



# **HANDBOEK TITAAN 2022**



# Inhoud Handboek Titaan

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Voorwoord                                                         | 5  |
| Het metaal Titaan                                                 | 7  |
| Wetenswaardigheden over lassen van titaan en zirkoon              | 13 |
| Oppervlaktebehandeling van titaan                                 | 19 |
| Dunne keramische lagen ter bescherming van Roestvast Staal        | 29 |
| Handleiding voor ontwerpers en gebruikers van titaan pijpsystemen | 31 |
| Smeedstukken van titaan                                           | 45 |
| Het ontwerpen en vervaardigen van titaan leidingsystemen          | 55 |
| Titaan in relatie tot agressieve gasomgevingen                    | 61 |
| Anodiseren van titaan                                             | 62 |

# Lijst van adverteerders

|                          |    |
|--------------------------|----|
| Hart B.V.                | 34 |
| Innomet Consultancy B.V. | 17 |
| Jacquet Nederland B.V.   | 18 |
| Salomon's Metalen B.V.   | 4  |
| Titan Projects           | 24 |
| Valbruna Nederland B.V.  | 11 |

**Digitaal Handboek Titaan**  
is een uitgave van: 2Blonds V.O.F  
De Laat de Kanterstraat 27a 2313 JS Leiden  
tel. (071) 531 45 11 [www.alurvs.nl](http://www.alurvs.nl)

Overname van artikelen, grafieken, tabellen en foto's is alleen mogelijk na schriftelijke toestemming van de uitgever.  
Hoewel het Handboek Titaan zeer zorgvuldig wordt samengesteld, kunnen de betrokkenen bij de samenstelling en uitgave  
geen aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele onjuistheden of onvolledigheden.

**Uitgever:** C.M.A. Willenborg

**Redactie:** Jeroen Opstal (hoofdredacteur)

**Vormgeving:** Christine van der Ven

Op al onze overeenkomsten en offertes, hoe ook genaamd, zijn van toepassing onze algemene verkoop- en leve- ringsvoor-  
waarden, zoals gedeponeerd bij de Kamer van Koophandel voor Rijnland onder nummer B 897.  
Een afschrift van onze voorwaarden wordt u desverzocht kosteloos toegezonden.



# SALOMON'S METALEN B.V.

[www.salomons-metalen.nl](http://www.salomons-metalen.nl)

## OUR STOCK

ALUMINIUM  
BERYLLIUM COPPER  
BRASS  
BRONZE  
COPPER  
CUNIFER  
DUPLEX/SUPER DUPLEX  
FOIL SPECIALS  
HASTELLOY C-4®  
HASTELLOY C-22®  
HASTELLOY C-276®  
INCONEL 600®  
INCONEL 601®  
INCONEL 625®  
INCONEL 718®  
INCONEL 800HT®  
INCONEL 825®  
INDIUM  
INVAR  
KOVAR  
LEAD  
MAGNESIUM  
MOLYBDENUM  
MONEL 400®  
MONEL K500®  
MU-METAL  
NICKEL  
NICKEL ALLOYS  
PHOSPHOR BRONZE  
SILVER  
SILVER STEEL  
STAINLESS STEEL  
STAINLESS STEEL  
(HEAT RESISTANT)  
TANTALUM  
TIN  
TITANIUM  
TUNGSTEN  
VANADIUM  
WIRE SPECIALS  
ZINC  
ZIRCONIUM

## OUR MARKETS

- ♦ OIL & GAS
- ♦ PETROCHEMICAL
- ♦ OFFSHORE
- ♦ HEAVY INDUSTRY
- ♦ MARINE
- ♦ AEROSPACE
- ♦ AUTOMOTIVE
- ♦ SEMICONDUCTOR
- ♦ MEDICAL
- ♦ FINE MECHANICAL

Gotenburgweg 24  
9723 TL Groningen  
☎ +31 (0)50 542 12 00  
☎ +31 (0)50 541 68 92  
✉ [info@salomons-metalen.nl](mailto:info@salomons-metalen.nl)  
🌐 [www.salomons-metalen.nl](http://www.salomons-metalen.nl)

## WE OFFER YOU

Plates, bars, wires, foils,  
profiles and tubes.

Also special products  
**CUSTOM MADE**

**AVAILABLE IN ANY  
QUANTITY**

**FAST WORLDWIDE  
DELIVERIES**

## OUR MACHINE SHOP

- ♦ WATERJET CUTTING
- ♦ LASER CUTTING
- ♦ SAWING MACHINES

## Voorwoord

### Het misverstand over het metaal titaan

Als metaalkundige wil je graag het beste voor je relaties als het bijvoorbeeld om materiaalkeuzes en corrosiepreventie gaat. Zo kan het gebeuren dat je als optimale metaalkeuze uitkomt op het metaal titaan en dan begint a.h.w. de onrust. De eerste reactie die dan meestal wordt geuit is “dat kost goud” of andere woorden van die strekking. Titaan wordt ook wel titanium genoemd hoewel dat laatstgenoemde woord feitelijk een anglicisme is.



Ko Buijs - Innomet Consultancy BV

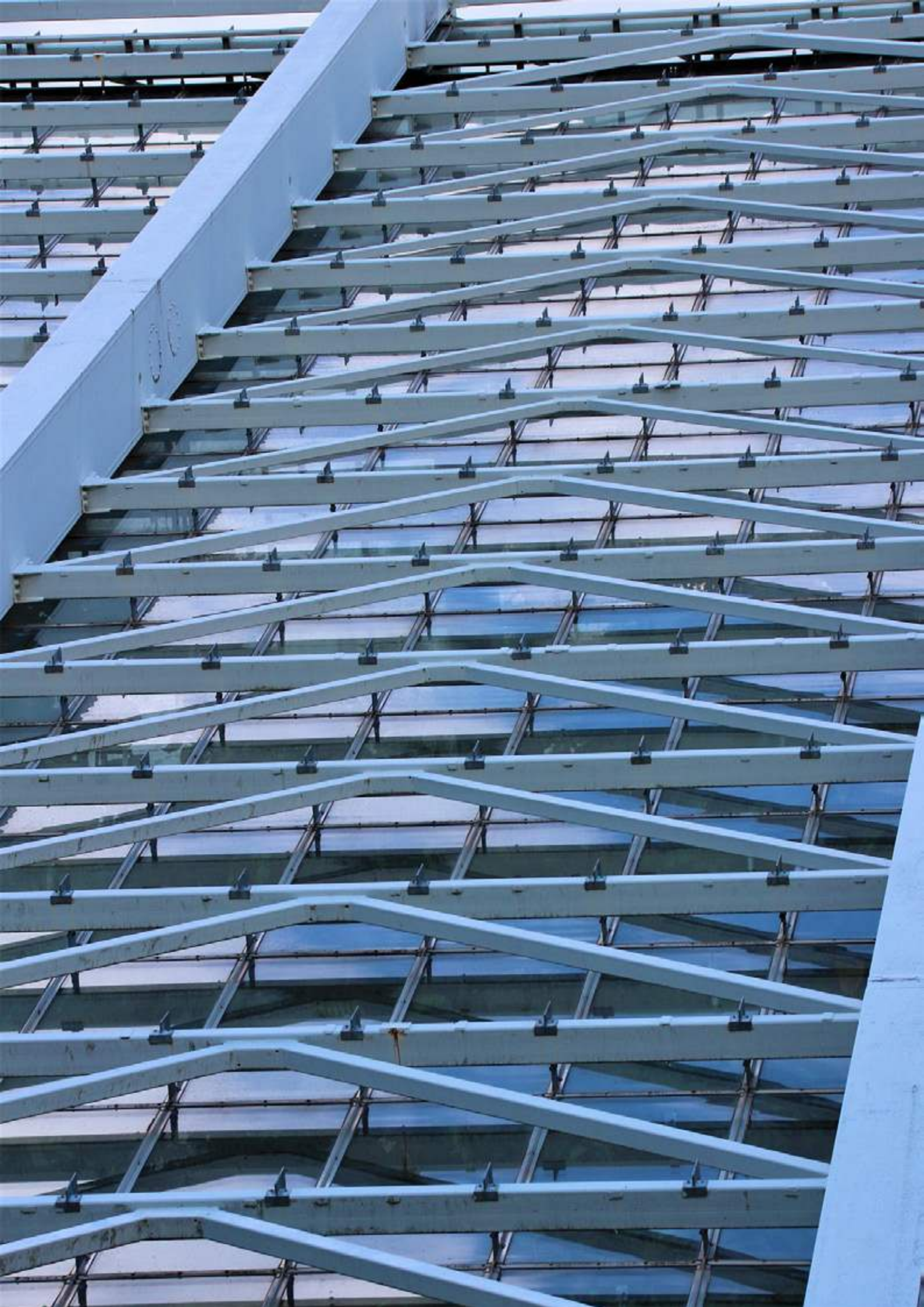
Titanium klinkt echter wel wat exclusiever dan titaan en dan beginnen de gedachtenspinsels dat het een onbetaalbaar kostbaar metaal zou zijn dat a.h.w. alleen bij de juwelier in de etalage ligt. Nu kan het inderdaad gebeuren dat dit metaal daar wordt aangetroffen want titaan leent zich uitstekend voor het maken van sieraden. Dit komt mede door het feit dat er mooie metallische kleuren kunnen ontstaan dankzij het variëren van de oxidehuiddikte. Dat laatste wordt overigens bereikt met elektrochemische processen. Gelukkig is bij een selectief aantal technici bekend dat titaan ook wordt toegepast in allerlei apparaten t.b.v. de chemie, petrochemie, offshore etc. Deze beperkte doelgroep is dan ook overtuigd van het bijzondere nut om dit opmerkelijke metaal toe te passen. Titaan is namelijk bestand tegen de allermeeste chemicaliën, zeewater, zouten, logen, halogenen en chloorverbindingen. Titaan behoeft geen kathodische bescherming en is ook niet gevoelig voor de steeds grotere problemen die microbiële geïnduceerde corrosie (MIC) met zich meebrengen.

Titaan is ook niet gevoelig voor spannings- en putcorrosie doch wel enigszins gevoelig voor spleetcorrosie in heet zeewater maar dat kan men simpel oplossen door het te legeren met 0,2% palladium. Zijn er echter geen spleten dan is dat laatste uiteraard niet nodig. Vanwege het merkwaardige imago van titaan dat het onbetaalbaar zou zijn, wordt titaan niet eens overwogen als serieus alternatief op die plaatsen waar het juist zo geschikt is. Daarom stuit men in de praktijk op problemen die met het gebruik titaan niet aan de orde waren geweest. Titaan is weliswaar duurder in aanschaf

dan roestvast staal en daarom is het verstandig om dit eens te relativeren. Men kan ervan uitgaan dat titaan vier keer zo duur is dan de meeste hoogwaardige typen roestvast staal. Het soortelijk gewicht van titaan is echter ongeveer de helft dan die van roestvast staal waardoor de prijs met een factor 2 de goede kant opschuift. Titaan behoeft geen corrosietoetslag waardoor men veelal op de helft kan gaan zitten wat de wanddikte betreft. Dat is wederom een factor 2 de goede kant op. Dit feit wordt ook nog eens versterkt door het feit dat de mechanische waarden van titaan beter zijn. M.a.w. zo komt men al aardig in buurt van het prijsniveau van roestvast staal. Daarnaast zijn er nog andere voordelen zoals het minder gevoelig zijn voor scaling en het bevorderen van een druppelvormige condensatie dat het rendement van een warmtewisselaar verder verhoogt. De slechtere warmtegeleiding van titaan wordt voor een groot deel gecompenseerd door de dunnere wanddikte.

Daarom is het in de praktijk de moeite waard om eens wat prijzen naast elkaar te leggen om op deze wijze een beter beeld te krijgen hoe het prijstechnisch nu werkelijk in elkaar steekt. Laatst hadden we van doen met corrosie van een RVS 316 leiding in de voedingssector vanwege een hoge zoutbelasting. Titaan doet zoiets ‘op zijn sloffen’ en daarom wilde men toch wel eens weten wat de aanschafprijs van zo’n leiding zou zijn. Na ontvangst van de offerte werd gesteld “dat valt ons alles mee”. Een fabrikant van kokend water boilers had problemen met corrosie van de roestvast staal tanks en vroeg ons om raad. Nadat titaan werd aanbevolen was de eerste reactie dat dit veel te duur zou gaan worden. Na het opstellen van een rapport en het doorberekenen van het geheel bleek titaan uiteindelijk niet duurder te zijn dan roestvast staal omdat diverse kostbare uitbestedingen wegvielen. M.a.w. deze boilers hebben tegenwoordig een binnenwerk van titaan. Daarom is het te hopen dat men eens wat vaker titaan overweegt als alternatief voor roestvast staal waardoor men zich veel corrosieleed e.d. kan besparen. Lezers die dit wel eens nader onderzocht willen hebben, kunnen vrijblijvend hun vraagstelling kwijt bij onderstaand e-mailadres: [info@innometconsultancy.nl](mailto:info@innometconsultancy.nl)

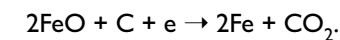




## Het metaal titaan

Titaan is een bijzonder en relatief licht metaal met een zilverachtige kleur dat bepaald niet schaars aanwezig is in de aardbodem. Sterker nog, het is op vier na het meest voorkomende element in onze aardkorst. De vraag is dan ook gerechtvaardigd waarom dit metaal zo relatief duur is en dat komt voor een groot deel door de kostbare winning.

Alle onedele metalen worden in de regel gedolven als een metaaloxide en naarmate de normaalpotentiaal van het metaal lager wordt in de edelheidreeks des te moeilijker het wordt om het metaal van de gebonden zuurstof te scheiden. Het metaal ijzer heeft een potentiaal van  $-0,44$  Volt en laat zich vrij gemakkelijk scheiden van de gebonden zuurstof. Dit is voor te stellen met de reductieformule



Deze reactie speelt zich af in een hoogoven en de 'e' in de formule staat voor de benodigde energie want men moet energie toevoegen om deze reductie mogelijk te maken. Past men dit mechanisme toe op titaanoxide, dat ook wel rutiel wordt genoemd, dan gebeurt er helemaal niets want titaanoxide moet heel anders worden behandeld om deze twee sterk gebonden elementen van elkaar los te krijgen. Dat proces verloopt als volgt:

1. Rutiel ( $\text{TiO}_2$ ) wordt met cokes gechloreerd waardoor titaantetrachloride ( $\text{TiCl}_4$ ) en koolzuur ( $\text{CO}_2$ ) ontstaat.
2. Titaantetrachloride is een kleurloze vloeistof dat nog gezuiverd wordt.
3. Daarna wordt aan dit titaantetrachloride magnesium of natrium toegevoegd in een inerte omgeving.
4. Daardoor ontstaat de volgende chemische omzetting:  $\text{TiCl}_4 + 2\text{Mg} \rightarrow \text{Ti} + 2\text{MgCl}_2$ . Zo ontstaat er uiteindelijk titaanspons en magnesiumchloride.
5. Titaanspons wordt geperst tot blokken en daarna inert gesmolten tot gietelingen eventueel aangevuld met legeringselementen en schroot.
6. De gietelingen worden daarna gewalst tot allerlei halffabrikaten zoals platen en staven.

Het zal inmiddels wel duidelijk zijn hoeveel energie het kost om titaan uit zijn erts te bevrijden en daar komt nog een keer bij dat het ook veel energie kost om magnesium of natrium te bereiden. Daarom is een groot deel van de titaanprijs bepaald door de energiekosten. Titaan is een reactief metaal met een normaalpotentiaal van  $-1,63$  volt en dat is zo'n vier keer meer negatief dan de negatieve potentiaal van ijzer. Toch gedraagt dit zeer onedele metaal zich zo enorm edel omdat het huidje van titaandioxide zo'n geweldig goede

bescherming geeft. Titaan is zo reactief dat zich spontaan een titaanoxidehuid zal vormen aan de lucht zonder een waterig milieu. Dat in tegenstelling tot ijzer want dat heeft wel vocht en lucht nodig om te gaan oxideren. Daarom is ijzer geen reactief maar actief metaal.



Titaan grade 2-buizen t.b.v. chemisch riool VC plant.



Titaan grade 2-opslagtank voor chemisch afval.



### Eigenschappen titaan

De fysische eigenschappen van het metaal titaan zijn:

- smeltpunt = 1660°C
- soortelijk gewicht = 4,51
- uitzettingscoëfficiënt =  $8,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
- elektrische weerstand bij 20 °C = 48,2 micro-ohmcm
- normaal potentiaal = -1,63 Volt
- E-modulus is 105.000 N/mm<sup>2</sup>

In het kort kan men de algemene eigenschappen van titaan als volgt samenvatten:

- relatief laag soortelijk gewicht;
- hoge corrosiebestendigheid;
- grote erosieweerstand;
- hoge efficiënte warmteoverdracht;
- gunstige sterkte/gewichtverhouding;
- geringe thermische uitzetting;
- esthetisch fraai uiterlijk;
- harde gladde oxidehuid;

Deze laatstgenoemde eigenschap belemmert in hoge mate vuilafzetting en bevordert een druppelvormige condensatie wat van belang is t.b.v. het rendement van condensoren en warmtewisselaars. Factoren zoals een laag soortelijk gewicht, goede mechanische waarden en corrosiebestendigheid zijn belangrijke aspecten die het gebruik van titaan snel zullen rechtvaardigen. In de afgelopen 50 jaar heeft titaan zich bijzonder goed bewezen als een optimale materiaalkeuze in zouthoudend, brak en verontreinigd water. Meer dan 150 miljoen meter condensorpijp, die maar liefst over een tijdsbestek van 40 jaar gegarandeerd worden, zijn wereldwijd geïnstalleerd in elektriciteitscentrales zonder dat er enige aantasting valt waar te nemen. Aanvankelijk werden brandblussystemen en koelsystemen t.b.v. offshoreplatforms van koolstofstaal gemaakt die beschermd werden met allerlei deklagen. Vanwege het beschadigen van deze coatings is men toen snel overgestapt naar cupronikkel wat weer leidde tot putcorrosie en erosie (vooral in bochten) in verontreinigd water. Sommige ontwerpers hebben toen getracht deze problemen te overwinnen door de wanddiktes te vergroten en de watersnelheden te verlagen. De nadelige gevolgen door het beperkte debiet wat zo ontstond, waren grotere diameters pijpen, grotere bochtradiussen en een grote toename in de kosten en gewicht van het pijpsysteem dat bovendien ook nog meer ruimte innam. Ondanks al deze maatregelen, kwamen toch weer op den duur allerlei gebreken openbaar die ertoe leidde dat er een noodzaak was tot een ommezwaai in de materiaalkeuze en ook een andere benadering m.b.t. het ontwerp.

Meer recente ontwerpen eisen naast kosten en gewichtsbesparingen ook hoog betrouwbare materialen die het mogelijk maken om met relatief kleine diameters vloeistoffen met hoge snelheden te verplaatsen. Aanvankelijk was een austenitische roestvast staal met circa 6% molybdeen, zoals 254SMO, favoriet doch later kregen de superduplex RVS-soorten meer aandacht i.v.m. nog betere prestaties. Beide kwaliteiten boden meer dan cupronikkel maar bereikten toch niet de gewenste resultaten en bovendien gaven zij ook nog de nodige moeilijkheden tijdens het verwerken. De buitengewone en unieke corrosieprestaties van het metaal titaan gaven nieuwe perspectieven voor deze toepassingen. Daarom is het ook niet verwonderlijk dat titaan tegenwoordig zeer frequent wordt gekozen bij het fabriceren van zeewatergekoelde warmtewisselaars en pijpsystemen; als condensormateriaal bij elektriciteitscentrales en allerlei apparatuur op schepen zoals bijvoorbeeld handling systemen. Tot nu toe is gebleken dat de toepassing van titaan een garantie is voor het afdoende oplossen van corrosieproblemen in specifieke milieus. Titaan dient in principe altijd overwogen te worden, zowel t.b.v. de onshore als offshore, zodra er chloridenhoudende milieus, zwavelverbindingen of koolwaterstofverbindingen in de processtroom aanwezig zijn. Financiële voordelen door deze prestaties zijn door de praktijk reeds bewezen en de ontwerp- en verwerkingsparameters zijn afdoende vastgesteld.

### Toepassingen

Titaan wordt vooral toegepast t.b.v. de industriële apparatenbouw zoals in warmtewisselaars, leidingsystemen voor de chemie en offshore alsmede in de procesindustrie zoals pompen, afsluiters e.d. Daarnaast vindt men dit materiaal terug in de vliegtuigbouw, medische implantaten, sportartikelen zoals tennisrackets en golfsticks, brilmonturen, sieraden, pigmenten voor verf en papier, etc. Bekende toepassingen vindt men ook in de chloorbereiding (membraan elektrolyse) en in PTA-fabrieken.

### Corrosietoeslag

Een van de interessante aspecten is dat titaan geen corrosietoeslag behoeft en dat compenseert voor een groot deel de relatief slechte warmteoverdracht. Met onderstaande formule kan men de wanddikte berekenen van buismateriaal.

Alle onedele metalen worden in de regel gedolven als een metaaloxide en naarmate de normaalpotentiaal van het metaal lager wordt in de edelheidreeks des te moeilijker het wordt om het metaal van de gebonden zuurstof te scheiden.



Het metaal ijzer heeft een potentiaal van -0,44 Volt en laat zich vrij gemakkelijk scheiden van de gebonden zuurstof. Dit is voor te stellen met de reductieformule  $2\text{FeO} + \text{C} + \text{e} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{CO}_2$ . Deze reactie speelt zich af in een hoogoven en de 'e' in de formule staat voor de benodigde energie want men moet energie toevoegen om deze reductie mogelijk te maken. Past men dit mechanisme toe op titaanoxide, dat ook wel rutiel wordt genoemd, dan gebeurt er helemaal niets want titaanoxide moet heel anders worden behandeld om deze twee sterk gebonden elementen van elkaar los te krijgen.

Dat proces verloopt als volgt:

$$T_m = \frac{PD}{2(\sigma + PY)} + A$$

T<sub>m</sub> = minimum wanddikte in mm

P = werkdruk in het systeem in MPa

D = uitwendige pijpdiameter in mm

σ = maximaal toelaatbare spanning in MPa bij de ontwerp-temperatuur

Y = een coëfficiënt

A = corrosietoeslag (voor titaan is deze dus 0).

### Titaan & titaanlegeringen

Commercieel zuivere titaansoorten zijn dus ongelegeerd maar men kent wel gradaties in de mate van verontreinigingen. Hieronder vallen de typen grade 1 t/m 4 die een oplopende onzuiverheid hebben. Grade 1 is vanwege de lage verontreinigingen het meest ductiel en daarom geschikt voor het explosieve plateren. Grade 2 is de meest voorkomende kwaliteit terwijl grade 4 de beste mechanische waarden heeft van de vier typen. Daarom worden van grade 4 veelal bevestigingsmaterialen (fasteners) gemaakt. Al deze kwaliteiten van onder de α (alfa)-legeringen. Dat geldt ook voor de typen grade 11 en 7 welke in feite grade 1 en 2 betreffen met een additie van circa 0,2% palladium. Palladium zorgt ervoor dat de weerstand tegen spleetcorrosie (crevice corrosion) verder toeneemt in bijvoorbeeld warm zeewater. Daarnaast zijn er ook β (bèta)-legeringen en ook σ+β-legeringen. Zoals de soorten met hoge mechanische waarden. Veelal betreffen dit smeedlegeringen en gietlegeringen. Er zijn vele interessante titaanlegeringen ontwikkeld maar het zou in dit artikel te ver gaan om deze allemaal te behandelen. Daarom beperken we ons tot de bekendste titaanlegering en dat is grade 5 (Ti-6Al4V) wat een legering betreft met 6% aluminium en 4% vanadium. Deze kwaliteit, die ook wel het werkpaard onder de titaanlegeringen wordt genoemd, wordt veel in de luchtvaart gebruikt i.v.m. de gunstige gewicht/sterkteverhouding. Veelal zijn dit kritische onderdelen zoals de bewegende delen (moving parts) in vleugels en air frames. Het materiaal is verkrijgbaar als plaat (ASTM B265), staven (ASTM B348, gietstukken (ASTM B367), smeestukken (ASTM B381) en ook als bouten en moeren (ASTM F467). Het MIL-nummer is T-9047.

In tabel 1 ziet men duidelijk de effecten op de mechanische waarden in afhankelijkheid van de toenemende hoeveelheid verontreinigingen. Ook ziet men het opmerkelijk mechanische gedrag van het gelegeerde grade 5.

### Zeewater en atmosferische omstandigheden

Er zijn titaanproducenten die titaan in zeewater voor 40 jaar onophoudelijk gebruik garanderen zonder dat men doet aan corrosiepreventie. Omdat titaan ook in gebouwen wordt gebruikt als gevelbekleding en dakbedekking wordt

| Ti-Grade | rekgrens<br>in MPa | treksterkte<br>MPa | rek<br>in % |
|----------|--------------------|--------------------|-------------|
| 1        | 170-190            | 240-345            | 25-27       |
| 2        | 240-345            | 345-450            | 20-24       |
| 3        | 380-460            | 450-595            | 18-25       |
| 4        | 480-560            | 550-685            | 15-23       |
| 7        | 280-350            | 345-480            | 20-28       |
| 11       | 170-220            | 240-345            | 25-37       |
| 5        | 830-910            | 900-1000           | 10-18       |

Tabel 1. mechanische waarden van enkele typen titaan.

er zelfs een garantie van 100 jaar afgegeven. Voorbeelden zijn ruimschoots te vinden in Japan maar ook het Guggenheim museum in Bilbao en het Vincent van Gogh museum in Amsterdam hebben respectievelijk een gevelbekleding en dakbedekking van titaan.



Het Guggenheim in Bilboa is voorzien van titaan gevelbekleding.

### Titaan als legeringselement

Titaan wordt ook gebruikt als legeringselement in bijvoorbeeld roestvast staal maar het wordt soms ook gelegeerd in nikkel-, zirkonium- en vanadiumlegeringen. Een bekende toepassing is titaan als stabilisator in RVS-typen die een relatief hoog gehalte aan koolstof bezitten. Titaan heeft namelijk een dusdanige hoge affiniteit tot koolstof dat deze twee elementen bij hoge temperaturen een verbinding vormen. Hierdoor voorkomt men dat schadelijke chroomcarbiden ontstaan in bijvoorbeeld de heat affected zone tijdens het lassen. Een voorbeeld is 316Ti (1.4571) dat veel in Duitsland is gebruikt. Dit type roestvast staal raakt wel steeds meer op de achtergrond omdat men tegenwoordig ook op commercieel verantwoorde wijze een L-kwaliteit (low carbon) kan vervaardigen. De noodzaak van een titaanadditie is dan komen te vervallen omdat het risico op de vorming van schadelijke chroomcarbiden verdwenen is. Dat neemt niet weg dat titaan een gunstige invloed heeft op de mechanische eigenschappen van het austenitische roestvast staal. Daarom

zal men in de regel bij toestellen onder druk eerder voor een titaan gestabiliseerd materiaal kiezen dan voor een low carbon versie.

