, destiček a příložek na spojování kostí, je také často používaným materiálem v dentální implantologii a v neposlední řadě slouží pro výrobu chirurgických nástrojů. Nejčastěji používanými materiály jsou čistý titan Grade 4, slitina Ti-6Al-4V, Ti-6Al-17Nb, Ti-15Mo, NiTi [2, 35, 36, 37, 38].



Obr. č. 20: Srovnání Youngova modulu pružnosti lidské kosti, slitin titanu a ostatních biokompatibilních materiálů [37]

¹⁵ hydrogely – polymerní struktury s hydrofilním zesítním. Mají širokou oblast použití, například kontaktní čočky, krytí ran, umělé chrupavky a kůže [37]

Mechanical properties of some titanium and its alloys

Alloy designation	Microstructure	Elastic modulus E (GPa)	Yield strength, YS (MPa)	Ultimate strength UTS (MPa)
cpTi	α	105	692	785
Ti-6Al-4V	α/β	110	850–900	960–970
Ti-6Al-7Nb (protasul-100)	α/β	105	921	1024
Ti-5Al-2.5Fe	α/β	110	914	1033
Ti-12Mo-6Zr-2Fe (TMZF)	Metastable β	74–85	1000–1060	1060–1100
Ti-15Mo-5Zr-3Al	Metastable β	82	771	812
	Aged $\beta + \alpha$	100	1215	1310
Ti-0/20Zr-0/20Sn-4/8Nb-2/4Ta ⁺ (Pd, N, O)	α/β	N/A	726–990	750–1200
Ti-Zr	Cast α'/β	N/A	N/A	900
Ti-13Nb-13Zr	α'/β	79	900	1030
Ti-15Mo-3Nb-0.3O (21SRx)	Metastable β + silicides	82	1020	1020
Ti-35Nb-5Ta-7Zr (TNZT)	Metastable β	55	530	590
Ti-35Nb-5Ta-7Zr-0.4O (TNZTO)	Metastable β	66	976	1010
Bone	Viscoelastic composite	10–40	–	90–140

X. Liu et al. / Materials Science and Engineering R 47 (2004) 49–121

Tab. č. 8: Mechanické vlastnosti biokompatibilních slitin titanu a lidské kosti [37]

Jak již bylo výše uvedeno, je důležité, aby hodnota modulu pružnosti materiálu implantátu byla co nejbližší hodnotám lidské kosti. Z předcházející tabulky můžeme vidět, že pevnost slitin titanu několikanásobně překračuje pevnost kostí, modul pružnosti se však příliš neliší a to především u slitin typu β -Ti. Na obrázku číslo 20 si můžeme všimnout, že z uvedených biokompatibilních materiálů má titanová slitina typu β a lidská kost nejmenší rozdíl modulů pružnosti. Tato vlastnost dává titanovým slitinám dobré předpoklady pro použití například na výrobu kloubních a kostních implantátů.

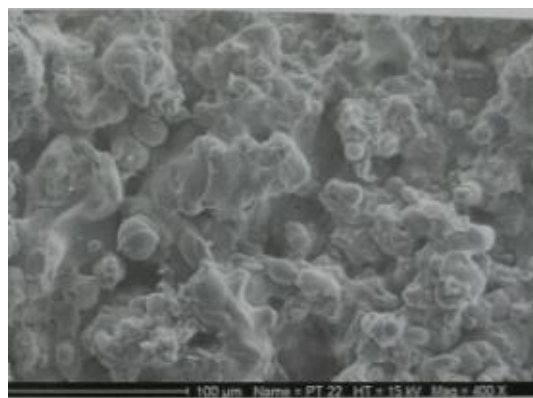
3.2.3. Povrchová úprava implantátů z titanu

Pro proces hojení je výhodnější, pokud je povrch titanu upraven. Drsné neboli texturované titanové povrchy původní obrobený povrch téměř vytlačily, protože vedou ke zlepšení vyhojovací schopnosti implantátu. Zdrsněný povrch implantátu se podobá struktuře kosti a ta do něj ochotně vrůstá, tím se stává implantát pevnou součástí kosti. Mezi metody zdrsnění povrchu patří pískování, plazmové sprejování (při němž se využívá plazmového nanášení nejčastěji titanového prášku), nebo leptání v minerálních kyselinách. Zajímavou technologii povrchové úpravy titanových implantátů představuje anodická oxidace ve vodných roztocích minerálních kyselin a solí. Další možností je nanášení bioaktivních¹⁶ povrchů na implantáty z titanu [38, 39].

¹⁶ **Bioaktivita** – vlastnost materiálu, která vyvolává specifické reakce mezi materiálem a okolní tkání, může například podpořit spojení tkáně při fixaci implantátu v těle [37]



Obr. č.21: Obrobený titanový povrch [38]



Obr. č. 22: Titanový povrch upravený plasmovým sprejováním [38]

3.2.4. Konkrétní příklady použití titanu v lékařství



Obr. č. 23: Cévní stent – nitinol [37]



Obr. č. 24: Dřík náhrady kyčelního kloubu – slitina Ti6Al4V [40]



Obr. č. 25: Zubní implantát [41]



Obr. č. 26: Chirurgické nástroje [42]

3.3. Intermetalika

Jedná se o takové slitiny kovů, které se svou strukturou a vlastnostmi liší od jednotlivých složek. Pouhou interpolací nelze jejich vlastnosti předpovědět. Většinou existují jen v úzkém oboru koncentrací a mají přesné chemické složení, kterým jsou charakterizovány; jejich atomy jsou v krystalové mřížce uspořádány. Někdy se nazývají intermetalické sloučeniny a pro jejich popis se používá chemická symbolika. Mezi tyto sloučeniny patří celá škála materiálů, které mají nejrůznější využití, například v oblasti elektrotechniky (supravodiče a polovodiče), slitiny s jevem tvarové paměti, které nacházejí uplatnění v chirurgii a ortodoncii, v chemii se používají intermetalické slitiny jako ochranné povlaky. Výzkum je však nejvíce zaměřen na oblast konstrukčního použití [43, 44].

3.3.1. Titanová intermetalika - jsou slitiny, které svým stupněm legování jsou strukturně složeny pouze z intermetalických fází titanu a legovacích prvků. Tyto fáze mají obecný vzorec Ti_xM_y . Intermetalické sloučeniny titanu se vyznačují vysokou odolností vůči teplotám a působícímu napětí. V současné době probíhá intenzivní výzkum intermetalik, především na bázi $TiAl - \gamma$ a $Ti_3Al - \alpha_2$. Průmyslově využívaná intermetalika můžeme rozdělit do dvou základních skupin, slitiny Ti-Ni a slitiny Ti-Al [1, 45, 46].

3.3.2. Slitiny Ti-Ni – jedná se o slitiny s obsahem obvykle 55 – 56 % niklu a 44 – 45% titanu. Komerčně je tato slitina označována jako Nitinol. Drobné změny ve složení významně ovlivňují výsledné vlastnosti. Existují dvě hlavní kategorie Nitinolu. První jsou slitiny známé jako Superelastické a druhou kategorií jsou slitiny s tvarovou pamětí. Nitinol, jako superelastický materiál nachází nejčastěji uplatnění v ortodoncii, jedná se o různé svorky a dráty zubních rovnátek, nebo také při výrobě brýlí. Jeho vlastností jako materiálu s tvarovou pamětí se využívá na výrobu svorek, spon, tepelných pojistek, v lékařství například k fixacím čelisti, páteře, případně na výrobu stentů¹⁷. Princip použití spočívá v tom, že materiál je umístěn v deformovaném stavu do požadované polohy a po následném zahřátí začne mechanicky působit na své okolí [46, 47].

