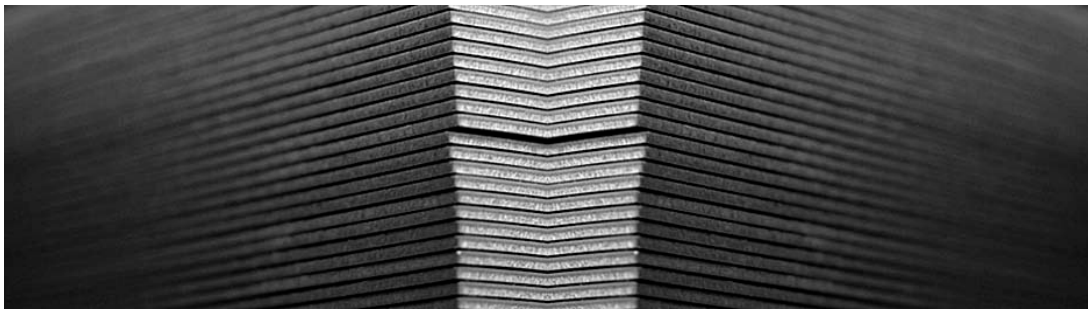


Titan



Henning Johansen

	side:
INNHOLD	2
FORORD	3
1 INNLEDNING	3
2 EGENSKAPER	4
3 FREMSTILLING OG PRODUKSJON	4
4 TITANLEGERINGER	6
4.1 Metallurgi	7
4.2 β -omvandilgstemperaturen	10
4.3 Ulegerte titantyper	11
4.3.1 Bruksområder for ulegert titan	11
4.4 α - og nær α -legeringer	11
4.5 α + β -legeringer	12
4.5.1 Bruksområder for α + β -legeringer	12
4.6 β -legeringer	12
4.6.1 Bruksområder for β -legeringer	13
5 SAMMENLIGNING MED ANDRE METALLER	13
6 KORROSJON	14
7 VARMEBEHANDLING	14
7.1 Avspenningsgløding	14
7.2 Gløding	15
7.3 Oppløsningsbehandling og utharding	15
7.4 Rengjøring før varmebehandling	16
8 SVEISING	16
9 EKSEMPLER PÅ BRUK AV TITAN METALL	17
9.1 Fly industrien	17
9.2 Medisin og proteser	18
9.3 Forsvar	18
9.4 Bygg og anlegg	19
9.5 Privat bruk	20
10 REFERANSER	20

FORORD

Dette kompendium er beregnet på personer som er fortrolig med grunnleggende materiallære og som ønsker å få en grunnleggende innføring i titan Ti og Ti-legeringer som er tyngst i gruppen lettmetaller. Det er skrevet ut i fra en serie med forelesninger for bachelorstudenter i Materiallære ved Høgskolen i Gjøvik. Det er lagt stor vekt på gode illustrasjoner og kortfattet tekst.

Som mål har dette kompendium å gi en kort innføring om titan og titan-legeringer. Hvilke egenskaper titan har og kort om hvordan Ti fremstilles. Hvordan vi deler Ti og Ti-legeringer i grupper og eksempler på bruksområder for disse gruppene. Ti-legeringer sammenlignes med andre metaller som er konkurrenter i forhold til styrke og korrosjonsegenskaper. Vi ser på hvordan vi kan varmebehandle Ti-legeringer for å forbedre enkelte egenskaper. Vi ser videre på sveisbarheten til disse legeringene. Vi avslutter med å se på anvendelsesområder.

Forfattereren var tidligere ansatt som bl.a. seksjonsleder ved Teknologisk Institutt, avd. for materialteknologi i Oslo, og er nå førsteamanuensis i materialteknologi ved Høgskolen i Gjøvik.

1 INNLEDNING

Titan er det tyngste av lettmetallene med tetthet på $4,51\text{g/cm}^3$.

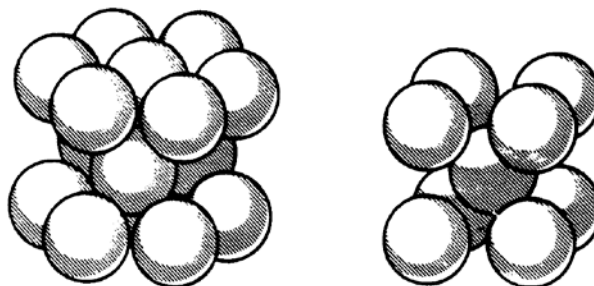
Titan kommer på niende plass blant grunnstoffene på jorda. Det utgjør ca. 0,6% av jordskorpa. I naturen eksisterer metallet bare i kjemisk forbindelse med andre elementer, hovedsakelig med oksygen (rutil) og/eller med jern (ilmenitt). Mesteparten av titan fremstilles fra mineralet ilmenitt. Ilmenitt forekommer i Norge.

Titandioksyd foredles i Norge fra mineralet ilmenitt som består av 45-70% TiO_2 . Norge eksporterer titandioksyd til land hovedsakelig i Europa.

Ca. 90% av alt titanråstoff som fremstilles er titanoksyd, bare 10% brukes til for videreforedling av metall. Titanoksydet anvendes som tilsats i for eksempel maling, papir og plast da det gir en fin hvitfarge. Det brukes også som tilsats i fiskepudding for å gjøre denne hvit. Titan er bio-kompatibelt og går rett igjennom kroppen.

Titan er et sølvfarget metall som, på samme måte som jern, kan eksistere i flere krystallinske former. Materialet kan gjennomgå en allotrop omvandling.

Ved romtemperatur har titan en heksagonal tettpakket krystallstruktur som kalles α (alfa)-fase. α -fasen er i ren titan (ulegert titan) stabil opp til ca 886°C . Over denne temperaturen går materialet gjennom en allotrop omvandling til en kubisk romsentrert struktur som kalles β (beta)-fasen. En tilsvarende allotrop omvandling skjer i ulegerte stål med ferritt som går over til austenitt ved oppvarming fra romtemperatur til over 910°C .



Figur 1.1

- a) Tettpakket heksagonal struktur, α -fasen. (1)
b) Kubisk romsentrert struktur, β -fasen. (1)

2 EGENSKAPER

Titan har følgende karakteristiske egenskaper:

- Tettheten er 4.51 g/cm^3 (ca. 60% av stål).
- E-modul på 120.000 N/mm^2 (ca. halvparten av austenittiske rustfrie stål som 254SMO, 200.000 N/mm^2).
- Ren titan har veldig gode korrosjonsegenskaper og er for eksempel nærmest immunt mot angrep fra klorider og de fleste uorganiske syrer. Titan er derfor godt egnet i aggressive medier hvor andre metaller ikke har tilstrekkelig god korrosjonsmotstand.
- Titan er ikke giftig, er bio-kompatibelt, og brukes til proteser i kroppen, for eksempel kunstige ledd og hjerteklaffer.
- Ren titan har veldig god sveisbarhet.
- Maskinerbarheten og formbarheten er generelt sett dårligere enn for stål.
- Titan er ikke magnetisk.
- Varmeutvidelseskoeffisienten på $8,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}^0\text{C}$ er ca. halvparten av hva den er for austenittiske rustfrie stål ($16,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}^0\text{C}$) og mindre enn halvparten sammenliknet med aluminium ($23,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}^0\text{C}$).
- Ren titan har en flytegrense på ca. 170 N/mm^2 , men selv små mengder av elementene oksygen (O), nitrogen (N) og jern (Fe) øker styrken vesentlig. For eksempel har den mest brukte typen av ren titan, ASTM B-265 grad 2, en flytegrense på ca. 280 N/mm^2 .
- Ved veldig lave temperaturer (kryogene forhold) anvendes titan med veldig lavt innhold av forurensninger som oksygen, nitrogen, hydrogen og karbon. Denne titantypen kalles ELI (en forkortelse for Ekstra Lavt Innhold av Interstitials) og bevarer god duktilitet og seighet ved kryogene temperaturer.
- Titan har en smeltetemperatur på ca. 1668^0C (austenittiske rustfrie stål har ca. 1420^0C). Metallet er på grunn av den store affiniteten til andre elementer ikke brukbart ved temperaturer over 427^0C . Enkelte titanlegeringer kan brukes opp til ca. 550^0C .
- Titan har "Shape memory" egenskaper når legeret med for eksempel nikkel

En oppsummering av noen egenskaper finner du i tabellen under.