### Vormgeheugenmetaal (shape memory metal)

Vormgeheugenmetaal is een legering van titaan en nikkel (50/50) dat ook wel nitinol wordt genoemd. Vormgeheugenmetaal is een metaal dat na een beperkte deformatie bij een relatief lichte temperatuurverhoging weer geheel terugkomt in zijn oude vorm onder afgifte van arbeid. Een en ander heeft te maken met een structuuromslag van austeniet naar martensiet in het metaal. Meestal geschiedt het deformeren van vormgeheugenmetaal bij kamertemperatuur en het verwarmen bij circa 60°C. Bij deze laatstgenoemde temperatuur heeft het materiaal een structuurverandering gekregen. Stel dat men een recht draadje heeft dat men bij kamertemperatuur vervormt, dan zal het zich weer geheel strekken tot zijn rechte oorspronkelijke vorm bij 60°C onder afgifte van enige arbeid. Deze arbeid kan men gebruiken om iets te activeren. Wel zal de deformatie beperkt moeten blijven tot maximaal 8% en dat betekent dat men dit draadje nooit mag knikken. Ook kan men het zogenaamde pseudo-elastische effect van deze legering benutten en een goed voorbeeld zijn de bekende elastische brilmonturen. Over de productie van vormgeheugenmetaal is veel te zeggen doch thans niet relevant genoeg om er uitgebreid bij stil te staan. In onderstaande opsomming kan men zich een idee vormen hoewel hier de indruk wordt gewekt dat het om een simpel procédé gaat. Dit blijkt in de praktijk echter niet het geval omdat de problematiek rond het smelten, legeren en de nodige warmtebehandelingen heel wat expertise en ervaring vereist.

Na het smelten en op 'maat' maken van de legering in een speciale vacuüm oven ontstaat er een gieteling die als knuppel verder wordt uitgesmeed. Daarna worden er allerlei producten van gewalst die zo hun uiteindelijke vorm krijgen. Deze producten krijgen een speciale warmtebehandeling voordat deze de fabriek mogen verlaten. Om het geheel wat concreter te maken wordt ervan uitgegaan dat er een veer van geheugenmetaal gemaakt moet gaan worden. Men gaat dan als volgt te werk: Een gewalste rechte draad wordt op een doorn met een bepaalde spoed gewonden en gefixeerd. Afhankelijk van de draaddikte wordt het geheel gedurende enige tijd in een vacuümoven gebracht. De oventemperatuur is ongeveer 500°C. De draad zal na deze warmtebehandeling de veervorm als definitieve vorm aannemen. Trekt men de veer uit elkaar bij kamertemperatuur tot bijvoorbeeld een grillige vorm, dan zal de veervorm weer geheel terug-

komen bij ± 60°C onder afgifte van enige arbeid. Men kan overigens met een nieuwe warmtebehandeling weer een andere gewenste vorm aan de veer geven. Het geheugenefect kan enigszins achteruit gaan door het mechanisch over te belasten maar ook indien het aan te hoge temperaturen blootgesteld wordt. Nitinol kan toegepast worden in de procesindustrie en vooral in de meet- en regeltechniek, brandpreventie, energierugwinning, ruimtevaart maar ook als gadget artikele. Omdat deze titaanlegering ook biocompatibel is kan men het implanteren in het menselijke lichaam. Voorbeelden zijn fixatie-elementen bij botbreuken, trekdraden voor scoliosepatiënten, stents die bloedproppen tegenhouden tijdens operaties, prostaatelementen, elementen t.b.v. blokkadeoperaties van de ruggengraat, etc.



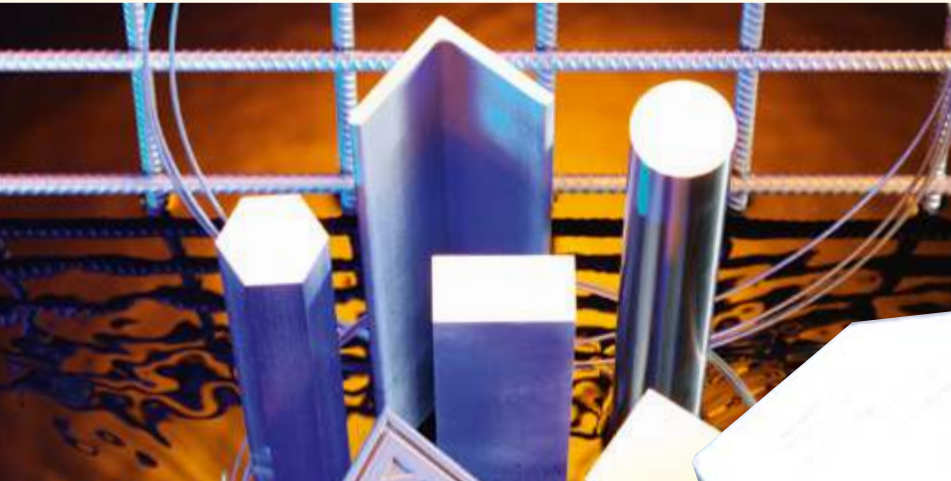
Het Vincent van Gogh museum heeft een dakbedekking van titaan.



Valbruna Nederland B.V.

ROESTVASTSTAAL - NIKKELLEGERINGEN - TITAAN

T 030-60 80 100 F 030-60 80 020 [www.valbruna.nl](http://www.valbruna.nl)



Valbruna is een toonaangevend voorraadhouder en producent van halffabrikaten gericht op (Duplex en Super Duplex) Roestvaststaal, Nikkellegeringen en Titaan.





## Wetenswaardigheden over lassen van titaan en zirkoon

Het metaal titaan is uitstekend lasbaar waardoor het mede daardoor steeds meer aan populariteit is gaan winnen. Toch gebeurt het nog regelmatig dat men zich niet volledig houdt aan de spelregels die voor het lassen zijn opgesteld en de vraag is dan hoe men kan zien of de kwaliteit van de las goed is. Een van de belangrijkste regels is dat de laszone tijdens het lassen zeer goed beschermd moet worden tegen zuurstof vanuit de atmosfeer omdat titaan zo enorm reactief is.

Bovendien is het hete titaan uiterst gevoelig om stikstof, waterstof en andere gassen in zich op te nemen. Daarom worden hoogwaardige toepassingen zelfs in een couveuse gelast waarin een volledig inert milieu heerst. Toch kan men ook met moderne lastoortsen gecombineerd met sleepsloffen tot een afdoende bescherming komen waardoor men een prima lasresultaat krijgt. Wat men vaak niet weet is dat de afkoelende las boven de 350°C ook gevoelig is voor gasopname waardoor deze las bros, hard en minder corrosiebestendig wordt. Dit wordt veroorzaakt door het poreuze karakter van de oxidehuid boven de 350°C.



Titaan heeft een oxidehuid van titaanoxide die transparant is en door de veranderingen van de dikte zullen door de brekingsindex van het invallende licht allerlei kleuren ontstaan. De kleur geeft dan een indicatie over de kwaliteit van deze las. Indien de las een doffe grijze kleur heeft dan kan men met zekerheid stellen dat de laskwaliteit niet goed is omdat dit uiterlijk aangeeft dat er allerlei ongewenste gasopname heeft plaatsgevonden. In het algemeen kan men bij het lassen van titaan het volgende stellen:

- een helder zilverachtige kleur is het gevolg van een uitstekend lasresultaat;

- een blauwe en een goudachtige kleur duidt op een acceptabele laskwaliteit;
- een doffe grijze kleur is het bewijs dat men niet afdoende de afkoelende las heeft beschermd tegen ongewenste gassen.

Dit laatste is ook aan te tonen door een microhardheidsmeting omdat de las door gasopname harder wordt. Als regel wordt gesteld dat een hardheidstoename in de las tot 60 HV nog acceptabel is. Daarboven dient men de las te verwijderen en opnieuw te leggen met de juiste lasparameters om te voorkomen dat de las de 'zwakke schakel in de ketting' is. Vanwege de grote oplosbaarheid van zuurstof in titaan is het onmogelijk om m.b.v. vacuümglueien de zuurstof te verwijderen in tegenstelling tot waterstof dat vanwege een hoge diffusiesnelheid wel met dit gloeiproces zal verdwijnen.

### Het backen

De vraag die hierop volgt, zou kunnen zijn hoe het backen verloopt tijdens het TIG-lassen bij reactieve metalen. Reactieve metalen zoals titaan, zirkoon, molybdeen, niobium, tantaal en wolfram moeten worden gelast met een zeer goede gasbescherming. Reeds bij 300°C zullen de meeste typen verbindingen aangaan met de gassen uit de omgevende lucht. Zeker in de vloeibare fase hebben ze een zeer grote affiniteit voor waterstof, zuurstof en stikstof. Dat betekent dat ze eigenlijk niet lasbaar zijn met de gewone voorzieningen zoals een lastoorts en een simpele voorziening voor backinggas. Contact van deze metalen boven 300°C met de lucht moet daarom volledig worden uitgesloten. Vindt er toch opname van zuurstof, stikstof of waterstof plaats dan is een desastreuze verbrossing van het metaal het gevolg. Dat betekent dat er moet worden gelast met zeer geavanceerde gasbacking. Verder moet een verlengd gasmondstuk c.q. sleepslof worden toegepast. Beter is het nog deze metalen te lassen in een volledig afgesloten ruimte, welke geheel met het beschermgas is gevuld en dat betreft dus een couveu-



se die ook wel 'glove box' wordt genoemd. Van tevoren worden de te lassen oppervlakken goed gereinigd. Voor het mechanisch reinigen gebruikt men borstels van roestvast staal of zelfs borstels van titaan.

## Kan men smeedstukken van titaan ook lassen?

Lastechnieken die gebruikt worden voor het lassen van titaanplaten en staf kunnen probleemloos op dezelfde wijze toegepast worden bij het lassen van smeedstukken uit titaan. Dit betekent dat men met TIG-lassen, elektronenstraallassen en plasmalassen uitstekende verbindingen kan maken tussen smeedstukken met andere productvormen van titaan. Naast het lassen aan gewalste producten kan men ook goede verbindingen maken met gietstukken van titaan. Hoewel TIG-lassen nog steeds wordt gebruikt voor het lassen van zwaardere en grotere onderdelen is het nadeel dat men veellaslagen moet leggen wat behoorlijk veel tijd c.q. geld kost. Daarom kan men beter gebruik maken van het plasma- of elektronenstraallasproces omdat deze processen te automatiseren zijn waardoor men in een laslaag de vereiste verbinding kan maken. Elektronenstraallassen geschiedt echter wel in een lucht vrije ruimte en de smalle straal vereist een nauwgezette voorbereiding en uitlijning van de te lassen componenten. Andere lasprocessen die gebruikt kunnen worden zijn wrijvingslassen, diffusieassen, explosief lassen, laserlassen en solderen. Alle genoemde processen kunnen goed uitgevoerd worden dankzij de goede laseigenschappen van titaan. Ook kan men probleemloos met het lasproces titaanlagen opbouwen op uitgesleten of beschadigde delen van titaancomponenten.

## Moet men commercieel zuiver titaan gloeien na het lassen?

Commercieel zuiver titaan is een eenvoudig metaal dat slechts éénfasig is en daarom gemakkelijk te lassen is door deskundige lassers in de werkplaats of op het fabrieksterrein. Een warmtebehandeling is in principe nooit nodig en de las heeft dezelfde corrosiebestendigheid als het moedermateriaal. In feite is het ongelegeerde materiaal niet warmte te behandelen omdat het nu eenmaal éénfasig is.

## Waar moet men verder op letten als men het metaal titaan last?

In vergelijking met andere constructiemetalen is titaan zeer goed lasbaar en niet gevoelig voor warscheuren. Het meest gebruikte lasproces t.b.v. titaan is het TIG-lasproces.

De wolfraamelektrode is gelegeerd met  $\pm 2\%$  thorium. Het bescherm- en backingmedium is in de regel altijd het inerte argon of heliumgas. Helium wordt vanwege de relatief hoge prijs in Europa maar zelden gebruikt. De zuiverheid van het backinggas dient minimaal 99,99% te zijn. Voordat men titaan gaat lassen dient men de te lassen plaatsen eerst te ontdoen van de oxidehuid. Dit kan zowel mechanisch zoals met een RVSborstel of slijpen, als met een chemisch beitsproces. Als beitsmiddel gebruikt men veelal een mengsel van waterstoffluoride (HF) en salpeterzuur (HNO<sub>3</sub>). Daarna vervolgt men met het grondig reinigen van allerlei vuil en vet. Bovendien is het zeer aan te raden om de lastoevoegmaterialen ook te ontvetten. Vet is namelijk een koolwaterstofverbinding die tijdens het lassen zal dissociëren, waardoor koolstof ontstaat die ongewenst het titaan zal binnendringen. Vanwege het reactieve vermogen van titaan vraagt het lassen extra aandacht en voorzorgsmaatregelen. Een heel belangrijke maatregel is dat de las en de afkoelende las zeer goed wordt beschermd zoals hierboven is omschreven. Een andere methode om het metaal te beschermen, is het zijdelings toedienen van het beschermgas. Aan de tegenzijde wordt een stationaire slof aangebracht. Het allerbeste zou zijn dat men het werkstuk plaatst in een couveuse waar een inert gasatmosfeer aanwezig is zoals eerder is vermeld. In de praktijk blijkt dit veelal alleen te lukken met werkstukken van geringe afmetingen.

## Welke lastoevoegmaterialen moet men gebruiken om een goede las te kunnen leggen in titaan?

Als toevoegmateriaal gebruikt men meestal voor de commercieel zuivere kwaliteiten de soorten grade 1 en 2. Het is van groot belang dat het hete uiteinde van de lasdraad voortdurend in het beschermgas wordt gehouden om gasopname c.q. verbrossing van het uiteinde te voorkomen.

## Kan men titaan solderen en wat zijn de problemen die hiermee gepaard gaan?

Ja, titaan is onder bepaalde condities te solderen. De belangrijkste toepassing van het solderen van titaan is de fabricage van de honingraatstructuur voor de vliegtuigindustrie. Een behoorlijk probleem bij het solderen van titaan is de grote snelheid waarmee titaan met het gesmolten soldeer reageert. Resultaat hiervan is de vorming van brosse intermetallische verbindingen. Het soldeer is alleen bruikbaar wanneer het binnen een bepaald temperatuurgebied smelt. Het soldeersel bevochtigt het titaan en in gesmolten toestand vloeit het enigszins op het basismateriaal. Van al de verschil-

lende metalen en legeringen die aan deze criteria voldoen, worden de legeringen op zilverbasis met het meeste succes gebruikt voor het solderen van titaan. Niet alle legeringen op zilverbasis zijn geschikt. Een voorbeeld van een toegepaste legering vormen de zilverlithiumlegeringen. Deze bevatten 0,5-3,0% lithium. Nadeel van deze verbindingen is een slechte oxidatieweerstand in lucht bij temperaturen boven 425°C en geen corrosiebestendigheid tegen een zoute oplossing. Een veel meer belovende legering is Ag-5Al- 1Mn, die een betere oxidatie- en corrosiebestandheid bezit. Momenteel zijn nog verschillende andere soldeersoorten in ontwikkeling, zoals Pd-15.4Ag-3,5Si en zilver-cadmiumzinklegeringen. Het is mogelijk om bij een juiste soldeermethode verbindingen te krijgen met treksterkten van 200 N/mm<sup>2</sup> en hoger.

## Hoe zit het met de lasbaarheid van het zustermateriaal zirkoon?

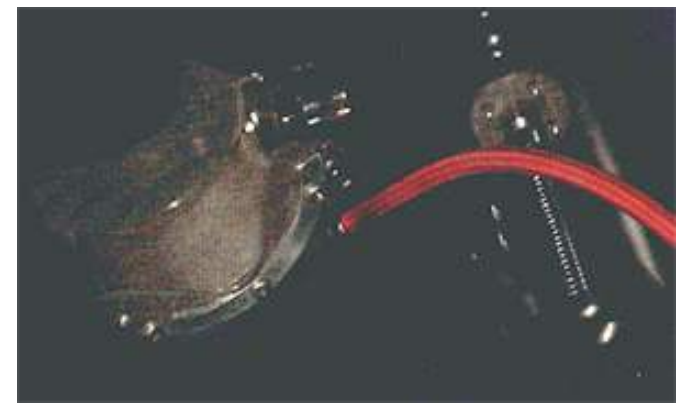
Het lassen van zirkoon blijkt een relatief eenvoudige opgave te zijn mits men de juiste lasparameters hanteert. Een zeer belangrijke maatregel is dat men tijdens het lassen de las en het afkoelende lasmetaal ook afdoende afschermt tegen het binnendringen van zuurstof, waterstof en stikstof. Bij temperaturen boven de 400°C zullen deze gassen vanuit de atmosfeer gemakkelijk binnendringen in het metaaloppervlak waardoor er plaatselijk verbrossing zal optreden. Dit is dan ook de reden dat er achter de lastoorts net als bij titaan een sleepslof gebruikt moet worden die de afkoelende las met een inert gas zoals argon of helium moet beschermen. Zirkoon wordt meestal gelast m.b.v. het TIG of MIG-lasproces. In sommige gevallen gebruikt men ook plasma- of elektronenstraallassen. Dankzij de lage thermische uitzetting heeft men zeer weinig vervormingen en spanningen in het metaal na het lasproces. Ook hier spreekt het voor zich dat grondig reinigen en ontvetten voor het lassen een noodzaak is.

Zirkoon kan men slechts aan enkele metalen lassen zoals titaan, vanadium en niobium. Wil men zirkoon aan koolstof- of roestvast staallassen dan zal dit meestal explosief moeten gebeuren. Zirkoon is qua lassen goed te vergelijken met titaan. Het heeft net als titaan een lage uitzettingcoëfficiënt en dat is een groot voordeel omdat het materiaal nauwelijks vervormt tijdens een thermische belasting zoals bij het lassen. Vanwege de lage elasticiteitsmodules zijn de restspanningen in de lasverbindingen gering. Ondanks dit is het toch aan te raden na het lassen spanningsvrij te gloeien bij 550-600°C. Als richtlijn wordt 1 uur gloeitijd aanbevolen per 25 mm materiaaldikte. Met de voorwaarden die gesteld worden om een goede las in het zirkoon te maken, moet reeds in het ontwerpstadium rekening mee worden gehouden. Men dient in dit verband ook de mogelijkheden t.a.v.

gasbescherming mee te nemen. Omdat zirkoon tijdens het lassen en het afkoelen beschermd moet worden met een inert gas moeten zowel de lastoorts als de sleepslof groter zijn dan normaal. De ontwerper dient hier voortdurend rekening mee te houden opdat er ruimte voor deze gereedschappen aanwezig zal zijn.

## Waar moet men vooral op letten bij het lassen van zirkoon?

Bij het starten en stoppen van de boog dient men enige seconden de toorts voor te spoelen voordat de boog wordt opgestart. Krassend starten moet altijd vermeden worden omdat dit een kans geeft op wolframinsluitels. De boog dient gedoofd te worden met een gelijkmatige aflopende stroom en een schakelaar die gewoonlijk door de voet bediend wordt. Na het beëindigen van de lasstroom moet het schermgas nog een tijdje via de stilstaande toorts en via het backingsysteem blijven stromen totdat het gestolde lasmetaal voldoende is afgekoeld. Als de las blauw of strogeel is dan is dit naspoelen te kort van duur geweest. Voor het lassen dient de lasdraad gecontroleerd te worden en zonodig worden gereinigd. Bij het handmatig toevoeren van de draad dient men erop te letten dat de draad met een constante voeding naar de laspoel wordt bewogen. Het afkoelende einde van de draad moet tijdens het afkoelen ook beschermd worden en indien dat door ondoordachtzaamheid niet gebeurd is, dient men zo'n 15 mm van het draadeind af te knippen omdat dit stukje mogelijk gecontamineerd is. Een gemakkelijke manier om draad van 1,5 mm aan te voeren kan men bereiken met het draadsysteem wat met het MIG-lassen wordt gebruikt. Tussentijdse reiniging is niet nodig als de stollende las helder en zilver van kleur is. Indien er een lichte verkleuring is zoals lichtblauw of strogeel dan dient dit verwijderd te worden met een austenitische roestvaststalen borstel. Gecontamineerde lassen moeten



Lascouveuse (linksboven) en sleepslof, Multiweld te Barendrecht.





m.b.v. slijpen verwijderd en gereinigd worden teneinde deze opnieuw te lassen. Met elektrisch slijpgereedschap moet men er rekening mee houden dat er een weinig olie of vet vrij kan komen waardoor men de geslepen oppervlakken weer goed moet ontvetten.

Met het lassen van meerdere lagen moet men erop toezien dat de temperatuur van het zirkoon niet teveel oploopt, want anders moet men het gebied wat gasbescherming nodig heeft verder uitbreiden. Omdat zirkoon uiterst gevoelig is voor contaminaties met verbrossing tot gevolg, is het van groot belang dat er lascontroles worden gedaan om zeker te zijn dat het lasproces goed is verlopen. Tijdens het lassen kan de lasser al de nodige controles uitvoeren en aanvullend kunnen er allerlei non-destructieve tests worden gedaan, zoals ultrasoon en radiografisch onderzoek alsmede een liquid penetrant inspectie. Een metallische zilverkleur op het uiterlijk van de las geeft alleen aan dat de gasbescherming tijdens het afkoelen goed is verlopen maar het betekent nog niet dat de primaire gasbescherming bij de lastoorts goed is verlopen. En licht strogeel of lichtblauw regenboogachtige kleuren geeft aan dat de las is beschermd tot een temperatuur onder de 550°C. Deze kleuren moeten weggeborsteld worden voordat men het lassen gaat voortzetten.

Onderstaande opsomming over de kleuren geeft een indicatie van de contaminaties weer:

- Lichtblauw, donkergeel en lichtblauw: oppervlakte-oxides die met een roestvaststalen borstel verwijderd moeten worden.



Titaankorven en titaan warmtewisselaars. Foto's: Schröder Plating Service te Langeveen.

- Donkerblauw, blauwgrijs, grijs en wit (losse bestanddelen): metaalcontaminaties die grondig verwijderd moeten worden door slijpen om daarna opnieuw gelast te moeten worden.

Als een algemene regel kan men stellen dat alle lichte kleuren t/m lichtblauw verwijderd kunnen worden met borstelen terwijl kleuren vanaf donkerblauw aangeven dat er gerepareerd moet worden door de las met slijpen gedeeltelijk te verwijderen. Is de las grijs of vlokachtig wit dan is de secundaire gasstroom zo slecht geweest dat de las totaal mislukt is, waardoor een grondige verwijdering van de las noodzakelijk is. De kleur van de las geeft de dikte van de oxidefilm aan en boven de 650°C lost deze oxidefilm op in het moedermetaal en dat inferieure uiterlijk is goed waarneembaar. Een eenvoudige buigtest om de ductiliteit te controleren geeft snel aan of de laskwaliteit goed is c.q. de primaire gasbescherming. Hoewel er allerlei complexe buigtesten beschikbaar zijn, kan men simpelweg met twee strookjes metaal die verbonden zijn door een stuiklas een buigproef uitvoeren. Dit doet men dan over een doorn die in een bankschroef zit ingeklemd. Indien men dan 180° buigt met een radius van 5xD zonder scheurvorming in de las dan is de verbinding in orde. Mocht de lasverbinding dikker zijn dan het basismateriaal dan moet men eerst de las even dik maken als het moedermateriaal

m.b.v. slijpen. Indien een dauwpuntmeter beschikbaar is dan kan de zuiverheid van het spoelgas gecontroleerd worden onder de -15°C. Ook kan men het uitstromend gas na het spoelen desgewenst hierop controleren. De hardheid van de ongecontamineerde las mag niet meer toenemen dan 30 punten Brinell ofwel 5 punten Rockwell B boven de hardheid van het basismateriaal. Indien deze hardheidstoename hoger is dan is het gelijk een indicatie dat de las verontreinigd is, ongeacht de kleur die de las heeft aangenomen.

## Het gebruik van vanadium

Indien men titaan of zirkoon toch aan staal of roestvast staal wil lassen dan zijn er toch bemoedigende resultaten te bereiken door eerst een laagje vanadium op het staal of roestvast staal aan te brengen d.m.v. een thermisch lasproces. Daarna kan men het titaan of zirkoon aan het vanadium lassen maar er moet wel bij gesteld worden dat de expertise van de lasser een grote rol speelt om tot een goed resultaat te komen. Ook is het een feit dat dit procédé nogal kostbaar is omdat men dubbel moet lassen en het metaal vanadium is vrij duur. Kan men derhalve uitwijken naar het explosief lasproces dan is dat in de meeste gevallen aan te raden, genoemde metalen te realiseren is.



**Metaalkundig adviesbureau Innomet Consultancy B.V.**

**Uw adviseur op gebied van alle metaal toepassingen!**

INNOMET Consultancy biedt metaalkundige expertise:

- materiaalselectie en schade-onderzoek
- rapporten en publicaties
- additive manufacturing en vormgeheugenmetaal
- gastlessen, lezingen en online trainingen
- explosief lassen en andere verbindingstechnieken

**METAALSELECTOR 5.0**  
Een waardevolle hulp om het juiste metaal te kiezen in een bepaalde chemische belasting

INNOMET Consultancy B.V.  
Utrecht  
06 51 990189  
info@innometconsultancy.nl  
www.innometconsultancy.nl

Innomet Consultancy verdiept zich in uw situatie!





**JACQUET**  
**NEDERLAND**

**JACQUET Nederland is dé specialist voor het conform specificatie snijden van roestvast staal, nikkellegeringen en titaan of het leveren van standaard c.q. gedecoilde plaat.**

**JACQUET Nederland BV**  
Volume 119B  
1446 WH Purmerend  
+ 31 (0)299 479 879  
sales@jacquet.nl  
<https://nederland.myjacquet.com/nl/>

- Roestvast staal
- Nikkellegeringen
- Laser snijden
- Waterstraal snijden
- Plasma snijden
- Plaat • Smeedwerk



## Oppervlaktebehandeling van titaan

In het algemeen kan men stellen dat oppervlaktebehandelingen van metalen het doel hebben om de slijtvastheid te vergroten, de wrijvingsweerstand te verlagen en om aan bepaalde esthetische eisen te kunnen voldoen. Per definitie levert een oppervlaktebehandeling een verandering van de eigenschappen van dit oppervlak op. In dit opzicht verschilt de doelstelling van een oppervlaktebehandeling niet als we aan het metaal titaan denken. Het oppervlak van titaan kan zowel mechanisch, metallurgisch als chemisch veranderd worden. Bovendien kan men m.b.v. bepaalde coatingtechnieken een laagje aan het oppervlak bewerkstelligen die bijvoorbeeld de slijtbestendigheid en de wrijvingseigenschappen verbetert. Wat alle technieken gemeen hebben is het feit dat het basismateriaal geen nadelige invloeden zal ondervinden. Om de slijtbestendigheid te verhogen zijn er meerdere mogelijkheden die allemaal hun eigen kenmerken en kostprijs hebben. De uiteindelijke keuze van deze behandeling is sterk afhankelijk van het soort slijtage dat kan gaan optreden. Onderstaande beschouwing zal meer duidelijkheid geven over al de variabelen.