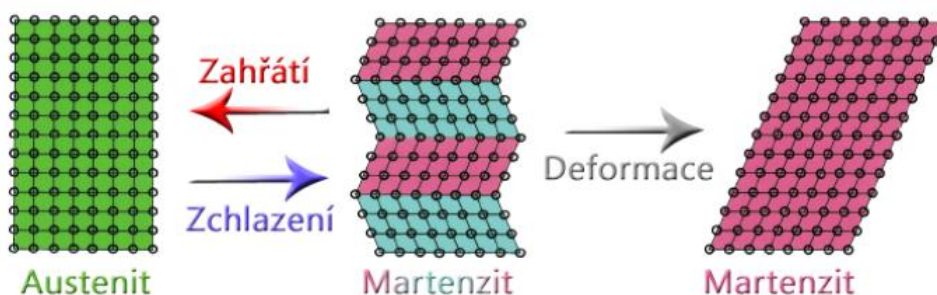
Slitiny s tvarovou pamětí - tvarová paměť je efekt pozorovatelný především u kovových slitin, ale podobný efekt byl nalezen i u některých plastů. Jev tvarové paměti trochu připomíná kouzelnický trik. Součástka ze slitiny SMA¹⁸ je ochlazená a potom zdeformována, tak, že se podstatně změní její tvar. Po zahřátí nad určitou charakteristickou teplotu se součástka samovolně vrátí ke svému původnímu tvaru. Deformace může být velká a změna tvaru výrazná. Jev tvarové paměti byl poprvé experimentálně pozorován a fyzikálně vysvětlen na poněkud exotické slitině zlato-kadmium (Au-Cd) v roce 1951. Aktivita výzkumu v tomto oboru významně vzrostla až po roce 1963, kdy byl tento jev náhodně pozorován na slitině NiTi vyvíjené původně jako antikorozní materiál. Následně byly objeveny i další slitiny s tvarovou pamětí (například: Cu-Al-Ni, Cu-Al-Mn, Ni-Ti-Cu, Ni-Ti-Hf). Tyto slitiny označované jako SMA vykazují i další velmi atraktivní vlastnosti při mechanickém namáhání,

¹⁷ Stenty - síťky ve tvaru trubiček připravené spletením z drátu nebo laserovým vyříznutím z tenkostěnné trubičky. Jsou lékařskými pomůckami, které hlavně pomáhají zlepšovat průchodnost cév v okolí lidského srdce a jiných důležitých místech krevního oběhu, dále pak průchodnost jiných tělních trubic od žlučovodu až po jícen a střeva [37]

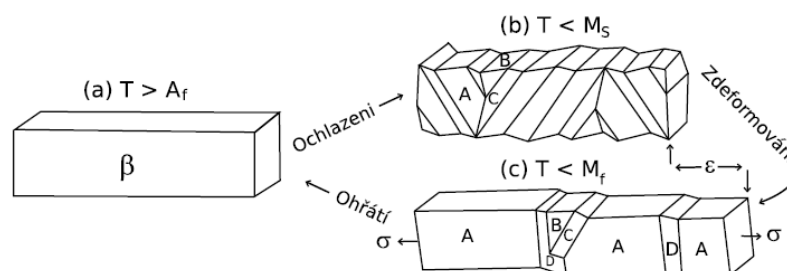
¹⁸ SMA – shape memory alloys – slitiny s tvarovou pamětí [48].

kteřé úzce souvisí s tvarovou pamětí a je možné je souhrnně označit jako "Jevy tvarové paměti". V technických aplikacích jsou nejrozšířenější slitiny Ti-Ni (nitinol) [43, 48, 49].

Princip jevu tvarové paměti - Fyzikálním základem pro vysvětlení jevů tvarové paměti je bezdifuzní fázová přeměna v pevném stavu - martenzitická transformace, jejíž průběh lze v SMA řídit změnou teploty nebo vnějšího napětí. Strukturní změnu probíhající při martenzitické transformaci si lze zjednodušeně představit jako tvarovou změnu původních krychlí na kosé kvádry. Martenzit s nižší symetrií může vznikat v různém natočení vzhledem k původní krychli a tedy existovat v několika (3-24) krystalograficky shodných ale natočených variantách. Při transformaci austenitu na martenzit nepozorujeme žádnou změnu tvaru. Následuje zatížení martenzitické struktury – deformace, vzorek mění tvar. Postupně se vytvoří pro dané zatížení nejvýhodnější varianta martenzitu a dochází k jevu superplasticity. Po odlehčení vzorku, dojde k elastickému odtižení podle Hookova zákona, zůstává však zachováno fázové složení, tedy jedna varianta martenzitu daná předchozí deformací. Ohřejeme-li následně vzorek nad kritickou teplotu A_s^{19} , materiál transformuje na austenit a tvar vzorku se změní opět na původní, zde se uplatňuje efekt tvarové paměti. Jev tvarové paměti je vyvolán tím, že se slitina snaží udržet v energeticky nejvýhodnějším stavu, a proto se vždy usiluje přeorientovat, čímž vyvíjí sílu do krystalické mřížky, která je za daných podmínek energeticky nejúspornější. Další zajímavou vlastností je elastická deformace u těchto slitin. Zatímco u běžných kovů elastická deformace nepřesahuje 1 % (běžná ocel má 0,5 %), u kovů s tvarovou pamětí může plně vratná deformace dosahovat až 15 % (viz. Superplasticita) [48, 50].



Obr.č.: Schéma martenzitické transformace [48]

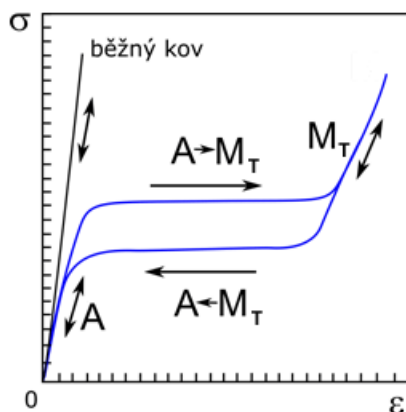


Obr. č. 28: Jednotlivé kroky a struktury při vyvolání jevu tvarové paměti [50]

(M_s – začátek přeměny z austenitu do martenzitu při ochlazování, M_f – konec přeměny z austenitu do martenzitu při ochlazování, A_s – začátek přeměny martenzitu do austenitu při zahřívání, A_f – konec přeměny martenzitu do austenitu při zahřívání, σ – působící zatížení, ϵ – deformace) [48]

¹⁹ A_s – teplota austenit start – začátek transformace martenzitu na austenit [48]

Superplasticita - namáháme-li materiál s tvarovou pamětí v austenitické fázi ($T > A_f$), dochází k martenzitické transformaci z austenitu do nejvhodněji orientované martenzitické varianty i beze změny teploty, pouze pod vlivem napětí. Deformace (tvarová změna) s tím spojená je omezená, ale plně vratná při odtížení. Zatímco elastická deformace běžných kovových materiálů je poměrně malá (výjimečně nad 0.7 %), může být vratná deformace způsobená transformací i více než deset procent [50].