Egenskap	Data	Egenskap	Data
Atomvekt	47,9	Elastisitetsmodul E	120000 N/mm^2
Egenvekt	$4,51 \text{ g/cm}^3$	Varmeledningsevne (20^0C)	$17 \text{ W/m}^0\text{C}$
Smeltepunkt	1668^0C	Lineær varmeutvidelse	$8,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}^0\text{C}$
$\alpha \rightarrow \beta$	882^0C	Elektrisk ledningsevne	$2,0 \text{ MS/m}$
Kokepunkt	3287^0C	Elektrisk motstandsevne (20^0C)	$482 \text{ n}\Omega\text{m}$

Tabell 2.1

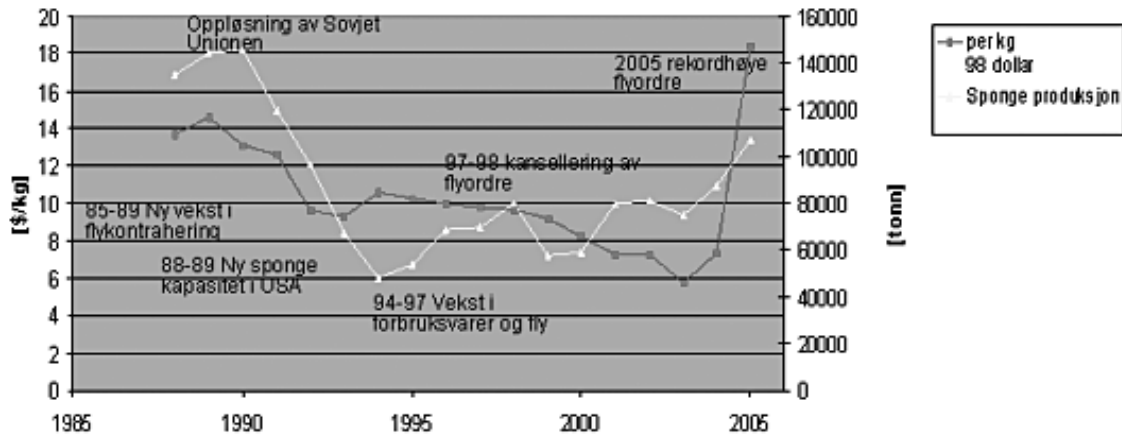
Noen egenskaper til titan. (2) (3)

3 FREMSTILLING OG PRODUKSJON

Årlig produksjonsvolum av Ti er ca. 150 000 tonn. Japan, tidligere Sovjetunionen, USA og Kina er de største produsentene. Hovedproduksjonen av titanråstoff er titandioksyd (pigment), TiO_2 og utgjør ca. 90%. Altså blir bare ca. 10% benyttet til fremstilling av titan metall. Kommersiell fremstillingsmetode ble oppdaget av William Kroll (1889 - 1973) ca. 1940. Fremstillingsprosessen er kostbar og kompleks og består av flere delprosesser. Den samme prosessen benyttes fortsatt i dag, og den innehar et stort forbedringspotensiale. På grunn av

den komplekse prosessen blir titan et dyrt metall. Prisen varierer veldig, 20 - 40USD/kg (ingot/blokk).

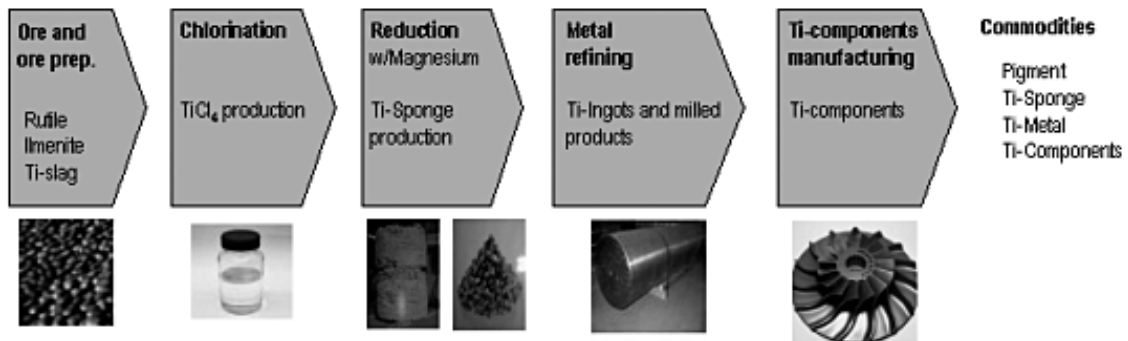
Figuren under viser priser og produksjonsvolum av titanoksyd, TiO_2 , fra 1985 og frem til dagens.



Figur 3.1

Priser, \$/kg, (til venstre) og produksjonsvolum, tonn, (til høyre) av titanoksyd (sponge), TiO_2 , fra 1985 og fremover. (4)

Hvorfor er titanfremstilling så dyrt? Den komplekse prosessen er en forklaring på dette. Det trengs 4 forskjellige fabrikker/prosesser for å komme frem til ferdig metall, se figuren under.



Kost distribusjon fra malm til ferdig titan produkt (USD/Kg):

Rutil: 0,5
Ilmenitt

$TiCl_4$: 0,8 - 1,2

Sponge: 9 - 13

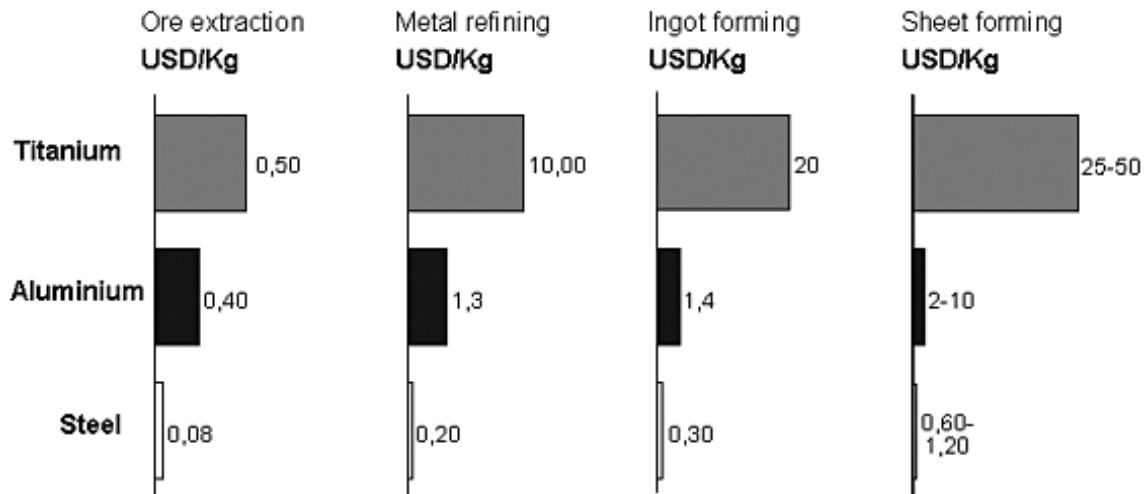
Ingots: 20 - 30
Milled: 30 - 50

Støpt: 50 - 300
Maskinert: 200 - 600

Figur 3.2

Den komplekse produksjonsprosessen for fremstilling av titanoksyd (sponge), titan metall og ferdige titan produkter. (4)

Ved å studere prosessen er det lett å forstå at titan er dyrt. Ti vil neppe kunne konkurrere med stål selv om det i fremtiden vil bli utviklet nye og billigere produksjonsmetoder.



