



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

TITAN, JEHO SLITINY A INTERMETALIKA PRO BIOLOGICKÉ A PRŮMYSLOVÉ APLIKACE

TITANIUM, ALLOYS AND INTERMETALLICS FOR BIOLOGICAL AND INDUSTRIAL APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VÍTĚZSLAV VESPALEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LADISLAV ČELKO, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vítězslav Vespalec

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:

Titan, jeho slitiny a intermetalika pro biologické a průmyslové aplikace

v anglickém jazyce:

Titanium, Alloys and Intermetallics for Biological and Industrial Applications

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem kladeným na studenta bude vypracování přehledné literární rešerše z oblasti čistého titanu, jeho slitin a intermetalik využívaných v současných biomedicínských a strojírenských aplikacích. Tato rešerše bude obsahovat základní metody využívané pro výrobu těchto materiálů, možné způsoby jejich tepelného zpracování, vliv technologie a tepelného zpracování na výslednou mikrostrukturu těchto slitin a další jejich charakteristické vlastnosti společně s předpokladem jejich aplikačního potenciálu v blízké budoucnosti.

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je vypracování přehledné literární rešerše na dané téma a seznámení studenta s tvorbou vysokoškolských kvalifikačních prací na odpovídající technické úrovni.

Seznam odborné literatury:

1. LEYENS, CH. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, Wiley, Germany 2003
2. DONACHIE, J.M. Titanium: A Technical Guide - 2nd Edition, ASM International, United States of America 2005
3. Lutjering, G., Williams, J.C. Titanium, Engineering Materials and Processes, Springer, Germany 2003

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Čelko, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 24.10.2012



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tvorba této bakalářské práce byla provedena formou literární rešerše, která shrnuje základní informace o titanu a jeho slitinách. V první kapitole je uvedena historie výroby a použití titanu. Následující kapitola obsahuje nejdůležitější vlastnosti čistého titanu, jakými jsou alotropické modifikace krystalové mřížky, chemické, fyzikální a technologické vlastnosti, dále je zde věnován prostor používanému rozdělení titanových slitin, vlivu nečistot, efektu tvarové paměti a příkladům intermetalik. Třetí část pojednává o vybraných aplikacích ve strojírenství. Závěr se zabývá biokompatibilitou a využití titanu a jeho slitin v implantologii a dentálních aplikacích.

ABSTRACT

The creation of this Bachelor's thesis was performed as a search retrieval, which includes basic information about titanium and its alloys. In the first chapter is stated history of titanium manufacturing. Following chapter include the most important property of pure titanium, such as alotropic modifications of the crystal grid, chemical, physical and technological characteristics, there is also space, that is assigned for using contemporary division of titanium alloys, detrimental effect of impurity, shape memory effect and intermetallics instance. Third part concern about selected application in industry. The conclusion pursue about biocompatibility factor and possibility use titanium and its alloys in implantology and dental applications.

KLÍČOVÁ SLOVA

titan, slitiny titanu, fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti titanu, technologie výroby, průmyslové oblasti využití, biokompatibilita

KEYWORDS

titanium, titanium alloys, physical, chemical and mechanical properties of titanium, technology, industrial applications, biocompatibility

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Titan, jeho slitiny a intermetalika pro biologické a průmyslové aplikace“ vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedené odborné literatury.

V Brně dne

.....

Vítězslav Vespalec

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VESPALEC, V. *Titan, jeho slitiny a intermetalika pro biologické a průmyslové aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Čelko, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Ladislavu Čelkovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při tvorbě této bakalářské práce.

OBSAH

1. Historie a současnost.....	3
2. Ti a jeho slitiny	5
2.1 Čistý Titan a jeho vlastnosti	5
2.2 Technologie výroby Ti a jeho slitin	6
2.2.1 Výroba Ti komerční čistoty	6
2.2.2 Prášková metalurgie.....	8
2.2.3 Kování a tváření.....	8
2.2.4 Odlévání.....	9
2.2.5 Obrábění.....	11
2.2.6 Svařování	12
2.2.7 Pájení.....	13
2.2.8 Tepelné zpracování	14
2.3 Rozdělení Ti a jeho slitin.....	15
2.3.1 Slitiny α Ti.....	16
2.3.2 Slitiny $\alpha+\beta$ Ti	16
2.3.3 Slitiny β Ti	17
2.3.4 Vliv legur na vlastnosti Ti slitin.....	18
2.3.5 Intermetalika	19
3. Strojírenské aplikace	23
3.1 Letecký průmysl.....	23
3.2 Vesmírný průmysl	25
3.3 Sportovní odvětví	26
3.4 Strojírnoství	27
3.5 Zbrojní průmysl.....	28
4. Bioaplikace.....	29
4.1 Implantologie.....	29
4.2 Dentální aplikace	30
5. Závěr	31
6. Seznam použitých zdrojů.....	33

1. HISTORIE A SOUČASNOST

Jako kov byl objeven v roce 1791 anglickým chemikem Williamem Gregorem v minerálu známém jako ilmenit. Pojmenován byl později v roce 1795 Martinem H. Klaprothem. V roce 1887 byl získán švédskými chemiky Lars F. Nilsonem a Otto Pettrsonem v 95 % -ní čistotě, získání titanu v takové čistotě bylo dosaženo pomocí redukce tetrachloridu titanu (výchozí materiál) sodíkem. Poprvé byl téměř čistý Ti (množstvím příměsí v řádu desetin procent) ve formě kovu izolován až v roce 1910 americkým chemikem Matthewem A. Hunterem. Později byl pro komerční výrobu využit Krollův proces, který byl objeven v roce 1932 lucemburským metalurgem Williamem J. Krollem. V současnosti se v technické praxi pro jeho výrobu používá také jiných metod.

Praktického využití se Ti dočkal až v 50. letech s masivním nástupem proudových letadel, u kterých je tento materiál používán na zvláště namáhané části: kostra (požadavky na pevnost) a součásti motorů (kompresory). Ti a jeho slitiny byly ideálním materiálem, který napomohl prudkému rozvoji kosmonautiky, kde sloužil k výrobě skeletů družic, orbitálních stanic a raket [1].

Kromě letectví a kosmonautiky se začal Ti a jeho slitiny prosazovat i ve strojírenství, kde bylo pro tyto materiály nalezeno uplatnění v nejnáročnějších aplikacích. Jeho první použití v průmyslu pro aplikace se datuje od roku 1957 [2].

První použití titanu v lékařství spadá do 2. poloviny 60. let, konkrétněji v roce 1967 a jednalo se o vůbec první šroubový zubní implantát zhotovený z titanu. Postupem času bylo v lékařském oboru nalezeno široké spektrum využití čistého Ti a jeho slitin. Do tohoto spektra můžeme zařadit vše od dentálních náhrad až po spojky a vruty pro fixaci zlomených kostí. Dále pak kloubní implantáty, které plnohodnotně nahrazují původní kloub až po náhrady chybějících částí kostí (a to včetně kosti lebeční) [1, 3].

Sportovní odvětví rovněž nezaostává ve využívání specifických vlastností titanu a jeho slitin. První kusy sportovního nářadí, které měly vyrobeny rám z titanu nebo jeho slitin se objevily počátkem 60. let. Převládající většina v současnosti vyráběných sportovních pomůcek je tvořena alespoň z části Ti nebo jeho slitinami, příkladem mohou být lyže, snowboardy, tenisové rakety či rámy bicyklů [4].

2. TI A JEHO SLITINY

2.1 Čistý Titan a jeho vlastnosti

Čistý titan je nemagnetický kov stříbrošedé barvy, o hustotě (4,506 g/cm³) a tvrdosti (cpTi 99,5% cca 120HB), teplota tání je 1668°C a varu 3287°C, vyskytuje se ve dvou stabilních modifikacích. První modifikací je α Ti vyskytující se pod teplotou 882°C s krystalovou mřížkou HCP (šesterečná krystalická mřížka), druhou modifikací je β Ti, který se vyskytuje nad teplotou 882°C, tato modifikace má krystalovou mřížku BCC (kubickou prostorově centrovanou).