Obr. č. 29: Superplastická deformační křivka SMA [50].
(silně nelineární, vždy doprovázená hysterezí²⁰)

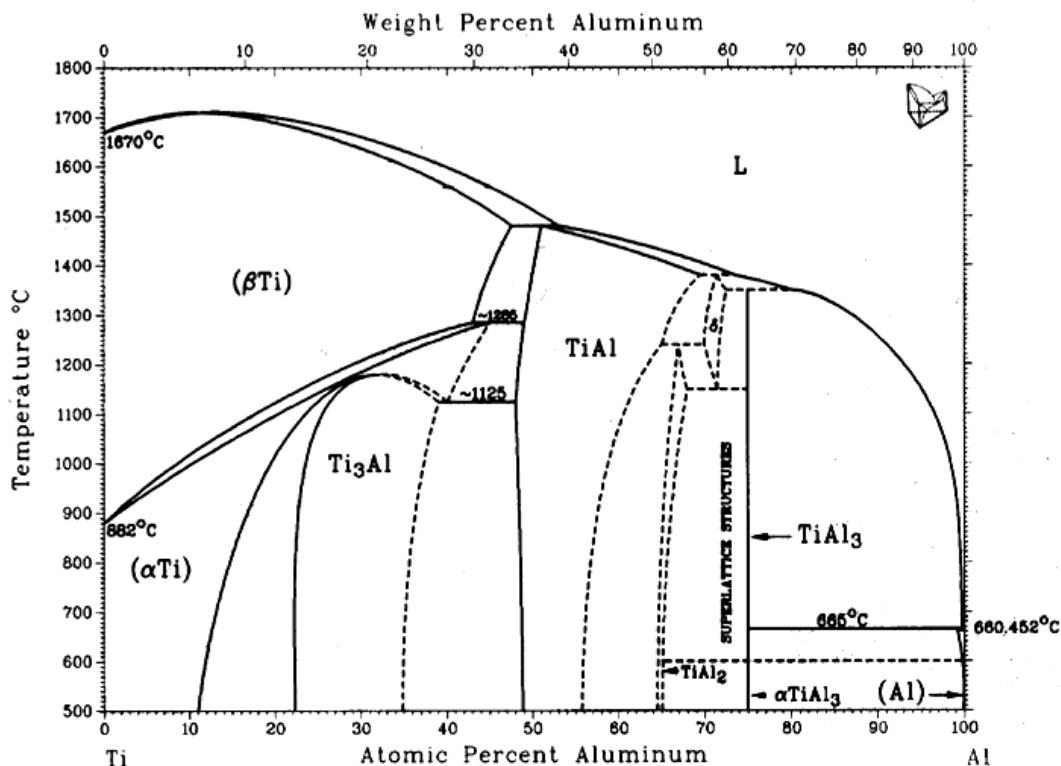
Pseudoplasticita - namáháme-li materiál s tvarovou pamětí v martenzitickém stavu ($T < M_s$) tahem a tlakem, deformuje se snadno v rozsahu ~5%, kdy se postupně se vytvoří pro dané zatížení nejvýhodnější varianta martenzitu. Za touto mezí a při odtížení se zorientovaný martenzit chová elasticky [50].

3.3.3. Žáropevné pseudoslitiny titanu - Základ tvoří intermetalické sloučeniny, aluminidy titanu Ti_3Al a $Ti-Al$. Oba aluminidy mají dobrou žáruvzdornost. Jejich žáropevnost je vyšší než u ostatních slitin titanu a srovnatelná se žáropevností slitin niklu. Jsou však 2,5 x méně hmotné (měrná hmotnost kolem $3\,500\,kg\cdot m^{-3}$). Mohly by být použity jako žáropevné součásti při teplotě až $900\,^{\circ}C$. Jejich nedostatkem je však velmi malá tvárnost za teplot do $600\,^{\circ}C$ a tedy obtížné zpracování na požadovaný tvar součásti [21].

Slitiny Ti-Al – jedná se o slitiny s obsahem Al kolem 30 %, kombinací s dalšími prvky, jako jsou Nb, Cr, nebo V, vzniknou takzvaná intermetalika $\gamma(TiAl)$ s nízkou hmotností a vysokou stabilitou mechanických vlastností při vysokých teplotách. Tato intermetalická sloučenina má tetragonální strukturou. Nejatraktivnější vlastností tohoto materiálu je jeho nízká hustota, která je nižší než $4000\,kg\cdot m^{-3}$. Navíc má Ti-Al vysokou tepelnou vodivost a odolnost proti korozi a opotřebení až do teploty $927\,^{\circ}C$. Nevýhodou je poněkud snížená plasticita, lomová houževnatost a komplikovaná výroba polotovarů. Součásti se vyrábějí nejčastěji odléváním s následným izostatickým lisováním. Problémem tohoto postupu je ztráta přesné geometrie součástí. Jinou možností je výroba usměrněnou krystalizací, kdy

²⁰ Hystereze – závislost stavu soustavy na stavech předcházejících [12].

ovšem dojde ke vzniku anizotropie²¹ vlastností. Při správném dodržení technologických podmínek a pečlivé konstrukční přípravě by mohly slitiny Ti-Al nahradit superslitiny a to hlavně v letectví, kde váha je velice důležitým parametrem. Dalším příkladem použití mohou být ventily spalovacích motorů, nebo součásti turbín [1, 43, 51].



Obr. č. 30: Binární diagram Ti-Al [45]

Slitiny Ti₃Al – jedná se o hexagonální intermetalickou sloučeninu, která se při teplotě 1180 °C rozpadá na titan α. Tato slitina má vysoký modul pružnosti (srovnatelný s niklovými superslitinami), ale podobně jako jiné intermetalické materiály je při pokojové teplotě křehká. Tuto křehkost je možno eliminovat legováním, nejčastěji Nb, popřípadě Nb v kombinaci s Mo a Ta. Při legování dojde ke stabilizaci β fáze titanu a tím ke zlepšení plasticity slitiny. Díky nízké hustotě, výborným mechanickým vlastnostem a teplotní odolnosti je Ti₃Al velmi atraktivním intermetalikem pro rozvoj vysokoteplotních materiálů. Nepříznivými vlastnostmi jsou nízká lomová houževnatost a tolerance k rázům. Dále náchylnost k napětím indukovanému praskání povrchu. Kromě odlévání a tváření je možno pro přípravu tvarových součástí využít technologii práškové metalurgie. Zde je však nutná pečlivá příprava prášku, který by neměl mít zoxidovaný povrch [45, 49, 52].

²¹ **Anizotropie vlastností** - závislost fyzikálních a mechanických vlastností látek na směru, ve kterém se měří, látky mají v různých směrech odlišné vlastnosti, například optické, elektrické, dilatační, tepelné, pevnostní [12].

3.4. Použití slitin titanu

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2, výroba titanu a jeho zpracování jsou náročné, což se negativně promítá do jeho ceny. I přesto jsou titan a jeho slitiny často používaným materiálem, především pro speciální účely. Vlastnosti titanových slitin je možné chemickým složením a tepelným zpracováním dále ovlivňovat (viz. kapitola 4. Tepelné zpracování titanu a jeho slitin). Výjimečná je kombinace nízké hustoty za současně vysoké pevnosti i odolnosti proti teplotám. Tyto vlastnosti předurčují titanové slitiny k použití v letectví, výrobě sportovních automobilů či sportovního vybavení, tedy všude tam, kde je požadována pevná konstrukce s nízkou hmotností. Korozní odolnost slitin titanu umožňuje jejich použití v chemickém, petrochemickém i lodním průmyslu, kde jsou součásti vystaveny agresivním prostředím. Nezastupitelnou roli hrají také v lékařství (viz. 3.2.1. Biokompatibilita) a díky své zdravotní nezávadnosti jsou vyhledávaným materiálem i ve šperkařství, používají se například na výrobu piercingů, náušnic či prstenů.