Figur 3.3

Sammenligning av fremstillingskostnader (USD/kg) for titan sammenlignet med aluminium og stål, (2000) (4)

4 TITANLEGERINGER

De mekaniske egenskapene til titan kan tilpasses ulike bruksområder ved å tilføre ulike legeringselementer.

Spesielt interessant er det å forbedre styrken av titan til bruk i konstruksjoner som er utsatt for store påkjenninger samtidig som det stilles krav til lav vekt. I tillegg kan det være krav til god korrosjonsmotstand og høy driftstemperatur.

Tilsats av legeringselementer (hovedsakelig aluminium) øker brukstemperaturen for titanlegeringene slik at enkelte legeringer kan anvendes opp til ca. 550°C. Begrensning i brukstemperatur skyldes at metallet reagerer med oksygen/nitrogen slik at det dannes sprø faser på overflaten, faser som nedsetter duktiliteten og utmattingsegenskapene.

Avhengig av hvilken krystallstruktur de ulike titanlegeringene har ved romtemperatur deler vi legeringene inn i følgende tre typer:

- α -legeringer
- $\alpha+\beta$ -legeringer
- β -legeringer.

Vi kan i faglitteraturen finne en inndeling i fem og ikke tre typer titanlegeringer. I tillegg til de ovennevnte opererer vi med en nær- α -legering (super - α) og en nær- β -legering (metastabil). I motsetning til α -legeringen vil det i en nær- α -legering ved oppvarming dannes noe β -fase. Ved romtemperatur vil imidlertid en α og en nær- α -legering oppføre seg tilnærmet likt.

I en nær- β -legering vil det kunne skilles ut sekundære faser ved varmebehandling.

Med unntak av tinn og zirkonium, som gir styrkeøkning gjennom løsningsstyrking i både α - og β -fasen, vil fasefordelingen mellom α og β ved en gitt temperatur være et resultat av både kjemisk sammensetning og termisk historie.

For å forstå hvordan strukturen påvirkes, samt hvordan de ulike strukturene oppstår, er det hensiktsmessig å gi en kort innføring i den fysikalske metallurgien til titan.

De viktigste karakteristikker for legeringstypene:

α -legeringer har følgende hovedkarakteristikker:

- overveiende α -struktur
- høy styrke ved høy temperatur
- god sveisbarhet
- høy bruddseighet
- rimelig bearbeidbarhet
- kan ikke varmebehandles til høy styrke

β -legeringer har følgende hovedkarakteristikker:

- har nesten 100% β -fase
- lav krepstyrke over 275°C
- god sveisbarhet
- god bearbeidbarhet
- kan varmebehandles til høy styrke

$\alpha+\beta$ -legeringer har følgende hovedkarakteristikker:

- strukturen består av både α - og β -fase
- god termisk stabilitet
- relativt dårlig sveisbarhet
- rimelig god bearbeidbarhet
- kan varmebehandles

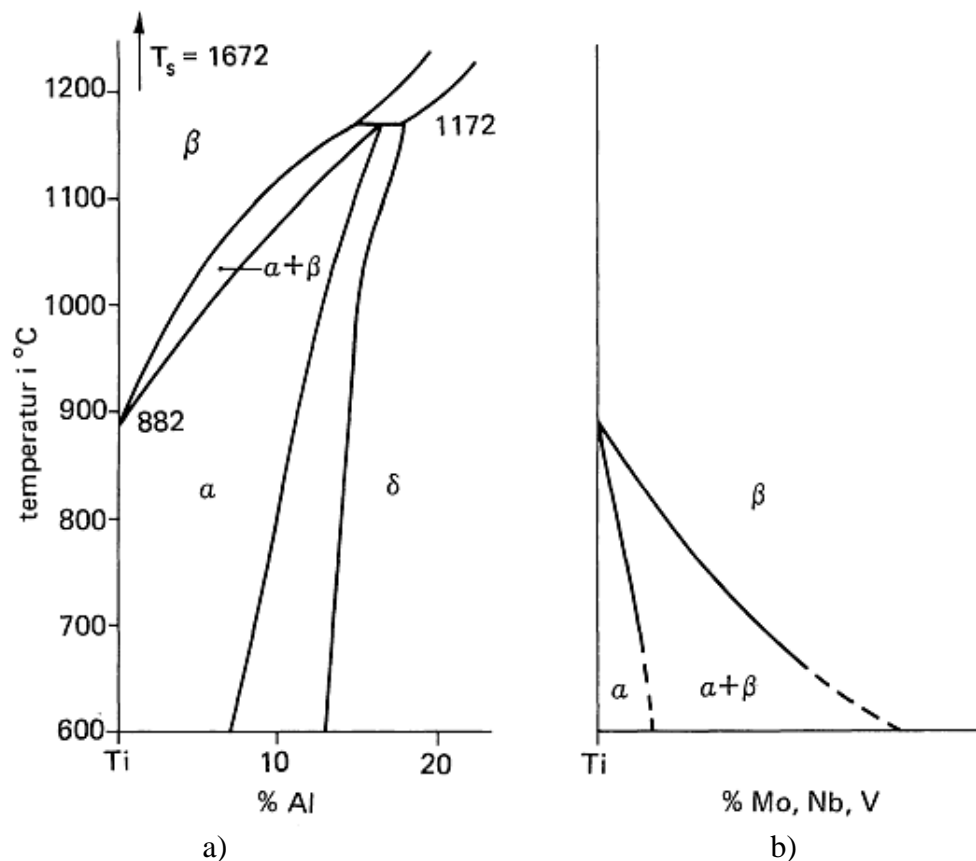
4.1 Metallurgi

Karbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N) og oksygen (O) gir løsningsstyrking (addisjonsløsning) i titan. C, N og O har størst løselighet i α -fasen og klassifiseres derfor som α -stabilisatorer.

Hydrogen har større løselighet i β -fasen og klassifiseres derfor som β -stabilisator.

Alle fire elementene som er nevnt ovenfor er interstitielle elementer som går i mellomromsposisjoner i gitteret og finnes som forurensningselementer i titan. Forskjellen i mekaniske egenskaper innen gruppen av ulegerte titantyper skyldes ulikt innhold av slike elementer, og da hovedsakelig oksygen.

De ulike legeringselementene og forurensningselementene i titan vil altså enten stabilisere α -fasen, for eksempel aluminium (Al) og tinn (Sn), eller β -fasen, for eksempel tantalium (Ta), molybden (Mo), niob (Nb) og vanadium (V).



Figur 4.1

- a) Al øker omvandlingstemperaturen i Ti-legeringer og betegnes α -stabilisator.
 b) Mo, Nb og V senker temperaturen og betegnes β -stabilisatorer. (5)

Omvandlingstemperaturen hvor strukturen skifter fra α - til β -fasen kalles ofte β -omvandlingstemperaturen (jamfør her med ulegert stål hvor omvandlingstemperaturen for ferritt til austenittomvandlingen kalles austenittiseringstemperaturen).

Alle legeringselementene som tilsettes titan resulterer i løsningsstyrking av metallet.

Styrkemekanismen er så avgjørende for egenskapene at den mest brukte av alle titantypene, Ti-6Al-4V (Grad 5), vanligvis anvendes i glødd tilstand.