### Het metaal titaan

De laatste jaren is er al veel gepubliceerd over het metaal titaan en daarom wordt hier slechts in kort bestek omschreven wat de karakteristieken zijn van dit interessante metaal dat vaak bekend staat als een duur corrosievast lichtmetaal. Titaan komt op vier elementen na het meest voor in onze aardkorst als rutielerts en daardoor is er bepaald geen gebrek aan dit element. De kwestie dat titaan relatief duur is, komt door het feit dat het metaal zich zo moeilijk laat scheiden van het element zuurstof waar het in ertsvorm zeer hecht aan verbonden is. De meeste metalen laten zich door een enkelvoudig reductieproces winnen vanuit hun ertsvorm, doch dat gaat bij titaan niet op. Het erts wordt namelijk eerst met cokes en chloor gemengd, waardoor op hoge temperatuur titaantetrachloride ontstaat. Daarna gebruikt men magnesium als reductiemiddel en bij verhoogde temperatuur ontstaat dan sponsachtig titaan en magnesiumchloride. Dit sponsachtige titaan wordt geperst tot blokken en daarna omgesmolten tot blokken voor verdere verwerking tot halffabrikaten. Voor de bereiding van magnesium gebruikt men ook veel energie hetgeen de prijs van titaan dus verder opdrijft. Eigenlijk moet men per saldo stellen dat er drie reductieprocessen nodig zijn plus een extra smeltproces, waardoor de kostprijs van titaan grotendeels wordt bepaald door het hoge energieverbruik. Gelukkig zijn alle reductieprocessen dusdanig verbeterd en veredeld dat deze energieconsumptie c.q. de titaanprijs de laatste jaren aanzienlijk is verlaagd. Omdat titaan goede mechanische eigenschappen bezit en omdat het in princi-

pe nooit corrosietoeslag nodig heeft, kan men in de regel de onderdelen aanzienlijk dunner maken dan bijvoorbeeld in het geval van roestvast staal en nikkellegeringen. In de praktijk kan dit zelfs oplopen tot een vermindering van 50%. Hieruit blijkt dan ook weer hoe relatief het begrip 'duur' is.



Afbeelding 1 Toepassing van titanium materiaal op dak, gevel en overstek van het Van Gogh Museum te Amsterdam. Foto: Combined Engineering B.V. te Rotterdam.





Afbeelding 2 Stukje titanium dat een behandeling heeft ondergaan om kleur te verkrijgen.Foto's boven: Combined Engineering B.V. te Rotterdam. Foto: Combined Engineering B.V. te Rotterdam.

In het kort worden onderstaande eigenschappen van titaan vermeld:

- Zeer hoge corrosiebestendigheid;
- Grote erosieweerstand;
- Hoge efficiënte warmteoverdracht;
- Zeer gunstige gewicht/sterkteverhouding.

Titaan is totaal immuun voor corrosieve aantastingen door zout- en zeewatermilieus. Er zijn fabrikanten die 40 jaar garantie geven op het gebruik in zeewater en dat zelfs in de onbehandelde staat en zonder kathodische bescherming. Ook heeft het metaal een voortreffelijke corrosiebestendigheid tegen een uitgebreide reeks van zuren, alkaliën, watertypen en industriële chemicaliën. Titaan biedt een superieure weerstand tegen erosie, cavitatie of botsingsinslag. Deze weerstand kan wel tot twintig keer zo groot zijn als die van bijvoorbeeld kopernikkellegeringen. Hoewel het warmtegeleidingsvermogen van titaan niet groot is, kan het metaal ook op dit terrein zich meten met allerlei koperlegeringen omdat de wanddikte veel geringer kan zijn dankzij de goede mechanische eigenschappen en omdat er geen

corrosietoeslag nodig is. In tabel 1 kan men de opmerkelijke eigenschappen van titaan gadeslaan. De toepassingen kunnen variëren van een medisch implantaat tot en met een grote stijgbuis in de olie-industrie. Ook huishoudelijke en sportartikelen worden steeds meer van titaan gemaakt. In de gelegeerde vorm wordt titaan met groot succes toegepast in de vliegtuigbouw en ruimtevaart vanwege de nog betere gewicht/sterkteverhouding. Men kan dan vooral denken aan de kwaliteit Ti-6Al-4V. Onder commercieel zuivere titaanlegeringen worden verstaan de grade 1, 2, 3, 4, 7 en 11 die een oplopende onzuiverheid kennen. Grade 7 en 11 bevatten circa 0,2% paladium dat zorgdraagt voor een nog hogere corrosiebestendigheid in vooral reducerende zuren en tegen de mogelijke kans op spleetcorrosie.

### Verkrijgbaarheid van titaan

Titaan is in allerlei productvormen verkrijgbaar en overeenkomstig de ASTM-normen kunnen we e.e.a. indelen zoals in tabel 2 is weergegeven. Lasdraad van titaan en titaanlegeringen is gespecificeerd volgens de AWS-specificatie A5.16.

### Wrijving en slijtgedrag

In de praktijk blijkt dat het heel moeilijk is om een juiste wrijvingscoëfficiënt voor titaan op te geven. Een wrijvingscoëfficiënt wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de wrijvingskracht en de grootte van het betreffende gewicht. Hoewel de wrijvingscoëfficiënt geen materiaaleigenschap is, hebben vele metalen toch een constante coëfficiënt die ligt tussen 0,1 en 1,0 (onder een droge conditie). Indien titaan over titaan schuift dan ligt deze waarde net onder de 1.0.

| Omschrijving                     | Eenheid  | Commercieel zuiver titaan | Ti-6Al-4V (grade 5) | Bèta-legeringen |
|----------------------------------|----------|---------------------------|---------------------|-----------------|
| <b>Mechanische eigenschappen</b> |          |                           |                     |                 |
| 0.2% rekgrens                    | MPa      | 345 - 480                 | 830 - 1000          | 1100 - 1400     |
| Treksterkte                      | MPa      | 480 - 620                 | 970 - 1100          | 1200 -1500      |
| Rek                              | %        | 20 - 25                   | 10 - 15             | 6 - 12          |
| Hardheid                         | HV       | 160 - 220                 | 300 - 400           | 360 - 450       |
| Elasticiteitsmodulus             | GPa      | 103                       | 114                 | 69 - 110        |
| <b>Fysische eigenschappen</b>    |          |                           |                     |                 |
| Soortelijk gewicht               | gm/cc    | 4,51                      | 4,42                | 4,81 - 4,93     |
| Uitzettingscoëfficiënt*)         | 10-6/ °C | 8,9                       | 8,3                 | 7,2 - 9,5       |
| Warmtegeleidingscoëfficiënt**)   | W/mk     | 22                        | 6,7                 | 6,3 - 7,6       |
| Specifieke warmte***)            | J/Kg/ °C | 515                       | 565                 | 490 - 524       |

\*) = geldig van 0 - 200 °C; \*\*) = geldig bij kamertemperatuur

Tabel 1. Overzicht van belangrijke eigenschappen van titaan en titaanlegeringen

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| ASTM B 265 | plaat en strip                       |
| ASTM B 337 | naadloze en langснаad gelaste buizen |
| ASTM B 338 | naadloze en langснаad gelaste buizen |
| ASTM B 348 | staven en knuppels                   |
| ASTM B 363 | naadloze en gelaste fittingen        |
| ASTM B 367 | gietsukken                           |
| ASTM B 381 | smeedstukken                         |
| ASTM B 861 | naadloze buizen                      |
| ASTM B 862 | langснаad gelaste pijp               |
| ASTM B 863 | draad                                |

Tabel 2 Overzicht ASTM-normen voor titaan en titaanlegeringen

Slijtage komt in de praktijk in allerlei vormen voor en wordt doorgaans veroorzaakt door wrijven, schuren en invreten vanwege metallisch contact. Ook titaan heeft uiteraard met dit probleem te maken. Het vreten van titaan op titaan wordt veroorzaakt indien twee beperkte contactvlakken vibrerend of stotend onder een bepaalde belasting op elkaar inwerken. De uitgebroken deeltjes metaal en oxides zullen dit vreeteffect verder versterken. Een andere vorm van slijtage is de invloed van abrasieve harde stoffen die door het oppervlak snijden van een zachter metaal. Vaak zijn dit zanddeeltjes die bijvoorbeeld in ruwe olie of in boorsel aanwezig kunnen zijn. Indien de omstandigheden zo zijn dat titaan niet direct een nieuwe oxidehuid kan vormen dan is zo'n abrasieve inwerking een reëel gevaar voor de corrosiebestendigheid. Wel is het zo dat titaan een hoge erosieweerstand biedt tegen vloeistoffen die allerlei zwevende deeltjes in zich hebben, mits de vloeistof niet reducerend werkt t.o.v. de oxidehuid. Uiteraard kan men ook het oppervlak voorzien van allerlei smeermiddelen die de wrijvingscoëfficiënt laten afnemen.

### Beperkingen van het titaanoppervlak

Titaan heeft van nature een goede hechtende oxidehuid die ook zijn beperkingen heeft in allerlei toepassingen waar het materiaal op wrijving wordt belast. Dit geldt vooral wanneer er sprake is van een contact van metaal op metaal. Het is daarom van groot belang dat men voldoende aandacht

schenkt aan de oppervlaktebehandeling en hoe de smering is van bijvoorbeeld matrijzen en andere gereedschappen. Zoals eerder gesteld is de grootte van de wrijvingscoëfficiënt 0,8 tot 0,9 bij wrijvend contact zonder smering of behandeling van het oppervlak. Fundamenteel onderzoek geeft aan dat deze waarde slechts 0,3 tot 0,4 zou moeten zijn en voor titaanlegeringen nog lager. Er zijn echter drie factoren die in combinatie met elkaar deze waarde sterk verhogen waardoor het minder goede tribologische gedrag ontstaat. De eerste factor is de atoomstructuur, de tweede is de kristalopbouw en de derde is de relatief lage treksterkte en afschuifwaarde van de titaanoxidehuid. Omdat de hechtingskracht van de oxidehuid op de matrix beter is dan de eigen treksterkte zullen allerlei deeltjes uitbreken bij het schuiven van een metaal over titaan. Legeren van het titaan geeft slechts een marginale verbetering van de slijteigenschappen. Als titaan over titaan schuift dan is de wrijvingscoëfficiënt twee keer zo groot als die van staal op staal en vier keer zo groot als brons op brons. Smeermiddelen op koolwaterstofbasis geven een enorme verbetering. Andere smeermiddelen zijn bepaalde olie- en vetsoorten alsmede molybdeendisulfide. Om goede slijteigenschappen te verkrijgen kan men naast afdoende smeertechnieken het allerbeste het titaan onderwerpen aan een oppervlaktebehandeling. Deze behandeling kan het beste plaatsvinden op een schoon en gebeitst oppervlak.

### Het beitsen van titaan

De dunne stabiele en taaie oxidehuid van titaan is een beperking om goede oppervlaktebehandelingen te geven en daarom dient deze eerst verwijderd te worden. Deze huid, die juist de basis is van alle bescherming, is gelijktijdig een sta-in-de-weg voor allerlei oppervlaktebehandelingen. Om bijvoorbeeld de hechtingskracht te vergroten kan men zowel mechanisch (bijvoorbeeld stralen en glasparalen) als chemisch (beitsen) het oppervlak verruwen. Onderdelen van titaan die bij hogere temperatuur aan lucht zijn blootgesteld hebben een dikkere oxidehuid die zeker verwijderd moet worden, omdat deze door allerlei contaminaties geen hoge corrosieprestaties kan leveren en bovendien zeer storend

| Aanbevolen beitsbaden en temperaturen |                                                                        |                              |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Legering                              | Samenstelling valt het beitszuur                                       | Temperatuur van het beitsbad |
| Alfa                                  | 10 - 20% salpeterzuur                                                  | maximaal 40°C                |
| Alfa-Bèta                             | 2 - 4% waterstoffluoride<br>zuurverhouding 5:1 met een maximum van 8:1 |                              |
| Bèta                                  | 30 - 35% salpeterzuur<br>4 - 6% waterstoffluoride                      | 60 - 70°C                    |

Tabel 3 Samenstelling van beitsbaden



| Reinigingsmiddel | Temperatuur | Concentratie | Corrosieremmers                    |
|------------------|-------------|--------------|------------------------------------|
| Zoutzuur         | tot 65°C    | tot 10%}     | 1000 ppm ijzerchloride of          |
| Zwavelzuur       | tot 65°C    | tot 10%}     | 1000 ppm koperchloride of          |
| Fosforzuur       | tot 65°C    | tot 10%}     | 500 - 1000 ppm chromiumoxide       |
| Citroenzuur      | tot 65°C    | tot 10%      | natuurlijk beluchting              |
| Salpeterzuur     | tot 65°C    | tot 10%      | geen                               |
| Natriumhydroxide | tot 65°C    | tot 10%      | 1% natriumchloraat of hypochloriet |

Tabel 4 Reinigingsvloeistoffen

zal werken voor allerlei oppervlaktetechnieken. Om dit te kunnen bereiken zal men na het glasparelen ook nog het oppervlak moeten beitsen, omdat deze oxidehuid uit meerdere lagen kan bestaan. Het beitsen gebeurt in een mengsel van salpeterzuur en waterstoffluoride (zie tabel 3). Een hogere concentratie aan salpeterzuur (tot 40%) en een lagere badtemperatuur zal leiden tot een minder ruw oppervlak, terwijl te veel waterstoffluoride zelfs waterstofopname kan veroorzaken, hetgeen schadelijk is. Na het beitsen moet men intensief spoelen met water. Soms spoelt men ook eerst na met een alkalische vloeistof i.v.m. de neutralisatie van het zuur. Ook kent men tegenwoordig speciale gepatenteerde etsende zoutoplossingen die ook zeer goed de primaire thermische oxides kunnen verwijderen. Hierna moet men beitsen zoals hierboven omschreven. Het reinigen van titaan in de praktijk kan men doen met vloeistoffen zoals beschreven in tabel 4. Het gebruik van koolstofstalen borstels of andere stalen voorwerpen om

allerlei aanslagen van het titaan te verwijderen wordt sterk ontraden omdat ingebedde deeltjes staal tot corrosie kunnen leiden. Men kan dan veel beter met borstels van roestvast staal of zelfs van titaan werken.

### Basische ontvetting

Oplossingen van natriumhydroxides en silicaten met oppervlakteactieve stoffen zijn in allerlei verhoudingen verkrijgbaar en zijn m.b.v. dompelbaden of sproeisystemen prima in staat om alle oppervlakteverontreinigingen zoals olie, vet, metaaldeeltjes e.d. te verwijderen. Het ontvetten, dat gewoonlijk geschiedt op een temperatuur van 80- 85°C, zal gevolgd moeten worden door grondig spoelen.

### Mechanische behandeling

Slijpen, bewerken, stralen en shot-peening (kogelstralen) kunnen zorgen voor een prima start teneinde een goede oppervlaktebehandeling aan het titaan te geven. Shot-pee-ning, dat bij omgevingstemperatuur geschiedt, is een proces waarbij kleine kogeltjes het oppervlak van het te stralen onderdeel bombarderen. Het resultaat is dat men een oppervlak krijgt met relatief hoge mechanische spanningen en enige koudversteving. Deze verdichte zone die zo ontstaat, vergroot de weerstand tegen cyclische vermoeiing en tegen de gevreesde spanningscheurcorrosie. Op afbeelding 3 kan men zich een beeld vormen van de effecten van deze verdichting. Deze verdichte laag bewerkt ook een verlaging van de vreetgevoeligheid en een verlaging van de wrijvingscoëfficiënt hetgeen een bijzonder groot voordeel is indien dit titaan in aanraking komt met andere bewegende metalen. Kogelstralen wordt in het algemeen gebruikt t.b.v. titaanschijven, schoepenbladen en andere kritische componenten van moderne straalmotoren. Ook vindt het steeds meer zijn weg in orthopedische componenten en andere toepassingen zoals in de architectuur, brilmonturen en horloges.

Bij het verdichten van het oppervlak ontstaan er drukspanningconcentraties aan deze oppervlakte die de weerstand tegen vermoeiing verhogen. Daarom wordt shot-peening ook met succes gebruikt om de vermoeiingseigenschappen van titaancomponenten te verbeteren die vooral worden gebruikt in de luchtvaartindustrie, doch soms ook wel bij industriële toepassingen. Het andere grote voordeel is dat de weerstand tot het vreten van verschillende op elkaar bewegende oppervlakken wordt gereduceerd. Bovendien zorgen de drukspanningen in het oppervlak voor een verlaging van de eventuele spanningscorrosiegevoeligheid. Soms wordt shot-peening ook gebruikt in combinatie met andere oppervlaktetechnieken.

### Bouten en moeren in titaan

Bij het vastzetten en demonteren van boutconstructies worden de oppervlakken van de schroefdraden enorm belast op metallisch contact, met mogelijk vreten tot gevolg. Bovendien krijgen we bij het vastzetten van andere metalen met bouten en moeren in titaan ook mogelijk te maken met galvanische corrosie waarbij in de regel het titaan altijd de kathode is. Bij aluminiumconstructies kan men ervan uit gaan dat men in zo'n geval in zeer korte tijd op een enorme lokale corrosie van het aluminium kan rekenen. Daarom verstrekken leveranciers van titaanbouten en moeren prima coatings die dat corrosieprobleem en het vreeteffect kunnen elimineren. Dit zijn veelal deklagen op organische basis die bovendien zijn verrijkt met inhibitoren (corrosieremmers) die tot 200°C en in de meeste agressieve reagentia intact blijven. Ook wordt met succes een coating van molybdeen-disulfide toegepast zoals dat ook vaak het geval is bij het gebruik van snijringkoppelingen.

### Het anodiseren van titaan

In tegenstelling tot wat vaak wordt aangenomen, bewerkt het verdikken van de titaanoxidehuid nauwelijks een verbetering van de slijteigenschappen. Wel geeft een geanodiseerd oppervlak een grotere weerstand tegen de diffusie van zuurstof bij verhoogde temperatuur en van waterstof in galvanische omstandigheden. Het elektrolyt dat veelal gebruikt wordt is 80% fosforzuur + 10% zwavelzuur en 10% water en na een behandeling van circa 10 minuten heeft men reeds een behoorlijke verdikking van een goed samenhangende oxidehuid verkregen. Wel kan men met deze methode, gecombineerd met een droog smeermiddel, de drang tot het invreten van schroefdraden aanmerkelijk verlagen. Voor stijgbuizen die o.a. toegepast zijn in het Heidrun-project in Noorwegen heeft men met succes Ti-6Al4V-bouten

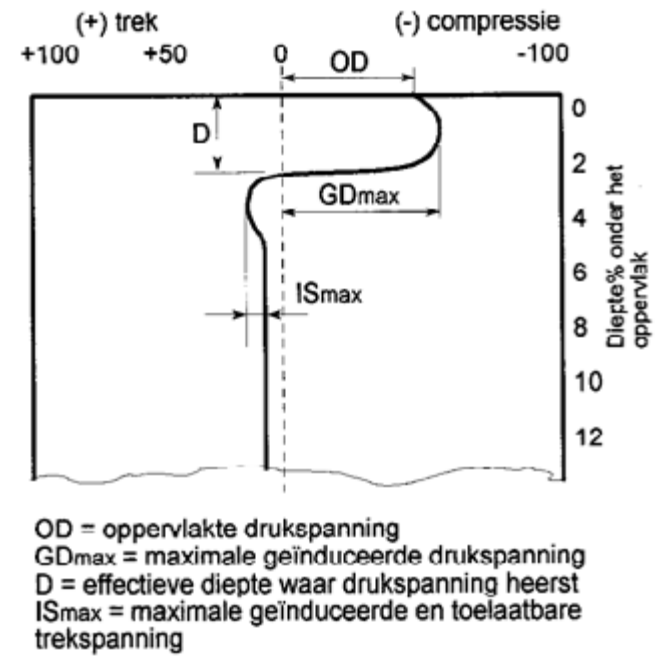
| Soort proces                            | Dikte van de laag in microns |
|-----------------------------------------|------------------------------|
| zuur anodiseren + smeermiddel           | 0,1                          |
| diffusie van stikstofionen              | 0,5                          |
| ioniserend plateren/zachte metalen      | 1                            |
| nitreren                                | 6                            |
| alkalisch anodiseren + smeermiddel      | 7                            |
| plasma nitreren                         | 30                           |
| gesmolten cyaanzout                     | 60                           |
| thermische gasdiffusie                  | 70                           |
| elektroplateren met hardmetaal          | 110                          |
| chemisch vernikkelen                    | 90                           |
| elektroplateren zachte metalen          | 110                          |
| thermisch sprayen van een coating       | 300                          |
| thermisch sprayen van zachte metalen    | 500                          |
| legeren van het oppervlak met een laser | 700                          |

Tabel 5 Slijtlagen met hun dikten

gebruikt die voorzien waren van een epoxycoating op basis van polyamide molybdeendisulfide dat aangebracht was op een oppervlak dat behandeld was door shot-peening gevolgd door anodiseren. Naast deze technieken zijn er meerdere varianten met hun specifieke eigenschappen zoals bijvoorbeeld met alkalische anodiseerprocessen die vaak nog dikkere oxidehuiden geven. Dergelijke processen zijn gebruikt voor titaanonderdelen die gebruikt zijn door de NASA voor expedities naar de maan. Een bijzondere 'bijwerking' is het feit dat de dikkere oxidehuid vanwege het anodiseren een andere brekingindex geeft van het opvallende licht waardoor alle kleuren van de regenboog mogelijk zijn. Van deze eigenschap maken vooral kunstenaars en edelsmeden dankbaar gebruik. Voor deze zaken wordt veel gebruikgemaakt van een elektrolyt die bestaat uit een oplossing van 3 - 5% natriumtrifosfaat in gedestilleerd water. De kleuren die op het titaan kunnen ontstaan zijn in afhankelijkheid van de samenstelling van het elektrolyt en het voltage. Heel soms wordt het anodiseren ook gebruikt om ijzercontaminaties te verwijderen die op het oppervlak kunnen voorkomen. Men kan een dergelijke actie dan zien als de laatste handeling om apparatuur in titaan optimaal af te leveren. Het zal overigens duidelijk zijn dat dit dan een alternatief is voor het beitsen.

### Harden m.b.v. een zoutbad

Oppervlaktebehandelingen in verschillende zoutbaden bij temperaturen rond de 800°C geven een verhoging van de hardheid tot wel 800 HV dankzij interstitiële oxides, carbi-



Afbeelding 3 Voorbeeld van restspanningen veroorzaakt door shot-peening.



# We love technical challenges

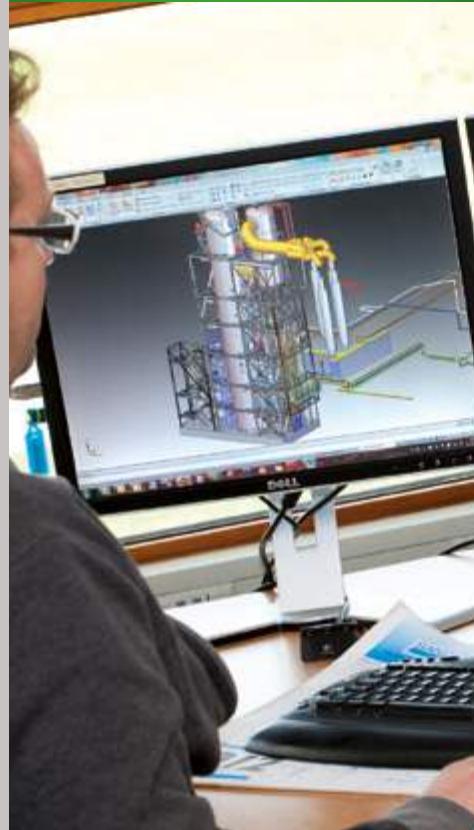
**Titan**  
Projects



## The bigger the challenge the better

- Process optimization
- Equipment renovation
- Site Installation
- Pressure equipment
- Complex projects

**Titan**  
Engineering



## Improving lifetime of process equipment

- Engineering (2D/3D)
- Plant design
- Material selection
- Stress calculations
- FEM analysis

**Titan**  
Fabrication



## Bring it on, we shape it and weld it

- Stainless steels / Duplex
- Special alloys
- Titanium
- Cladded materials
- Field experience

## Everything under control: Titan

For decades Titan Projects offers turn-key services when it comes to special process equipment. From engineering, production and installation to on site inspections and renovations (Worldwide). We love to solve problems which others don't whether it goes about manufacture a special pressure vessel or replacing a vessel bottom on site.

Try us: We don't get nervous.

[www.titanprojects.nl](http://www.titanprojects.nl)



den en nitriden die tot een dikte van 0,04 mm aanwezig zijn. In de tabel ziet men de dikte van de slijtlaag die men met de verschillende methoden kan verkrijgen en die nodig is voor een afdoende slijtweerstand.

### Het nitreren van titaan

Er zijn verschillende processen commercieel beschikbaar die een zeer dunne en harde genitreeerde laag bewerkstelligen op het titaanoppervlak. Deze laag is in de regel goudkleurig en slechts 4 micron dik. Titaannitride (TiN) is inert, biocompatibel (dus implanteerbaar) en kan toegepast worden tot een temperatuur van 480°C. Tegenover andere genitreeerde oppervlakken is de wrijvingscoëfficiënt 0,05-0,15.

Het plasma-nitreren is een eenvoudig en veelgebruikt proces omdat daarmee goede uniforme slijtlagen aangebracht (beter gezegd ingebracht) kunnen worden op alle denkbare vormen. Dit proces speelt zich af op een temperatuur van 700°C waardoor men ook rekening moet houden dat het materiaal hierdoor a.h.w. warmtebehandeld wordt. Men dient daarom echter ook rekening te houden met nadelen van deze behandeling omdat ook het oppervlak ruwer wordt en er treedt vaak een vermindering van de vermoeiingseigenschappen op. Dit laatste is vooral het geval bij dikkere genitreeerde laagdiktes. Bij deze temperatuur wordt de titaanoxidehuid verwijderd zodat stikstof het oppervlak binnen kan diffunderen met een harder substraat als gevolg waar uiteindelijk het slijtvaste titaannitride op aangebracht kan worden. Men kan dit proces ook af laten spelen bij een temperatuur van 450°C, waardoor er geen oppervlakteverruwing optreedt. De laag die dan ontstaat is echter dunner (3 microns) en heeft een veel slechtere hechting op het onderliggende titaan. Bij grote belastingen kan zo'n laag dan ook snel beschadigd worden. Daarom kan men dit substraat het beste eerst verstevigen en versterken m.b.v. lasersmelting met stikstof.