Použití titanových slitin je vhodné tam, kde výrobek z nich [14]:

- není vystaven tření s jinou součástí
- bude vysoce namáhán a vlastní hmotnost součásti musí být co nejmenší
- bude pracovat za zvýšených teplot (do 450 °C)
- musí mít dostatečnou pružnost
- bude pracovat v korozním prostředí, kde hrozí především koroze pod napětím

Konkrétní příklady použití titanových slitin:

Letectví	- součásti leteckých motorů (lopatky, ojnice...) - potahy draků, nosníky a podvozkové díly	- rotory helikoptér - součásti v raketovém a kosmickém oboru
Výroba elektrické energie	- plynové turbíny - parní turbíny - potrubní (rozvodové) systémy	- výměníky tepla - systémy čištění výfukových plynů
Chemický průmysl	- tlakové a reakční nádoby - výměníky tepla - potrubí a armatury - pumpy	- kondenzátory - ventily, rozvody a nálevky - míchadla
Automobilový průmysl	- karoserie - spojovací tyče - ventily a trysky	- vahadla
Lodní průmysl	- povrch trupů lodí - součásti hlubokomořských ponorek - součásti závodních jachet	- lodní klimatizační systémy - lodní šrouby - rozvody
Módní doplňky	- brýle - šperky - hodinky	- psací potřeby

Petrochemický průmysl	- potrubí, trysky, klapky	
Biomedicínské aplikace	- umělé kloubní protézy - kostní desky a tyče - srdeční chlopně - kardiostimulátory	- dentální implantáty - spojovací dráty - chirurgické nářadí - invalidní vozíky
Stavební prvky	- krytiny - okenní rámy - okapy a plechy	- zábradlí - ventilátory
Sportovní vybavení	- golfové hole - rámy jízdních kol a příslušenství - lakrosově hole - závodní invalidní vozíky	- podkovy - tenisové rakety - potápěčské plynové lahve - lyže
Ostatní aplikace	- slitiny s tvarovou pamětí - systémy kontroly znečištění - ruční nářadí	- desalinační systémy - vojenská obrněná vozidla - lovecké nože

Tab. č. 9: Použití titanových slitin v jednotlivých odvětvích průmyslu [10]

4. Tepelné zpracování titanu a jeho slitin

Mikrostruktura titanových slitin může být, podobně jako i u jiných kovů, upravována pomocí tepelného zpracování. Povaha a stupeň změny mikrostruktury, kterou tímto zpracováním obdržíme je závislá na druhu a konkrétním typu slitiny. Pro dosažení požadovaných mechanických vlastností titanu a jeho slitin, je možné použít různé druhy tepelného zpracování. Dvoufázové slitiny se obvykle kalí a popouštějí (tzv. zušlechťují), v optimálním případě dosáhneme tímto tepelným zpracováním zvýšení pevnosti při mírném snížení plasticity oproti pouze zakalenému stavu. Dalším příkladem mohou být různé druhy žíhání a použití procesů stárnutí. Žíháním dosáhneme minimalizace zbytkových napětí v materiálu. Díky tomu je možné předcházet například chemickému napadení povrchu v korozivních prostředích, nebo dosáhnout obnovení plasticity materiálu pro další tvářecí operace. Odezva titanu a jeho slitin na operace tepelného zpracování je výrazně závislá na složení a na vlivu přísadových prvků na fázovou transformaci titanu α na β . Ne všechny způsoby tepelného zpracování je možné použít u všech typů slitin, protože různé slitiny jsou vyvinuty k různým účelům a tedy mají také výrazně odlišné vlastnosti [6, 10, 23, 53].

Příklady jednotlivých slitin vyvinutých pro různé účely [53]:

- slitiny Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr a Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo jsou vyvinuty pro vysokou pevnost
- slitiny Ti- 6Al-2Sn-4Zr-2Mo a Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si pro odolnost proti creepu
- slitiny Ti-6Al-2Nb-1 Ta-1Mo a Ti-6Al-4V, pro odolnost vůči korozi pod napětím v solných roztocích a pro vysokou lomovou houževnatost.
- slitiny Ti-5Al-2.5Sn a Ti-2.5Cu pro dobrou svařitelnost
- Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-4V a Ti-10V-2Fe-3Al pro vysokou pevnost při nízkých teplotách

Hlavní důvody tepelného zpracování titanu a jeho slitin [10]:

- minimalizace zbytkových napětí vzniklých v důsledku výroby
- dosažení nejpříjemnější kombinace tažnosti, obrobitelnosti a rozměrové i strukturní stability, obzvláště ve slitinách α -Ti a β -Ti (žihání)
- zvýšení tvrdosti pomocí žihání a stárnutí slitin
- optimalizace speciálních vlastností, jako je lomová houževnatost, únavová pevnost, vysokoteplotní odolnost a creep

Tepelné zpracování slouží nejen ke zlepšení vlastností titanových slitin, ale je také nezbytnou součástí některých způsobů výroby polotovarů z těchto materiálů. Například žihání se používá po obrábění součástí a bez něj by nebylo možné ani tváření slitin za studena, protože titan výrazně deformačně zpevňuje. Proto výsledné přetvoření materiálu musí být rozděleno na několik operací s malými deformacemi, mezi které je vždy vloženo žihání. Charakteristiky a konkrétní použití jednotlivých druhů tepelného zpracování slitin titanu je uvedeno v následujících odstavcích.

4.1. Druhy tepelného zpracování titanu

Jednotlivé způsoby tepelného zpracování titanových slitin lze rozdělit do tří základních skupin [15]:

- žihání
- zušlechťování
- chemicko-tepelné zpracování

4.1.1. Žihání – podobně jako u jiných technických slitin se setkáváme i u slitin titanu s celou řadou způsobů žihání. Podle výše teploty žihání se mění různou měrou vlastnosti zpracované slitiny. S ohledem na rozmanitost slitin se nedají stanovit základní obecně platné směrnice pro žihání. Musíme tedy vždy uvažovat, jakou konkrétní slitinu a s jakým obsahem přísadových prvků budeme zpracovávat [15].

Mezi nejpoužívanější způsoby žihání patří:

- **žihání na odstranění pnutí** – používá se pro minimalizaci vnitřních zbytkových napětí, vzniklých po třískovém obrábění, rovnání, svařování apod. Slitiny se žihají při teplotách 450 až 650 °C a následně se pozvolna ochlazují. Při těchto teplotách nedochází k rekrytalizaci [21, 23].
- **rekrytalizačního žihání** - obvyklá teplota žihání je kolem 800 °C. Toto tepelné zpracování je významné především u jednofázových slitin α nebo β . Teplota rekrytalizačního žihání dvoufázových slitin musí být nižší než teplota přeměny na fázi β , protože v oblasti β fáze dochází k rychlému hrubnutí zrna. Rekrytalizační žihání je používáno pro odstranění deformačního zpevnění slitin tvářených za

- studena. Pro $\alpha + \beta$ slitiny lze použít také žihání izotermické, nebo dvojité stabilizační žihání [21, 23].
- **stabilizační žihání** – slouží k dosažení nejvyšší strukturní stability, která je důležitá z hlediska žárupevnosti. Toto žihání má 2 varianty, žihání izotermické a dvojité stabilizační žihání [23].
 - **izotermické žihání** - skládá se z ohřevu na 800 až 900 °C, ochlazení součásti v peci na teplotu 500 až 650 °C, nebo přenesení do druhé pece vyhřáté na danou teplotu. Následuje výdrž a ochlazení slitiny. Tímto způsobem zpracování titanové slitiny získávají poměrně vysokou pevnost a žárupevnost spolu s dobrou tvárností [21].
 - **dvojité žihání** - liší se od izotermického tím, že po výdrži na prvním stupni následuje ochlazení na vzduchu do pokojové teploty. V závislosti na složení slitiny může vzniknout metastabilní fáze β , která se při novém ohřevu rozpadá na směs stabilních fází $\alpha + \beta$ a dochází ke zpevnění slitiny. Nepříznivým důsledkem dvojitého žihání je nižší tvárnost výsledné slitiny, avšak příznivé je zvýšení pevnostních vlastností [21, 23].