Både elementer som går i addisjonsløsning og elementer som går i substitusjonsløsning spiller en betydelig rolle for de mekaniske egenskapene. Generelt er elementer som går i substitusjonsløsning å foretrekke fremfor elementer som går i addisjonsløsning (O, C, N, H). Dette fordi substitusjonsløsning har vist seg å gi de beste kombinasjoner av mekaniske egenskaper som fasthet, duktilitet og seighet.

Tabellen under gir en oversikt over de vanlige titantypene.

Betegnelse:	R _m min. N/mm ²	R _{p0,2} min. N/mm ²	Forurensninger %					Nominell analyse %				
			N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Andre
Ulegerte kvaliteter:												
ASTM Grade 1	240	170	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18					
ASTM Grade 2	340	280	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25					
ASiM Grade 3	450	380	0,05	0,10	0,015	0,30	0,35					
ASTM Grade 4	550	480	0,05	0,10	0,015	0,50	0,40					
ASiM Grade 7	340	280	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25					0,2Pd
Alfa- og nær-alfa-legeringer:												
Ti0,3Mo-0,8Ni	480	380	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25				0,3	0,8Ni
Ti-5Al-2,5Sn	790	760	0,05	0,08	0,02	0,50	0,20	5	2,5			
Ti-5Al-2,5Sn-ELI	690	620	0,07	0,08	0,0125	0,25	0,12	5	2,5			
Ti-8Al-1Mo-1V	900	830	0,05	0,08	0,015	0,30	0,12	8			1	1V
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo- Ti6242	900	830	0,05	0,05	0,0125	0,25	0,15	6	2	4,0	2	
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0,8Mo	790	690	0,02	0,03	0,0125	0,12	0,10	6			1	2Nb, 1Ta
Ti-2,25Al-11Sn-5Zr-1Mo	1000	900	0,04	0,04	0,008	0,12	0,17	2,25	11,0	5,0	1,0	0,25Si
Ti-5Al-5Sn-2Zr-2Mo(a)	900	830	0,03	0,05	0,0125	0,15	1,13	5	5	2,0	2	0,25Si
Ti-6Al-2,8Sn-4Zr-4Mo-4,5Si-Ti1100	930	850				0,02	0,07	6	2,75	4,0	0,40	0,45Si
Alfa-beta-legeringer:												
Ti-6Al-4V-Titan gr. 5	900	830	0,05	0,10	0,0125	0,30	0,20	6,0				4,0V
Ti-6Al-4V-ELI	830	760	0,05	0,08	0,0125	0,25	0,13	6,0				4,0V
Ti-6Al-6V-2Sn(b)	1030	970	0,04	0,05	0,015	1,0	0,20	6,0	2,0			0,75Cu, 6,0V
Ti-8Mn(b)	860	760	0,05	0,08	0,015	0,50	0,20					8,0Mn
Ti-7Al-4Mo(b)	1030	970	0,05	0,10	0,013	0,30	0,20	7,0			4,0	
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo-Ti6246	1170	1100	0,04	0,04	0,0125	0,15	0,15	6,0	2,0	4,0	6,0	
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr-Ti117(b)	1125	1055	0,04	0,05	0,0125	0,30	0,13	5,0	2,0	2,0	4,0	4,0Cr
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr(a)(b)	1030	970	0,03	0,05	0,0125	0,25	0,14	5,7	2,0	2,0	2,0	2,0Cr, 0,25Si
Ti-10V-2Fe-3Al(a)(c)	1170	1100	0,05	0,05	0,015	2,5	0,16	3,0				10,0V
Ti-3Al-2,5V(c)	620	520	0,015	0,05	0,015	0,30	0,12	3,0				2,5V
Beta-kgeringer:												
Ti-13V-11Cr-3Al(c)	1170	1100	0,05<	0,05	0,025	0,35	0,17	3,0				11,00Cr, 13,0V
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al(a)(c)	1170	1100	0,05	0,05	0,015	2,5	0,17	3,0			8,0	8,0V
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr(a)(b)	900	830	0,03	0,05	0,020	0,25	0,12	3,0		4,0	4,0	6,0Cr, 8,0 V
Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn(b)	690	620	0,05	0,10	0,020	0,35	0,18		4,5	6,0	11,5	

a) mekaniske egenskaper er oppgitt for glødet tilstand

b) mekaniske egenskaper er oppgitt for oppløsningsbehandlet og utskillingsherdet tilstand

c) legeringen brukes særlig til rør og kan kaldtrekkes for å øke styrken

Tabell 4.1)
En oversikt over de vanlige titantypene. (1)

Det store antallet elementer som egner seg til substitusjonsløsning i titan resulterer i et bredt spekter av titanlegeringer med ulike egenskaper.

Egenskapene til α - og α - β -legeringene er hovedsakelig oppnådd gjennom substitusjonsløsning.

Innlegering med elementer som går i addisjonsløsning er en billig måte å øke styrken på. Tabell 4.1 viser hvor styrken i de ulegerte titantypene varierer med innhold av O, N og Fe.

4.2 β -omvandlingstemperaturen

Da β -omvandlingstemperaturen har stor betydning for varmebehandling og bearbeiding av titanlegeringer, er det nødvendig med en nærmere definisjon.

O, N og C (α -stabilisatorer) vil øke omvandlingstemperaturen hvor α -fasen omdannes til β -fasen, mens H (β -stabilisator) senker denne temperaturen. Andre legeringselementer vil også innvirke på denne temperaturen.

β -omvandlingstemperaturen er her definert som den temperaturen hvor α -fasen eller α -fasen + β -fasen omdannes til bare β -fase.

Tabellen under viser β -omvandlingstemperaturen for de vanligste titanlegeringene.

Legering	β -omvandlingstemperatur ($\pm 15^{\circ}\text{C}$)
ulegert titan $\text{O} \leq 0,25$	910
ulegert $\text{Ti} \leq 0,40$	945
α - og nær- α -legeringer	
Ti-5Al-2,5Sn	1045
Ti8Al-1Mo-1V	1040
Ti-6Al-2,5Sn-4Zr-2Mo	997
Ti-0,3Mo-0,8Ni	880
Ti-6Al-2Cb-1Ta-0,5Mo	1015
α -legeringer	
Ti-6Al-4V	995
Ti-6Al-6V-2Sn	945
Ti-3Al-2,5V	930
Ti-6Al-2Sn-4Mo-2Zr-4Cr	905
Ti-7Al-4Mo	1000
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0,25Si	970
Ti-8Mn	785-815
β -legeringer	
Ti-13V-11Cr-3Al	720
Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn	755
Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo	795
Ti-10V-2Fe-3Al	805
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	760

Tabell 4.2
 β -omvandlingstemperaturen for de vanligste titanlegeringene. (1)

4.3 Ulegerte titantyper

Det finnes flere typer ulegert titan, ofte referert som ren titan. Den viktigste forskjellen ligger i innholdet av O, N og Fe. Styrken på ren titantypene øker med økende innhold av disse forurensningselementene, se Tabell 4.1.

Oppvarming av ren titan til høyere temperaturer medfører oksidasjon av overflaten i kombinasjon med en løsningsstyrking (substitusjonsløsning) av et tynt sjikt på overflaten av metallet. Dette sjiktet (ofte kalt α -skall) medfører redusert duktilitet og utmatningsstyrke av komponenten. Dette α -skallet kan fjernes mekanisk ved maskinering eller sliping, eller kjemisk før komponenten settes i drift.