Disponuje velmi dobrým poměrem pevnosti k hustotě, kde je rozdíl Ti oproti ocelím až v jednotkách nebo desítkách řádů, dále nízkou teplotní roztažností (při 20 - 100 °C: $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) a teplotní vodivostí (při pokojové teplotě: 21,9 W/mK). Titan běžné čistoty (cp Ti) je považován za pevný a poměrně tvrdý kov, naopak čistý Ti je považován za kov plastický. Rozpětí mechanických vlastností např. meze pevnosti v tahu je velké cca od 172 MPa pro Ti komerční čistoty až po 1380 Mpa u tepelně zpracovaných β Ti slitin.

Ke kladům Titanu také patří velmi dobré chemické vlastnosti vyplývající z tvorby relativně tenké porézní vrstvy TiO₂ (oxid titaničitý), která se tvoří na povrchu kovu. Právě tento oxid poskytuje Ti a jeho slitinám ochranu v různých chemických prostředích a zajišťuje jejich vysokou biokompatibilitu.

K nevýhodám Titanu patří jeho vysoká reaktivita s plyny a to především s kyslíkem a dusíkem za zvýšených teplot (nad teplotou 600°C), dále je to snížená obrobitelnost titanu oproti ocelím v důsledku třecích vlastností. V současnosti je však technologie obrábění titanových slitin již na velmi dobré úrovni. Obtížná svařitelnost je dalším negativem neboť je nutné Titan svařovat v atmosféře inertního plynu nebo ve vakuu. Z důvodu jeho vysoké reaktivity za zvýšených teplot. Mezi negativní vlastnosti můžeme také zařadit také obtížné zpracování vratného odpadu. Z hlediska mechanických vlastností má proti ocelím Titan nižší modul pružnosti v tahu. Pro srovnání modul pružnosti v tahu oceli cca 210 GPa oproti 115 GPa u Titanu [5].

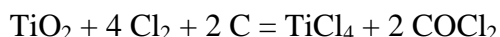
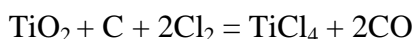
2.2 Technologie výroby Ti a jeho slitin

2.2.1 Výroba Ti komerční čistoty

Výroba Ti a jeho slitin probíhá v několika samostatných operacích. Nejprve tvorbou Ti komerční čistoty, do kterého jsou přidány legury, které společně vytvoří požadovanou slitinu titanu.

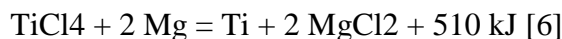
Výroba tzv. „titanové houby“

Titan je získáván z rud ilmenitu nebo rutilu (Obr 2.2.1.2). Oxidy Ti obsažené ve výše zmíněných rudách reagují s uhlíkem a chlorem za vzniku chloridu titaničitého. Reakční rovnice vzniku oxidu titaničitého:



Ten se po přečištění redukuje hořčíkem v atmosféře inertního plynu při teplotách cca 850 - 920 °C.

Rovnice probíhajícího procesu vzniku Ti houby (viz Obr 2.2.1.1 Titanová houba):



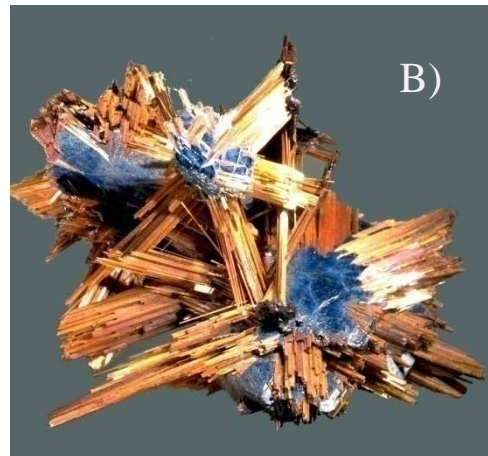
Vzniklým produktem je pórovitá látka (titanová houba), ze které je dále nutné odstranit chlorid hořečnatý a zbytkový (nezreagovaný) hořčík. V minulosti se používalo k další rafinaci titanové houby louhování ve vodním roztoku kyseliny solné. Dnes se využívá vakuové destilace, kdy titanová houba po rafinaci vykazuje menší residuální množství hořčíku, vodíku a chlóru oproti louhování.



Obr 2.2.1.1 Titanová houba (výchozí materiál - rutil) [7]

Další možností je pak redukce oxidu titaničitého sodíkem. Svoji podstatou se velmi podobá Krollovu procesu. Jeho nevýhodou je nutnost sodík před jeho redukcí vakuově destilovat.

Důvodem, proč se při výrobě Ti postupuje popsánými způsobem, je vysoká reaktivita Ti s plyny za zvýšených teplot. Proto nelze vyrábět Ti klasickými hutními metodami jako např. slitiny Fe. V porovnání s výrobou oceli jsou tak metody používané pro výrobu Ti mnohem náročnější a nákladnější.



Obr 2.2.1.2 Minerály užívané pro výrobu Ti, A) Ilmenit a B) Rutil [8, 9]

Výroba ingotů

Přetavování elektrickým obloukem ve vakuu je dominantní metodou výroby Ti ingotů, od doby počátku komerční výroby titanu. Tato metoda je používána k řízené tavbě a tuhnutí slitin s vysokou citlivostí na kyslík a dusík.

Výrobní postup je následující: válcová elektroda vhodného chemického složení pomocí elektrického oblouku ve vakuu roztaví požadovaný materiál a vyrobí Ti houbu, která zkrystalizuje ve vodou ochlazeném kelímku. Touto metodou je možné zpracovávat větší vsázku, nicméně neumožňuje tuhnout kovu v ustáleném stavu. Výsledkem je titanový ingot (Obr 2.2.1.3). Výhodou tohoto procesu je vysoká výsledná čistota ingotu a velmi dobrá kontrola celého procesu. Nevýhodou je to, že ve vertikální poloze může gravitace ovlivňovat segregaci v ingotu [10].



Obr 2.2.1.3 Titanový Ingot [11]

Pro zlepšení kvality a chemické homogenity ingotů se provádí jejich opětovné přetavování. V případě materiálu určeného pro zvlášť náročné aplikace se obvykle provádí přetavování dvakrát [6].

2.2.2 Prášková metalurgie

Zpracování Ti slitin touto technologií má potenciál v podobě možnosti výroby tvarově složitých součástí s obdobnými mechanickými vlastnostmi, které mají součásti vyrobené tvářením. Díky možnosti tvarovat součásti odpadá většina obráběcích operací a minimalizuje se množství odpadního materiálu. Tato kombinace výhod staví práškovou metalurgii do popředí oproti konvenčním metodám jako je tváření nebo odlévání.

Proces výroby prášku Ti a jeho slitin je limitován jeho vysokou reaktivitou s atmosférou. Pro výrobu titanového prášku tak existuje několik metod např. pomocí plasmové rotační elektrody, plynovým rozprašováním atd. Na počátku výroby se ze surovin, tj. odpad z obrábění nebo dalších operací, odstraní nečistoty a nežádoucí prvky (zejména vodík). Dalším krokem je umístění surovin do vibračního kulového mlýna, kde se v argonové atmosféře při teplotě 400 ° C, po dobu cca 4 hodin a při tlaku 1 psi* vytvoří samotný prášek. Výsledné prachové částice pak mají rozměr mezi 50 a 300 μm [10].

2.2.3 Kování a tváření

Kování

V současnosti jsou výkovky z Ti slitin vyráběny všemi dostupnými metodami od volného přes zápustkové kování, rotační kování a další. Výběr vhodné metody pro konkrétní součást se řídí podle požadovaného tvaru, mechanických vlastností a mikrostruktury.

Metodu zápustkového kování můžeme zařadit mezi konvenční metody. Zřejmou výhodou této metody je výsledný polotovár součásti, který se svým tvarem blíží finálnímu výrobku a z toho vyplývající zkrácení času potřebného pro obrábění. Při ohřevu na kovací teplotu je nutné kontrolovat teplotu transformace α Ti na β Ti, podle tohoto zápustkové kování rozlišujeme na kování pod teplotou beta transformace a na kování nad teplotou beta transformace.