4.1.2. Zušlechťování – titan a jeho slitiny jsou polymorfní kovy, dalo by se tedy očekávat, že právě polymorfní přeměna bude základem tepelného zpracování, jako je tomu například u slitin železa. Ve skutečnosti je tento předpoklad splněn jen do určité míry. U slitin titanu je základním procesem vytvrzování eutektoidní rozpad tuhého roztoku. Z hlediska zvyšování mechanických vlastností tepelným zpracováním jsou zajímavé především heterogenní slitiny titanu $\alpha + \beta$ a slitiny s fází β , u nichž je možné dosáhnout širokého rozmezí výsledných pevností. Vytvrzování $\alpha + \beta$ slitin titanu se skládá z rozpouštěcího ohřevu, rychlého ochlazení (kalení) a procesu stárnutí. Teplota rozpouštěcího ohřevu je volena v oblasti $\alpha + \beta$ tak, aby kalením bylo zachováno co největší množství metastabilní fáze β , tato teplota je ovšem výrazně závislá na typu slitiny. Kalení se provádí do vody. Poté následuje nový ohřev (stárnutí), nejčastěji za teplot v intervalu 500 až 600 °C. Pro tenkostěnné součásti lze použít izotermické kalení. Komerčně vyráběné β slitiny jsou obvykle dodávány v žíhaném stavu a vyžadují pouze stárnutí [21, 15, 53].

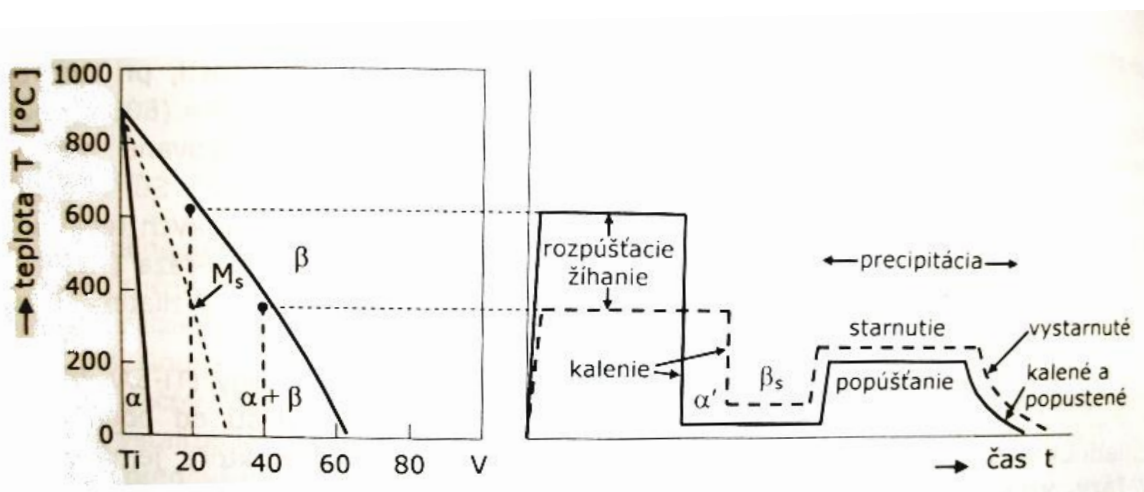
Alloy	Solution temperature [°C]	Solution time [h]	Cooling rate	Aging temperature [°C]	Aging time [h]
α or near-α alloys					
Ti-8Al-1Mo-1V	980-1010	1	Oil or water	565-595	
Ti-2.5Cu (IMI 230)	795-815	0,5-1	Air or water	390-410	8-24 (step 1)
				465-485	8 (step2)
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	955-980	1	Air	595	8
Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si (IMI 685)	1040-1060	0,5-1	Oil	540-560	24
Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.3Mo-0.3Si (IMI 829)	1040-1060	0,5-1	Air or oil	615-635	2
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.3Si (IMI 834)	1020	2	Oil	625	2
α-β alloys					
Ti-6Al-4V	955-970	1	Water	480-595	4-8
	955-970	1	Water	705-760	2-4
Ti-6Al-6V-2Sn (Cu+Fe)	885-910	1	Water	480-595	4-8
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	845-890	1	Air	580-605	4-8
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si (IMI 550)	890-910	0.5-1	Air	490-510	24
Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si (IMI 551)	890-910	0.5-1	Air	490-510	24
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	845-870	1	Air	580-605	4-8
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si	870-925	1	Water	480-595	4-8
β or near-β alloys					
Ti-13V-11Cr-3Al	775-800	1/4-1	Air or water	425-480	4-100
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn (Beta III)	690-790	1/8-1	Air or water	480-595	8-32
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (Beta C)	815-925	1	Water	455-540	8-24
Ti-10V-2Fe-3Al	760-780	1	Water	495-525	8
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	790-815	1/4	Air	510-595	8-24

Tab. č. 10: Příklady teplot, výdrží a ochlazovacího prostředí pro tepelné zpracování vybraných slitin titanu [53]

4.1.3. Kalení a titanu

Při kalení je nezbytný ohřev do oblasti polymorfni přeměny, tj. nad teplotu přeměny α -Ti na β -Ti, dle příslušného rovnovážného diagramu. Jedná se tedy obvykle o teploty mezi 850 až 880 °C. Tento ohřev nesmí být příliš vysoko nad tuto teplotu, neboť přehřátí snižuje pevnost a plasticitu slitin, kterou již nelze upravit opakovaným tepelným zpracováním. U slitin se strukturou $\alpha + \beta$ se ohřev provádí do oblasti existence obou fází. Při ohřevu k horní hranici, tj. na vyšší z možných teplot, je rozpuštěn větší podíl fáze α a po zakalení vzniká martenzitická struktura. Při kalení z nižších teplot zůstává zachována metastabilní fáze β , která se vytvrzuje následujícím stárnutím. Fáze α vzniklá při kalení se při následném žhání (stárnutí) prakticky nemění. Kalení se provádí nejčastěji do vody, ale některé slitiny lze úspěšně kalit i ochlazením na vzduchu. U slitin se strukturou tvořenou převážně nebo výlučně β -fází se kalící ohřev provádí nad teplotu polymorfni přeměny nebo k horní hranici teplotní existence obou fází $\alpha + \beta$. Zakalení slitin β strukturou se provádí buď do vody, nebo při kalení

z nižších teplot, i na vzduchu. U tohoto typu slitin je stárnutí po kalení nezbytné a je konečnou operací zpevňujícího tepelného zpracování [54, 55].