Titan er svært reaktivt og binder seg lett til interstitielle elementer som O og N. Dette begrenser derfor bruken av ren titan til temperaturer under 427°C. Titan har en så sterk kjemisk affinitet (reaktivitet) til O at det selv ved romtemperatur dannes et tett og fastsittende oksidlag på overflaten av metallet. Dette oksidlaget er blankt og medfører en naturlig passivisering av metallet. Titan har derfor en svært god korrosjonsmotstand i de fleste miljøer.

Selv om ren titan kan få økt fasthet gjennom kalddeformasjon (deformasjonsstyrking) er denne styrkemekanismen sjelden brukt.

Ren titan er i annen litteratur ofte referert til som Commercial Pure Titanium (CP).

4.3.1 Bruksområder for ulegert titan

Ren titan rukes der hvor det er behov for god korrosjonsmotstand, men hvor kravet til styrke ikke er spesielt høyt. Eksempler på slike bruksområder er tanker, varmevekslere, prosessbeholdere for kjemisk industri, cellulose, sjøvannsførende system (offshore), avsaltingsanlegg, hjerteventiler o.l.

4.4 α - og nær α -legeringer

α - og nær α -legeringene utgjør nesten 30% av den totale produksjonen av titan. α - og nær α -legeringene kan ikke styrkes ved varmebehandling. Legevingene inneholder alltid en høy andel α -fase i strukturen, og ofte består strukturen av ren α -fase. Legevingene er vanligvis mykgjødet etter kaldbearbeiding, noe som gjør dem godt sveisbare. Smibarheten er generelt dårligere sammenlignet med $\alpha+\beta$ - og β -legeringene, spesielt ved temperaturer lavere enn β -omvandlingstemperaturen.

Styrken av disse legevingene oppnås gjennom løsningsstyrking (substitusjonsløsning) samt i enkelte tilfeller også i kombinasjon med en liten grad av formasjonsstyrking.

α - og nær α -legeringene inneholder aluminium (Al), tinn (Sn) og/eller zirkonium (Zr) og foretrekkes både for høye og lave temperaturer. De benyttes også for særlig lave temperaturer, såkalte kryogene forhold. Disse legevingene har bedre sigestyrke ved høyere temperatur enn $\alpha+\beta$ - eller β -legeringene.

Tilsats av i første rekke Al gjør at de er mer egnet for høye temperaturer enn de ulegerte titantypene.

Legeringer som skal brukes ved kryogene forhold må ha lavest mulig innhold av forurensninger som O, N, H og C (interstitials). Slike ELI-legevinger (Ekstra Lavt Innhold av

Interstitials) bevarer god duktilitet (seighet) ved de lave temperaturene. Ti-5Al-2,5Sn-ELI brukes for eksempel mye til denne typen formål.

Ti-0,2Pd (Grad 7) og Ti-0,8Ni (Grad 12) har i enkelte media bedre korrosjonsmotstand enn ulegerte titantyper samtidig som også styrken er noe høyere (gjelder Grad 12) enn for de ulegerte kvalitetene Grad 1 og Grad 2. Grad 12 har tilnærmet de samme korrosjons-egenskapene som Grad 7, men er noe "billigere". Nær α -legeringer (ofte kalt super- α) opptrer nærmest som en α -legering, selv om de kan inneholde små mengder β -stabilisatorer og noe rest- β -fase. Dette gjelder for eksempel for legeringene Ti-8Al-1Mo-1V og Ti-6Al-2Nb-1Ta-0,8Mo.

4.5 α + β -legeringer

Disse legeringene inneholder både α - og β -stabiliserende elementer.

α + β -legeringenes styrke kan økes med varmebehandling, det vil si oppløsningsbehandling (innherding) med påfølgende utharding. En slik varmebehandling kan øke styrken med 30-50%.

Legeringene inneholder en høyere andel β -fase i innherdet tilstand enn α - og nær- α -legeringene. Mengden av β -fase avhenger av mengden tilsatt β -stabiliserende elementer samt av varmebehandlingen.

Den viktigste av disse legeringene er Ti-6Al-4V (titan Grad 5), som inneholder 6% Al og 4% V. Legeringen har gode mekaniske egenskaper og god form- og maskinerbarhet. Grad 5 er den mest benyttede titanlegeringen. Den benyttes ofte som referanse når vi skal foreta valg av legeringstype. Omtrent 50% av all titan som produseres brukes som denne legeringen. Legeringen er også vanlig som støpelegering.

Som en generell regel kan vi si at herdbarheten til de ulike α + β -legeringene øker med økende innhold av β -stabiliserende elementer.

Noen av α + β -legeringene brukes i utglødd tilstand. Disse legeringene har veldig god bruddseighet. Varmebehandlede legeringer har et høyt fasthet-til-vekt-forhold som gjør denne typen legeringer godt egnet i konstruksjoner der vi ønsker stor styrke og lav vekt.

4.5.1 Bruksområder for α + β -legeringer

Disse kvalitetene brukes ofte hvor et stilles krav til høy styrke, lav vekt og gode korrosjons-egenskaper. Grad 5 brukes for eksempel i undervannsfartøyer, anlegg på store dyp, høyt belastede konstruksjoner o.l.

4.6 β -legeringer

Denne legeringstypen inneholder flere β -stabiliserende og færre α -stabiliserende legeringselementer enn α + β -legeringene. β -legeringene har god herdbarhet. I tynnere gods er β -fasen bevart ved kjøling i luft ned til romtemperatur. For tykkere gods kreves hurtigere avkjøling, f. eks. i vann.

Styrken til disse legeringene oppnås gjennom utfelling av α -fase eller av en annen sammensatt forbindelse. β -legeringene benevnes ofte som metastabile, dette fordi kaldbearbeiding eller en relativt liten temperaturøkning kan medføre delvis eller fullstendig omvandling av β -fasen til α -fase.

I vannavkjølte β -legeringer kan vi oppnå bedre fasthetsegenskaper enn i $\alpha+\beta$ -legeringer. En ulempe er at β -legeringene har høyere spesifikk vekt (p.g.a. legeringselementenes høye vekt), lavere sigestyrke og dårligere duktilitet enn $\alpha+\beta$ -legeringene. Likevel kan bruddseigheten for en utherdet β -legering være bedre enn i en utherdet $\alpha+\beta$ -legering med samme styrke.

I oppløsningsbehandlet tilstand er β -legeringene dårlig egnet for temperaturer over ca 320°C fordi β -fasen er metastabil og dekomponeres til en α -fase. Skal legeringene brukes ved høyere temperaturer må de enten stabiliseres eller overutherdes.

4.6.1 Bruksområder for β -legeringer

Den største fordelene med β -legeringene er at de har god smibarhet og veldig gode kaldformingssegenskaper i oppløsningsbehandlet tilstand. De velges derfor ofte som materiale i komponenter som skal smis.

Legeringene har veldig god herdbarhet slik at høye fasthetsnivåer kan oppnås ved herding. I varmebehandlet tilstand har legeringene et høyt styrke-til-vektforhold, men har dårlig duktilitet og lav bruddseighet.

5 SAMMENLIGNING MED ANDRE METALLER

Tabell 51 viser en enkel sammenligning av forholdet styrke/tetthet mellom titan (Grad 2 og Grad 5) og ”konkurrerende” metaller.