Tváření

Slitiny Ti lze tvářet obtížněji než oceli nebo slitiny Al. Důvodem je hůře předvídatelné chování materiálu při tváření. Proto je nezbytné s tímto počítat a dodržovat doporučené postupy při tváření za tepla i za studena.

Dalším z problémů, se kterým je nutno se potýkat, je odpružení materiálu. Eliminaci odpružení lze provést stejnými způsoby jako u ocelí např. úpravou přípravků, ve kterých se tváření provádí (v případě ohybu materiálu součásti do požadovaného úhlu je zapotřebí připočítat navíc vliv odpružení). Po dokončení tvářecí operace je nutné, aby součást prošla mezioperačním tepelným zpracováním (žíháním) před opětovným procesem tváření.

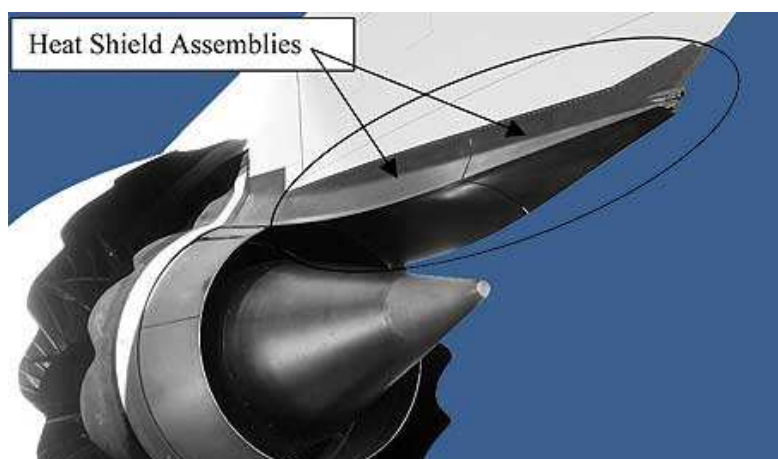
Při tváření Ti a jeho slitin za tepla nedochází k výraznému ovlivnění požadovaných vlastností. Proces tváření probíhá v rozmezí teplot cca 595-815 °C, kdy se materiál deformuje mnohem snadněji, a při kterých současně také dochází k uvolňování vnitřních pnutí deformovaného materiálu. Ti a jeho slitiny mají při zvýšených teplotách tendenci k tečení. Z tohoto důvodu je tak výdrž na teplotě v průběhu tváření další možností jak dosáhnout požadovaného tvaru a zároveň potlačit vliv odpružení.

Při tváření za studena, na rozdíl od tváření za tepla, dochází k podstatným změnám vlastností materiálu. Konkrétně k výraznému zpevnění, např. u slitiny Grade 9 dojde ke zvýšení meze pevnosti až na 860 MPa a snížení houževnatosti z 15% na 8%. Abychom materiál zbavili nežádoucího velmi vysokého zpevnění, a obnovili původní vlastnosti, musí vždy následovat tepelné zpracování (žíhání).

* psi (pound per square inch) – libra na čtvereční palec, 1 psi = 6 894,757 Pa

Superplastické tváření

Superplastické tváření je metodou tváření, která se uplatnila převážně ve výrobě součástí pro letecký průmysl (Obr 2.2.3.1 Sestava tepelného štítu) a částečně i ve výrobě plynových turbín. Uplatnění metody v uvedených odvětvích vyplývá z jejích výhod a nevýhod, kterými jsou: možnost vyrábět mnohem složitější díly pouze v jediném kroku, možnost vyrábět větší množství součástí a neměnný tlak působící na všechny plochy součástí. K nevýhodám patří vysoké náklady na pořízení zařízení, dlouhé předehřívací časy a nutnost užívání ochranné atmosféry inertního plynu [10].



Obr 2.2.3.1 Sestava tepelného štítu, chránící nosný pylon tryskového motoru (heat shield assemblies – sestava tepelného štítu) [12]

2.2.4 Odlévání

V současnosti patří u Ti a jeho slitin k nejrozšířenějším výrobním postupům. Nejvyužívanějšími metodami jsou metody přesného lití, metoda přesného lití do vytavitelného modelu a metoda odstředivého lití. Rozdíl při využívání této metody výroby u titanu a jeho slitin oproti ocelím je pouze v použité ochranné inertní atmosféře.

Metoda do vytavitelného modelu

Patří mezi moderní výrobní metody, jejíž velkou výhodou je to, že výsledné odlitky jsou tvarově bližší konečné podobě součásti. Zkracuje se výrazně čas potřebný pro obrábění součásti do výsledného tvaru a spotřeba materiálu bývá obvykle nižší než u klasických metod odlévání. Postup je následující: 1. vytvoří se voskové modely daného odlitku, které se naskládají do tzv. „stroměčku“, 2. výroba skořepiny, 3. vytavení vosku ze skořepiny a její vypálení, 4. odlévání do předehřáté skořepiny v ochranné atmosféře inertního plynu. Tato technologie se používá pro odlévání lopatek kompresorů tryskových motorů (Obr 2.2.4.1) [13].



Obr 2.2.4.1 Lopatka kompresoru tryskového motoru [14]

Metoda odstředivého lití

K odlévání se využívá odstředivých sil, které vznikají při rotaci formy kolem její osy, to zajistí nejen vyplnění formy, ale i dosažení požadovaného tvaru s hladkým povrchem u výsledného odlitku. Touto metodou se vyrábí zejména odlitky s tenkou stěnou s vysokou kvalitou povrchu. Příkladem může být součást axiálního kompresoru (Obr 2.2.4.2).

U odstředivého lití existují dva způsoby odlévání Ti a jeho slitin. První možností je přímé lití, kdy je osa odlitku totožná s osou rotace. Druhou možností je pak lití nepřímé, kdy osa odlitku není totožná s osou rotace. Tento způsob lití nazýváme odléváním za zvýšených sil [15].



Obr 2.2.4.2 Axiální kompresor [16]

2.2.5 Obrábění

Technologie obrábění Ti a jeho slitin se podobá konvenčnímu obrábění ocelí. Titan a jeho slitiny jsou však podstatně hůře obrobitelné. Zhoršenou obrobitelnost způsobuje pevnost materiálu, nízká schopnost odvádět teplo, zpevnění povrchu, vysoká reaktivita materiálu v místě odběru, kde dochází k ohřevu na teploty, kdy Ti reaguje s plyny [6].

Pro dosažení co největší efektivity a přesnosti procesu obrábění je třeba uvažovat tyto negativa a přizpůsobit tento proces od geometrie řezného nástroje, rychlosti obrábění až po chemické složení řezné (chladicí) kapaliny.

Životnost nástrojů

Podobně jako při obrábění jiných kovů a slitin, závisí životnost nástroje na řezné rychlosti, rychlosti posuvu, dostatečném chlazení a ostření.

Materiály nástrojů pro obrábění Ti a jeho slitin musí být otěruvzdorné a velmi tvrdé i za zvýšených teplot. Používají se zejména nástroje z karbidu wolframu s příměsí kobaltu, slinutými karbidy nebo stellit (stellit je slitina kobaltu a chromu s příměsí wolframu, molybdenu a uhlíku) [6].

Intenzivní chlazení je při obrábění Ti slitin nezbytné a to hlavně z důvodu jejich nízké tepelné vodivosti. Chladicí kapalina rovněž odvádí třísky z místa řezu, dále snižuje řezné síly mezi nástrojem a obrobkem a pozitivně ovlivňuje životnost obráběcího nástroje. Řezné (chladicí) kapaliny nesmí v žádném případě negativně ovlivňovat nástroj nebo obrobek. Z tohoto důvodu nesmí být použita řezná (chladicí) kapalina obsahující chlór, po obrábění musí následovat očištění součásti a její kontrola.

Netradiční metody obrábění

Chemické a elektrochemické metody obrábění jsou používány pro své příznivé vlastnosti. Používají se pro rychlé odstraňování kovu z povrchu komplexně tvarovaných součástí, především z míst o malé tloušťce materiálu nebo na rozsáhlých plochách. Po těchto procesech nedochází k negativnímu ovlivňování mechanických vlastností materiálu [6, 10].