Men noemt dit proces ook wel laser-nitreren. Ook kan dit versterken en verstevigen bereikt worden door bepaalde legeringsadditieven aan te brengen in het oppervlak m.b.v. het elektronenstraalsmelten. Ruwweg kan men stellen dat een vertienvoudiging van de geharde laag een verdubbeling geeft van de slijtbestendigheid waardoor de prestaties van titaan min of meer vergelijkbaar zijn met dat van gehard staal. Genitreeerde titaanassen van 4 meter lang die gebruikt zijn in het Snorre Leg Platform in Noorwegen hebben een laagdikte van 5-12 microns met een gemiddelde hardheid van 900 HV.

Ook de motorrace is een grote gebruiker van genitreeerde titaancomponenten. We kunnen hierbij denken aan onderdelen in afsluiters en klepinrichtingen, doch ook verbindingssassen, lagers, naven en andere slijtdelen. Ook worden



Afbeelding 4. Genitreeerde titaankogels t.b.v. afsluiters waardoor er een uitstekende combinatie ontstaat van slijt- en corrosiebestendigheid met bovendien een lage wrijvingscoëfficiënt. Bron: Courtesy Tecvac Ltd. en Timet UK

genitreeerde kogels in afsluiters met succes toegepast in de maritieme en chemische industrie. Genitreeerde onderdelen die in het lichaam worden geïmplantéerd dienen eerst gepolijst te worden i.v.m. het ruwere oppervlak. Een van de grootste problemen die men met het nitreren tegenkomt is de verlaging van de vermoeiingssterkte als gevolg van kleine microscheurtjes in het genitreeerde oppervlak die zich in het moedermateriaal kunnen 'voortplanten'. Dit probleem versterkt zich naarmate de laagdikte toeneemt.

### Metallische coatings

Omdat titaan een oxidehuid heeft, moet het materiaal voorbehandeld worden voordat men overgaat tot het plateren. Deze oxidehuid vormt een barricade om een goede hechting te krijgen van de platering en dient dus daarom verwijderd te worden m.b.v. diverse behandelingen waaronder etsen en andere oppervlakteactivaties.

### Galvanisch plateren

Een van de meest gebruikte methoden is het galvanisch plateren met chroom dat ook wel hardverchromen wordt genoemd. De laagdikte varieert tussen 5 en 250 micron en de hardheid is 900-1050 HV. Toepassingen treft men vooral in dragende componenten t.b.v. de luchtvaart, actuatoren, automobielinindustrie zoals zuigers, klepveren, dragende delen voor nokken- en krukassen. Teneinde de vermoeiingseigenschappen te behouden wordt vooraf het component onderworpen aan een shot-peeningbehandeling. Dit geldt overigens niet voor dunne voorwerpen. Bij zeer zware



deklagen kan het soms noodzakelijk zijn dat er nog enige mechanische nabewerking nodig is om de juiste afmetingen te krijgen. Hardverchromen heeft een negatieve invloed op de vermoeiingssterkte van het titaan, doch dankzij een shot-peening, mogelijk gecombineerd met een warmtebehandeling, geeft het toch weer goede resultaten. Het invreten van titaan kan men het beste bestrijden met metallische deklagen die bestand zijn tegen oxiderende invloeden zoals men bijvoorbeeld krijgt met het chemisch vernikkelen of met nog zachtere, zelfsmurende deklagen zoals zilver, indium, koper en tin. Koper geeft de beste resultaten van alle zachte metallische deklagen als het om het invreten en vermoeiing gaat. Als men een deklaag van 50 micron koper aanbrengt na het shot-peenen, dan bewerkt dat een toename in de weerstand tegen het vreten van maar liefst 150%. In het verleden gebruikte men ook wel cadmium, doch dat leidde tot verbrossing en spanningscorrosie en wordt daarom afgeraden. Dit is zeker het geval bij het gebruik van kritische onderdelen zoals bouten en moeren.

### Chemisch plateren

Chemisch plateren gebeurt zonder een stroombron en het grote voordeel van dit proces is de zeer egale dikte van de



Afbeelding 5. Dankzij een opgespoten coating van wolframcarbide (0,25 mm dik) werd het invreeteffect op deze titaanschoepen vertraagd van 100 uur naar 30.000 uren. Het slijteffect op de basis van deze schoepen werd nagenoeg geheel opgeheven door een galvanisch opgebrachte koper-nikkel-indium laag. Bron: Courtesy Praxair Surface Technologies Ltd. en Timet UK.

deklaag. Op deze wijze kan men zelfs componenten bewust onder de maat produceren waardoor deze dankzij dit proces zeer nauwkeurig aan de maat kunnen komen. Een nikkelplatering op titaan kan dankzij een warmtebehandeling van 1 uur op 400°C qua hardheid toenemen van 450-650 HV tot 950-1050 HV. Deze warmtebehandeling heeft geen invloed op de karakteristieken van het ongeleeerde titaan, doch kan mogelijk wel wat effect hebben op de eigenschappen van titaanbètalegeringen die onderworpen zijn geweest aan een verouderingswarmtebehandeling.

### Plateren met ingebedde bestanddelen

Zowel bij het galvanisch als het chemisch plateren kan men kleine harde of smerende bestanddelen laten inbedden in de slijtlaag, zoals bijvoorbeeld nikkelborium of een PTFE (polytetrafluoroethyl)-coating. De metallische deklaag zorgt dan voor de samenbinding. Het nikkelborium geeft een zeer goede slijtbestendigheid en heeft een lage wrijvingscoëfficiënt; het kan toegepast worden tot 500°C. Het PTFE fungeert als een zacht droog smeermiddel. Bij het chemisch plateren met nikkel gevolgd door een warmtebehandeling bij 300°C gedurende 4 uur heeft men dan een hardheid van ongeveer 400 HV verkregen. Toepassingen zijn mogelijk tot een temperatuur van maximaal 300°C.

### Thermisch sprayen met metalen en keramiek

Er zijn diverse thermische-spraysystemen ontwikkeld, zoals het plasma-sprayen, HVOF (high velocity oxy-fuel) en het vacuüm plasmaproces. Vele keramische en carbidehoudende deklagen, doch ook metalen en metaallegeringen, kunnen m.b.v. het HVOF- en plasmasprayproces met succes worden aangebracht. Het doel is om de prestaties te verbeteren van bijvoorbeeld de vreetneigingen, slijtbestendigheid, elektrische isolatie, erosieweerstand e.d. Poreuze deklagen kunnen de slijtbestendigheid verder vergroten omdat de poriën smeermiddelen absorberen. Spraydeklagen die m.b.v. een hydroxielapatietvlam zijn aangebracht worden meestal alleen gebruikt voor implantaten waardoor het samengroeien met het botweefsel wordt gestimuleerd. Zachte metalen zoals koper, koper/nikkellegeringen, indium en aluminiumbrons zijn prima metalen teneinde de vreetneigingen te verlagen en de glij-eigenschappen te verbeteren. Met thermisch sprayen verkrijgt men een zeer goede binding met het titaansubstraat. Dit proces wordt gedaan door gespecialiseerde bedrijven die ook voor de juiste voor- en nabehandeling zorgen.

### Verfdeklagen en polymeercoatings

#### Verfsystemen

Omdat titaan een uitzonderlijke corrosiebestendigheid geniet, wordt het maar zeer zelden voorzien van een verfsysteem. Heel soms kan een verfsysteem aangebracht worden indien er absoluut geen vonken worden getolereerd of ook wel om redenen die te maken hebben met camouflage, esthetica of identificatie. De voorbehandeling van het titaan wordt normaal gesproken door de verffabrikant opgegeven, doch meestal is dat goed ontvetten, beitsen of een glaspa-relbehandeling. Ook hier geldt dat shot-peening de voorkeur heeft, omdat naast de uitstekende binding van de coating ook nog een verbetering optreedt van de vermoeiingseigenschappen.

#### Polymeercoatings

Diverse toepassingen vereisen in combinatie met het gebruik van titaan een polymeercoating. Voor het bekleden van beton met titaanplaten in een ontzwapingsplant is een fluoropolymeer coating ontwikkeld die als een bitumineuze bedding lokaal op het titaan is aangebracht i.v.m. het natte zure agressieve gas. Men moet uiterst kritisch zijn met de keuze van de coating omdat in bepaalde gevallen actieve fluoriden met het titaan kunnen reageren tijdens het aanbrengen en soms zelfs tijdens het gebruik. Een polyurethaancoating is wel eens gebruikt op titaanpijpen t.b.v. de offshore om galvanische corrosie te bestrijden die had kunnen optreden bij minder edele metalen die in contact stonden met het titaan. Ondanks de zeer goede erosiebestendigheid van titaan zijn er omstandigheden waarbij het titaan onacceptabele schade aan het oppervlak zou kunnen krijgen vanwege de combinatie inslagkracht en abrasiviteit van bepaalde harde deeltjes. Op deze wijze kunnen kleine kerfjes ontstaan die de vermoeiingssterkte aanzienlijk doen afnemen. Daarom heeft men bijvoorbeeld de binnenkant van de titaanstijgbuis in het Noorse Heidrun-project beschermd met HNBR-rubber (Hydrogenated Acrylonitrile Butadiene Rubber).

### Oppervlaktebehandelingen voor speciale toepassingen

Diverse bekledingstechnieken zijn er voor titaan door de jaren ontwikkeld die het materiaal nog meer geschikt maken voor bepaalde toepassingen. Dit zijn veelal technieken die alleen maar door speciale bedrijven kunnen worden aangebracht. In het kort worden onderstaande systemen behandeld. Het cladden met andere metalen Titaan kan zowel met wals als met explosiefplateren worden verbonden aan de meeste



Titaan onderdeel van een vleugelklep van een Lockheed Tristar vliegtuig in de kwaliteit Ti-6Al-4V. Nadat deze ‘flaptrack’ was gerepareerd m.b.v. oplassen is deze gesprayed met een kobaltpoeder (87%), waardoor er een slijtlaag van 200 - 300 micron ontstond. Bron: Courtesy TWI, Marshall Aerospace en Timet UK.

andere metalen. Voor het explosief plateren zijn in principe alleen die kwaliteiten geschikt die een lage of middelgrote mechanische sterkte bezitten zoals de typen grade 1, 2, 7, 11 en 12. Kwaliteiten met een hogere mechanische sterkte kunnen echter ook wel explosief worden aangebracht, doch dan moet men wel een tussenlaag van een lage sterkte toepassen. De bindingssterkte van de explosieve verbinding is doorgaans altijd hoger dan die van het walsplateren. Soms dient men ook rekening te houden met mogelijke galvanische corrosie in combinatie met metalen die lager in de spanningsreeks zitten en dat vooral bij natte agressieve corrosieve omgevingen. De meeste harde slijtbestendige legeringen zoals bijvoorbeeld stelliet hebben echter ook goede en soms zelfs betere corrosieprestaties dan titaan, waardoor dit probleem weer verdwijnt. Ook titaan dat gecombineerd wordt met metalen die min of meer op gelijke hoogte in de spanningsreeks staan zoals duplex, superduplex, \*Hastelloy® en Inconel 625®, kan probleemloos toegepast worden in lichtreducerende, neutrale en oxiderende omstandigheden.

#### Het oplassen

Men kan harde of hardbare titaanlegeringen als een slijtlaag oplassen op zachtere kwaliteiten titaan. Dit kan ook partieel gebeuren op die plaatsen van een component waar men dit wenst. Een goed voorbeeld zijn de slijtringen in pompen en componenten waar voortdurend druppelinslag van water optreedt. Voor dit laatstgenoemd geval kan men uitstekend



de hardbare molybdeenhoudende bètalegeringen gebruiken die een twintigvoudige levensduurverlenging geven t.o.v. commercieel zuiver titaan.

**Elektrolytisch polijsten van titaan**

Uiteraard kan titaan met de hand gepolijst worden, doch het nadeel is dat men geen constante oppervlaktegesteldheid kan verkrijgen. Bovendien is deze methode uiterst arbeidsintensief. Daarom kan men beter gebruikmaken van het elektrolytisch polijstproces omdat men dan zeer gecontroleerd de oppervlakteconditie kan bepalen. Er zijn echter niet veel

bedrijven die een ruime ervaring hebben opgebouwd met het polijsten van titaan.

*Verantwoording*

De auteur is dank verschuldigd aan de Titanium Information Group en de National Surface Engineering Centre in Engeland die beide voor relevante informatie hebben gezorgd.

\*Hastelloy® en Inconel® zijn handelsmerken van respectievelijk Haynes International en Inco Family of Companies.



**Dunne keramische lagen ter bescherming van Roestvast Staal**

Om slijtage aan machineonderdelen en gereedschappen te verminderen wordt al sinds geruime tijd gebruik gemaakt van dunne, harde keramische lagen, zoals titaannitride en titaancarbide. Deze lagen worden bij Philips CMTI aangebracht via Chemical Vapour Deposition (CVD). Dergelijke lagen worden bij corrosie- en slijtageproblemen met roestvast staal nog weinig toegepast. In dit artikel worden twee toepassingen beschreven voor het beschermen van roestvast staal met CVD-lagen.

**Chemical Vapour Deposition: Algemeen**

Chemical Vapour Deposition (CVD) is een chemische techniek, waarbij materiaal vanuit de gasfase op een substraat (ondergrond) wordt neergeslagen. Het proces voor de vorming van deze lagen vindt plaats in een reactorsysteem bij temperaturen tussen 850 en 1000°C.

De volgende CVD-lagen en combinaties kunnen worden geproduceerd:

- titaannitride (TiN);
- titaancarbide (TiC);
- chroomcarbide (CrxCy).

Een belangrijke eigenschap van de  $\pm 5 \mu\text{m}$  dunne lagen is de zeer hoge hardheid: 2000 tot 3500 Vickers (zie afbeelding 1). Duidelijk zichtbaar is het grote verschil tussen de lagen en de bekende hardmetaal- en staalsoorten. Het is mogelijk om een groot aantal metalen, zoals hardmetaal, gereedschapstaal, roestvast staal en koper te voorzien van een CVD-laag. CVD-lagen worden sedert jaren op grote schaal toegepast bij het coaten van hardmetalen beitelplaatjes. De gerealiseerde standtijdverbetering bedraagt vaak een factor 5-10 x. CVD-processen lenen zich in het bijzonder voor



Afb. 1 Verfspuitmond met 3  $\mu\text{m}$  dikke titaannitride CVD-deklaag; materiaal AISI 316.

massafabricage. Zo worden bij Philips CMTI bijvoorbeeld grote hoeveelheden tooibits voorzien van titaan nitride. Roestvast staal vertoont nauwelijks maat- en vormafwijkingen ten gevolge van het CVD-proces en kan daardoor goed van een CVD-coating worden voorzien.

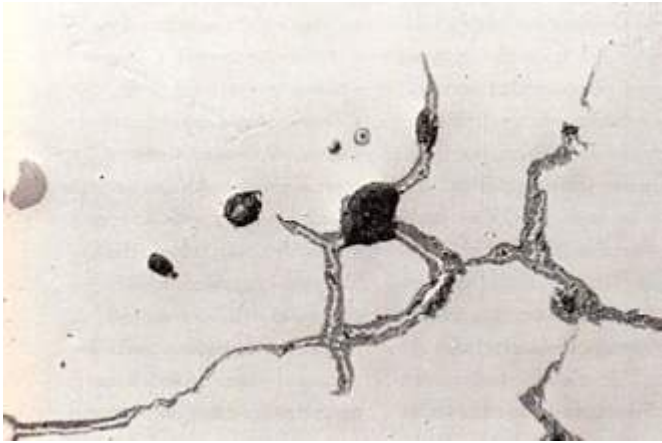
**Adhesieve slijtagevermindering door CVD-titaannitride op verfspuitmonden**

De meest toegepaste laag is ongetwijfeld titaannitride (TiN). Deze goudkleurige laag heeft naast de reeds genoemde hoge hardheid tevens een hoge chemische stabiliteit en lage wrijvingscoëfficiënt ten opzichte van staal. Dit zorgt voor een uitstekende weerstand tegen adhesieve slijtage (aanladen). Bij het doseren van nauwkeurige hoeveelheden verf wordt gebruik gemaakt van spuitmonden zoals weergegeven op afbeelding 1. Het basismateriaal van de spuitmond is roestvast staal AISI 316. Een probleem bij het gebruik van deze spuitmonden vormt het aancoeken van verfdeeltjes in de spuitmond en het slijten van de binnenkant van de spuitmond. Het CVD-proces biedt de mogelijkheid om gelijktijdig een laag op de buitenkant en op de binnenkant van de spuitmond af te zetten (grootpenetratie vermogen). De laagdikte vertoont nauwelijks verschillen aan de binnen- en buitenzijde van de spuitmond. Door het aanbrengen van een titaannitridelaag wordt het aancoeken van verfdeeltjes onderdrukt en de slijtage van de spuitmond neemt sterk af.

**Het tegengaan van corrosie van roestvast stalen branders met CVD-titaannitride**

De standtijd van branders in een industriële omgeving wordt vaak beperkt door corrosie- en oxydatieverschijnselen. Een uitgevallen brander is onderzocht om de oorzaak van de uitval te achterhalen en hoe de standtijd van de brander zou kunnen worden verlengd. De onderzochte brander was gemaakt van een verspaanbaar type martensitisch roestvast staal. Bij de fabricage is naast verspanen ook gebruik





Afb. 2 Interkristallijne aantasting naast uitscheidingen van chroomcarbide op de korrelgrenzen in een brander, gemaakt van een verspaanbaar type martensitisch roestvast staal. V = 1000x.

gemaakt van hardsolderen. De buitenzijde van de brander vertoonde een sterke mate van putvormige aantasting, waarbij het opmerkelijk was dat slechts één zijde van de brander was aangetast. Dit bleek die zijde te zijn waar koelwater wordt aangevoerd, met andere woorden: de relatief koele zijde van de brander. Bij nauwkeurige bestudering van de corrosie, met behulp van metallografisch onderzoek van doorsneden met lichtmicroscopie, bleek dat de corrosie preferent langs de korrelgrenzen had plaatsgevonden (zie afbeelding 2). Verder werd zichtbaar dat de aantasting ook aan de binnenzijde van de koelkanalen was opgetreden, maar dat zij juist afwezig was in het aanvoer kanaal van de zuurstof.

Dit leidde tot de conclusie dat de geconstateerde corrosie het gevolg was van een combinatie van uitscheidingen op de korrelgrenzen en corrosieve omstandigheden. De uitscheidingen op de korrelgrenzen, die waarschijnlijk bestaan uit chroomcarbide, kunnen zijn gevormd tijdens de hardsoldeerbewerkingen aan de brander of gedurende plaatselijke oververhitting tijdens bedrijf. Ook in de afbeelding zijn deze uitscheidingen zichtbaar, omdat ze niet worden aangetast tijdens het corrosieproces. Deze uitscheidingen op zich zijn

echter geen voldoende voorwaarde voor het optreden van corrosie, zoals blijkt uit de afwezigheid van corrosie in de zuurstoftoevoerleiding. Het gegeven dat met name de koele zijde van de brander is aangetast geeft aan dat de corrosieve omstandigheden worden gevormd door de aanwezigheid van water. Aan de buitenzijde van de brander kan met name condenswater ontstaan ten gevolge van het verbrandingsproces.

### Oplossing

Deze corrosieproblemen kunnen op een drietal manieren worden aangepakt: Opheffen van de corrosieve omstandigheden, aanpassen van het materiaal van de brander of toepassen van een deklaag. De eerste mogelijkheid is het tenietdoen van de chroomcarbide-uitscheidingen door een warmtebehandeling. Hoewel een dergelijke warmtebehandeling voor austenitische typen succesvol kan zijn, zal men in dit type martensitisch roestvast staal altijd uitscheiding van carbiden houden omdat het koolstofpercentage relatief hoog is en de oplosbaarheid voor koolstof gering. De verwachting is dat deze behandeling niet veel zal helpen. Een tweede mogelijkheid is het toepassen van een roestvast-staalttype dat minder gevoelig is voor interkristallijne corrosie. Dit betekent dat men een austenitisch type moet kiezen, wat inhoudt dat men concessies moet doen aan de verspaanbaarheid.

Aangezien ook deze optie niet als aantrekkelijk gezien werd is besloten als experiment de brander te voorzien van een speciale titaannitridelaag door middel van CVD. Via deze werkwijze wordt ook de binnenzijde van de corrosievaste koelkanalen bedekt. Een speciaal ontwikkelde titaannitridelaag onderdrukt de corrosieverschijnselen en zorgt ervoor dat de standtijd van de branders aanzienlijk wordt verlengd. Het aanbrengen van de CVD-deklaag wordt nu uitgevoerd als onderdeel van de productie van de branders.

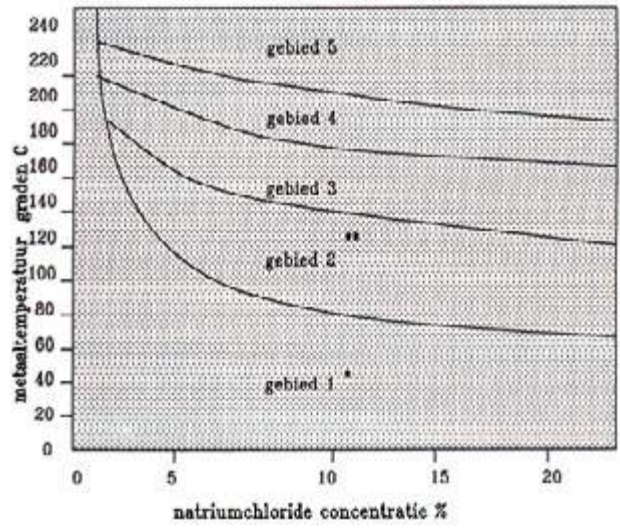
## Handleiding voor ontwerpers en gebruikers van titaan pijpsystemen

De buitengewone en unieke prestaties van het metaal titaan in zeewater, pekeloplossingen, brak, verontreinigd en gewoon water hebben zich nu al vele decennia bewezen in allerlei toepassingen. Daarom is het ook niet verwonderlijk dat titaan tegenwoordig steeds frequenter wordt gekozen bij het fabriceren van zeewatergekoelde warmtewisselaars en pijpsystemen; als condensormateriaal bij elektriciteitscentrales en allerlei apparatuur op schepen zoals bijvoorbeeld handlingsystemen. Tot nu toe is gebleken dat de toepassing van titaan een garantie is voor het afdoende oplossen van corrosieproblemen in specifieke milieus. Titaan dient in principe altijd overwogen te worden, zowel on-als offshore, zodra er chloridehoudende milieus of koolwaterstofverbindingen in de processtroom aanwezig zijn. Financiële voordelen en prestaties hebben zich in de praktijk reeds bewezen en de ontwerp-en verwerkingsparameters zijn afdoende vastgelegd.

Dit artikel, wat is ontleend is aan een informatiebulletin van de 'Titanium Information Group', geeft diverse kernzaken weer die verkregen zijn uit zeer veel bronnen die ruime ervaring hebben opgedaan met het ontwerpen en toepassen van pijpsystemen van titaan. Deze informatie stelt de gebruiker in staat om een optimale en verantwoorde materiaalkeuze te doen.

### Waarom wordt titaan gebruikt?

Gering gewicht, sterkte en corrosievastheid zijn de factoren, die het gebruik van titaan snel zullen rechtvaardigen. In de afgelopen 30 jaar heeft titaan zich bij uitstek bewezen als het juiste materiaal in zouthoudend, brak en verontreinigd water (zie afbeelding 1). Meer dan 100 miljoen meter condensorpijp, die voor 40 jaar gegarandeerd worden, zijn wereldwijd geïnstalleerd in elektriciteitscentrales zonder dat er tot op heden enige aantasting valt waar te nemen. Aanvankelijk werden brandblussers en koelsystemen op offshore platforms gemaakt van staal, dat beschermd werd door allerlei deklagen. Vanwege het beschadigen van deze deklagen vond al snel de overstap plaats naar cupronikkel, hetgeen weer leidde tot putcorrosie en erosie (vooral in bochten) in verontreinigd water. Sommige ontwerpers hebben toen getracht deze problemen te overwinnen door de wanddiktes te vergroten en de watersnelheden te verlagen (zo eist bijvoorbeeld BSMA 18, 1973 een maximale snelheid van 5 m/s in pijpen van 100 mm en groter). De nadelige gevolgen van deze invoering waren grotere pijpdiameters, bochten met grotere radius en een enorme toename in de kosten en het gewicht van het pijpsysteem dat ook nog meer ruimte innam. Ondanks al deze maatregelen kwamen er op den



| technisch zuiver titaan<br>grade 7 (Ti-0,2%Pd) |                                                     |                                                                   |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| gebied 1*                                      | geen aantasting                                     | geen aantasting                                                   |
| gebied 2**                                     | kans op spleetcorrosie                              | geen aantasting                                                   |
| gebied 3                                       | spleet- en putcorrosie mogelijk bij zure pH waarden | spleetcorrosie mogelijk bij zure pH waarden                       |
| gebied 4                                       | spleet- en putcorrosie waarschijnlijk               | spleetcorrosie mogelijk; putcorrosie mogelijk bij zure pH waarden |
| gebied 5                                       | spleet- en putcorrosie waarschijnlijk               | spleet- en putcorrosie waarschijnlijk                             |

\* Condensors voor elektriciteitscentrales, raffinaderijen, zeewaterkoelers, pekelloelers, ontziltingsapparatuur e.d.  
\*\* Zoutindampingsunits en ontziltingsapparatuur

Afbeelding 1. Immunitetsgrenzen voor spleet- en putcorrosie.

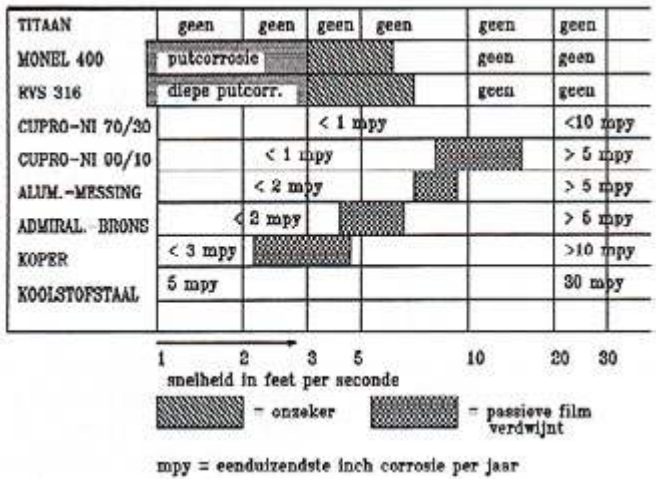


duur toch weer allerlei gebreken aan het licht, die de noodzaak benadrukten tot een fundamentele ommezwaai in de materiaalkeuze en een andere benadering van het ontwerp.