Obr.č.: Tepelné zpracování $\alpha + \beta$ slitin titanu [51]

4.1.4. Chemicko-tepelné zpracování titanu

Vysoká reaktivita titanu s plyny je na jedné straně vlastnost nežádoucí, protože způsobuje obtíže při výrobě. Na straně druhé může být ovšem využita i ke zlepšení jeho povrchových vlastností a to především snížení náchylnosti k zadírání, nebo pro dosažení vyšší povrchové tvrdosti [15].

Oxidace - nejjednodušším pochodem povrchové úpravy titanu je oxidace, která probíhá při ohřevu na vzduchu, a to již od 600 °C. Při nižších teplotách vznikají také kyslíčkové vrstvičky, jsou ovšem příliš tenké a proto nemají na mechanické vlastnosti povrchové vrstvy podstatný vliv. Tloušťka oxidické vrstvy je závislá na teplotě žíhání. Při žíhání titanu na vzduchu za teplot vyšších než 1000 °C se začíná uplatňovat reakce titanu s dusíkem a povrchová vrstva kyslíčnicku je tím silně ovlivněna, ve všech případech však probíhá přednostně oxidace před nitrací. Kyslíčnicková vrstva zvýšené povrchové tvrdosti se využívá pro snížení součinitele tření a zlepšuje také korozní odolnost titanu v různých prostředích [15].

Nitridace – jedná se o nejvýznamnější způsob chemicko-tepelného zpracování titanu a některých jeho slitin. Nitridováním se zvyšuje především odolnost proti opotřebení. Nejběžnější je nitridování v dusíku nebo ve čpavku. Atmosféra čpavku zároveň sytí povrchovou vrstvu vodíkem, což může vést k vylučování hydridu TiH a k snížení vrubové houževnatosti. V obou atmosférách vzniká na povrchu výrobku nitrid titanu TiN, který je křehký a zpomaluje další sycení dusíkem. Zabránit vzniku TiN lze snížením sytícího potenciálu atmosféry buď zředěním dusíku či čpavku neutrálním plynem (Ar) ve vakuu nebo snížením obsahu dusíku na povrchu výrobku po nasycení izotermickou výdrží ve vakuu. K moderním technologiím patří nitridování titanu v doutnavém výboji nebo s indukčním či kontaktním ohřevem. Povrchová úprava nitridací je nejvýhodnější u čistého titanu. U slitin záleží na jejich složení a některé slitiny se vůbec nedoporučuje nitridovat [15, 55].

4.1.5. Tepelně mechanické zpracování – v minulosti byl sledován především vliv teploty a velikosti redukce na obsah fáze β a mechanické vlastnosti slitin. U různých typů slitin má toto zpracování různý význam. Válcování titanu při 1100 až 900 °C s následujícím zachlazením do vody zvyšuje jeho pevnost až o 100 MPa. K tomuto zpevnění stačí již deformace 20 %. Snížením doválcovací teploty na 600 °C se zvýší pevnost asi o 150 MPa. Ve dvoufázových slitinách titanu nepřesahuje zpevnění vlivem tepelně mechanického zpracování 20 až 30 % zpevnění dosažitelného tepelným zpracováním. Nutnost zachovat určitou minimální plasticitu nedovoluje snížit doválcovací teplotu pod 600 °C, což je důvodem proč se toto zpracování příliš nepoužívá. Na zpevnění slitin β má tepelně mechanické zpracování malý vliv a to při všech stupních deformace [2, 55].

5. Slitina TiAl6V4

Jak již bylo zmíněno slitina TiAl6V4 je nejpoužívanější a nejčastěji vyráběnou slitinou titanu. Závěrečná část této práce bude tedy věnována stručné charakteristice tohoto materiálu.

TiAl6V4 označovaná také jako VT6 patří do skupiny slitin s dvoufázovou strukturou $\alpha+\beta$. Jedná se o vysoce pevnou slitinu, která má velmi dobrý poměr hustoty ku pevnosti. Její mechanické vlastnosti je možné dále zlepšovat pomocí tepelného zpracování, jako je žíhání či zušlechťování, které může zvýšit pevnost o 15 až 25 %. Je vhodná především pro tváření za tepla, ale je možné ji také odlévat. Zpracování tvářením za studena se nedoporučuje, z důvodů její vysoké pevnosti a nízkému modulu elasticity. Při tepelném zpracování se obvykle upřednostňuje ohřev v elektrické peci a pracuje se v inertní atmosféře či ve vakuu. Tato slitina je nejčastěji dodávána v prutech či sochorech, ale dostupné jsou i ploché polotovary. Její obrábění je díky nízké tepelné vodivosti obtížné. Slitina se vyrábí v různých variantách s různými legurami. Příklady jednotlivých typů slitin a jejich chemické složení jsou uvedeny v tabulce číslo 11. Tyto slitiny vykazují vynikající únavové vlastnosti, odolnost vůči iniciaci trhliny i jejímu šíření. Díky ochranné oxidické vrstvě TiAl6V4 výborně odolává korozi a to i v agresivních prostředích. V případě porušení oxidické vrstvy je její obnovení v prostředí obsahujícím kyslík velmi rychlé. Další příznivou vlastností je výborná biokompatibilita s lidskou tkání a kostmi, která umožňuje široké použití slitiny v lékařství a také pro výrobu šperků [56] [57].

Použití [56] [57]:

- implantáty v chirurgii – TiAl6V4 ELI (Extra low intersticial)
- součásti v leteckém průmyslu
- šperkařství
- výroba lodí
- energetika
- vojenský průmysl

	Fe	C	N	O	H
TiAl6V4	≤ 0.40	≤ 0.08	≤ 0.05	≤ 0.20	≤ 0.015
TiAl6V4 ELI	≤ 0.25	≤ 0.08	≤ 0.05	≤ 0.13	≤ 0.012
	Al	V	Ti		
TiAl6V4	5.50 - 6.75	3.50 - 4.50	Bal.		
TiAl6V4 ELI	5.50 - 6.50	3.50 - 4.50	Bal.		

Pozn. obsahy prvků jsou uvedeny v hmotnostních procentech

Tab. č. 11: Obsah chemických prvků v jednotlivých typech slitiny [57]

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo formou literární rešerše shromáždit a přehledně uspořádat informace o titanu, jeho vlastnostech a vyráběných slitinách. Hlavní pozornost byla zaměřena na rozdělení a charakteristiku jednotlivých typů slitin titanu a na možnosti ovlivnění jejich mechanických vlastností tepelným zpracováním. Na základě studia je možno učinit tyto nejdůležitější závěry.