2.2.6 Svařování

Při svařování Ti a jeho slitin hraje roli několik faktorů. Před samotným svařováním je nutné povrch součástí očistit od nečistot a v případě nerovností jej vyrovnat. Při čištění součástí je nutné se vyvarovat čisticích prostředků obsahujících chlór. Pro odstranění vrstvy oxidu z povrchu, se součásti před samotným svařováním máčí v roztavené solné lázni nebo jsou otryskány.

Při svařování je nutné používat atmosféru inertního plynu. Jelikož spotřeba je vyšší než při svařování jiných kovů a z tohoto důvodu se svařuje přímo v komorách s atmosférou hélia nebo argonu o vysoké čistotě. Často pro svařování nelze použít plamen, obalené elektrody nebo svařování pod tavidlem. Nejčastěji používanými metodami je svařování elektrickým obloukem, metodou TIG nebo MIG. Konečným produktem procesu svařování může být například rám jízdního kola (Obr 2.2.6.1).

Svařitelnost Ti slitin je pak závislá na fázovém složení slitin. Z hlediska svařitelnosti je lze rozdělit do tří skupin.

Slitiny α Ti

Slitiny α a blízké α jsou dobře svařitelné. Důvodem je jejich nízká citlivost na tepelné zpracování a houževnatost. Jsou zaručeně svařitelné ve vyžíhaném stavu. Samotný proces svařování má pak v oblasti svaru pouze nepatrný vliv na výsledné mechanické vlastnosti materiálu.

Slitiny $\alpha+\beta$ Ti

U slitin $\alpha+\beta$ může docházet ke značné změně mechanických vlastností v důsledku ohřevu, kterému jsou v průběhu svařování vystaveny. Lze je svařovat jak bez přídavného materiálu tak i s ním.

Slitiny β Ti

Jsou svařitelné pouze ve vyžíhaném stavu. Tento stav se pak používá především z důvodu odlišných vlastností svaru a základního kovu. Pokud jsou svařované součásti v provozu vystaveny zvýšeným teplotám, může docházet u beta Ti slitin ke stárnutí svarového spoje a tím k jejich křehnutí.



Obr 2.2.6.1 Svarový spoj (rám jízdního kola) [17]

V případě nedodržení doporučených podmínek při procesu svařování dochází ke vzniku svarových vad. U Ti slitin se pak může jednat o makro nebo mikro segregaci, popraskání svaru při tuhnutí taveniny, praskání vlivem znečištění svaru při kontaktu se vzduchem, vlhkostí nebo uhlovodíky, kde do svarového kovu vniká zejména kyslík, dusík, uhlík a vodík. Posledně jmenovaný plyn pak může způsobovat tzv. vodíkovou křehkost [18].

2.2.7 Pájení

Pájení je další možností jak vytvořit nerozebíratelný spoj Ti a jeho slitin (Obr 2.2.7.1). Při procesu pájení je kov pájky roztaven a v místě spoje dojde vlivem kapilárního jevu k zatečení pájky do spoje, kde tavenina ztuhne a spojí oba materiály.

V případě Ti a jeho slitin hraje důležitou roli jejich reaktivita s atmosférou, díky které může dojít v průběhu ohřevu snadno k degradaci tepelně ovlivněného materiálu. Proces pájení je tedy potřeba provádět ve vakuu nebo v jiné vhodné atmosféře (argon, helium). Při pájení Ti a jeho slitin je nutno používat speciální tavidla pro ně určené. Těmi jsou směsi fluoridů a chloridů alkalických kovů, sodíku, potasiumu a lithia. Vhodné složení pájky závisí na konkrétním chemickém složení pájených materiálů. Jako naprosto nevyhovující se ukazují pájky obsahující nikl a to z důvodu degradace pájeného spoje i obou materiálů.



Obr 2.2.7.1 Pájený spoj [19]

2.2.8 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování Ti a jeho slitin se provádí: 1. ke snížení zbytkových napětí vytvořených během výroby, 2. pro dosažení optimální kombinace požadovaných vlastností zejména u $\alpha+\beta$ Ti slitin, 3. pro nárůst pevnosti, tj. tepelné zpracování a vytvrzování, 4. k optimalizaci požadovaných vlastností, např. lomová houževnatost, únavová pevnost a pevnost za vysokých teplot.

Základní typy tepelného zpracování

Žihání po obrábění

Žiháním po obrábění se odstraňuje pnutí vzniklé po obrábění, rovnání, tváření a svařování. Provádí se při teplotách 450 - 650°C. Lze říci, že se jedná o univerzální způsob tepelného zpracování.

Rekrystalizační žihání

Rekrystalizační žihání se používá k odstranění deformačního zpevnění po tváření za studena. Při rekrystalizačním žihání se materiály ohřívají na teplotu cca 800 °C.

Izotermické žihání

Podstatou izotermického žihání je ohřev na teplotu 800- 950°C, ochlazení v peci na 500-650°C s výdrží na této teplotě a následného ochlazení. Slitiny tak získávají pevnost, žárupevnost a tvárnost.

Dvojité žihání

Dvojité žihání se odlišuje od izotermického žihání tím, že po výdrži na teplotě následuje ochlazení na vzduchu do oblasti pokojové teploty. Důležité je fázové složení slitiny, tj. pokud vzniká metastabilní fáze β , další ohřev pak způsobí její rozpad na směs fází $\alpha+\beta$ a dojde tak ke zpevnění slitiny, zvýšení pevnosti a poklesu houževnatosti.

Stabilizační žihání

Při stabilizačním žihání dochází k rekrystalizaci, čehož se využívá pro dosažení stability struktury materiálu z hlediska žárupevnosti a pro snížení tvrdosti. Teplota ohřevu je závislá na fázovém složení slitiny, pro slitiny které neobsahují hliník 600-700°C, slitiny obsahující hliník 700-900°C. Po výdrži na teplotě je slitina pomalu ochlazována v peci.

Vytvrzování

Vytvrzování je finálním krokem tepelného zpracování Ti a jeho slitin k dosažení požadované pevnosti ohřevem na teplotu vytvrzování (425-650°C). Proces stárnutí Ti slitin není totožný s procesem využívaným pro Al a Ni slitiny. Ve slitinách $\alpha+\beta$ Ti nebo β Ti způsobuje stárnutí rozklad zbytkové přesycené fáze β po přechlazení.

Stárnutí slitiny při teplotě vyšší než je uvedené a přesto pod teplotou beta transformace vede k tzv. přestárnutí. Tohoto efektu je občas využíváno pro mírné zvýšení pevnosti při zachování uspokojivé houževnatosti a rozměrové stability [10, 20, 21].

2.3 Rozdělení Ti a jeho slitin

Mechanické vlastnosti titanu jsou závislé na jeho čistotě, podstatným způsobem tyto vlastnosti ovlivňují obsahy prvků kyslíku, uhlíku, dusíku a železa. S klesající čistotou titanu dochází ke zvyšování meze pevnosti R_m , tvrdosti HB a poklesu tažnosti A. Z Tab.č.1 je patrné, že zvýšení celkového obsahu nečistot o 0,5 hm % má na zmiňované vlastnosti nezanedbatelný vliv.

Tab.č.1. Mechanické vlastnosti titanu o různé chemické čistotě [6]

Druh Titanu	R_m [MPa]	A [%]	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

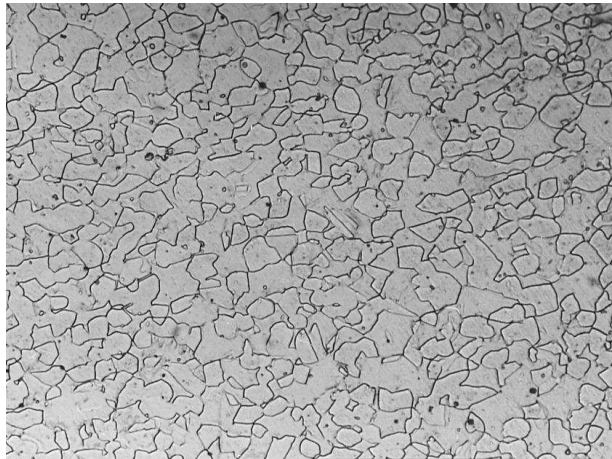
Pro mnoho aplikací v technické praxi není čistý titan vyhovující, běžně se tak používají jeho slitiny. Slitiny se neodlišují pouze fázovým složením α , $\alpha+\beta$ a β , ale také svými specifickými mechanickými, chemickými a technologickými vlastnostmi. Z Tab.č.2. jsou patrné rozdíly mechanických vlastností v závislosti na složení dané slitiny.