Recente ontwerpen vergen naast kosten-en gewichtsbesparing ook hoog-betrouwbare materialen die het mogelijk maken om met relatief kleine diameters vloeistoffen met hoge snelheden te verplaatsen. Aanvankelijk was een super-austenitisch roestvast staal met circa 6% molybdeen favoriet, maar later kwam duplex roestvast staal in de belangstelling vanwege de nog betere prestaties. Beide soorten boden meer dan cupronikkel maar bereikten toch niet de gewenste resultaten en bovendien gaven zij de nodige moeilijkheden tijdens de fabricage. Titaan is de enige effectieve oplossing bij het gebruik van pijpsystemen in zeewatermilieus. Titaan is volledig immuun voor algemene putcorrosie en erosie tot snelheden die op kunnen lopen tot 30 m/s (zie afbeelding 2). Tijdens het ontwerpen van een systeem kan de kleinste nog praktische doorlaat worden gecombineerd met de geringste wanddikte, teneinde kosten en gewicht tot een minimum te beperken. Dit concept is al toegepast als zeewaterballast-systeem op diverse offshoremodulen, zowel in Noorwegen, Engeland als Canada. Het technische en prijstechnische succes van titaan hebben ertoe geleid dat dit metaal in de offshore ook wordt gebruikt voor pijpenwarmtewisselaars, platenkoelers en natriumhypochloriet doseersystemen die aangroei en verstopping moeten tegengaan. Het zal duidelijk zijn dat het eerder bezwijken van minder corrosiebestendige metalen, die vroeger werden gebruikt, leidde tot hoge kosten in verband met onderhoud en vroegtijdige vervanging. De lessen, geleerd met dergelijke dure fouten, hebben de ontwerpers ertoe gebracht om vanaf het eerste begin het juiste materiaal te specificeren teneinde een betrouwbaar, veilig en optimaal systeem te verkrijgen. Deze benadering is essentieel voor offshore-installaties die ontworpen worden met een levensduur van 20 tot 50 jaar en waar dus de levensduurkosten een belangrijker rol spelen dan de in vesteringskosten. Alleen titaan voorziet in deze oplossing. Dit artikel beoogt een bijdrage te leveren om de criteria van boven genoemde kosten ten behoeve van pijpsystemen in titaan aan het licht te brengen. Het beoogt echter ook om onjuiste opvattingen over titaan, als zou het moeilijk zijn te verwerken, duur in het gebruik en slecht te verkrijgen, te elimineren. Vooral diegenen die niet vertrouwd zijn met dit unieke metaal plegen regelmatig laatstgenoemde onjuiste kwalificaties te gebruiken.

### Ontwerp van pijpsystemen in titaan

Het mechanische ontwerp van pijpsystemen in titaan stelt twee gelijke en belangrijke principiële eisen:



Afbeelding 2. Effect van zeewatersnelheden op condensormateriaal.

- Het dient te voldoen aan de ontwerpnormen voor druk en temperatuur in de verschillende delen van het systeem uitgaande van de minimum wanddikte van de pijp en de meest economische keuze van alle variabelen (waaronder ook de fittingen en versterkingen). De beschikbare nationale en internationale normen geven in detail zeer uitgebreid aan hoe het ontwerpen, het maken en het testen van pijpsystemen moet plaatsvinden. Specifieke industrieën zoals bijvoorbeeld de chemische, petrochemische en nucleaire industrie, stellen zelf hun normen en specificaties op, afhankelijk van wat het systeem moet transporteren (bijv. vloeistoffen of gassen).
- Ook dient het te voldoen aan eisen die worden gesteld door operationele facetten en betrouwbaarheid. Hieronder worden ook begrepen de expansie en flexibiliteit van het systeem alsmede de functie van de ophang- en bevestigingselementen. Deze aspecten zullen samen met de praktische ervaringen betrokken moeten worden in het definitieve ontwerp al naar gelang de complexiteit van het systeem alsmede de aangelegde belasting door het te transporteren medium. Ontwerpnormen zoals bijvoorbeeld gegeven in ANSI B31.3 bieden de nodige houvast om handelbare analyses mogelijk te maken. Waar een noodzaak is voor dergelijke analyses zijn er diverse computerprogramma's op de markt gebracht zoals bijvoorbeeld 'Caesar 11' dat voldoet aan de analyse, gesteld in ANSI B31.3.

Deze twee eisen staan los van het te kiezen materiaal, zodat de regels die worden gesteld aan koolstofstaal of roestvast staal ook worden gesteld aan titaan en zijn legeringen. De onderstaande formule om de wanddikte van een pijp te berekenen geeft echter aan dat met het gebruik van titaan de kosten naar beneden worden gebracht dankzij het feit dat er geen corrosietoeslag hoeft te worden berekend en doordat het titaan een relatief hoge sterkte bezit.

$$T_m = \frac{PD}{2(\sigma + PY)} + A$$

- $T_m$  = minimum wanddikte in mm  
 $P$  = druk in het systeem in MPa  
 $D$  = uitwendige piijpdiameter in mm  
 $\sigma$  = maximale toelaatbare spanning in het materiaal bij de ontwerp temperatuur in MPa  
 $Y$  = een coëfficiënt die gelijk is aan 0,4 van die van non-ferro metalen  
 $A$  = een corrosietoeslag in mm (deze is nul voor titaan)

### Basiseigenschappen van titaan en titaanlegeringen

Een gemakkelijk en veelgebruikt systeem voor het identificeren van de verschillende typen van technisch zuiver en gelegeerd titaan staan vermeld in de desbetreffende ASTM-specificaties. Grade 1, 2, 3, en 4 zijn technisch zuivere typen met als primair doel corrosiebestendigheid. De mechanische waarden nemen toe met het typenummer, met andere woorden, grade 1 is mechanisch het zwakste.

Grade 2 is het meest gebruikte type omdat hier sprake is van een compromis tussen zuiverheid en mechanische waarden. Grade 7, 11 en 12 zijn legeringen met superieure corrosievastheid, vooral in reducerende, zure, chloridehoudende milieus. De mechanische waarden zijn vergelijkbaar met die van respectieve lijk grade 7 en 11. Voor de gegevens van grade 12 wordt verwezen naar tabel 1. Grade 5 en 9 zijn legeringen met een goede corrosievastheid gecombineerd met goede mechanische eigenschappen. Het gebruik ervan moet vooral worden gezocht in specia le toepassingen, zoals bijvoorbeeld de vliegtuigbouw. Beta -C is een legering met hoge sterkte-eigenschappen en goede corrosievastheid in zeewater, maar wordt nog niet gedekt door een ASTM -specificatie. Alle voorkomende vormen worden beschreven door de volgende ASTM-normen:

- ASTM B 265-strip en plaat
- ASTM B 337-naadloze en gelaste pijp
- ASTM B 338-naad loze en gelaste pijp
- ASTM B 348-staf
- ASTM B 363-naadloze en gelaste fittingen
- ASTM B 367-gietwerk
- ASTM B 381-smeedstukken

| benaming type                | grade 2<br>alfa | grade 3<br>alfa | grade 12<br>alfa | grade 9<br>alfabeta | grade 5<br>alfabeta | beta C<br>beta |
|------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| ANALYSE %                    |                 |                 |                  |                     |                     |                |
| zuurstof max.                | 0,25            | 0,35            | 0,25             | 0,12                | 0,20                | 0,12           |
| stikstof max.                | 0,03            | 0,03            | 0,03             | 0,02                | 0,05                | 0,03           |
| waterst. max.                | 0,015           | 0,015           | 0,015            | 0,015               | 0,015               | 0,015          |
| koolstof max.                | 0,10            | 0,10            | 0,8              | 0,05                | 0,10                | 0,05           |
| ijzer max.                   | 0,30            | 0,30            | 0,30             | 0,25                | 0,40                | 0,30           |
| aluminium                    | –               | –               | –                | 2,5-3,5             | 5,5-6,8             | 3,0-4,0        |
| vanadium                     | –               | –               | –                | 2,0-3,0             | 3,5-4,5             | 7,5-8,5        |
| molybdeen                    | –               | –               | 0,2-0,4          | –                   | –                   | 3,5-4,5        |
| nikkel                       | –               | –               | 0,6-0,9          | –                   | –                   | –              |
| chroom                       | –               | –               | –                | –                   | –                   | 5,5-6,5        |
| zirconium                    | –               | –               | –                | –                   | –                   | 3,5-4,5        |
| rest elk                     | 0,10            | 0,10            | 0,10             | 0,10                | 0,10                | 0,10           |
| rest totaal                  | 0,40            | 0,40            | 0,40             | 0,40                | 0,40                | 0,40           |
| MECHANISCHE WAARDEN          |                 |                 |                  |                     |                     |                |
| 0,2% rekengrens MPa          | 275             | 380             | 345              | 485                 | 825                 | 1170           |
| treksterkte in MPA           | 345             | 450             | 483              | 620**               | 895                 | 1240           |
| rek in %                     | 20              | 18              | 18               | 15                  | 10                  | 6              |
| hardheld HV torsie           | 160-200         | 180-220         | 170-240          | 260-320             | 330-390             | 360-420        |
| modules GPa                  | 44,8            | 44,8            | 42,7             | 43,0*               | 42,1                | 41,3           |
| FYSISCHE EIGENSCHAPPEN       |                 |                 |                  |                     |                     |                |
| soortelijke massa            | 4,51            | 4,51            | 4,51             | 4,48                | 4,43                | 4,82           |
| uitzettingscf. 0-200 C°10/C° | 0,163           | 0,163           | 0,163 0,161      | 0,160               | 0,174               |                |
| therm. geleidb. 20 C° W/mK   | 16,4            | 16,4            | 19,0             | 8,0                 | 6,7                 | 6,3            |
| spec. warmte 20 C° J/Kg°C    | 5,9             | 5,19            | 544              | 544                 | 565                 | 523            |

\* = geïnterpoleerde waarde  
\*\* = hogere sterkte mogelijk bij koud verstevigd en spanningsvrij gegloeid materiaal

Tabel 1. Chemische samenstelling en mechanische- en fysische eigenschappen van een aantal titaantypen.





## Uitgebreide voorraad naadloze Nikkel buis en fittingen

- Alloy 200/201
- Alloy 400
- Alloy 600
- Alloy 625
- Alloy 825
- Alloy C276 (naadloos & gelast)



Een compleet programma:  
½" t/m 8" - Sch10s t/m XXS

## Total Project Management

- Complete piping pakketten
- Supply Chain Management
- Technische en Logistieke ondersteuning



## Services

- Op maat zagen / PMI / herstampelen conform PED
- Inspecties en extra testen
- ISO 9001 gecertificeerd
- 24 uren levering vanuit voorraad



| materiaal te vorm en spec. nr. 93 | specifieke treksterkte MPa | minimum rekgrens MPa | opmerk. | voor metaal |     | temperaturen die niet hoger zijn dan (C): |     |     |     |     |     |     |     |     |    |  |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------|---------|-------------|-----|-------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|--|
|                                   |                            |                      |         | 38          | 66  | 93                                        | 121 | 149 | 177 | 204 | 232 | 260 | 288 | 316 |    |  |
| plaat                             | grade 1                    | 240                  | 170     | –           | 61  | 56                                        | 50  | 45  | 40  | 36  | 33  | 31  | 28  | 25  | 22 |  |
| strip                             | grade 2                    | 345                  | 280     | –           | 86  | 83                                        | 75  | 68  | 62  | 58  | 53  | 50  | 46  | 43  | 39 |  |
| SB-265                            | grade 3                    | 450                  | 380     | –           | 112 | 108                                       | 99  | 90  | 81  | 72  | 64  | 57  | 52  | 46  | 41 |  |
| staf                              | grade 7                    | 345                  | 280     | –           | 86  | 83                                        | 75  | 68  | 62  | 72  | 58  | 50  | 46  | 43  | 39 |  |
| knuppel SB-348                    | grade 12                   | 480                  | 345     | (3)         | 121 | 121                                       | 113 | 105 | 98  | 92  | 86  | 82  | 79  | –   | –  |  |
| smeedst. SB-381                   |                            |                      |         |             |     |                                           |     |     |     |     |     |     |     |     |    |  |
| pijp                              | grade 1                    | 240                  | 170     | –           | 61  | 56                                        | 50  | 45  | 40  | 36  | 33  | 31  | 28  | 25  | 22 |  |
| SB-337                            | grade 2                    | 345                  | 280     | –           | 86  | 83                                        | 75  | 68  | 62  | 58  | 53  | 50  | 46  | 43  | 39 |  |
| naadloos                          | grade 3                    | 450                  | 380     | –           | 112 | 108                                       | 99  | 90  | 81  | 72  | 64  | 57  | 52  | 46  | 41 |  |
|                                   | grade 7                    | 345                  | 280     | –           | 86  | 83                                        | 75  | 68  | 62  | 72  | 58  | 50  | 46  | 43  | 39 |  |
|                                   | grade 12                   | 460                  | 345     | (3)         | 121 | 121                                       | 113 | 105 | 98  | 92  | 86  | 82  | 79  | –   | –  |  |
| pijp                              | grade 1                    | 240                  | 170     | (1)(2)      | 52  | 48                                        | 43  | 38  | 34  | 30  | 28  | 26  | 24  | 21  | 18 |  |
| SB-338                            | grade 2                    | 345                  | 280     | (1)(2)      | 73  | 70                                        | 64  | 58  | 53  | 49  | 45  | 42  | 39  | 37  | 33 |  |
| gelast                            | grade 3                    | 450                  | 380     | (1)(2)      | 92  | 92                                        | 84  | 77  | 69  | 61  | 55  | 49  | 44  | 39  | 35 |  |
|                                   | grade 7                    | 345                  | 280     | (1)(2)      | 73  | 70                                        | 64  | 58  | 53  | 49  | 45  | 42  | 39  | 37  | 33 |  |
|                                   | grade 12                   | 460                  | 345     | (1)(2)(3)   | 102 | 102                                       | 96  | 89  | 83  | 78  | 73  | 70  | 66  | –   | –  |  |

opm. (1) = De lasfactor is op 0,85% gehouden teneinde de toegestane spanningen te bepalen.  
opm. (2) = Tijdens de fabricage van gelaste pijp mag geen lastoevoegmateriaal gebruikt worden.  
opm. (3) = Dit voorschrift is goedgekeurd in 1979.

Tabel 2. Maximale toelaatbare trekspanningen voor gegloeide titaanlegeringen\*.

\* Afgeleid uit tabel UNF-23.4 van 'ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII-division 1.

Lasmateriaal wordt omschreven in de AWS specificatie A5.16. Een overzicht van alle feiten is weergegeven in tabel 1.

## Ontwerpcodes voor pijpsystemen

### ANSI/ASME 831.3

De veel gebruikte voorschriften, die te vinden zijn in 'Chemical Plant and Petroleum Refinery Pipework', bestaan al sinds 1935. In tegenstelling tot andere pijpvoorschriften verenigt de B31.3-norm de diverse titaantypen en de tabellen die de toegestane ontwerpspanningen voor de grades 1, 2, 3 en 7 aangeven voor zowel de gelaste als de naadloze pijpuitvoering. Er is een bepaling dat er voor gelaste pijpen geen lastoevoegmateriaal mag worden gebruikt. In veel gevallen echter is het onvermijdelijk om lastoevoegmaterialen te gebruiken. Bovendien blijft de kwaliteit door de moderne hoogwaardige lasmethoden nagenoeg gelijk, zodat het geen probleem is om de bovengenoemde ontwerpspanningen aan te houden. Bij deze spanningen is een lasfactor van 0,85 aangehouden en daarom is het niet nodig een vermindering door te berekenen in de ontwerpformules voor de diverse gelaste pijpcomponenten. De basis voor het bereiken van de toegestane ontwerpspanningen, die in tabel 2 zijn weergegeven, is vastgesteld in een code. Voor titaan is deze spanning gebaseerd op de laagste waarde van:

- 1/3 van de specifieke minimale treksterkte bij kamer-of ontwerptemperatuur;
- 2/3 van de minimale rekgrens bij kamer-of ontwerptemperatuur. Voor alle toepassingen geldt dat de maximale toelaatbare ontwerpspanning niet hoger mag zijn dan 2/3 van de minimum rekgrenswaarde bij kamertemperatuur.

Gedetailleerde waarden van uitzettingscoëfficiënten en elasticiteitsmoduli zijn te vinden in de drukvaten standaard ASME VIII-div 2. Hoewel deze voorschriften niet specifiek de materiaalselecties aangeven, geven ze wel aanwijzingen voor bepaalde voorzorgsmaatregelen voor diverse materialen en ze attenderen de gebruiker op de ongeschiktheid van titaan voor gebruik boven de 315°C.

### TBK 5/6

Deze norm slaat niet specifiek op titaan en zijn legeringen doch voorziet wel in regels voor het bepalen van toegestane spanningen in koolstofstaal, laaggelegeerd staal en roestvast staal, koper en koperlegeringen alsmede aluminium en zijn legeringen. Vanwege het ontbreken van specifieke regels is er in het verleden aangegeven dat er voor roestvast staal veiligheidsfactoren moeten worden ingebouwd opdat er geen overschrijding plaatsvindt van de toelaatbare spanningen. Een typische ontwerpspanning moet daarom lager zijn dan 2,4 maal de uiterste trekspanning bij kamertemperatuur



of 1,35 maal de rekgrens bij kamertemperatuur. Diverse reducties in de toelaatbare spanningen komen tot stand door spanningsfactoren in de diverse ontwerpformules. Deze factoren zijn afhankelijk van de lasnaadpositie en van de omvang van de niet destructieve proeven die moeten worden uitgevoerd. Een richtlijn voor deze noodzakelijk uit te voeren analyses wordt verstrekt door ANSI/ASME B31.3.

BS 3351

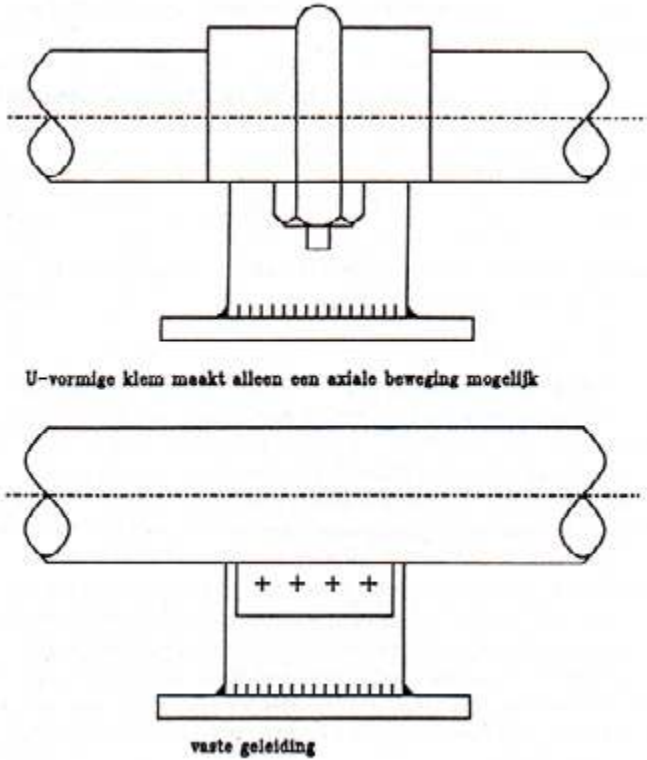
Hoewel deze 'British Standard' is ingetrokken is deze nog steeds in gebruik bij het bepalen van ontwerp en fabricage van pijpleidingsystemen van aardolieraffinaderijen. De norm heeft betrekking op koolstofstaal, laaggelegeerd staal en roestvast staal en sommige nikkellegeringen. De ontwerpspanningen voor al deze voornoemde metalen zijn geschrapt uit deze norm en daarom dienen deze waarden gehaald te worden uit ANSI/ASME B31.3 als men toch deze British Standard wil blijven gebruiken. Ook kunnen de toelaatbare spanningen worden ontleend aan de BS 5500 App.K-norm.

Pijpsystemen en fittingen layout

Voor ieder pijpsysteem dient er een evenwicht te zijn tussen allerlei parameters die te maken hebben met het bevestigen van de pijpen om een optimaal systeem te verkrijgen. Dit geschiedt altijd in afhankelijkheid van de thermische expansie die te allen tijde ongehinderd moet kunnen plaatsvinden. Er bestaan diverse geleidingen zoals gedeeltelijk of volledig lineaire of cirkelvormige inklemming. Deze geleidingen behoeven niet aan de pijpen gelast te zijn, maar bestaan uit simpele klemmen. In sommige omstandigheden is het aanbevelenswaardig een slijtstrip aan te brengen op de pijp om te voorkomen dat de klemmen metallisch gaan invreten. Bij vaste geleidingen kunnen titaanplaatjes aan de pijp worden gelast, die daarna met bouten aan de geleiding worden bevestigd, zie afbeelding 3. Indien er teveel spanning ontstaat kan de route beter opnieuw worden bekeken of er moeten meer bochten en expansielussen worden toegepast. Dit is beter dan het installeren van balgen. Als laatstgenoemden moeten worden toegepast dan is het aan te raden speciale balgen volgens de EMSA-standaard toe te passen.

Fittingen

De meeste fittingen in titaan grade 2 zijn gewoonlijk beschikbaar tot en met een nominale diameter van 4 inch met een wanddikte tot schedule 40s en bovendien is er een beperkt programma beschikbaar tot en met een nominale diameter van 6 inch. Boven deze maatvoering en in geval van andere titaantypen zullen de fittingen in de meeste gevallen moeten worden gemaakt van plaatmateriaal. De voorschrif-



Afbeelding 3. Klem- en geleidingsdetails voor het bevestigen van titaan-pijpsegmenten.

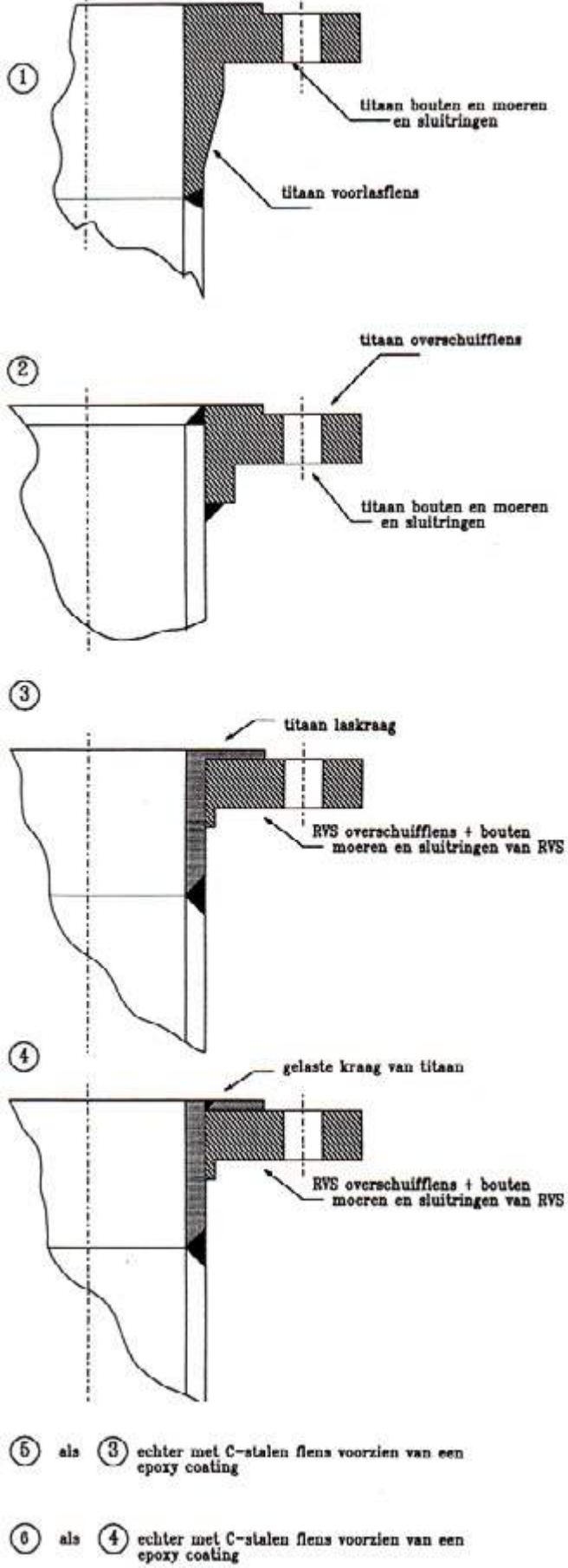
ten en de veiligheidsfactoren voor de diverse sterkteberekeningen zijn te vinden in deze publicatie.

Om het aantal lasnaden te beperken genieten getrokken bochten de voorkeur boven conventionele stompgepaste fittingen. De lassen zullen op zijn minst een gelijke of een grotere sterkte moeten bezitten dan die van het moeder-materiaal en in zeer corrosieve milieus is het raadzaam een ander type titaanlasdraad te gebruiken, bijvoorbeeld grade 7 (met palladium gelegeerd), dat de corrosievastheid lokaal enorm doet toenemen.

Flensverbindingen zijn normaal gesproken van het overlaptpe met losse overschuifflenzen van koolstofstaal of roestvast staal. Overlapverbindingen kunnen worden voorzien van een laskraag (stub end) die als gereed product of als opgebouwde gelaste eenheid kunnen worden toegepast, zie afbeelding 4. Aangezien er spanningen zullen ontstaan door het forceren van de gereede laskragen, dienen deze niet te worden toegepast onder zwaar belaste cyclische omstandigheden (zie ANSI/ASME 831.3).