Materiale	Flytegrense $Re_{0,2}$ (N/mm ²)	Tetthet ρ (g/cm ³)	Forholdet $Re_{0,2}/\rho$
Titan Grad 2	275	4,51	61
Titan Grad 5	830	4,42	188
AISI 316L	230	7,93	29
6-Mo	300	8,00	38
SAF 2205	450	7,80	58
Monel 400	175	8,83	20
Inconel 625	415	8,44	49
Hast C-276	355	8,89	40
Cu-Ni (70/30)	120	8,90	13
Cu-Ni (90/10)	90	8,90	10
AISI 410	350	7,72	45

Tabell 5.1

Sammenligning mellom flytegrense og tetthet for korrosjonsbestandige materialer. (1)

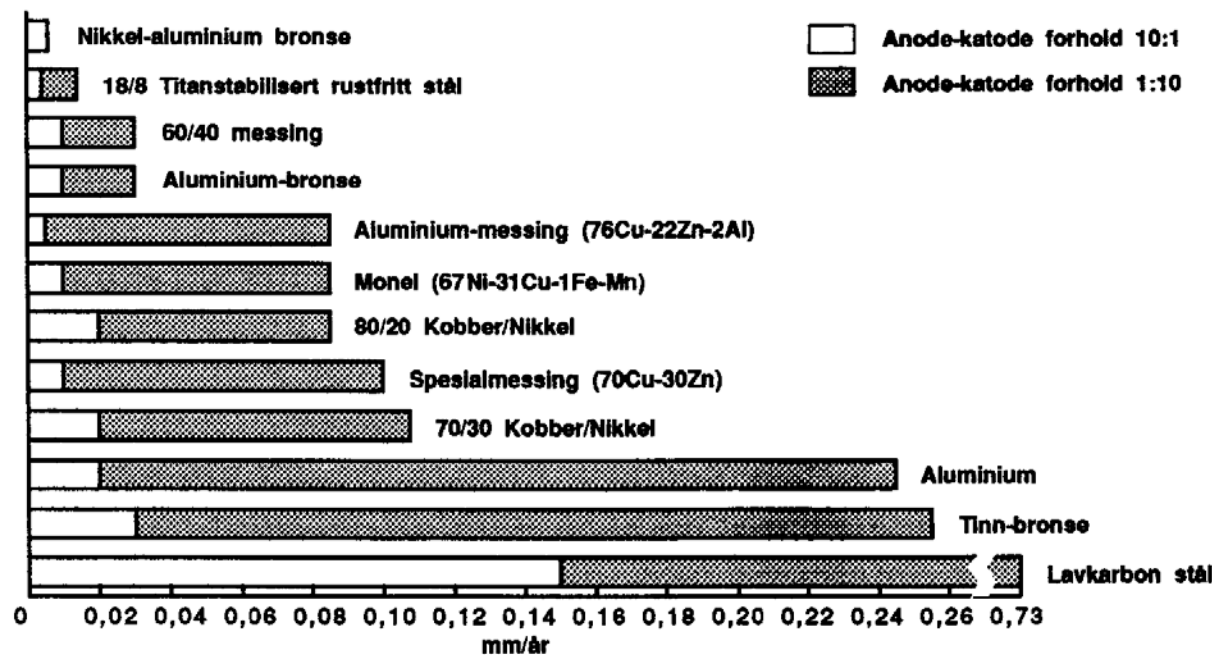
Tabellen viser at titan Grad 5 er det materialet som har høyest styrke i forhold til tettheten. Selv den ulegerte Grad 2 har et høyt forhold.

6 KORROSJON

Titan går for å være det beste av alle korrosjonsbestandige metaller.

Ved bruk av titan i konstruksjoner er det faren for galvanisk korrosjon av mer uedle metaller som byr på det største problemet.

Figuren under viser korrosjonshastigheten ved sammenkobling mellom titan og andre metaller ved ulike anode/katodeforhold.



Figur 6.1

Korrosjonshastighet (mm/år) ved sammenkobling av titan og andre metaller i sjøvann. (1)

7 VARMEBEHANDLING

Varmebehandling av Ti utføres vanligvis for å forbedre enkelte egenskaper. De vanligste prosedyrer ved varmebehandling av Ti er avspenningsgløding, gløding og oppløsningsbehandling og utharding.

7.1 Avspenningsgløding

Avspenningsgløding foretas for å minske spenninger i materialet. Dette er spenninger som for eksempel er forårsaket av ujevn deformasjon ved varmsmiing, kaldforming, usymmetrisk maskinering av plater eller smigods og sveising av smidde eller støpte detaljer.

Ti og Ti-legeringer kan avspenningsglødes uten negativ innvirkning på styrken og duktiliteten til materialet. Ved å fjerne de indre spenningene vil vi kunne opprettholde dimensjoner og form på konstruksjonen. Vi vil også redusere faren for spenningskorrosjon i enkelte miljøer.

Oppvarmingstemperatur og avkjølingstid avhenger av type legering. Ofte kan det være umulig å gjennomføre avspenningsgløding uten at enkelte egenskaper reduseres. Det blir da et kompromiss mellom de ønskede egenskapene. For å unngå restspenninger ved inhomogen avkjøling skal komponentene avkjøles i ovn eller i rolig luft.

7.2 Gløding

Gløding av Ti og Ti-legeringer utføres for å oppnå forbedring av bruddseighet, duktilitet ved romtemperatur, dimensjonsmessig stabilitet og sigefasthet i enkelte tilfeller. Mange Ti-legeringer brukes i glødet tilstand.

Glødetemperatur, glødetid og avkjøling (i luft, i ovn eller i vann) må velges avhengig av legering og hva vi ønsker å oppnå ved glødeprosessen. Det er mulig å ende opp med relativt stor variasjon i egenskaper hos samme type legering. Husk også at en forbedring av ett sett egenskaper skjer ofte på bekostning av andre egenskaper.

7.3 Oppløsningsbehandling og utharding

Oppløsningsbehandling og utharding er en fullstendig varmebehandling som gjør det mulig å oppnå en rekke ulike fasthetsnivåer i α -, $\alpha+\beta$ - og β -leageingene. Grunnen til at vi får til utharding er at β -fasen som dannes ved høy temperatur er ustabil ved lavere temperaturer.

Hvis vi varmer opp en $\alpha+\beta$ -legering til temperatur for oppløsningsbehandling (vanligvis 20 til 80°C under β -omvandlingstemperaturen for den aktuelle legeringen), vil dette føre til at andelen av β -fase øker. Denne fasefordelingen opprettholdes ved avkjøling. Påfølgende utharding fører til at den ustabile β -fasen dekomponeres. Det oppstår en finfordeling av α - og β -blandkrystaller. Denne nye strukturen er hardere og har høyere styrke enn en struktur i glødet tilstand.

Oppløsningsbehandling og utharding kan øke styrken med opp til 30-50% i forhold til et materiale i glødet tilstand. Kommersielle β -legeringer leveres vanligvis i oppløsningsbehandlet tilstand og behøver bare å uthardes for å oppnå de ønskede egenskapene.

Et eksempel:

Vi har 2 runde stenger med $d = 25\text{mm}$ i legering Ti-6Al-4V (grad 5)

- Stang 1 blir glødet ved 720°C i 1time.
Dette gir en fasthet på 900 - 1000N/mm².
- Stang 2 blir oppløsningsbehandlet ved 955°C i 1time og deretter bråkjølt i vann.
Stanga blir så uthardet ved 560°C i 6timer.
Dette gir en fasthet på 1070 - 1250N/mm².

Økningen av styrken i stang 2 reduserer duktiliteten (seigheten) sammenlignet med stang 1.

7.4 Rengjøring før varmebehandling

Før titankomponentene utsettes varmebehandling må de rengjøres grundig og tørkes. Vi må ikke benytte vann direkte fra springen. Rengjøring er så viktig fordi Ti er veldig reaktivt ved høye temperaturer og tar opp forurensninger fra omgivelsene, for eksempel olje, fuktighet, maling, fingeravtrykk og lignende. Etter rengjøring må delene bare flyttes med rent verktøy og rene hansker.

O og N reagerer med Ti og danner ved høyere temperaturer et O-/N-rikt sjikt på overflaten av komponenten. Dette er et sprøtt sjikt som må fjernes før komponenten settes i drift.