Tab.č.2. Přehled mechanických vlastností vybraných titanových slitin

Druh Ti slitiny	R_m [MPa]	R_{p02} [MPa]	A [%]
Grade 2	390 – 540	275 – 450	22
Grade 3	460 - 590	380 – 550	18
Grade 4	540 – 740	483 – 655	16
Grade 5 (Ti6Al4V)	895 – 1000	828 – 910	10
Grade 6 (Ti5Al2,5Sn)	792 – 827	758 – 779	10
Grade 7	390 – 540	275 – 450	22
Grade 9 (Ti3Al2,5V)	690 – 820	515 – 823	15

2.3.1 Slitiny α Ti

Slitiny obsahující pouze fázi α , jsou označovány jako jednofázové slitiny. Jejich legujícími prvky jsou Al, Sn, Zr, (Mn, Fe, Cr ve stopovém množství, Mo v omezené míře do 2,2 hm. %) s kyslíkem, dusíkem a uhlíkem (do 0,2 hm% kyslíku, do 0,05 hm% dusíku a do 0,1 hm% uhlíku). Tyto slitiny vykazují příznivé vlastnosti při zatížení za nízkých i mírně zvýšených teplot a vynikají svojí houževnatostí 18-16 %. Nejpoužívanějším zástupce α Ti slitin lze uvést Titanium Grade 6 (Ti-5Al-2,5Sn - Obr 2.3.1.1) [1].



Obr 2.3.1.1 Mikrostruktura slitiny α Ti (polyedrická α fáze, zvětšeno 750x): Ti-5Al-2,5Sn [22]

2.3.2 Slitiny $\alpha+\beta$ Ti

Tyto slitiny, patří do kategorie tzv. dvoufázových slitin. Obsahují větší množství hliníku (7 - 9 hm. % podle hm. % vanadu), který slouží jako stabilizátor fáze α dále pak nižší množství legovacích prvků sloužících jako stabilizátory fáze β . Nejdůležitějším prvkem pro stabilizaci fáze β je vanad. K dalším legurám používaných u těchto slitin patří Cr, Cu, Zr, které mají za úkol zlepšovat mechanické vlastnosti. V případě některých prvků (zejména u těžkých kovů) existují obavy z jejich negativního působení na lidský organismus zejména při dlouhodobé interakci s tělními tekutinami a to zejména u kloubních náhrad.

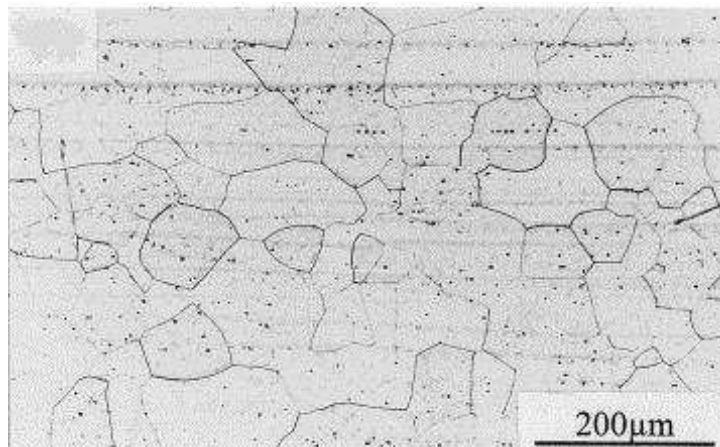
Velkou předností těchto slitin je jejich snadná (v porovnání s ostatními slitinami Ti) zpracovatelnost. Je možno je tvářet i tepelně zpracovávat (kalení, stárnutí). Jejich nevýhodou je však omezené teplotní využití do 450°C, kdy dochází k prudkému poklesu hodnoty mechanických vlastností a zhoršuje se jejich svařitelnost. Nejtypičtějším zástupcem této třídy patří i se všemi modifikacemi slitina Titanium Grade 5 (Ti-6Al-4V - Obr 2.3.2.1) [1].



Obr 2.3.2.1 Mikrostruktura slitiny $\alpha+\beta$ Ti: Ti6Al4V [23]

2.3.3 Slitiny β Ti

Slitiny β jsou stejně jako slitiny α tvořeny pouze jednou fází. Jedná se o slitiny s β stabilizátory tvořící tuhý roztok s Ti. Mezi β stabilizátory patří: Mo, V, Mn, Cr a Fe. Tyto stabilizátory mají za úkol rozšířit a stabilizovat fázi β za pokojových teplot. Slitiny jsou dobře tvářitelné i za studena, lze je pájet nebo svařovat, jako zástupce slitin β Ti lze zmínit Ti-15Mo-3Nb-3Al-0.2Si (Obr 2.3.3.1). Tyto slitiny jsou převážně využívány v zubním lékařství z důvodů nízké teplotní roztažnosti [1, 24].



Obr 2.3.3.1 Mikrostruktura slitiny β Ti: Ti-15Mo-3Nb-3Al-0.2Si [25]

2.3.4 Vliv legur na vlastnosti Ti slitin

Vliv přísadových či legujících prvků na Ti slitiny není zanedbatelný. Tyto prvky rozdělujeme na dvě skupiny, stabilizátory fáze α a stabilizátory fáze β . Množství stabilizátorů dané fáze ve slitině neovlivňuje pouze výsledné mechanické vlastnosti, ale také navazující postupy tepelného zpracování.

Legující prvky (stabilizátory) fáze α

Patří sem prvky jako Al , Sn , Zr a O, N a C. Tyto prvky, zvyšují teplotu transformace α slitiny na β slitinu. Nejvýznamnějším prvkem je hliník, který zvyšuje rozpustnost vodíku, z čehož vyplývá snížení rizika vzniku vodíkové křehkosti (zejména u slitin typu TiAlV). Nicméně obsah hliníku bývá zpravidla limitován (max. 7-9 hm. %) a to z důvodu nárůstu křehkosti, díky čemuž dochází k omezení tvárnosti jak za tepla, tak i za studena.

Kyslík a dusík

Kyslík a dusík patří mezi α stabilizátory, rozpustné ve fázi α ale i fázi β . Výrazným způsobem ovlivňují pevnost, tvrdost, snižují tažnost a houževnatost, už při koncentraci, která se pohybuje řádově v desetinách hm% (kyslík 0,1-0,2 hm. %, dusík 0,03-0,07 hm. %).

Uhlík

Uhlík má omezenou rozpustnost ve fázi α i β . Za pokojové teploty činí maximálně 0,25 hm.%. Pokud není uhlíku v Ti slitině větší množství, působí kladně na mechanické vlastnosti. Při překročení této koncentrace začíná tvořit karbidy titanu (TiC). Naopak pokud koncentrace uhlíku dosáhne hodnoty cca 0,1hm. % projeví se jeho negativní vliv na zhoršení svařitelnosti.

Vodík

Vodík má podstatný vliv na hodnoty nárazové práce. Způsobuje stárnutí Ti slitin, kdy probíhá precipitace hydridu titanu, který způsobuje zkřehnutí slitiny. Z těchto důvodů je důležité držet koncentraci vodíku pod hranicí 0,01hm.%. V případě, že je jeho koncentrace vyšší je potřeba ho odstranit žíháním ve vakuu.

Legující prvky (stabilizátory) fáze β

Mezi přísady či legující prvky stabilizující fázi β Ti patří Mo, V, Mn, Pa, Cr a Fe. Tyto prvky snižují teplotu transformace β do oblasti pokojových teplot. Pokud je jejich koncentrace dostatečná zůstává fáze β stabilní i za těchto teplot.