1. Titan je bezesporu moderní materiál, neboť jeho historie nesahá daleko do minulosti. I když byl objeven v posledním desetiletí 18. století, trvalo ještě dlouhou dobu, než se jej podařilo izolovat z rud a vyrobit tak kov potřebné čistoty. Vypracovat metodu vhodnou pro jeho výrobu ve větším měřítku bylo rovněž obtížné. Nejstarší a často používaná je takzvaná Krollova metoda.
2. Při nízkých teplotách je titan velmi stálý a odolný proti korozi díky ochranné vrstvě oxidů, avšak za zvýšených teplot se tato vrstva rozpadá a titan se stává velmi reaktivním s okolním prostředím. Proto je nutné jej při výrobě, ale i při následném zpracování chránit před okolním prostředím inertní atmosférou či přítomností vakua.
3. Titanové slitiny je možno rozdělit podle několika různých hledisek. Jedním z nich je rozdělení podle použití, přičemž jednotlivé druhy slitin vykazují různé vlastnosti, které je možné dále upravovat a zlepšovat jak legováním, tak tepelným zpracováním.
4. V závislosti na tom, jakým způsobem jsou využívány specifické vlastnosti titanu a jeho slitin, jsou tyto materiály používány v různých oblastech průmyslu. Zprvu byl titan považován za strategický kov a jeho využití bylo soustředěno především ve vojenské technice. Později se ovšem jeho použití výrazně rozšířilo. Odolnosti titanu proti korozi se využívá nejen v chemickém průmyslu, ale také všude tam, kde jsou součásti z něj vyrobené vystaveny dlouhodobému styku například s mořskou vodou. Z titanu mohou být tedy vyrobeny součásti lodí, ponorek, či lodní šrouby. Výrazné použití titan nalézá také v konstrukcích letadel, součástech leteckých proudových motorů a kosmických technologiích. Kombinace jeho nízké hmotnosti a pevnostních vlastností je výhodná při výrobě sportovního vybavení. Díky zdravotní nezávadnosti a mimořádné stálosti se využívá čistý TiO_2 , jako bílý pigment pro omítkové nátěry, ale také například pro docílení bílé barvy zubních past.
5. Použití titanových slitin je velmi rozšířené také v lékařství, protože mnohé jeho slitiny vykazují dobré biokompatibilní vlastnosti. Nejčastěji vyráběná je slitina TiAl6V4 , která je hojně používána například pro výrobu kloubních implantátů. I v tak agresivním prostředí, jako je prostředí lidského těla titan nekoroduje, není toxický ani karcinogenní a na rozdíl od jiných kovů, například niklu, nemá ani alergizující účinek. V kontaktu s lidskou tkání vyvolá minimální odmítavé reakce. Jeho biokompatibilitu je možné dále zlepšit povrchovými úpravami, které umožňují například snazší srůstání implantátu a kosti. Titan má také nízký modul pružnosti, což je v oblasti lékařství vlastnost velmi výhodná. Z materiálů používaných na kloubní náhrady mají titanové slitiny hodnoty modulu pružnosti nejbližší hodnotám lidské kosti, díky tomu je výrazně sníženo riziko poškozování kosti v okolí implantátu.

6. V dalších oblastech použití titanu se využívá také jevu tvarové paměti některých jeho slitin. Nejznámější slitinou tohoto typu je Nitinol, který nachází využití jak v lékařství, například v ortodoncii, či při výrobě lékařských svorek, spon či cévních stentů, ale také například při výrobě brýlí či tepelných pojistek. Slitiny s tvarovou pamětí stejně tak jako superplastické slitiny nebo žáropevné pseudoslitiny patří do skupiny titanových intermetalik.
7. I přes některé negativní vlastnosti, které například prodražují výrobu kovu i následné zpracování titanových polotovarů, je tento materiál velmi používaný a má široké uplatnění v různých odvětvích průmyslu. Přestože materiálový vývoj nových titanových slitin v současné době neprobíhá ve velkém měřítku, probíhá vývoj v oblasti zpracovatelských technologií, jehož cílem je dosažení lepších vlastností titanových výrobků.

6. Seznam použité literatury

- [1] NĚMEC, Milan; PROVAZNÍK, Jaroslav. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. Vydání první. Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. 137 s. ISBN 978-80-01-04116-1.
- [2] SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny*. Praha : ANTL, 1963. 206 s.
- [3] MICHNA, Štefan. *Stefanmichna* [online]. 2007 [cit. 2011-11-13]. Titan - vlastnosti, použití, slitiny. Dostupné z WWW: http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/titan_vlastnosti_pouziti_slitiny.pdf.
- [4] SEDLÁČEK, Vladimír. *Únava hliníkových a titanových slitin..* Praha : SNTL, 1989. 351 s.
- [5] ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. . *The Science and Engineering of Materials*. 5th ed. . Toronto : Thomson, 2006. 863 s. ISBN 0-534-55396-6.
- [6] *Microstructure and properties of materials* [online]. Singapore: World Scientific, 2000, 436 s. [cit. 2012-01-23]. ISBN 981-02-4180-1. Dostupné z WWW: <http://books.google.cz/books?id=4c31Fipmc5AC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>
- [7] *Yin.cz* [online]. 2007 [cit. 2011-11-20]. Periodická tabulka prvků. Dostupné z WWW: <http://periodicka-tabulka-prvku.yin.cz/>.
- [8] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.
- [9] ŠITTNER, Petr; NOVÁK, Václav . *Kovové slitiny s tvarovou pamětí. Technik* [online]. 2002, č.15, [cit. 2011-12-09]. Dostupný z WWW: <http://technik.ihned.cz/c1-11264510-kovove-slitiny-s-tvarovou-pameti> .
- [10] DONACHIE, Matthew J. *Titanium : A Technical Guide* [online]. 2nd ed. USA : ASM International, 2000 [cit. 2011-11-13]. Dostupné z WWW: http://books.google.com/books?id=HgZukknbnGAC&pg=PA8&hl=cs&source=gbs_toc_r&cad=4#v=onepage&q&f=true. ISBN 0-87170-686-5.
- [11] VAVRDA, Ondřej. *Fd.cvut* [online]. 2008, 2010 [cit. 2011-11-13]. Vlastnosti titanu. Dostupné z WWW: <http://www.fd.cvut.cz/personal/vavrdond/text1.html>.
- [12] *CoJeCo: Vaše Encyklopedie* [online]. 1999, 2012 [cit. 2012-01-23]. Dostupné z WWW: <http://www.cojeco.cz/>
- [13] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1979. 398 s.

- [14] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *[Nauka o materiálu 3. část]: Speciální kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 118 s. ISBN 978-800-1042-120.
- [15] PÍŠEK, F.; JENÍČEK, L.; RYŠ, P. *Nauka o materiálu I : Neželezné kovy*. 3. Praha : Academia, 1973. 596 s.
- [16] *KMM : katedra materiálů a strojírenské metalurgie* [online]. 2005, 8.12. 2009 [cit. 2011-12-09]. Strojírenské materiály. Dostupné z WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/Nikl_titan.pdf>.
- [17] Stellite. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 18.8.2011 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Stellite>>.
- [18] GREGER, Miroslav. Kování titanu a jeho slitin. *Technický týdeník* [online]. 2010, č.9, [cit.2011-12-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=6477&mark=>>>.
- [19] ZUHLA, M. *Technologie tváření neželezných materiálů* (bakalářská práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michaela Marečková.
- [20] LUTJERING, G a J WILLIAMS. *Titanium* [online]. New York: Springer, c2003, 379 s. [cit. 2012-02-07]. Engineering materials. ISBN 35-404-2990-5. Dostupné z WWW: <http://books.google.cz/books?id=GwI9ul_wAegC&pg=PA17&dq=editions:ISBN0849350107&hl=cs&source=gbs_toc_r&cad=4#v=onepage&q&f=false>
- [21] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno : CERM, 2002. 392 s. ISBN 80720424832. (2)
- [22] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-800-1041-673.
- [23] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006, 164 s. ISBN 80-010-3513-1.
- [24] DALIBOR VELEBIL. *Stručně o minerálech* [online]. 11. července 2007 [cit. 2012-01-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.velebil.net/mineraly/>>
- [25] Perovskit. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 20. 10. 2011 [cit. 2012-01-21]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Perovskit#Vyu.C5.BEit.C3.AD>>
- [26] SIDORINOVÁ, T (2007): *Foto - Ilmenit*. In: Fotoarchiv České geologické služby [online databáze]. Praha, Česká geologická služba [cit. 2012-01-21]. Dostupné z WWW: < <http://www.geology.cz/foto/14294>>
- [27] *Museum Reich der Kristalle: Mineralogische Staatssammlung München* [online]. [cit. 2012-01-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.lrz.de/~Mineralogische.Staatssammlung/MSM.html>>