Ontwerpen die de corrosievastheid verhogen

De uitstekende corrosievastheid van titaan in schoon en in verontreinigd zeewater dankt het aan de stabiele, taaie en



Afbeelding 4. Constructiedetails voor flensverbindingen aan titaanpijpen.

permanente oxydehuid. In stromend of stilstaand water blijft het titaanoppervlak onaangetast tot een temperatuur van 130°C en dat ook in omstandigheden waar andere metalen snel worden aangetast. Ontwerpgegevens die tot stand zijn gekomen voor warmtewisselaars, vaten en pijpsystemen voor chemische fabrieken hebben ertoe geleid dat:

- titaan geen corrosietoeslag behoeft; pijpsystemen kunnen derhalve met een minimum wanddikte gespecificeerd worden, één en ander wel in afhankelijkheid van de hanteerbaarheid en /of werkdruk;
- titaan geen noemenswaardig verlies van de vermoeingssterkte ondergaat in zeewater; waarden die worden bereikt in lucht voor technisch zuiver titaan kunnen zonder meer worden gebruikt in dergelijke ontwerpberekeningen, zie tabel 3;
- titaan onder normale omstandigheden geen corrosieprotectie nodig heeft in de vorm van deklagen, inhibitoren of kathodische bescherming; evenmin behoeven er speciale voorzorgsmaatregelen te worden getroffen bij in-of uitlaatgedeelten of bij bochten, tenzij er galvanische corrosie kan worden verwacht vanwege aanliggende metallische onderdelen;
- titaan veel langer schoon blijft dan de meeste andere metalen; watersnelheden van 3-5 m/s zullen vuilafzettingen van biologische zeeorganismen tot een minimum beperken ; in het algemeen kunnen vuilafzettingfactoren van 0,95 tot 0,99 worden gebruikt bij warmtewisselaars van titaan; bij het transport van slibhoudend water kunnen nog snelheden tot 6 m/s worden getolereerd, terwijl bij schoon zeewater snelheden tot 30 m/s geen problemen opleveren.

| Spanning die na 10 <sup>7</sup> cycli tot breuk leidt in MPa |       |          |
|--------------------------------------------------------------|-------|----------|
| legering                                                     | lucht | zeewater |
| Ti-gr2                                                       | 359   | 372      |
| Ti-gr5                                                       | 480   | 410      |

Deze resultaten zijn bereikt door mechanische spanning aan te leggen op een roterende, gladde schaaft.

Tabel 3. Effect van zeewater op de vermoeingseigenschappen van titaan.

Hydro-dynamische ontwerpen van titaanpijpsystemen kunnen desgewenst worden geoptimaliseerd door wijzigingen in het pompcircuit en door mogelijke drukverlagingen. Ideale pijpsystemen kunnen worden bereikt indien het geheel van titaan is vervaardigd. Wanneer dit onmogelijk is, mogen alleen die metalen worden toegepast die een gering potentiaalverschil met titaan hebben zoals Inconel 625 r, Hastelloy C 276 r, 254 SMO r, Xeron 100 r of composieten. Deze materialen zullen weinig of geen problemen opleveren indien



ze elektrolytisch geleidend in verbinding staan met titaan. Hoewel de meeste hoogge legerde roestvast staaltypen en nikkellegeringen slechts een weinig minder edel zijn dan titaan in de passieve staat, geven zij ee n dramatische cor-rosieaantasting indien zij bijvoorbeeld (plaatselijk) worden geactiveerd door bijvoorbeeld putcorrosie. Titaan zal onder de meeste condities in zeewater kathodisch reageren waar-door het wordt beschermd, zie afbeelding 5. Een of meer va n de volgende technieken zal als aanvulling moeten dienen teneinde de corrosievastheid van de anodische onderdelen te laten toenemen:

- Het aanbrengen van een deklaag op het titaan in de nabijheid van de verbinding om zo het kathode-oppervlak (titaan) ten opzichte van het anode-oppervlak te verkleinen.
- Het toepassen van kathodische bescherming met een spanning die negatiever is dan -1,0 Volt.
- Elektrische isolatie van het titaan door het gebruik van niet-geleidende afdichtingen en door het toepassen va n isolerende hulzen om de bouten.
- Het installeren van gemakkelijk vervangbare opofferings-anades van een vee l minder edel metaal. Dergelijke elementen moeten niet worden geplaatst waar turbulentie kan worden verwacht.
- Het toepassen van inhibitoren zoals bijvoorbeeld ferrosulfaat voor koperlegeringen in bepaalde omstandigheden.

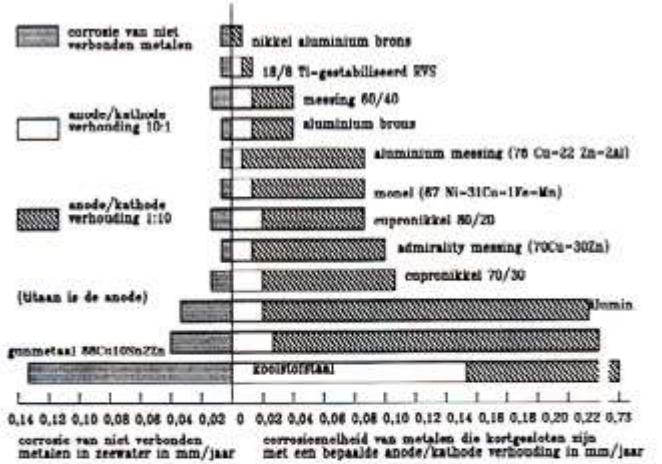
Als een veel minder edel metaal in verbinding moet staan met titaan dan is dat alleen verantwoord indien beide wor-den voorzien van een deklaag. Een defect in zo'n deklaag zal leiden tot lokale aantasting. Om dit laatste tegen te gaan kan kathodische of chemische bescherming worden toegepast.

Ontwerp-checklist voor productie, installatie en gebruik

Titaan kan worden geleverd in alle voorkomende halffabri-katen en eindproducten. Het juiste ontwerp en de wijze van produceren van het pijpsysteem vraagt in geval van titaan veel meer aandacht dan voor goedkopere materia len. Indien men bijvoorbeeld simpelweg titaan gebruikt in een ontwerp dat is bedoeld voor een relatief goedkoop materiaal, dan kan men er zeker van zijn dat er een onnodig dure constructie ontstaat. De tijd die nodig is om het ontwerp opnieuw door te lopen voor het toepassen van titaan zal ruimschoots worden terugverdiend.

Ontwerp-check nr. 1

Vraagstelling: Zijn de diktes van het titaan niet meer dan mi-nimaal vereist is om een hanteerbaar pijpsysteem te verkrijgen met toe reikende mechanische sterkte?



Opm.:  
– aantastingen zijn hoger bij stromend zeewater en hogere tempe-raturen.  
– corrosiesnelheden zijn afgeleid van gewichtsaftnamen.  
– messing 60/40 heeft bovendien ontzinkingsverschijnselen.  
De aantasting van aluminiumbrons en nikkel aluminiumbrons kun-nen onder bepaalde metallurgische omstandigheden hoger zijn en ook indien er spleten of bepaalde neerslagen aanwezig zijn.

Afbeelding 5. Overzicht van galvanische corrosie van verbindingen met titaan en andere metalen in stilstaand zeewater bij kamertemperatuur.



Afbeelding 6. Reactorvat uit titaan grade 2 gemaakt door Hoefnagel & Meijn 8. V., Zaandam.

Gemeten naar de eenheidsprijs van titaan lijkt deze hoog te zijn. Per vierkante meter gerekend valt deze juist enorm mee. Titaan is een relatief licht metaal, want de soortelijke massa is slechts 56% van die van staal. Eén meter stalen pijp weegt daarom net zoveel als een pijp van titaan van 1,8 meter lang. Titaan heeft daarentegen geen corrosietoeslag nodig, waar-door de wanddikte gehalveerd kanworden, zodat de titaanpijp zelfs 4 maal zolang kan worden met hetzelfde gewicht.

Ontwerp-check nr. 2

Vraagstelling: Zijn gelaste pijpen en fittingen overal inzetbaar? Technisch zuiver titaan is een eenvoudig metaal dat slechts éénfasig is en daarom gemakkelijk is te lassen door be-

kwame lassers in de werkp laats of op het fabrieksterrein. Een warmtebehandeling is in principe nooit nodig en de las heeft dezelfde corrosievastheid als het moedermateriaal. Duizenden meters dunne gelaste pijp zouden nooit zijn geïnstalleerd als men onnodig was blijven aandringen om de veel duurdere naadloze uitvoering te gebruiken. Ontel-bare gelaste onderdelen van titaan zouden nooit in gebruik zijn genomen wanneer men had gestaan op producten die gemaakt moesten worden van staf of als smeedstukken. Zowel de pijpen als de hulpstukken zouden dan gewoonweg te duur zijn geweest.

Ontwerp-check nr. 3

Vraagstelling: Geeft een titaanbekleding (lining) een betere oplossing? Titaandiktes van minder dan 1 mm zijn al ruim voldoende om corrosie in zeewater te weerstaan. Buizen met een wanddikte van 0,5 mm worden al vaak toegepast in zeewa-tercondensors. Grotere pijpdiameters hebben in de regel grotere wanddiktes nodig vanwege de mechanische sterkte en dat leidt uiteraard tot een minder interessant prijsni-veau. Het inwendig bekleden van een pijp (linen) of zelfs het uitwendig bekleden zal leiden tot een veel aantrekkelijker prijspeil. Titaan kan echter niet worden gebruikt als opas-

materiaal op andere non-ferro legeringen of op koolstof-staaL In systemen waar een lichte overdruk heerst kunnen mechanisch vastgezette voeringen worden toegepast, terwijl bekledingen aangebracht hetzij door explosie, hetzij door walsen, veel geschikter zijn voor toepassingen waar een hoge of zeer hoge bindingssterkte tussen bekleding en ondergrond wordt vereist. Dikwijls wordt het product pas gevormd na het wals-of explosief bekleden. Al deze opties vereisen een nauwkeurig lassen van de titaan stuikranden. Hiervoor zijn diverse voorschriften beschikbaar, zie de tabellen 4 en 5.

Ontwerp-check nr. 4

Vraagstelling: Zijn de financiële voordelen vanwege de ruimtebe-sparing een factor in de calculaties? Titaan weerstaat erosie in zeewater tot snelheden van 30 m/s. Daardoor kunnen kleinere pijpdiameters en bochten met kleinere stralen worden gespecificeerd, als er voldoende pompcapaciteit aanwezig is. Technisch zuiver titaanpijp tot een diameter van 200 mm kan koud vervormd worden tot een radius van 600 mm (3D) . Dunne buis (bijv. schedule 5) van grotere diameters kan een 5D bocht hebbèn. Nog klei-nere bochten kunnen worden verkregen door schedule 5 of 10 bochten toe te passen.

| wanddikte<br>mm | buitendiameter van de buis |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|----------------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | ½"                         | 5/8" | ¾"   | 7/8" | 1"   | 1¼" | 1½" | 1¾" | 2"  | 2¼" | 2½" |
| 0,51            | 555                        | 448  | 376  | 323  | 283  | 227 | 189 |     |     |     |     |
| 0,64            | 689                        | 555  | 465  | 403  | 351  | 283 | 238 | 203 |     |     |     |
| 0,71            | 765                        | 620  | 520  | 448  | 393  | 317 | 265 | 227 | 200 |     |     |
| 0,81            | 868                        | 703  | 593  | 510  | 448  | 362 | 303 | 258 | 227 | 203 |     |
| 0,89            | 941                        | 765  | 645  | 555  | 489  | 393 | 331 | 283 | 248 | 220 | 200 |
| 1,07            | 1120                       | 906  | 765  | 662  | 582  | 469 | 393 | 338 | 296 | 265 | 238 |
| 1,24            | 1278                       | 1045 | 882  | 765  | 675  | 544 | 458 | 393 | 345 | 307 | 279 |
| 1,65            |                            |      | 1144 | 996  | 879  | 713 | 599 | 517 | 455 | 407 | 365 |
| 1,82            |                            |      | 1256 | 1092 | 968  | 785 | 662 | 572 | 503 | 448 | 407 |
| 2,11            |                            |      |      |      | 1103 | 896 | 758 | 655 | 575 | 513 | 465 |

\* Berekend m.b.v. de formule  $P = \frac{S \times t}{R + 0,6t}$

S = de ontwerpspanning voor gelaste titaan grade 2 buis  
R = de helft van de uitwendige buisdiameter  
t = de wanddikte van de buis

Tabel 4. Veilige interne werkdrukken in KPa/cm2 voor gegloeide gelaste titaanbuizen in grade 2 en 7 bij 38 °C.

| Voor metaaltemperaturen (°C) die niet hoger zijn dan: |              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|-------------------------------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|                                                       | 38           | 66    | 93    | 120   | 150   | 177   | 204   | 232   | 260   | 288   | 316  |
| grade 2                                               | 1,00         | 0,960 | 0,872 | 0,792 | 0,726 | 0,672 | 0,616 | 0,576 | 0,528 | 0,496 | 0,45 |
| grade 7                                               | idem grade 2 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| grade 3                                               | 1,30         | 1,248 | 1,144 | 1,040 | 0,936 | 0,832 | 0,744 | 0,664 | 0,600 | 0,536 | 0,48 |
| grade 12                                              | 1,40         | 1,400 | 1,312 | 1,216 | 1,136 | 1,065 | 1,000 | 0,952 | 0,912 |       |      |

Kies de veilige werkdruk voor grade 2 titaanbuizen met de gewenste diameter en wanddikte. Gebruik daarna de vermenigvuldigingsfactor van deze tabel om de juiste werkdruk te vinden bij een bepaalde temperatuur en legeringstype.

Tabel 5. Vermenigvuldigingsfactoren om een veilige inwendige werkdruk te bepalen voor gelaste titaanbuizen bij verhoogde temperatuur.





| Waarden in mm/jaar<br>vloeistofsnelheid in m/sec | zwevende<br>materie            | duur in uren | titaan grade 2       | Cu-Ni 70/30*     | Al-Messing       |
|--------------------------------------------------|--------------------------------|--------------|----------------------|------------------|------------------|
| 7,2                                              | niets                          | 10000        | niets                | aangetast        | aangetast        |
| 2                                                | 40 g/l<br>zand maaswijdte 60   | 2000         | $2,5 \times 10^{-3}$ | 0,01             | 0,05             |
| 2                                                | 40 g/l<br>amaril maaswijdte 60 | 2000         | 0,01                 | zware aantasting | zware aantasting |

\* = hoog ijzer- en mangaanhoudend 70/30 cupronikkel

Tabel 6. Erosie van ongelegeerd titaan in zeewater dat zwevende vaste deeltjes bevat.

| materiaal    | rekgrens 20 °C in<br>MPa | s.g. g/cm <sup>3</sup> | rekgrens/s.g.<br>verhouding | % verhouding<br>gerelateerd aan<br>Ti-grade 2 | % verhouding<br>gerelateerd aan<br>Ti-grade |
|--------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Ti-grade 2   | 275                      | 4,51                   | 61                          | 100                                           | 32                                          |
| Ti-grade 5   | 830                      | 4,42                   | 188                         | 308                                           | 100                                         |
| 316RVS       | 230                      | 7,94                   | 29                          | 48                                            | 15                                          |
| 254 SMO      | 300                      | 8,00                   | 38                          | 62                                            | 20                                          |
| duplex       | 450                      | 7,80                   | 58                          | 95                                            | 31                                          |
| monel 400    | 175                      | 8,83                   | 20                          | 32                                            | 11                                          |
| inc. 625     | 415                      | 8,44                   | 49                          | 80                                            | 26                                          |
| hastel. C276 | 355                      | 8,89                   | 40                          | 66                                            | 21                                          |
| Cu/Ni 70/30  | 120                      | 8,90                   | 13                          | 21                                            | 7                                           |

Tabel 7. Enige vergelijkende waarden.

#### Ontwerp-check nr. 5

*Vraagstelling: Zijn flenzen werkelijk nodig?*

De hoogste kostenconcentratie in ieder pijpsysteem wordt gevormd door flenzen en fittingen. Stub ends zijn aanzienlijk goedkoper dan voorlasflenzen, maar zelfs het ontwerpen met stub ends wordt vaak onnodig duur. Lichtgewicht leidt ingen van titaan kunnen met veel minder van deze relatief dure onderdelen toe door de pijpen eenvoudigweg langer te maken. Wordt er voor titaan gekozen, dan kunnen er veel langere pijpen worden toegepast. Ook is het zaak de juiste flensverbinding te kiezen, zie afbeelding 4. Tevens zijn er titaankoppelingen op de markt die kunnen worden gekozen voor de daarvoor geschikte plaatsen in het pijpsysteem.

#### Ontwerp-check nr. 6

*Vraagstelling: Worden de financiële voordelen van de gewichtsbesparing opgenomen in de calculaties?*

Titaan heeft, zoals reeds eerder is gezegd, een veel lagere soortelijke massa dan staal of cupronikkel. Buis met een diameter van 300 mm, uitgevoerd in cupronikkel, met een totaal gewicht van 1000 kg, kan worden vervangen door titaan, waardoor 700 kg kan worden bespaard. Het veel lagere totaalgewicht van titaanpijpsystemen, mede dankzij de mogelijkheid om kleinere pijpdiameters te gebruiken, leidt derhalve tot grote voordelen in de lichtere pijpleidings-systemen, lagere transportkosten en besparingen tijdens de montage (bijv. hijswerk).

Titaan heeft echter een elasticiteitsmodulus die lager is dan

die van staal of van koperlegeringen en daarom moeten bijvoorbeeld in warmtewisselaars de onderlinge afstanden tussen de keerschotten kleiner zijn om de neiging tot doorbuigen te compenseren indien de pijpen gevuld zijn met een medium.

De extra belasting in titaanpijpsystemen zal afhankelijk zijn van het operationele gewicht (dus inclusief het medium). windbelasting en dergelijke en in de regel betekent dit een kleinere extra belasting dan gewoonlijk het geval is. Daar staat echter tegenover dat de lagere elasticiteitsmodules van titaan een betere schokbestendigheid oplevert.

#### Ontwerp-check nr. 7

*Vraagstelling: Zijn de hydrodynamische prestaties geoptimaliseerd in het systeem?*

Snelheden van 3 m/s en hoger worden bij het gebruik van titaan aanbevolen om vervuiling met microbiologische organismen tegen te gaan. Bij snelheden van 2 m/s zal men echter te maken krijgen met de afzetting van hardnekkige macro-organismen zoals mosselen e.d. Bij pijpen waar dergelijke lage stroomsnelheden optreden of zelfs stilstand van het medium, dient er regelmatig een 'shock' chloreerbehandeling toegepast te worden om te voorkomen dat de pijpen dichtgroeien, zie tabel 6.

#### Ontwerp-check nr. 8

*Vraagstelling: Zijn titaanlegeringen daar gespecificeerd waar hogere prestaties worden verlangd?*



Bij het gebruik van legeringen die superieure sterkten bezitten en daardoor onderworpen worden aan hoge drukken of aan verhoogde temperaturen, zal het nut van titaan verder op de voorgrond treden. Dit is met name het geval bij gietwerk, en het vroegtijdig raadplegen van een terzake deskundige of deskundige leverancier zal de juiste oplossing opleveren voor nagenoeg elke toepassing, zie tabel 7.

## Handleiding beschikbare producten

Het eerst afgeleide product na het raffineren van het titaanerts (rutiel) is titaanspons. Dit poreuze spons dat onbruikbaar is als technisch metaal zal na een speciaal smeltproces in blokken worden gegoten. Spons is toch regelmatig in het nieuws, omdat de verkrijgbaarheid en prijs doorgaans een maatstaf zijn van de industriële capaciteit en de prijzontrends van producten. Gietblokken hebben in de regel een gewicht tussen 2 en de 8 ton waarvan de volgende producten kunnen worden gemaakt:

- knuppels voor de productie van smeedstukken, staf en draad;
- plakken voor de productie van dikke en dunne plaat alsmede folie;
- naadloze buis, gemaakt van knuppels en gelaste pijp gemaakt van plaatstrip;
- gietstukken die worden gemaakt van hersmolten gietblokken of van knuppels, soms ook van gezuiverd retouromateriaal.

Titaan en zijn legeringen zijn beschikbaar in allerlei vormen zoals gesmede, gegoten en gefabriceerde producten die onder meer geschikt zijn voor pijpsystemen. Zowel ronde, vierkante, rechthoekige of zeskante staf wordt geproduceerd bij hoge temperatuur en kan worden geleverd in ruw gesmeed, bewerkte vorm of ontdaan van zijn walshuid en zonodig gebeitst. De lengten kunnen gewone handelslengten zijn of op maat besteld. Draad, zowel warm als koud getrokken, wordt op de markt gebracht als rechte lengten en op rollen. Rechte lengten worden meestal verpakt in dozen ten behoeve van het MIG-of TIG-lassen. Platen tot 3 meter breed zijn warmgewalst en worden ontdaan van de walshuid en daarna gebeitst. Nauwere toleranties op de dikte worden verkregen door een mechanische bewerking. Bewerkingsprocessen die een zeer vlakke plaat opleveren worden gebruikt voor speciale toepassingen zoals bijvoorbeeld voor pijpenplaten. Dikke platen worden gewalst tot minimaal 4 mm dikte. Technisch zuivere, dunne titaanplaat wordt koudgewalst en daarna op rollen (coils) of op een gewenste lengte op de markt gebracht. Een glimmend oppervlak kan worden verkregen door de platen te beitsen of door een gloeiproces onder vacuüm. Plaatmateriaal

met een dikte beneden 0,3 mm noemt men folie. Grade 5 titaan wordt altijd gewalst bij hoge temperatuur en daarna ontdaan van de walshuid. Gelaste pijp kan worden geleverd tot een lengte van 30 meter en het wordt gemaakt van een dunne plaat, dat op de gewenste breedte wordt gesneden in de lengterichting (slitten). Deze stroken worden in een fabricagestraat, waarin een continue lasproces is opgenomen, tot pijpen gevormd.

In deze fabricagestraat wordt tevens een warmtebehandeling gegeven alsmede een wervelstroomonderzoek en een pneumatische test verricht. Kleine hoeveelheden pijp worden gemaakt van platen waardoor er vaste lengten ontstaan. Gelaste pijp met een dikkere wand en zeer grote diameters wordt gemaakt van plaat in enkele lengten tot en met 6 meter. Ook deze platen worden omgevormd en daarna gelast. Naadloze titaanpijp wordt gemaakt van knuppels die worden geëxtrudeerd of met behulp van het piercing-wals proces, gevolgd door reductie-natrekken. Flenzen kunnen worden verspaand uit staf of zij worden gesmeed of gegoten, gevolgd door een bewerking volgens de ontwerpnormen. Bochten, T-stukken enz. zijn leverbaar in de gesmede vorm, alsmede



Afbeelding 7. Titaanpijpstukken grade 2 gemaakt door Titanium Industries, USA.



Afbeelding 8. Titaan grade 2 gemaakt door de Merwede Valves, Hardinxveld-Giessendam.

geperst uit pijp of opgebouwd uit plaat. Grotere afmetingen kunnen worden opgebouwd uit geperste, halve schalen of segmenten. Gegoten onderdelen voor bijvoorbeeld pompen en afsluiters worden in de regel vervaardigd naar modellen die ook voor andere metalen worden gebruikt. Uiteraard wordt het efficiëntste model verkregen als deze speciaal voor titaan wordt gemaakt, zodat na het gieten optimale maten worden verkregen en nabewerkingen derhalve minimaal zullen zijn. Tot op heden kan men gietstukken maken tot maximaal 750 kg, hoewel er grotere gietstukken ingebruik zijn, maar die zijn opgebouwd uit verschillende aan elkaar gelaste gietstukken. Bouten, draadeinden, moeren en andere bevestigingsmiddelen zijn leverbaar zowel in technisch zuiver titaan als in grade 5 of Beta-C legeringen.

## Aanbevelingen

### Bewerking

Het goed doordringen zijn van de totaal verschillende mechanische en oppervlaktekarakteristieken van de diverse titaantypen zal leiden tot een succesvolle mechanische bewerking. Er moet worden beschikt over brandveiligheidsprocedures vanwege de ontvlam- en brandbaarheid van titaankrullen en andere fijne residuen. Daarnaast nog de volgende aanbevelingen:

- Zorg voor star opgesteld snijgereedschap en stel de juiste snij snelheid en voeding in, onder gebruikmaking van correct snijgereedschap.
- Gebruik altijd snijolie.
- Gebruik ondersteuningssupports en -centers.
- Verwissel op tijd het snijgereedschap.
- Gebruik speciaal afsluitbare containers voor titaanspanen.
- Voorkom dat titaanspanen worden gemengd met ander afval en voorkom dat er open vuur of lasprocessen

plaatsvinden in de buurt van de titaanspanen.

## Fabriceren

In het algemeen geldt dat de ruimte waarin wordt gewerkt schoon dient te zijn (vooral bij de lasplaats). Een vakbekwaam technisch management moet daar op toezien. Wat onder meer moet worden gedaan is het volgende:

- Een juiste voorbereiding alvorens te lassen.
- Verwijderen van alle vet, verf en vuil voordat men gaat lassen of warmtebehandelen.
- Reinig alle gebieden die gelast moeten worden met aceton op doeken die niet kunnen pluizen of gebruik titaanborstels.
- Gebruik schoon en droog titaanlasdraad van het juiste type.
- Las altijd onder schermgas en zorg ervoor dat ook de afkoelende las beschermd blijft (tot zeker 400°C).
- Geef nooit een warmtebehandeling in een reducerende atmosfeer omdat titaan dan waterstof zal opnemen wat tot verbrossing leidt.
- Gebruik nooit methyllalcohol (methanol) als reinigingsmiddel omdat opgedroogde methanol spanningsscheuren kan veroorzaken.
- Probeer nooit titaan aan andere metalen te lassen.

## Installatie

Voor een optimale installatie is het noodzakelijk om acht te slaan op de kenmerkende mechanische eigenschappen, corrosievastheid en oppervlaktekarakteristieken van titaan. Vanwege de lagere elasticiteitsmodulus van titaan moet bij pijpsystemen voor voldoende ondersteuning worden gezorgd. Op plaatsen waar wrijving kan worden verwacht of waar dragende delen ten opzichte van elkaar kunnen bewegen dient het contactvlak te worden behandeld. Breng in dat geval speciale deklagen aan op die plaatsen waar kans is op vonken, die gevaar kunnen opleveren. Breng nooit titaan in contact met onedeler metalen; breng in dat geval elektrische isolatie aan. Hopelijk heeft de informatie die in dit artikel naar voren is gekomen een gunstige invloed op het verbruik van het toch unieke metaal titaan, dat ten onrechte maar al te vaak niet wordt toegepast door onbegrip of onkunde.

### Literatuur

Titanium Pipework systems; U.K. titanium information group 1989.  
Titaan, materiaal met toekomstperspektieven, ing. N.W. Buijs;  
Metaal en Kunststof-mei 1988.





## Smeedstukken van titaan

Ten onrechte wordt in de industrie vaak aangenomen dat smeedstukken van titaan alleen te vinden zijn als onderdelen voor de luchtvaartindustrie en daarom is het van belang om door middel van dit artikel meer duidelijkheid te verstrekken waar dergelijke smeedstukken nog meer hun weg vinden, opdat er mogelijk nog meer toepassingen gevonden kunnen worden. Ook hier geldt 'onbekend maakt onbemind', waardoor men ook de unieke eigenschappen van titaan misloopt. Wat men vaak niet beseft is dat titaan in de vorm van smeedstukken al zo'n 45 jaar worden toegepast met dezelfde afmetingen en vormvrijheid die men ook met andere metaallegeringen heeft. Dankzij de ervaring en expertise die men heeft verworven met de smeedprocessen gecombineerd met de karakteristieken van het metaal bij hoge temperatuur heeft het metaal veel meer toepassingen gekregen in diverse takken van de industrie.