Hlavním legujícím prvkem pro stabilizaci fáze β je vanad. Má velmi dobrou rozpustnost ve fázi β a nízkou rozpustnost ve fázi α . U slitin zvyšuje pevnost a tvárnost. V praxi se tak dosahuje zvýšením koncentrace hliníku ve slitině, aniž by došlo ke ztrátě tvárnosti v důsledku transformace na fázi α . To je způsobeno tím, že vanad umožňuje zmenšení poměru os a/c u HCP mřížky. Výsledkem tohoto jevu je tak zlepšení možnosti skluzu dislokací ve skluzových rovinách mřížky HCP.

Železo

Železo se dostává do Ti houby už při její výrobě. Zvyšuje tvrdost, pevnost a snižuje tvárnost. Pokud celkový obsah železa nepřekročí koncentraci 0,1hm. % můžeme označit jeho vliv na vlastnosti slitin pouze jako zanedbatelný [6, 10, 26].

2.3.5 Intermetalika

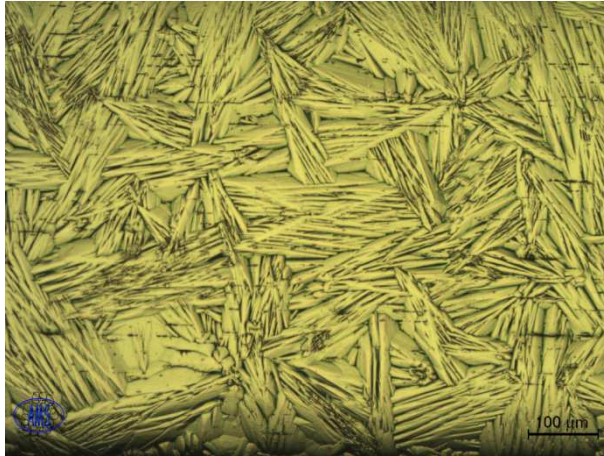
Jsou to slitiny kovů, které se strukturou a vlastnostmi zcela liší od základních komponent systému, které ho tvoří. Jejich vlastnosti tak nelze stanovit interpolací z vlastností těchto jednotlivých složek. Většinou mohou existovat pouze v malém rozsahu koncentrací či o přesném chemickém složení. Pro představu jsou zde uvedena dvě nejpoužívanější intermetalika na bázi Ti : 1. α - β TiAl, 2. TiNi .

TiAl – intermetalika s obsahem Al cca 30 %, která v kombinaci s dalšími kovy (Nb, Cr, V) tvoří slitiny s velmi nízkou hmotností (hustota nižší než 4000 kg/m^3) a velmi dobrou tepelnou vodivostí (Obr 2.3.5.1) disponují neměnnými mechanickými vlastnostmi za vysokých teplot, což je předurčuje pro aplikaci v prostředích se zvýšenou teplotou (součástí kompresorů leteckých turbín). Jejich nevýhodou je nízká houževnatost při pokojových teplotách a značně komplikované obrábění součástí.

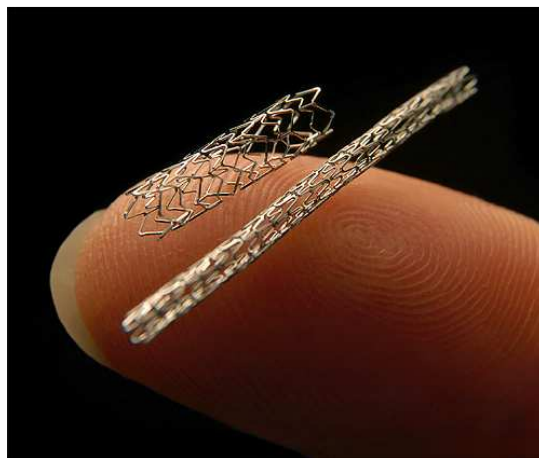


Obr 2.3.5.1 Mikrostruktura TiAl intermetalika: TiAl-2Nb [27]

TiNi – intermetalická fáze o chemickém složení 55-56 hm.% Ni a 44-45% hm.Ti (Obr 2.3.5.2). Tyto intermetalika můžeme zařadit do kategorie superelastických slitin a slitin s tvarovou pamětí. Využívají se hlavně v lékařství k fixacím čelistí, páteře nebo pro výrobu cévních stentů (Obr 2.3.5.3).

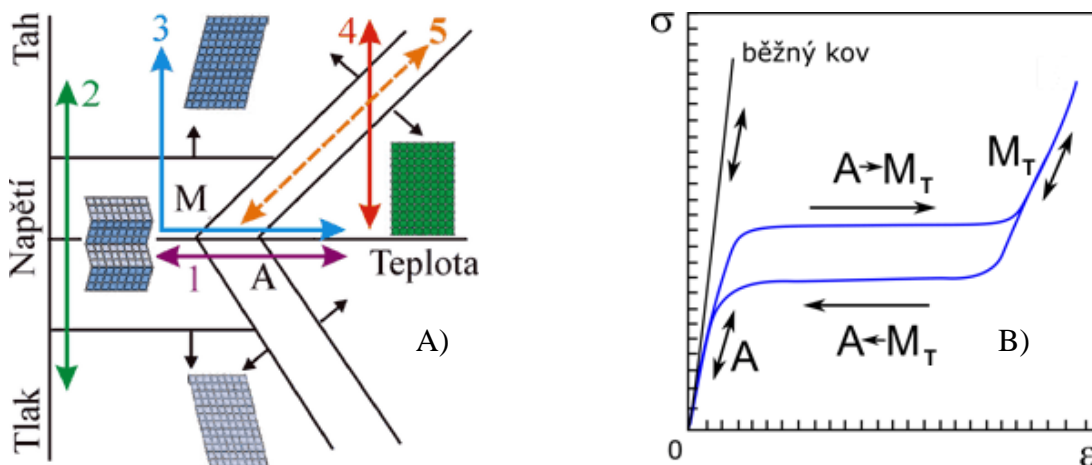


Obr 2.3.5.2 Mikrostruktura TiNi intermetalika: 49,34Ti – 50,66Ni [23]



Obr 2.3.5.3 Cévní stenty [28]

Superelasticitá – pokud namáháme materiály s tvarovou pamětí ve fázi austenitu ($T > A_f$, cesta 4) dochází k martenziticke transformaci (Obr 2.3.5.4 A) z austenitu do nevhodně orientované martenziticke varianty bez nutné změny teploty, jen vlivem napětí. Deformace, která je s tím spojená je omezená, ale plně vratná po odlehčení podle hysterezní křivky (Obr 2.3.5.4 B). Takto popsané chování můžeme označit jako superelasticitu.



Obr 2.3.5.4 Diagram martenziticke transformace A), diagram superelasticity B) [29]

Slitina s tvarovou pamětí (SME*)

Součást z dané slitiny je ochlazena a její tvar je podstatným způsobem změněn. Po následném ohřevu na příslušnou teplotu součást opět získá svůj původní tvar [30].

Slitina s tvarovou pamětí (TWSME**)

Ve srovnání se zmíněným jevem SME jev TWSME umožňuje materiálu si zachovávat tvar i v martenziticke fázi. První etapa probíhá stejně jako u slitin SME, rozdíl je patrný při ochlazování, které provází spontánní změna makroskopického rozměru zároveň se vznikem desek martenzitu s jednotnou orientací. Slitina TWSME tedy přejde přímo do preferovaného typu martenzitu, následkem tohoto přechodu je neschopnost kompenzovat změny rozměrů po transformaci [1].

* SME (shape memory effect) – efekt tvarové paměti

** TWSME (two-way shape memory effect) – dvoucestný efekt tvarové paměti

3. STROJÍRENSKÉ APLIKACE

Ti a jeho slitiny nacházejí v důsledku svých atraktivních vlastností uplatnění v řadě odvětví. V částech následující kapitoly bude věnován prostor využití Ti a jeho slitin v několika vybraných odvětvích. V leteckém průmyslu bývá využívá zejména pro výrobu nosných konstrukcí a součástí motorů. Vesmírný průmysl využívá tyto materiály pro výrobu palivových čerpadel. Sportovní odvětví využívá částí náradí vyrobených z Ti slitin. Ve strojírenství nalézá využití od spojovací techniky (šrouby) až po tlakové nádoby. Novým odvětvím je civilní část zbrojního průmyslu vyrábějící hlavní součásti zbraní z Ti slitin.