For å unngå sprøtt sjikt på overflaten ved varmebehandling, må metallet være godt rengjort på forhånd og varmebehandlingen utført i vakuum eller i en inert atmosfære (bruk av edelgass). Dette gjelder også komponenter som er bråkjølt i vann.

Vanligvis fjernes sjiktet på overflaten med en mekanisk eller kjemisk prosess.

Graden av forurensning (opptak av O og N) vil avhenge noe av legering.

8 SVEISING

Ulegert titan (ren titan) har veldig god sveisbarhet og velges vanligvis på grunn av god korrosjonsmotstand, god formbarhet og god sveisbarhet.

α - og nær α -legeringene har veldig god sveisbarhet. Disse legeringene bør sveises i glødet tilstand.

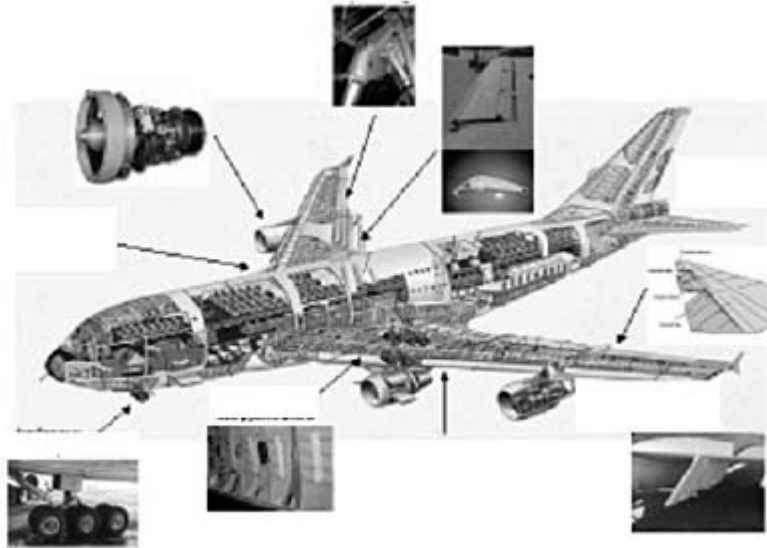
De fleste $\alpha+\beta$ -legeringer kan sveises enten i glødet eller i oppløsningsbehandlet og delvis utherdet tilstand. Med delvis utherdet menes at legeringen ikke har vært holdt tilstrekkelig lenge ved temperatur for utharding til at fullstendig utharding har skjedd. Ved sveising av legeringer i glødet tilstand er det nødvendig med full varmebehandling etter sveising for å oppnå tilfredsstillende mekaniske egenskaper. Ved sveising av legeringer som er oppløsningsbehandlet og delvis utherdet, kan vi ved avspenningsgløding etter sveising oppnå fullstendig utharding av strukturen.

Enkelte β -legeringer er sveisbare i glødet eller oppløsningsbehandlet tilstand. I sveiset tilstand har sveiseforbindelsen lav styrke og god duktilitet. Utherdede sveiser i enkelte β -legeringer kan være sprøe og må derfor varmebehandles med stor varsomhet for å styrke sveiseforbindelsen, samt forbedre seigheten.

9 EKSEMPLER PÅ BRUK AV TITAN METALL

9.1 Fly industrien

Fly industrien står for 45% av forbruket av Ti. Ti brukes bl.a. mye i landingsunderstell og i flymotorer.

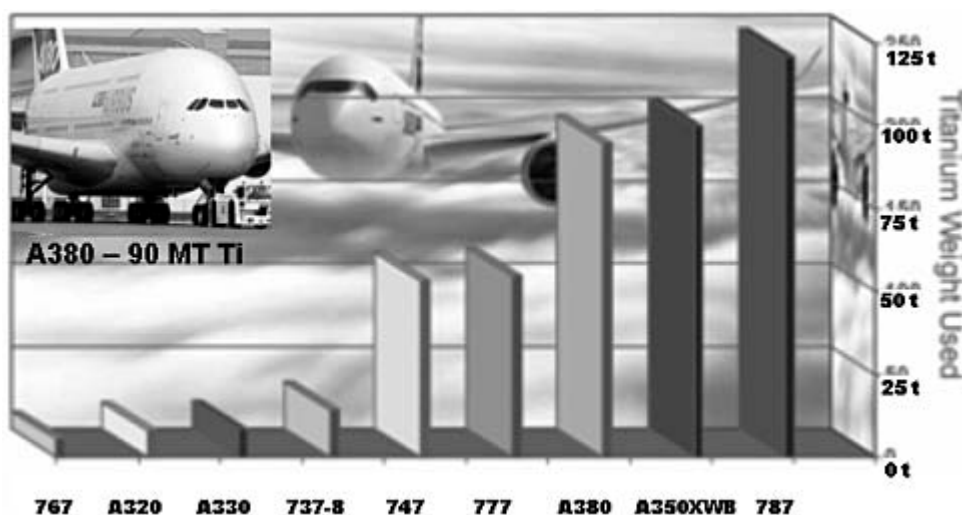


Figur 9.1

Eksempler på bruk av Ti i fly (4):

- bird shredder
- turbine blades
- structure
- seat rails
- landing gir
- fasteners
- fittings

Økt fokus på å redusere utslipp av CO₂ og lavere drivstoff forbruk, kombinert med stadig større fly, har økt andelen av Ti i fly med 10 gangen.



Figur 9.2

Eksempler på bruk av Ti i noen flytyper. I Airbus A380 brukes det for eksempel 90tonn Ti. (4)

9.2 Medisin og proteser

Dette er ikke et stort marked, men et viktig marked.

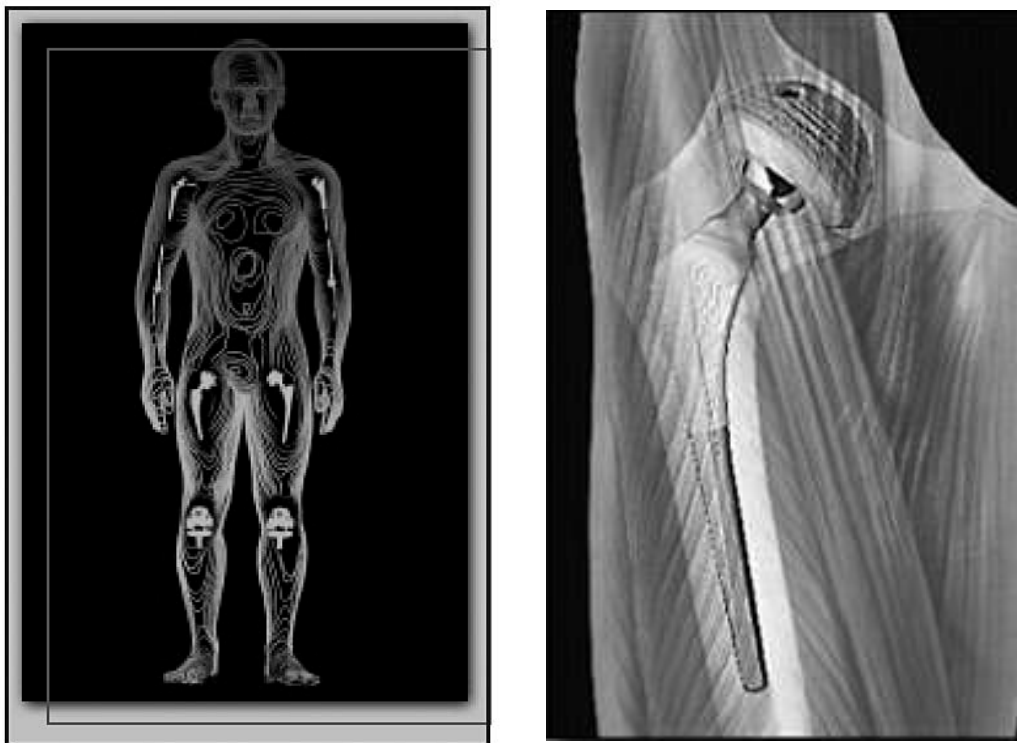
Ti benyttes i kirurgisk utstyr da det er mer inert overfor vev og lignende (bio-kompatibelt) enn andre metaller.