Het doel van het smeedproces is om een product te vervaardigen dat zo dicht mogelijk bij de eindmaten komt teneinde zo min mogelijk machinale bewerking te bewerkstelligen alsmede een zo optimaal mogelijk gebruik van het materiaal. Een van de unieke kenmerken van het smeedproces is dat men de mechanische eigenschappen en de microstructuur kan laten variëren van zowel het gehele smeedstuk als op bepaalde extra belaste plaatsen. Bij toepassingen waar een hoge zuiverheid, consistentie en gedefinieerde eigenschappen zijn vereist in een specifieke vorm, is het gebruik van het smeedproces te prefereren boven andere vervaardigingsmethoden. Dankzij het smeedproces kan men de grote voordelen van titaan, zoals laag soortelijk gewicht en een hoge sterkte, volledig benutten. Als voorbeeld kan men hierbij denken aan het smeden van pijpenplaten voor warmtewisselaars, flenzen voor pijpsystemen, fittingen, ringen, bouten en moeren, afsluiter- en pompbuizen.

### Uitgangspunten bij het ontwerp

Voordat een onderdeel in titaan wordt vervaardigd, moeten optimale route worden uitgestippeld teneinde een goedproduct te verkrijgen. Men kan dan kiezen uit het giet- of smeedproces, doch ook uit het mechanisch bewerken of uit het opbouwen van een component. Deskundigen die ervaring hebben met titaan zullen dan moeten bepalen welk proces voor die bepaalde toepassing technisch en economisch het meest optimaal is. De fabricagemethode is afhankelijk van de vorm, afmeting en het aantal van de vereiste component. Een gietstuk is veelal de meest optimale economische keuze als het om componenten gaat waarvan de vorm hol moet zijn en/of diep inspringende patronen kent



zoals diepliggende koelribben of waar vrijstaande steunstijlen aanwezig zijn. De afmetingen en gewichten van gietstukken zijn echter beperkt vanwege de gelimiteerde inhoud van een smeltoven. Smeedstukken kennen deze beperking niet, omdat zelfs gietblokken van 8 ton verwerkt kunnen worden. In het algemeen kan men stellen dat smeedstukken een hogere zuiverheid en een meer gecontroleerde microstructuur hebben dan gietstukken. Ook komen in smeedstukken nagenoeg geen porositeiten voor, zoals dat meestal wel het geval is bij gietstukken. Dankzij het smeden krijgt men een uitstekende textuur (vezelrichting) die de mechanische waarden verbetert op vele specifieke plaatsen van het smeedstuk. Vanwege de interactie tussen economische, proces- en metallurgische variabelen is het aan te raden om een smeeddeskundige te raadplegen tijdens het ontwerp van een component teneinde tot een optimaal resultaat te komen.





Factoren die men in ogenschouw moet nemen tijdens de ontwerpevaluatie:

- De eindafmeting en vorm van het gewenste component.
- De karakteristieken bij hoge temperatuur van de te smeden legering.
- De afweging tussen materiaalbesparingen en de hogere matrijskosten die nodig zullen zijn om zo dicht mogelijk bij de eindvorm te komen.
- De kosten voor machinale bewerking na het smeden in relatie met een gewenste vorm.
- De vereiste combinatie van een specifieke structuur en materiaaleigenschappen.
- Eisen voor integrale proefstukken.
- Elke vormbeperking die voortkomt uit de eisen die gesteld worden door non-destructieve testen.
- Juiste versteviging om de grootste spanningen te weerstaan.

Indien er smeedstukken zijn met een ingewikkelde vorm en/of dunne doorsneden dan kan vanwege de afkoeling van het materiaal tegen de matrijs het vullen van de smeedholte behoorlijk worden afgeremd, waardoor het materiaal plaatselijk zelfs een temperatuur kan krijgen die te laag is om nog acceptabel te kunnen smeden. Dit effect kan worden tegengewerkt door matrijsmaterialen te kiezen die een hoge temperatuursterkte bezitten waardoor men hogere operationele temperaturen kan toelaten. Toch zijn dergelijke smeedtemperaturen voor de meeste commerciële titaanlegeringen relatief laag te noemen (900 - 950°C) en dat bewerkt het voordeel dat men isothermische smeedcondities krijgt waardoor het matrijsmateriaal niet extra beschermd hoeft te worden tegen atmosferische invloeden die juist bij hogere temperaturen de prestaties van de matrijs zouden kunnen ondermijnen.

### Het handmatig smeden

Bij handmatig smeden maakt men geen gebruik van gevormde matrijzen, maar gebruikt men de platte kanten van de hamer of van de pers. Ook worden er eenvoudige hulpgereedschappen gebruikt zoals stuiksmeedzadels, ponsmallen, doorns etcetera, waardoor deze vorm van smeden het best vergeleken kan worden met de ouderwetse smidse. Handgevoormde smeedproducten zoals ringen, schijven, blokken, assen en dergelijke van allerlei grootte kunnen in de regel niet exact op de gewenste afmetingen en toleranties vervaardigd worden. Ondanks deze tekortkoming blijken handgevoormde smeeddelen toch goedkoper te zijn dan de stukken die gemaakt zijn met behulp van het matrijssmeedproces. Dit gaat vooral op indien het aantal stukken gering is, er een speciale

matrijs gemaakt moet worden en indien het om zeer grote stukken gaat. Het andere voordeel van handsmeden is dat de doorlooptijd erg kort is, temeer omdat er geen speciale gereedschappen aangebracht en ingesteld moeten worden. De meeste producten kunnen in allerlei grootte en vormen vervaardigd worden vanuit knuppels of staven die normaal gesproken altijd vanuit voorraad leverbaar zijn.

### Het matrijssmeden

Bij het matrijssmeden worden smeedstukken vervaardigd met behulp van gevormde hamers en/of persen. Het gebruik van persen geniet de voorkeur indien het om grotere smeedstukken gaat en indien men een speciale structuur met bepaalde hoge mechanische eigenschappen moet hebben. Matrijssmeedstukken kunnen qua vorm nauwkeurig gedefinieerd worden waardoor de producten in grote hoeveelheden identiek aan elkaar zijn. Ook biedt dit proces het voordeel dat het voormateriaal optimaal benut kan worden vanwege de speciaal op maat gevormde matrijzen. Dit voordeel komt juist bij het relatief kostbare titaan goed tot zijn recht. In het algemeen kan men stellen dat het matrijs-smeden in combinatie met goede procescondities zal leiden tot een constante productkwaliteit hetgeen vooral tot uitdrukking komt in de nagenoeg constante mechanische waarden. Hoewel matrijssmeden diverse voordelen biedt ten aanzien van materiaaluitsparing en reproduceerbaarheid zal het duidelijk zijn dat de hoge matrijskosten alleen maar terugverdiend kunnen worden met het maken van grote series. Met matrijssmeden kan men zeer nauwkeurige smeedstukken maken die lichter zijn dan 100 gram, zoals bijvoorbeeld gasturbinebladen tot stukken die meer dan een ton wegen. Tot nu toe worden alle commerciële titaanlegeringen voor dit smeedproces gebruikt.

| Voorbeelden van toleranties die men kan behalen met matrijssmeden: |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| Compressorbladen die niet langer zijn dan 100 mm                   | ± 0,12 mm |
| Getordeerd waaierblad tussen 100 en 400 mm lang                    | ± 0,20 mm |
| Groot waaierblad tot 750 mm                                        | ± 0,30 mm |
| Orthopedisch heupgewricht                                          | ± 0,25 mm |

Het matrijssmeedproces is de laatste tijd bijzonder vereenvoudigd dankzij speciale software die hiervoor ontwikkeld is. Met behulp van de computer kan men nu exact voorspellen hoe het materiaal zich tijdens het smeden zal bewegen in de matrijs waardoor men inzage krijgt in de thermomechanische condities. Op deze wijze kan men uitval voorkomen en kan men het proefsmeden overslaan, waardoor tijdwinst c.q. kostenbesparing het gevolg is. Met het zogenaamde isother-



misch matrijssmeden kan men smeedstukken vervaardigen die secties hebben met wanddiktes en lossingshoeken die veel geringer kunnen zijn dan met het conventionele matrijssmeden. Met het isothermisch smeden kan men hierdoor tot 30% materiaal uitsparen, alhoewel ook gesteld moet worden dat de matrijskosten aanzienlijk hoger zullen zijn.

Het extrusiesmeden

Conventionele extrusietechnieken kunnen worden gebruikt om allerlei staven en holle vormen van titaan te produceren, zoals men ook doet met andere hoogwaardige legeringen. Inherent aan dit proces is de hoge materiaalreductie die in het algemeen leidt tot een aanzienlijke verbetering van de structureigenschappen zoals zuiverheid en korrelgrootte, hetgeen weer een goede uitwerking heeft op het mechanisch gedrag.

Massieve extrusieproducten

Een zeer breed scala productvormen kan verkregen worden met het extrusieproces die op hun beurt weer het basismateriaal vormen indien men eindproducten wenst te vervaardigen met gecompliceerde vormen. Dit product kan tot stand komen met bijvoorbeeld het ringwalsen gevolgd door het vonkstuiklassen. Ringen die op deze wijze gemaakt zijn, hebben een laszone die na inspectie 90% van de sterkte van het basismateriaal bezitten.

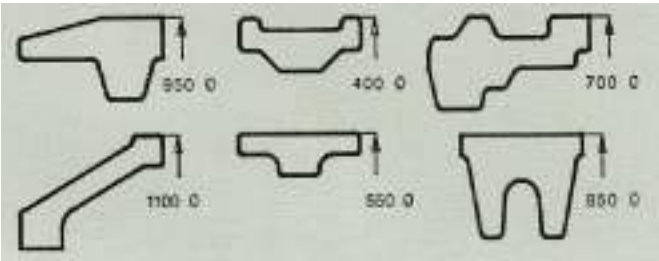
Holle extrusieproducten

Extrusie bij hoge temperatuur is een zeer bekende methode om naadloze titaanbuizen te vervaardigen. Wat velen niet weten is dat dit proces ook wordt gebruikt om succesvol pijpen te maken met een diameter van wel 600 mm en een wanddikte van 25 - 30 mm. Dit geschiedt niet alleen in de commercieel zuivere kwaliteiten, maar ook met het gelegerde Ti-6Al-4V (grade 5). Wat ook vrij onbekend is, is dat men met hetzelfde proces ook buisjes met een uitwendige

diameter van 1 mm kan produceren. Door gebruik te maken van de combinatie smeden en extruderen kan men pijpen maken in allerlei maten die reeds voorzien zijn van een flens. Dankzij het gebruik van een geëxtrudeerde voorlasflens kan men nu een las leggen die behoorlijk ver verwijderd is van die plaatsen die toch reeds onder hogere mechanische spanningen staan. Een heel goed voorbeeld van een dergelijke constructie is de fabricage van een stijgbuis die gebruikt is in het Heidrun platform van Conoco in Noorwegen. Deze stijgbuis heeft een uitwendige diameter van 550 mm en een wanddikte van 22 mm. De totale lengte bedraagt 345 meter en de buis is gemaakt van de titaanlegering Ti-6Al-4V die over een hoge mechanische sterkte beschikt. Deze stijgbuis is opgebouwd uit diverse pijpstukken die aan weerskanten voorzien zijn van twee geflenste buizen.

Het walsrollen

Titaan en titaanlegeringen kunnen gemakkelijk gewalst worden tot allerlei ringen en ringvormen met gebruikmaking van de bekende walsrolprocessen. De vervormkarakteristieken zijn identiek aan die van roestvast staal. Dit walsrolproces bevordert de vormgelijkheid en constante mechanische waarden van de gerede producten. Gebruikelijk is het dat dit walsrolproces wordt toegepast bij hoge temperaturen. Het kenmerk van dit proces is dat de wandikte van de naadloze ring voortdurend wordt gereduceerd waardoor de textuur van de structuur gelijkmatig wordt, hetgeen weer constante mechanische waarden oplevert. De ringdoorsneden kunnen variëren tussen strakke rechthoekige tot zeer gecompliceerde vormen zoals men op figuur 1 kan zien. Het zal duidelijk zijn dat de gereedschapskasten voor rechthoekige doorsne-



Figuur 1. Diverse ringprofielen die reeds in titaan gemaakt worden.

|                         | Benodigd gewicht in gram/stuk |                   |             | Bewerkingstijd |                   |             |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------|----------------|-------------------|-------------|
| Soort product           | gesmeed                       | gedraaid uit staf | % besparing | gesmeed        | gedraaid uit staf | % besparing |
| Kolomschroef M5 x 30 mm | 3,87                          | 11,27             | 60          | 1,44           | 25                | 94          |
| Bout M8 x 40 mm         | 12,59                         | 50,26             | 75          | 1,44           | 60                | 97          |
| Schroef M10 x 35 mm     | 16,63                         | 75,76             | 78          | 50             | 33                |             |

Tabel 1. Voorbeelden van materiaalgebruik en tijdsduur.

den relatief laag zijn en hoger zullen worden naarmate de vorm complexer wordt. Het is van groot belang dat men niet bezuinigt op de fabricage van deze complexe vormen omdat dit meer voormateriaal zal uitsparen. Ringen van 5000 kg, met diameters tot 4 meter en met een dikte van 850 mm zijn tegenwoordig geen uitzondering meer.

Gesmede bevestigingsmaterialen van titaan

De opmerkelijke karakteristieken van titaan zoals hoge sterkte en laag soortelijk gewicht vullen het gat op dat aanwezig is tussen het zwakkere doch lichtere aluminium en de zware staalsoorten. Bovendien valt de enorm goede corrosiebestendigheid van titaan op als men dit vergelijkt met de meeste aluminium- en staalsoorten. Het smeedproces om bevestigingsmaterialen te vervaardigen leent zich uitstekend tot automatisering, terwijl de producten een hoge kwaliteit bezitten en afmetingen hebben die gebonden zijn aan zeer strakke toleranties. Zo ligt de tolerantie op de diameter en de lengte gemiddeld op respectievelijk ± 0,005 mm en ± 0,06 mm. Ook complexe boutkopvormen zijn zonder meer mogelijk om op deze wijze te maken met nauwkeurige toleranties. In tabel 1 kan men een indruk krijgen wat voor een materiaal- en tijdbesparingen er mogelijk zijn indien men in plaats van het mechanisch bewerken vanuit staf, de bevestigingsmaterialen laat smeden. Uiteraard zal met kleine series de aantrekkelijkheid van mechanisch bewerken vanuit staf ook actueel blijven en dat ook mede vanwege de zeer korte levertijden. Daarom zullen de totale praktijkcondities de uiteindelijke beslissing geven over de meest optimale vervaardigingskeuze.

Basiseigenschappen van titaan en titaanlegeringen

De meest gebruikte norm die voor de specificaties van titaansmeedstukken wordt gebruikt, is de ASTM B381. Dit geldt zowel voor de corrosievaste soorten alsmede voor de kwaliteiten met hoge mechanische sterktes. De soorten-grade 1, 2, 3 en 4 zijn commercieel zuivere kwaliteiten met oplopende onzuiverheid en mechanische sterkte. Grade 2 en 3 worden in het algemeen gebruikt als smeedkwaliteit en voor de eigenschappen wordt verwezen naar tabel 2. Grade 7, 11, 16 en 17 zijn commercieel zuivere titaankwaliteiten met een toevoeging van palladium, hetgeen ervoor zorgt dat de corrosiebestendigheid aanzienlijk wordt verhoogd in reducerende chloridehoudende zuren. Dit komt nog het beste tot uitdrukking in de enorme toename in de bestendigheid tegen spleetcorrosie in dergelijke milieus. Ten aanzien van

de mechanische waarden kan gesteld worden dat deze voor grade 7 en 16 dezelfde zijn als die van grade 2 en voor 11 en 17 als die van grade 1. Grade 5 en 23 worden vanwege hun middelhoge mechanische waarden ook wel de werkpaarden van alle titaankwaliteiten genoemd. Grade 25 en 24 bevatten 0,05% palladium om de corrosiebestendigheid verder te verbeteren. Grade 19 en 21 zijn bètalegeringen met hoge sterkte, terwijl grade 20 en 22 hun tegenhangers zijn vanwege de toevoeging van palladium. Andere legeringen die interessant zijn voor het smeedproces zijn de grades 9, 12 en 18 (grade 9 + Pd) die alle redelijk hoge mechanische waarden bezitten. Ook de titaankwaliteit 550 (Ti-4Al- 4Mo- 2,5Sn-5Si) die als alfa-bètalegering na een warmtebehandeling zeer hoge mechanische waarden bezit, is een belangrijke optie tussen alle andere legeringen. Van deze legering is echter nog geen ASTM-norm beschikbaar. De gemiddelde waarden in de tabel zijn grootheden die slaan op een bepaalde legeringsgroep. Uiteraard heeft iedere legering op zich weer specifieke waarden, maar het zou te ver gaan om er in dit artikel verder over uit te weiden. Wel is het van belang om de ASTM-normen weer te geven die op andere productvormen slaan:

- ASTM B265: Plaat en strip.
- ASTM B337: Naadloze en gelaste buis.
- ASTM B338: Naadloze en gelaste buis.
- ASTM B348: Staven en knuppels.
- ASTM B363: Naadloze en gelaste fittingen.
- ASTM B367: Gietstukken.
- ASTM F 67: Ongelegerde chirurgische implantaten.
- ASTM F136: Ti-6Al-4VELI voor chirurgische implantaten.

Lastoevoegmaterialen die nodig zijn voor al deze legeringen zijn gespecificeerd in de AWS norm A5.16.

Warmtebehandeling van smeedstukken

De commercieel zuivere titaankwaliteiten zijn niet warmtebehandelbaar en daarom worden smeedstukken van deze kwaliteiten geleverd zoals deze gesmeed zijn. De hoger gelegeerde typen zijn te leveren in de volgende condities:

- Gegloeid.
- Oplossend gegloeid.
- Verouderend gegloeid.

Het mechanisch bewerken kan het beste geschieden op gegloeide of op oplossend gegloeid materiaal. Spanningsarm gloeien tussen bewerkingstappen kan toegepast worden indien vervormingen mogelijk problemen op gaan leveren.



| Eenheid                                                   | Commercieel zuiver titaan | Titaan Ti6Al4V niet warmte-behandelbaar | Hoge sterkte titaan-legering type 550 (warmtebehandelbaar) | Titaan bèta-legering met hoogste sterkte |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Type legering                                             | Alfa                      | Alfa-bèta                               | Alfa-bèta                                                  | Bèta                                     |
| 0,2% rekgrens in MPa                                      | 345 - 480                 | 830 - 1000                              | 1000 - 1250                                                | 1100 - 1400                              |
| Treksterkte in Mpa                                        | 480- 620                  | 970 - 1100                              | 1100 -1450                                                 | 1200 - 1500                              |
| Rek in%                                                   | 20-25                     | 10 - 15                                 | 10 - 15                                                    | 6 - 12                                   |
| Elasticiteitsmodulus bij trek in GPa                      | 103                       | 114                                     | 114                                                        | 69 - 110                                 |
| Torsiemodulus in Gpa                                      | 44,8                      | 42                                      | 42                                                         | 38 - 45                                  |
| Soortelijk gewicht                                        | 4,51                      | 4,48                                    | 4,60                                                       | 4,81 - 4,93                              |
| Uitzettingscoëfficiënt (0 - 200°C) x 10 <sup>-6</sup> /°C | 8,9                       | 8,3                                     | 9,4                                                        | 7,2 - 9                                  |
| Warmtegeleidingsvermogen bij kamertemperatuur in W/mK     | 22                        | 6,7                                     | 7,6                                                        | 6,3 - 7,6                                |
| Specifieke warmte bij kamertemperatuur in J/kg/°C         | 515                       | 565                                     | 503*                                                       | 490 - 524                                |

\* geïnterpoleerde waarde

Tabel 2. Eigenschappen van titaankwaliteiten.

| Legeringstype                                                                                      | Aanduiding |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Commercieel zuivere legeringen (grade 2 en 3) die niet warmtebehandelbaar zijn                     | Alfa       |
| Legeringen met een middelgrote sterkte die beperkt warmtebehandelbaar zijn (grade 5, 23, 24 en 25) | Alfa-bèta  |
| Hogere sterktelegering die goed warmtebehandelbaar is (Ti-550)                                     | Alfa-bèta  |
| Hoge sterktelegeringen die goed warmtebehandelbaar zijn (grade 19, 20, 21 en 22)                   | Bèta       |

Tabel 3. Structuren.

### Het beitsen van titaansmeedstukken

Inherent aan het smeedproces vanwege de hoge temperatuur is de vorming van een geoxideerde laag en een metallische onderlaag die rijk is aan zuurstof. Deze laag die totaal circa 0,2 mm dik is, wordt meestal verwijderd met staal- of zandstralen gevolgd door beitsen. Er is in principe niets op tegen om ook gebruik te maken van straaldeeltjes van koolstofstaal die ongetwijfeld zullen leiden tot een roestig uiterlijk mits er maar daarna afdoende wordt gebeitst. Het beitsen wordt uitgevoerd in een mengsel van salpeterzuur en waterstoffluoride van 40°C met een verhouding van 5:1 en 8:1. Ook hier geldt dat na het beitsen goed gespoeld zal moeten worden in schoon water.

### Niet-destructieve testen

Smeedstukken van titaan kunnen getest worden met het bekende ultrasonoor onderzoek en onderworpen worden aan een 'dye-penetrant' test. Indien het ultrasonoor onderzoek kritisch ligt, dan zal eerst het gehele oppervlakte mechanisch bewerkt moeten worden.

### Het kogelstralen (shot-peening)

Het kogelstralen, dat bij omgevingstemperatuur geschiedt, is een proces waarbij kleine kogeltjes het oppervlak van het te stralen onderdeel bombarderen. Het resultaat is dat men een oppervlakte krijgt met relatief hoge mechanische spanningen en enige koudverstevinging. Deze verdichte zone die zo ontstaat, vergroot de weerstand tegen cyclische vermoeiing en tegen spanningsscheurcorrosie. Deze verdichte laag bewerkt ook een verlaging van de vreetgevoeligheid en een verlaging van de wrijvingscoëfficiënt, hetgeen een bijzonder groot voordeel is indien dit titaan in aanraking komt met andere bewegende metalen. Kogelstralen wordt in het algemeen gebruikt ten behoeve van titaanschijven, schoepenbladen en andere kritische componenten van moderne straalmotoren. Ook vindt het steeds meer zijn weg in orthopedische componenten en andere industriële toepassingen.

### Het lassen van titaansmeedstukken

Lastechnieken die gebruikt worden voor het lassen van titaanplaten en staf kunnen probleemloos op dezelfde wijze toegepast worden bij het lassen van titaansmeedstukken. Dit

| Grade                            | Spanningsarm gloeien |           | Gloeien (G) of oplossingsgloeien (OG)         |           | Veroudertemperatuur    |           |
|----------------------------------|----------------------|-----------|-----------------------------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|                                  | Temp. °C             | T in uren | Temp. °C                                      | T in uren | Temp. °C               | T in uren |
| Commercieel zuiver               | 500 - 600            | 1/2 - 4   | 600 - 700 (G)                                 | 1/2 - 4   | –                      | –         |
| Middelhoge sterkte zoals grade 5 | 500 - 600            | 1 - 4     | 500 - 700 (G)                                 | 1 - 4     | 460 - 510              | 2 - 4     |
|                                  |                      |           | 870 - 950 (OG)*                               | 1/2 - 1   |                        |           |
| Hoge sterkte zoals 550           | 500 - 650            | 1 - 2     | 900 (OG) luchtgekoeld                         | 1 - 4     | 500 luchtgekoeld       | 24        |
| Bètalegeringen                   | 450 - 500            | 1 - 2     | 815 (OG) luchtgekoeld of afschrikken in water | 1/4 - 1/2 | 480 - 600 luchtgekoeld | 6 - 20    |

\* Het sterkte-effect neemt af boven wandiktes van 12 mm

Tabel 4. Typische warmtebehandelingen voor titaan smeedstukken.

betekent dat men met TIG-lassen, elektronenstraallassen en plasmalassen uitstekende verbindingen kan maken tussen smeedstukken met andere productvormen van titaan. Naast het lassen aan gewalste producten kan men ook goede verbindingen maken met gietstukken van titaan. Hoewel TIG-lassen nog steeds wordt gebruikt voor het lassen van zwaardere en grotere onderdelen, is het nadeel dat men veellaslagen moet leggen, hetgeen behoorlijk veel tijd c.q. geld kost. Daarom kan men beter gebruik maken van het plasma- of elektronenstraallasproces, omdat deze processen te automatiseren zijn waardoor men in een laslaag de vereiste verbinding kan maken. Elektronenstraallassen geschiedt echter wel in een lucht vrije ruimte en de smalle straal vereist een nauwgezette voorbereiding en uitlijning van de te lassen componenten. Andere lasprocessen die gebruikt kunnen worden zijn wrijvingslassen, diffusielassen, explosief lassen, laserlassen en solderen. Alle genoemde processen kunnen goed uitgevoerd worden dankzij de goede laseigenschappen van titaan. Ook kan men probleemloos met het lasproces titaanlagen opbouwen op uitgesleten of beschadigde delen van titaancomponenten.

### Het bewerken van titaansmeedstukken

Commercieel zuiver titaan heeft een bewerkbaarheid die te vergelijken is met gegloeid austenitisch roestvast staal, terwijl gelegeerde titaansmeedstukken qua bewerkbaarheid het beste te vergelijken zijn met duplex roestvast staal. De bekende bewerkingstechnieken zoals draaien, frezen, boren, tappen en slijpen zijn prima uitvoerbaar alsmede technieken zoals het elektrochemisch bewerken en vonkerosie.

#### Praktische punten

#### 1. Ontwerp van het smeedstuk

Praktische zaken die tot een succesvol smeedstukontwerp zullen leiden, zijn in principe altijd terug te voeren tot de

gunstige gewicht/sterkteverhouding en de enorme corrosiebestendigheid van het titaan.

Wat men beslist moet doen:

- Overleg met smederijen zo vroeg mogelijk over het ontwerp;
- Ga na welke standaardmaterialen beschikbaar zijn teneinde de meest interessante basismateriaalprijs te verkrijgen;
- Gebruik de juiste smeedmethode voor de gewenste configuratie, afmeting en hoeveelheid van de componenten die uiteindelijk nodig zijn;
- Specificeer het handmatig smeden overeenkomstig de uiteindelijke afmetingen van het te maken smeedstuk;
- Buit de sterkte en de corrosiebestendigheid van het titaan zoveel mogelijk uit.