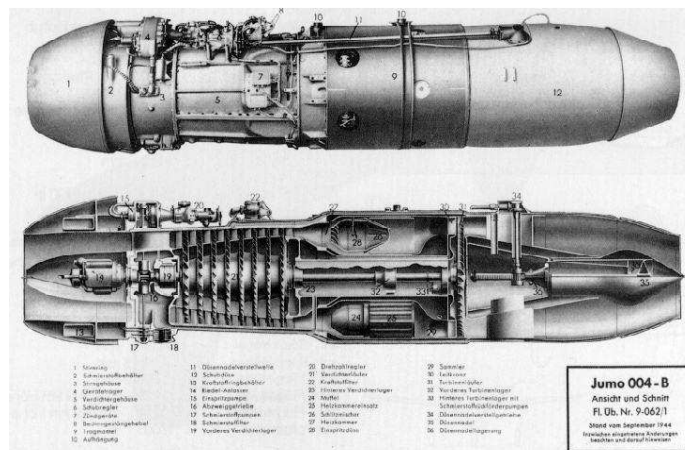
3.1 Letecký průmysl

Už na začátku 2. světové války bylo zřejmé, kterým směrem se bude pohybovat další vývoj v oblasti letecké techniky, postupně vymizí letadla s pístovými motory, které nahradí nové stroje s proudovými motory. Důkazem toho je např. Messerschmitt Me 262 “Schwalbe”, první operačně nasazený letoun s proudovými motory (Obr. 3.1.1).



Obr. 3.1.1 Messerschmitt Me 262 později Avia S-92 (Letecké muzeum Kbely) [31]

Motory, které poháněly tento stroj (Jumo 004 - Obr. 3.1.2) však byly nechvalně známé svojí nízkou životností (cca 10-15 letových hodin, po kterých následovala výměna). Toto bylo způsobeno nedostatkem kvalitního materiálu, který je pro výrobu tohoto typu pohonných jednotek nutný. Při výrobě, tak byly v období 2. Světové války používány náhražky kvalitnějších materiálů, které ovšem byly pro tyto aplikace nevhodné.



Obr. 3.1.2 Řez proudovým motorem Jumo 004 [32]

Dalším strojem, který by mohl s Me 262 soupeřit, co se týče operačního nasazení je britský Gloster Meteor (Obr. 3.1.3), který se používal pro stíhání a ničení střel V1).



Obr. 3.1.3 Gloster Meteor [33]

Po 2. světové válce se rychlým tempem rozběhl vývoj v oblasti proudových motorů, ale stále vzrůstající požadavky na používané materiály donutil konstruktéry nalézt a aplikovat materiály nové, takové, které by vyhovovaly všem na ně v provozu kladeným požadavkům.

Tímto materiálem se stal Ti a jeho slitiny. Vzhledem k vynikajícímu poměru pevnosti k hustotě, svým mechanickým vlastnostem, které si je schopen zachovat i při zvýšených teplotách se staly tyto materiály dominantními v oblasti konstrukce moderních letadel.

Příkladem celotitanové konstrukce je špionážní letoun SR-71 "Blackbird" (Obr. 3.1.4), který z pohledu technologií a použitých materiálů předběhl svoji dobu asi o 30 let [34].



Obr. 3.1.4 SR-71B Blackbird [35]

3.2 Vesmírný průmysl

Ti a jeho slitin jsou také používány ke konstrukci raket a raketoplánů nejen pro své mechanické vlastnosti, ale také pro svoji nižší hmotnost ve srovnání se slitinami Fe, příkladem může být raketoplán Atlantis (Obr. 3.2.1) jehož části nosné konstrukce jsou vyrobeny z Ti slitin. Využití titanu a jeho slitin znamená, že raketa (raketoplán) spotřebuje méně paliva na to, aby se raketa vymanila z působení gravitačního pole Země. Zároveň dochází ke zvýšení užitečné nosnosti rakety (raketoplánu). Ti a jeho slitiny zde nalézají uplatnění jako konstrukční materiály pro výrobu palivových čerpadel kapalného vodíku, okysličovačel a částí nosné konstrukce.



Obr. 3.2.1 Raketoplán Atlantis [36]

3.3 Sportovní odvětví

Stejně jako v jiných odvětvích se i zde začal používat Ti kvůli své vysoké pevnosti a relativně nízké hmotnosti. Tyto vlastnosti velkou měrou přispívají k pohodlnějšímu používání a delší životnosti sportovního nářadí ať již jde o jízdní kola, tenisové rakety nebo hlavice golfových holí (Obr. 3.3.1).



Obr. 3.3.1 Rám jízdního kola a hlavice golfové hole [37, 38]

3.4 Strojírenství

V oblasti strojírenství také nacházíme Ti a jeho slitiny v těch nejnáročnějších aplikacích. Příkladem mohou být Ti slitiny pro výrobu součástí plynových turbín, v automobilním průmyslu součásti ventilových rozvodů, v chemickém průmyslu výstelky nádrží pro skladování chemikálií (Obr. 3.4.1 A), ve spojovací technice (Obr. 3.4.1 B), v kryogenických podmínkách pro výrobu čerpadel zkapalněných plynů (vodík) a také pro výrobu kuchyňského nádobí a nádobí pro kempink (Obr. 3.4.1 C) [39, 40].



Obr. 3.4.1 A) Nádrž pro skladování chemikálií; B) spojovací materiál šrouby, podložky, matice;
C) titanové nádobí pro kempink [41, 42, 43]

3.5 Zbrojní průmysl

Titan se svými slitinami pronikl i do tohoto specifického odvětví průmyslu. Důvodem, proč se začaly tyto materiály používat, byl stejný jako ve všech výše popsaných odvětvích tj. vysoká pevnost v poměru ke hmotnosti.

Hmotnost je důležitým faktorem pro zbraň určenou k dennímu nošení - ať už jako obranné (v případě civilisty) nebo služební (v případě ozbrojených sborů). Jako příklad lze uvést například zbraně, které mají jednu ze svých hlavních částí vyrobenou z Ti slitiny. První je poloautomatická pistole Christensen 1911 Commander (Obr. 3.5.1 A), kde je ze slitiny titanu vyrobeno tělo zbraně. Druhou je revolver S&W Model 340 (Obr. 3.5.1 B), který má ze slitiny titanu vyroben revolverový válec.



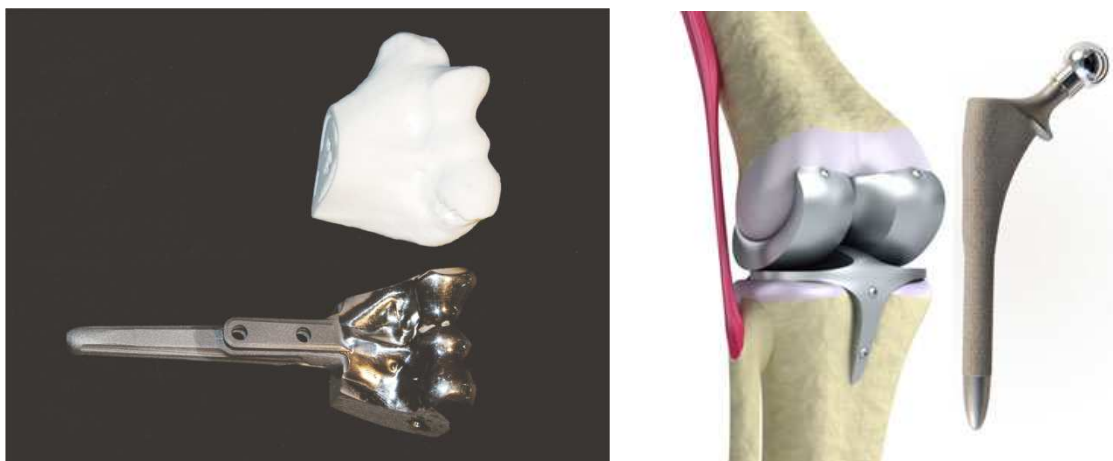
Obr. 3.5.1 A) Christensen 1911 Commander, B) S&W Model 340 [44, 45]

4. BIOAPLIKACE

Jak už bylo uvedeno dříve Ti a jeho slitiny mají využití v mnoha odvětvích lidské činnosti mezi, které patří i lékařská věda. První užití Ti jako biomateriálu spadá do 2. poloviny 60. let, kdy se jako biomateriály používaly některé druhy ocelí. Dnes se upřednostňuje komerčně čistý Ti nebo jeho slitiny pro jeho vysoké odolnosti vůči korozi, která je daná porézní pasivační vrstvou oxidu na povrchu kovu. Tato vrstva výrazně napomáhá dobrému přijetí implantátu. Velkou výhodou Ti a jeho slitin je jejich netoxičita a nulový karcinogenní vliv na okolní tkáň v neposlední řadě také to, že nezpůsobuje alergie [2].