- [28] *Jihočeský mineralogický klub* [online]. 2006 [cit. 2012-01-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.mineraly.org/mineraly/?podle=abecedy&clanek=517>>
- [29] KOLÍNSKÁ, Irena. In: *Acron* [online]. 2006 [cit. 2012-01-21]. Dostupné z WWW: <http://www.acron.cz/joomla/index.php?option=com_content&task=view&id=284&Itemid=38>
- [30] TITAN. *Stránky o materiálech part. I: Metalurgie neželezných kovů* [online]. 2005 [cit. 2012-01-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.nom.wz.cz/KOVY/titan.htm>>
- [31] WOODFORD, Chris. Titanium. *Explain that stuff* [online]. 2007 [cit. 2012-01-21]. Dostupné z: [http WWW: <http://www.explainthatstuff.com/titanium.html>](http://www.explainthatstuff.com/titanium.html)
- [32] VOJTĚCHOVSKÝ, Ondřej. *Titanium: vlastnosti-výroba-použití* [online]. 2009 [cit. 2012-01-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.fd.cvut.cz/personal/vojteond/>>
- [33] KARASEK, J. *Obrabění titanových slitin* (diplomová práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 80 s., příloh 2. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Piška, CSc.
- [34] *TOHO Titanium CO.,LTD* [online]. 2009 [cit. 2012-01-23]. Dostupné z WWW: <http://www.toho-titanium.co.jp/en/products/sponge_en.html>
- [35] CALLISTER, William D. *Materials Science and Engineering : An Introduction*. 5th Ed. New York : John Wiley and Sons, Inc., 2000. 871 s. ISBN 04-713-2013-7.
- [36] KOUTSKÝ, Jaroslav. *Biomateriály*. Plzeň : Tiskárna FOTO&TISK, 1997. 72 s. ISBN 80-7082-370-4.
- [37] LOSERTOVOÁ, Monika. *Biokompatibilní materiály*. VŠB, Technická univerzita Ostrava [online]. 2004-2010 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z WWW: <http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/soubory/U_Biokomp.pdf>
- [38] ŠIMŮNEK, Antonín. *Dentální implantologie*. 2., přeprac. a dopl. vyd. Hradec Králové: Nucleus HK, 2008, 285 s. ISBN 978-808-7009-307.
- [39] KRUG. Zubní implantologie. *Lékařské listy* [online]. 13.12.2010(č. 22) [cit. 2012-02-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.zdn.cz/clanek/priloha-lekarske-listy/zubni-implantologie-456506>>
- [40] *Medin* [online]. 2011 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.medin.cz/medin-cylindricky-mc-t-mc-s-16998d/>>
- [41] Dental Implant. *Naomidental* [online]. 2009-2011 [cit. 2012-02-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.naomidental.com/en/index.php?a=news&No=91>>
- [42] KMedic. *Teleflex Medical OEM* [online]. 2012 [cit. 2012-02-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.teleflexmedicaloem.com/brands/kmedic/index.html>>
- [43] NOVÁK, Václav. *Intermetalika a jevy tvarové paměti*. 2009 [cit. 2012-01-27]. Dostupné z WWW: <<http://archiv.otevrenaveda.cz/users/Image/default/C2Seminare/MultiObSem/003.pdf>>

- [44] KURSA, Miroslav. *Intermetalické sloučeniny Ti-Al a slitiny na jejich bázi*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2005, 166 s. ISBN 80-248-0893-5.
- [45] KÁRNÍK, Tomáš, Miroslav KURSA a Kamil KRYBUS. Charakteristika intermetalických sloučenin ze systému Ti-Al. In: *Metal 2000: 9. mezinárodní metalurgická konference*. Ostrava: TANGER, spol. s r.o., 2000, s. 8. Dostupné z WWW: <http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_00/papers/615.pdf>
- [46] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [47] Introduction To Nitinol®. *Dynalloy, Inc: Makers of dynamic alloys* [online]. [cit. 2012-01-27]. Dostupné z: [http WWW: < http://www.dynalloy.com/AboutNitinol.php>](http://www.dynalloy.com/AboutNitinol.php)
- [48] ODSTRČIL, M. *Slitiny s tvarovou pamětí*. 2002. [cit. 2012-01-26]. Dostupné z WWW: <files.odstrtom.webnode.cz/200000009-47b4049a7a/slitiny.pdf>
- [49] ULRICHOVÁ, Alena. *Intermetalika a uspořádané fáze v konstrukčních materiálech* (bakalářská práce). Brno, 2006. Masarykova univerzita, přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Doc. RNDr. Jiří Sopoušek, CSc.
- [50] *SMA ve FZÚ AVČR: Materiály s tvarovou pamětí (SMA) fyzikální ústav akademie věd* [online]. 2008 [cit. 2012-01-27]. Dostupné z WWW: <http://department.fzu.cz/ofm/sma/brana_cz/>
- [51] ŠVEC, Pavol. *Konstrukčné materiály*. Bratislava: STU, 2010. ISBN 978-80-227-3386-1.
- [52] LOSERTOVÁ, Monika. *Intermetalické sloučeniny (IMC)*. VŠB, Technická univerzita Ostrava [online]. 2004-2010 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z WWW: <http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/soubory/KOVYII_IMC.pdf>
- [53] Heat Treating of Titanium and Titanium Alloys. *Key to metals: The world's most comprehensive metals database* [online]. 1999-2012 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.keytometals.com/Article97.htm>>
- [54] KUDRMAN, Jiří, Božena PODHORNÁ a Jaroslav VESELÝ. *21. dny tepelného zpracování: sborník přednášek: Mezinárodní konference*. Praha: 2006. ISBN 80-239-7840-3.
- [55] MACEK, Karel a ZUNA. *Tepelné úpravy kovových materiálů*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 100 s. ISBN 80-01-02287-0.
- [56] TiAl6V4. ÚMVI FSI VUT V BRNĚ. *Příprava a hodnocení materiálografických vzorků* [online]. - [cit. 2012-04-13]. Dostupné z WWW: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/PHMV/ti_tial6v4.php>
- [57] Specialty materials: TiAl6V4. *Zapp* [online]. 2007 [cit. 2012-04-13]. Dostupné z WWW: <http://www.zapp.com/uploads/media/TIAL-6V4_EN.pdf>

7. Seznam použitých symbolů a značek

BCC		- krystalická mřížka kubický prostorově středěná (body centred cubic)
FCC		- krystalická mřížka kubická plošně středěná (face centred cubic)
HCP		- krystalická mřížka šesterečná (hexagonální), s nejtěsnějším uspořádáním
SMA		- slitina s tvarovou pamětí (shape memory alloy)
A_s		- austenit start
A_f		- austenit finiš
M_s		- martenzit start
M_f		- martenzit finiš
Φ		- úhel normály skluzové roviny
λ		- úhel směru skluzu
σ	[MPa]	- působící zatížení
ε	[%]	- deformace
E	[GPa]	- modul pružnosti materiálu
R_e	[MPa]	- mez kluzu materiálu
$R_{p0,2}$	[MPa]	- smluvní mez kluzu materiálu
R_m	[MPa]	- mez pevnosti
A	[%]	- tažnost (měrné prodloužení)
HB		- tvrdost podle Brinella
HBW		- tvrdost podle Brinella (kulička ze slinutého karbidu)