Ti anses som det beste materialet for proteser og implanter da det er fullstendig bio-kompatibelt og med et høyt styrke til vekt forhold.

Eksempler på bruksområder:

- Hofter og kne proteser
- Tenner
- Kunstig hjerte
- Øvrige implanter, eks. medisinske pumper og lignende

Antatt volum Ti brukt innenfor dette området er 2000 tonn.



Figur 9.3

Eksempler på proteser / implanter av Ti i menneskekroppen. (6)

a) Ti implants

b) Implanted artificial hip joint,
T16A14V

9.3 Forsvar

Forsvaret er en stor bruker av Ti. Ti brukes mye i U-båter, i fly og som panser i taks og lignende pga:

- Styrke - vekt forhold
- Panser / ballistiske egenskaper (egenskaper bane til avskutte prosjektiler)
- Ikke magnetisk



62 tonn titan i LPD17



Abrams M1A2 tank, 30% vektreduksjon



3,9 tonn titan i F22 Fighter

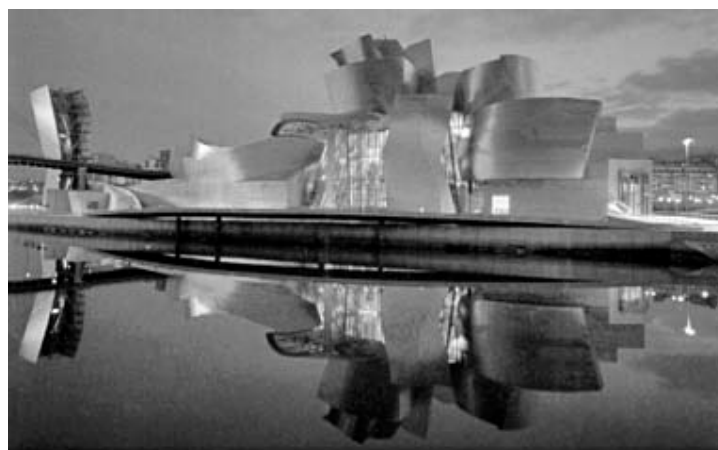


34 tonn titan i SSN21

Figur 9.4
Ti brukt i forsvarsprodukter. (4)

9.4 Bygg og anlegg

Stål og aluminium er de ledende metallene innen bygg og anlegg. Titan benyttes en del til å kle bygninger, spesielt i Japan. Ti har en viss estetisk form og kan gi spesielle overflater. Dette kombinert med bygningerskonstruksjoner som skal stå nært saltvann.



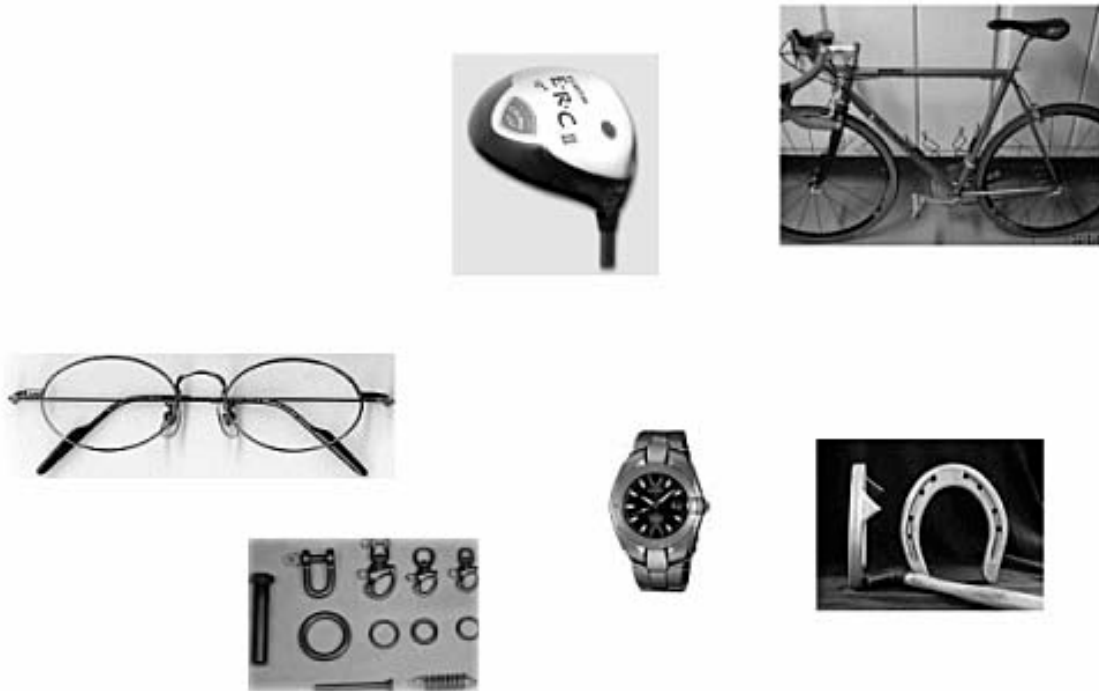
Figur 9.5
Ti brukt i bygningskonstruksjoner nær saltvann. (4)

Fordeler ved bruk at Ti i bygg og anlegg er:

- Lav vekt
- Korrosjonsbestandighet
- Nesten ikke vedlikehold
- Utseende

9.5 Privat bruk

Eksempler er klokker, brilleinnfatninger, sykler, o.l. Dette er et lite marked hvor fordelene er at vi kan bruke Ti av lav kvalitet.



Figur 9.6
Ti brukt i noen produkter innen privat forbruk. (4)

Fordeler ved bruk av Ti i denne type produkter er:

- Lav vekt
- Bio-kompatibelt
- Lav varmeledningsevne
- God korrosjonsbestandighet
- Nesten ikke vedlikehold
- Utseende

10 REFERANSER

- 1 Gudbrandsen, Jan A. (1991). *Titan*. TI-forlaget. ISBN 82-567-0609-0.
- 2 Borris Pedersen, "Stål og andre metaller", 1987, Svejsecentralen Jysk Teknologisk
- 3 Dansk Teknologisk Institutt (1991). *Materialkendskab Rustfritt stål, nikkel & titan*. Dansk Teknologisk Institutt Forlaget. ISBN 87-7756-247-3
- 4 Petter Gjørvad - Norsk Titanium, Titan - et fantastisk materiale til riktig pris?, foredrag på Lettmetallkonferansen 2008.
URL: <http://media01.smartcom.no/Microsite/start2.aspx?eventid=2795> (31.03.08)
- 5 Næss, Almar A. (2003). *Metalliske Materialer*. Tapir akademisk forlag. ISBN 82-519-1786-7.
- 6 University of Limerick, Limerick, Ireland. Biomaterials.
URL: <http://www.ul.ie/elements/Issue5/Ken%20Stanton.htm> (01.04.08)
- 7 Teknologibedriftenes Landsforening, TBL (1991). *Materialteknisk håndbok for verkstedindustrien*. ISBN 82-9 1073-00-7.
- 8 Euro-Titan Handels AG. URL: <http://www.euro-titan.com/en/index.php> (18.01.08)