4.1 Implantologie

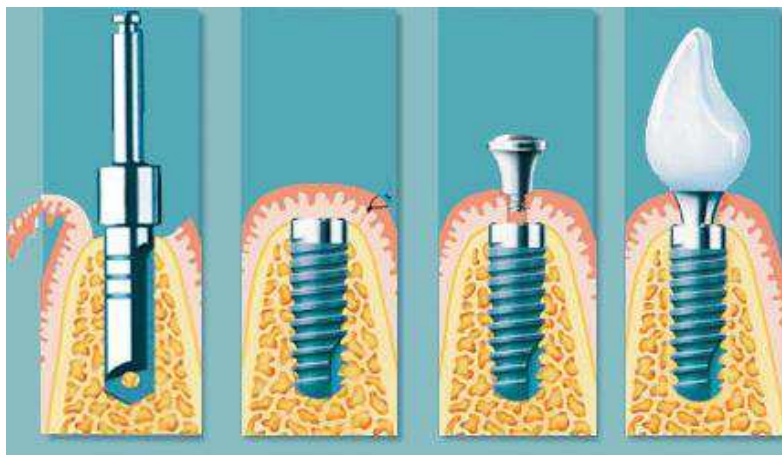
Tento obor, jak již z názvu vyplývá, se zabývá implantací různých fixačních přípravků. Některé typy zlomenin je nutno zafixovat pomocí šroubů a zajistit tak správný srůst kosti. Dalším typem implantátů jsou také kloubní náhrady (Obr. 4.1.1). Ty nastupují v případě, že je nutné nahradit kloub opotřeбенý nadměrným užíváním nebo poškozený úrazem.



Obr. 4.1.1 Příklady kloubních náhrad [46, 47]

4.2 Dentální aplikace

Dentální aplikace jsou dalším oborem, kde lze nalézt praktické uplatnění Ti nebo jeho slitin. Důvody proč je používání těchto materiálů tak časté můžeme najít v jeho vlastnostech, které jsou pro nositele nejdůležitější. Kromě pevnosti i nižší hmotnost implantátu (Obr. 4.2.1) je též tzv. chuťová neutralita, kdy nositel při každodenní konzumaci potravin nezaznamenává přítomnost implantátu.



Obr. 4.2.1 Schéma implantace Ti vrutu do čelisti a jeho následné osazení zubní náhradou [48]

Jednotlivé fáze zobrazené na schématu jsou s nezbytnými časovými odstupy potřebnými pro zhojení okolní tkáně a přijetí implantátu.

5. ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byly formou literární rešerše shromážděny a přehledně uspořádány informace o výrobě, vlastnostech a oblastech využití titanu a jeho slitin. Pozornost byla zaměřena na technologii výroby, a na charakteristiky a rozdělení titanu a jeho slitin. V další části práce je uvedeno několik vybraných odvětví s různou mírou využití titanu a jeho slitin. Závěrečná část práce je věnována tzv. biokompatibilitě tj. snášenlivosti látek v biologickém prostředí, oboru implantologie a oboru dentálních aplikací.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KLUSÁK, O. *Biokompatibilní materiály na bázi kovů a jejich využití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lenka Klakurková, Ph. D.
- [2] Vladimír Sedláček, Titan a jeho slitiny, Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1,1963
- [3] <http://www.zubniimplantat.cz/historie-zubnich-implantatu/>
- [4] International Titanium Association , Specifications book fourth edition -2005, 2655 W.Midway Boulevard , Suite 300 Broomfield
- [5] <http://www.titanium.org/chinese/English/Background/theultimatechoib.html>
- [6] 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.
- [7] www.japanmetalbulletin.com
- [8] <http://geologie.vsb.cz>
- [9] <http://mineralogische.staatssammlung.userweb.mwn.de>
- [10] DONACHIE, J.M. Titanium: A Technical Guide - 2nd Edition, ASM International, United States of America 2005
- [11] <http://www.reade.com>
- [12] <http://www.sae.org>
- [13] Ing. Aleš Hermann, PhD., Lití na vytavitelný model
- [14] <http://www.rolls-royce.com>
- [15] ŠUPÁLEK, M. *Přesné lití turbínových kol turbodmychadel ze slitin TiAl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.
- [16] <http://i01.i.aliimg.com>
- [17] <http://farm3.static.flickr.com>
- [18] <http://www.titanium.org/chinese/English/Background/theultimatechoib.html>
- [19] <http://www.titanium-brazing.com>
- [20] <http://news.alibaba.com/article/detail/metalworking/100188113-2-metals-knowledge%253Aheat-treating-titanium-titanium.html>
- [21] Luděk Ptáček a kolektiv, Nauka o materiálu 2, Brno: CERM s.r.o, 2002
- [22] MICHNA Štefan, Přednáška: Titan – vlastnosti, použití, slitiny a výroba, Ústí nad Labem: Univerzita J.E.Purkyně, 2008
- [23] KLAURKOVÁ Lenka, SLÁMEČKA Karel, ČELKO Ladislav, MAN Ondřej, Atlas materiálových struktur, Brno: VUT FSI Ústav materiálových věd, 2009
- [24] Petr Šatra, Semestrální práce z SMT: Titan a jeho slitiny se zaměřením na letecký průmysl, Praha: ČVUT FD, 2008

- [25] BERGER M.C, GREGORY J.K, Residual stress relaxation in shot peened Timetal 21s, Technical University of Munich, 1999
- [26] REICHMAN, L. Využití slitin titanu v cyklistickém průmyslu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [27] POLÁK Jaroslav, OBRTLÍK Karel, PETRENEC Martin, MAN Jiří, KRUML Tomáš, Odborná práce: Mechanisms of High Temperature Damage in Elastoplastic Cyclic Loading of Nickel Superalloys and TiAl Intermetallics, Brno: Ústav fyziky materiálů AV ČR, 2013
- [28] <http://www.designworldonline.com>
- [29] <http://ofm.fzu.cz>
- [30] Václav Novák, CSc., Odborná práce: Intermetalika a jevy tvarové paměti RNDr., Fyzikální ústav Akademie věd ČR
- [31] <http://www.navzduchu.cz>
- [32] <http://www.leteckemotory.cz>
- [33] <http://www.wiivehicles.com>
- [34] Paul F. Crickmore, Bojové legendy: SR-71 Blackbird, Praha 2004
- [35] <http://good-wallpapers.com>
- [36] <http://www.enstoneflyingclubblog.co.uk>
- [37] <http://mtobikes.com>
- [38] <http://www.titleist.com>
- [39] Přednáška č. 2 z předmětu SMA : Nikl a jeho slitiny, Titan a jeho slitiny
- [40] <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-07-42.pdf>
- [41]] <http://kozigkar.hu>
- [42] <http://2.imimg.com>
- [43] <http://www.alpkit.com>
- [44] <http://www.arms-cz.cz>
- [45] <http://www.weaponsandgear.com>
- [46] <http://www.emeraldinsight.com>
- [47] <http://www.pressuretechnology.com>
- [48] <http://www.dr-brigitte-steinberg.de>