Wat men beslist niet moet doen:

- Men moet niet zonder meer bestaande ontwerpen gebruiken voor titaan, tenzij deze toch uiteindelijk geschikt blijken te zijn;
- Men moet zich niet verzetten tegen het opnieuw doorlopen van een ontwerp teneinde tot gewichtsbesparing van het titaan te komen en dat zeer zeker als het om een grotere serie gaat.

#### 2. De warmtebehandeling

Praktische zaken die tot een succesvolle warmtebehandeling zullen leiden zijn in principe altijd terug te voeren tot schoon werken en de beheersing van de ovenatmosfeer.

Wat men beslist moet doen:

- Verwijder al het vet, olie, verf en vuil van de smeedstukken voordat men gaat warmtebehandelen;
- Voorkom dat metaaloxiden van andere metalen bij hoge temperatuur in contact komen met het titaan;
- Rangschik de smeeddelen dusdanig dat er een uniforme warmtebehandeling kan plaatsvinden;





- Denk eraan dat titaan een slecht warmtegeleidingsvermogen heeft en dat daarom grote smeedstukken tijdens de behandeling een keer omgekeerd moeten worden teneinde een uniforme warmtebehandeling te verkrijgen.

Wat men beslist niet moet doen:

- Onderwerp titaan nooit aan een reducerend milieu tijdens de warmtebehandeling, omdat anders waterstof opgenomen zal worden, hetgeen tot verbrossing zal leiden;
- Laat de thermische belasting niet langer duren dan strikt noodzakelijk is;
- Reinig de titaandelen nooit met methylalcohol (methanol) of met zwavelhoudende ontvettersen dat zeker niet voor een warmtebehandeling.

### 3. Bewerken

Praktische zaken die tot een succesvolle mechanische bewerking zullen leiden, zijn in principe altijd terug te voeren tot de inachtneming van de verschillende mechanische en oppervlaktekarakteristieken van titaan. Ook dient men er rekening mee te houden dat zeer fijne titaanresiduen zeer brandbaar kunnen zijn.

Wat men beslist moet doen:

- Gebruik starre opstellingen van de snijgereedschappen en pas de juiste snijsnelheden en voedingen toe onder gebruikmaking van een goede koelvloeistof;
- Gebruik lopende centers bij het draaien;
- Verwijder regelmatig de spanen;



- Gebruik speciale afsluitbare afvalbakken voor titaanspanen.

Wat men beslist niet moet doen:

- Bewerk titaan nooit met botte gereedschappen en laat het niet vreten op andere metalen;
- Meng nooit brandbaar afval met titaanresiduen;
- Pas op voor open vuur en ga niet lassen in de buurt van titaanresiduen;
- Verwijder grotere hoeveelheden.

### 4. Toepassingen en gebruik

Praktische zaken die tot succesvolle toepassingen en gebruik van titaan zullen leiden zijn in principe altijd terug te voeren als men de verschillende mechanische eigenschappen, de corrosiebestendigheid en de oppervlaktekarakteristieken voldoende in ogenschouw neemt.

Wat men beslist moet doen:

- Geef componenten van titaan een oppervlaktebehandeling indien deze een glijdend contact met andere materialen hebben en indien het titaan wordt onderworpen aan een dragende belasting;
- Voorzie titaan van een bescherm laag op die plekken waar mogelijk vonken op neer kunnen komen.

Wat men beslist niet moet doen:

- Vermijd contact tussen titaan en andere metalen met een geringere corrosiebestendigheid, want dit zal tot galvanische corrosie leiden. Indien het niet anders kan, dan zal er een isolatie tussen de metalen moeten worden aangebracht.

### Literatuur

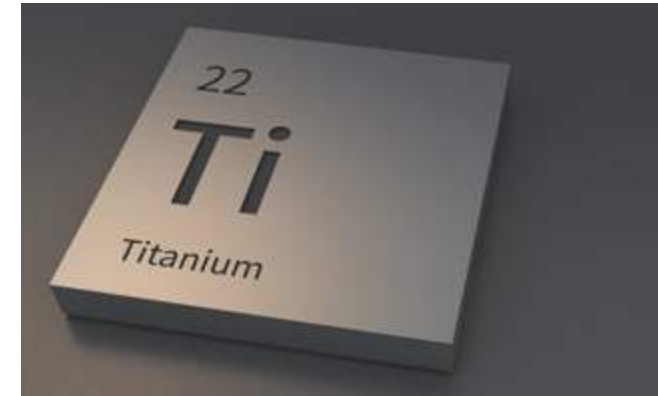
- 1) Titanium Forgings - The TIG Information Group UK.
- 2) All at sea with titanium- David Peacock- Materials World.
- 3) Het lassen van titaan en titaanlegeringen- N.W. Buijs - Roestvast Staal 5/96.





## Het ontwerpen en vervaardigen van titaan leidingsystemen

Het vervaardigen van titaan leidingsystemen vraagt extra aandacht in vergelijking met leidingen die gemaakt worden van roestvast staal, cupronikkel of cunifer. Daarom volgen nu praktische vragenstellingen met antwoorden over het ontwerpen, fabriceren en installeren van dergelijke hoogwaardige leidingsystemen. Naast het woord titaan wordt ook wel de benaming titanium gebruikt, maar dan praten we over hetzelfde metaal. Titanium is feitelijk een anglicisme.



Het metaal titaan kan worden geleverd in alle voorkomende halffabricaten en eindproducten zoals dat ook met andere industriële metalen het geval is. Het juiste ontwerp en de wijze van produceren van een leidingsysteem, vraagt echter voor titaan beduidend meer aandacht dan voor goedkopere kwaliteiten. Indien men voor titaan een ontwerp gebruikt dat eigenlijk voor een relatief goedkoop materiaal bestemd is, dan kan men er zeker van zijn dat men een onnodig duur geheel creëert. De tijd die men investeert om het ontwerp opnieuw door te lichten voor het toepassen van titaan, zal dan ruim terugverdiend kunnen worden.

Men moet zich daarom afvragen of de wanddiktes van titaanbuizen en componenten anders moeten zijn om een technisch en commercieel verantwoord geheel te krijgen. Daar kan het volgende over gesteld worden. Als men de eenheidsprijs beziet van titaan, dan lijkt dit altijd behoorlijk hoog te zijn. Ziet men echter de prijs per vierkante meter, dan lijkt dit weer juist enorm mee te vallen. Titaan is namelijk een relatief licht metaal want de soortelijke massa is slechts 56% van dat van staal. Een meter stalen pijp weegt daarom net zoveel als dezelfde pijp in titaan van 1,8 meter lang. Titaan echter heeft geen corrosietoeslag nodig en daarom kan de wanddikte gehalveerd worden, waardoor de titaanpijp zelfs vier keer zo lang kan worden met hetzelfde gewicht. Dit vergelijk gaat meestal ook op in vergelijking met roestvast staal.

Titaan heeft dus een veel lager soortelijk gewicht dan staal of cupronikkel. Buizen met een diameter van Ø300 mm uitgevoerd in cupronikkel of roestvast staal met een gewicht van 1000 kg, kunnen vervangen worden in titaan waardoor er 700 kg materiaal bespaard kan worden. Het veel lagere totaalgewicht van titaanpijssystemen, mede dankzij de mogelijkheid om kleinere pijpdiameters te gebruiken, kan leiden tot grote voordelen in lichtere geleidingssystemen, goedkopere transporten en besparingen tijdens de montage want ook zal het hijswerk goedkoper uitkomen. Daarnaast biedt de lage uitzettingscoëfficiënt van titaan ook een groot voordeel omdat er minder en kleinere expansiestukken nodig zijn. Dat levert ook weer de nodige besparingen op.

Daarnaast kan men zich afvragen of gelaste pijpen en fittingen goed en overal te verwerken zijn. Commercieel zuiver titaan is op zich een eenvoudig metaal dat slechts één fase heeft en daarom vrij gemakkelijk te lassen is door deskundige lassers in de werkplaats of op het fabrieksterrein zelf. Een warmtebehandeling is in principe nooit nodig en de las heeft dezelfde corrosiebestendigheid als het moedermateriaal. Het is dus zaak om de juiste – en meest praktische – wanddikte te bepalen ten behoeve van de fabricage en tegen de laagst mogelijke kosten. Als langснаad gelaste buizen en fittingen op de juiste wijze zijn gelast dan zullen deze producten kwalitatief nooit onder hoeven te doen voor de naadloze uitvoering.

Duizenden meters dunne gelaste pijp zouden nooit geïnstalleerd zijn als men onnodig had blijven aandringen om de veel duurdere naadloze uitvoering te gebruiken. Ontelbare gelaste componenten in titaan waren nooit in gebruik genomen, indien men geëist had dat deze producten gemaakt moesten worden uit staf of uit smeedstukken. Zowel de pijpen als de hulpstukken waren dan gewoonweg te duur geweest.

Hoewel het lassen geen enkel probleem hoeft op te leveren, dient men er wel voor te zorgen dat er geen zuurstof of stikstof bij het gesmolten lasmetaal kan komen omdat deze anders onherroepelijk broos wordt. Bovendien moet ook de afkoelende las beschermd worden met een inert gas dat gedoseerd kan worden door een sleepslof dat achter de





lastoorts meebewogen wordt. Onder de 300°C is dit verbroingsrisico door ongewenste gassen voorbij. Meestal is het inerte gas altijd zeer zuiver argon.

Titaan is dus zeer goed lasbaar en niet gevoelig voor warm-scheuren, in tegenstelling tot veel andere metalen. Het meest gebruikte lasproces ten behoeve van titaan is het TIG-lasproces. De wolfraamelektrode is gelegeerd met  $\pm 2\%$  thorium. Het bescherm- en backingmedium is in de regel altijd het inerte argon of heliumgas. Helium wordt vanwege de relatief hoge prijs in Europa maar zelden gebruikt. De zuiverheid van het backinggas dient minimaal 99,99% te zijn. Voordat men titaan gaat lassen, dient men de te lassen plaatsen eerst zoveel mogelijk te ontdoen van de oxidehuid. Dit kan mechanisch gebeuren met een RVS-borstel of door slijpen. Ook kan dit bereikt worden door middel van een chemisch beitsproces. Als beitsmiddel gebruikt men veelal een mengsel van waterstoffluoride (HF) en salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ). Daarna vervolgt men met het grondig reinigen van allerlei vuil en vet. Bovendien is het zeer aan te raden om de lastoevoegmaterialen ook te ontvetten. Vet is namelijk een koolwaterstofverbinding die tijdens het lassen zal dissociëren, waardoor koolstof ontstaat dat het titaanoppervlak zal binnendringen. Deze diffusie is namelijk zeer ongewenst.

Als lastoevoegmateriaal gebruikt men meestal voor de commercieel zuivere kwaliteiten de soorten grade 1 en 2. Het is van groot belang dat het hete uiteinde van de lasdraad voortdurend in het beschermgas wordt gehouden om gasopname c.q. verbroising van het uiteinde te voorkomen.

Na het lassen ziet men gelijk aan het uiterlijk of de las van een goede kwaliteit is. Is deze zilverachtig helder dan heeft men de beste laskwaliteit gerealiseerd. Indien de las licht verkleurd is dan is het ook nog wel acceptabel maar donkere kleuren wijzen erop dat er teveel vreemde gassen in het beschermgas aanwezig zijn geweest. Zulke lassen moeten grondig verwijderd worden want deze zijn niet te repareren. Daarna kan opnieuw de las gelegd worden. Dan rijst ook de vraag of een titaanvoering c.q. lining een goede mogelijkheid is. Wanddiktes van minder dan 1 mm zijn al ruim voldoende om corrosie van titaan volledig te weerstaan in zeewater. Buizen met een wand van een 0,5 mm worden al vaak toegepast in zeewatercondensoren. Grotere diameters pijp hebben in de regel dikkere wanden nodig vanwege de mechanische sterkte en vormvastheid. Dat feit leidt uiteraard tot een minder interessant prijsniveau. Het inwendig bekleden van een pijp, het zogenaamde linen of zelfs het uitwendig bekleden zal leiden tot een veel beter prijspeil. Titaan kan echter niet worden gebruikt als opas-materiaal op andere non-ferro legeringen of op koolstofstaal. Mechanisch vastgezette voeringen kunnen worden toegepast in systemen waar een lichtere overdruk heerst, terwijl explosieve of walsbeklede verbindingen veel meer geschikt zijn voor toepassingen waar een hoge of zeer hoge bindingssterkte tussen die twee metalen wordt vereist. Veelal wordt het product pas gevormd na het wals- of explosief bekleden. Al deze opties vereisen een nauwkeurig lassen van de titaanstukranden. Hiervoor zijn diverse voorschriften beschikbaar.

De wanddikte van een buis is te berekenen met de volgende

formule:

$$T_m = \frac{P \times D}{2(\sigma + P.Y)} + A$$

$T_m$  is de minimum wanddikte in mm

P is de druk in het systeem in MPa

D is de uitwendige piijpdiameter in mm

$\sigma$  is de maximaal toelaatbare spanning in MPa bij de ontwerp-temperatuur

Y is een coëfficiënt, bij ferro metalen is deze factor 0,4.

A is de corrosietoeslag.

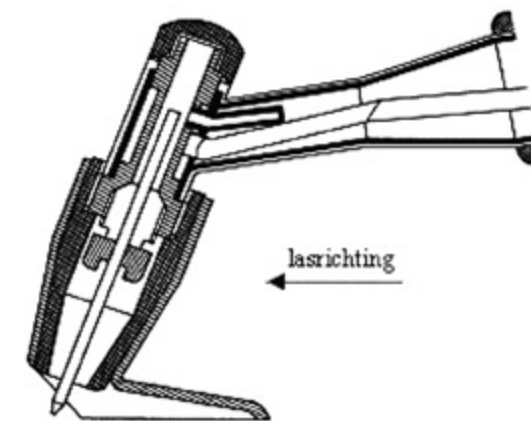
De corrosietoeslag voor titaan is nul en dat verklaart mede de geringe wanddikte.

Ook kan men zich afvragen of er financiële voordelen zijn te behalen vanwege de ruimtebesparing die titaan installaties bieden. Dat is zeker het geval want het metaal titaan biedt bepaalde stromingsvoordelen dat er kleinere diameters mogelijk zijn. Titaan weerstaat erosie in zeewater tot snelheden van 30 meter per seconde. Daardoor kunnen kleinere piijpdiameters en kleinere bochtradiussen gespecificeerd worden als er voldoende pompcapaciteit aanwezig is. Bovendien gaat titaan de afzetting van maritieme fouling tegen dankzij de harde gladde oxidehuid wat een groot voordeel is. Dat is de oorzaak dat het zogenaamde 'scaling-effect' laag is. Boven watersnelheden van 2,7 meter/seconde worden kleine zeepokken worden gedood waardoor zij zich niet op het oppervlakte kunnen afzetten. Deze informatie is verstrekt op de "The 7<sup>th</sup> Scandinavian Corrosion Congress". Indien men wenst een systeem te chloreren, dan geeft dat voor titaan geen enkel risico op corrosie.

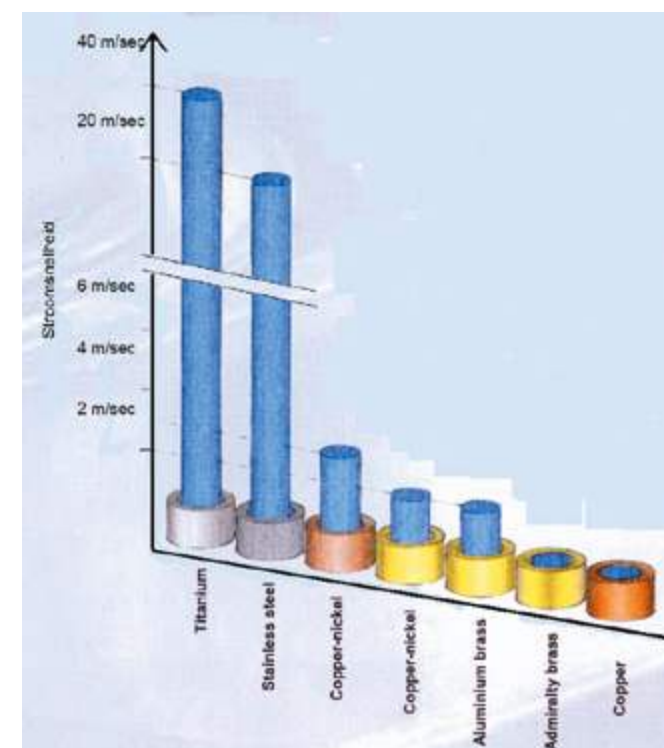
Commercieel zuivere titaanpijpen, zoals typen grade 1 en 2, tot een diameter van 200 mm kunnen koud vervormd worden tot een radius van 600 mm (3D). Dunne buis zoals Schedule 5 van grotere diameters kunnen zelfs een 5D bocht hebben. Nog kleinere bochten kan men bereiken door Schedule 5 of 10 bochten toe te passen.

Een ander voordeel van titaan is dat het oppervlakte een druppelvormige condensatie bevordert in plaats van een laminaire, zoals dat het geval is bij roestvast staal. Dat is vooral te danken aan de harde gladde oxidehuid. Dat betekent ook dat de warmteoverdracht wordt verbeterd omdat het titaanoppervlak op een veel directere wijze contact krijgt met de koel- of verwarmingsvloeistof. Een laminaire condensatie geeft een dun waterlaagje dat een enigszins isolerende werking heeft.

En dan nog even aandacht voor het aspect over de kosten. De hoogste kostenpost van ieder piijpsysteem zijn de flenzen en de fittingen. Stubends zijn aanzienlijk goedkoper



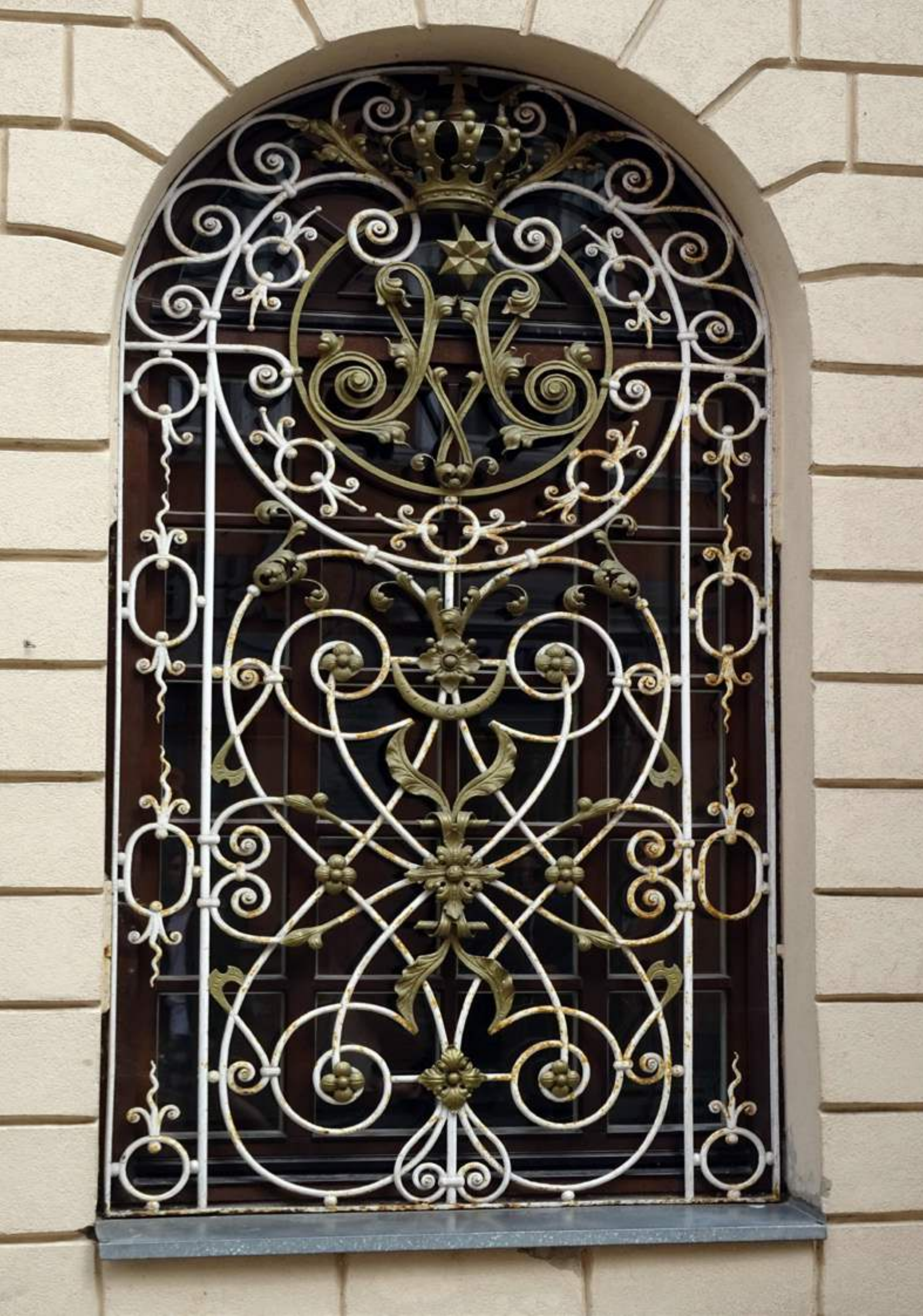
Afbeelding 1: titaan grade 2 buizen met een wanddikte van 1 mm.



Afbeelding 2: praktisch haalbare stromingssnelheden van zeewater in verschillende metalen. Bron: "The 7<sup>th</sup> Scandinavian Corrosion Congress". Titaan komt dan het beste uit de bus.

dan voorlasflenzen maar zelfs het ontwerpen met stubends wordt vaak onnodig duur omdat de lichtgewicht leidingen in titaan veel minder van deze relatief dure onderdelen nodig hebben door de pijpen eenvoudigweg langer te maken. Bovendien kan overwogen worden om titaan boordringen te kiezen in plaats van stubends, want die zijn opmerkelijk goedkoper. Veel langere titaanpijpen kunnen gebruikt worden mits de toepassing dat toelaat. Ook is het belangrijk de juiste flensverbindingen te kiezen. Bovendien zijn er titaankoppelingen op de markt beschikbaar en kunnen toegepast worden op de daarvoor geschikte plaatsen.





Soms lijkt het erop dat het gebruik van titaan alleen maar voordelen oplevert maar dat is niet het geval. Naast het nadeel dat er meer zorg gegeven moet worden aan het lassen, heeft men ook te maken met een elasticiteitsmodulus die lager is dan die van staal of van koperlegeringen. Dat kan leiden tot nadelig vibreren van de buizen. Daarom moeten er bijvoorbeeld in warmtewisselaars de onderlinge afstanden van de baffleplaten kleiner zijn dan bij roestvast staal of cupronikkel. Op deze wijze kan de neiging tot doorbuigen en vibreren gecompenseerd worden. Dat is vooral van belang zodra de buizen gevuld zijn met een medium. De overspanning in titaanpijpsystemen zal in afhankelijkheid zijn van het operationele gewicht (dus inclusief het medium), windbelasting e.d. en in de regel betekent dit een kleinere overspanning dan gewoonlijk het geval is. Een voordeel echter is dat de lagere elasticiteitsmodulus van titaan een betere schokbestendigheid oplevert.

Om een optimale benutting van het systeem te krijgen ten aanzien van de hydrodynamische prestaties van titaan, kan het volgende gesteld worden. Bij vloeistofsnellheden van 3 meter per seconde en hoger, wordt het gebruik van titaan aanbevolen om de vervuiling met microbiologische organismen tegen te gaan. Bij snelheden van twee meter per seconde kan men echter te maken krijgen met de afzetting van hardnekkige macro-organismen zoals mosselen en dergelijke. Bij buizen waar dergelijke lage stroomsnelheden of zelfs stilstand van het medium voorkomen, dient er regelmatig een "shock" chlooreerbehandeling toegepast te worden om te voorkomen dat de pijpen dichtgroeien. Chloor heeft geen enkele negatieve invloed op titaan.

Er wordt nog wel eens gevraagd of het nuttig is om titaan te specificeren zodra er extra hoge prestaties verlangd worden. Bij het gebruik van legeringen die superieure sterkten moeten bezitten en daardoor onderworpen kunnen worden aan hogere drukken of aan verhoogde temperaturen, zal het nut en voordeel van titaan steeds verder op de voorgrond komen. Daarom zal het vroegtijdig raadplegen van een deskundige leverancier de juiste oplossing bieden voor nageenog elke toepassing.

Tenslotte nog een voordeel dat titaan biedt op het gebied van de corrosiebestendigheid. Dat titaan een superieure corrosiebestendigheid tegen zeewater en andere reagentia heeft, is inmiddels wel genoegzaam bekend. Maar de belasting die aerosolen hebben op bijvoorbeeld roestvast staal, speelt bij titaan geen enkele rol van betekenis. Aerosolen zijn veelal kleine druppeltjes zeewater die tijdens hun vlucht snel indampen vanwege een gunstige verhouding tussen oppervlak en volume. Dat betekent dat de zout- en chloridegehalte toeneemt tijdens dat indampen. Komt zo'n druppeltje op het roestvast staaloppervlak, dan laat het zoutkristallen achter zodra al het water verdampt is. Bij condensatie of dauwvorming zullen deze zoutkristallen weer in oplossing gaan, waardoor deze het roestvast staaloppervlak kunnen aantasten. Titaan heeft daar geen enkele last van. Uiteraard speelt dit probleem zich alleen af bij leidingen en apparatuur die zich in de buitenlucht bevinden. Ook de omgeving speelt een grote rol, want de corrosie door aerosolen zal het heftigst zijn in de buurt van de kust of van brakwater.

*Enige passages komen voort uit een publicatie van de TIG-Group.*





## Titaan in relatie tot agressieve gasomgevingen

Titaan is een bijzonder corrosiebestendig metaal en dat is over het algemeen wel bekend. Naast dat het goed inzetbaar is in zowel oxiderende en reducerende corrosieve omgevingen vindt dit unieke metaal ook zijn weg in de lucht- en ruimtevaart alsmede in de medische sector zoals implantaten. Vooral de gewicht/sterkte verhouding maakt het metaal bijzonder aantrekkelijk voor de luchtvaart. Dat titaan ook aan allerlei agressieve gassen blootgesteld kan worden, is over het algemeen wat minder goed bekend. Daarom wordt onderstaand verschillende gevallen van titaan in gasstromen doorgenomen.

Het metaal titaan kan ongelegeerd in allerlei agressieve gassen gebruikt worden maar men dient wel op te passen met de temperatuur. In het geval van ongelegeerd titaan mag men dit zelfs niet aan de atmosfeer blootstellen zodra de omgeving heter wordt dan 360°C. Gebeurt dit wel dat diffunderen allerlei ongewenste gassen vanuit de omgeving in het metaal die het titaan poreus en bros zullen maken. Dat is vooral van belang bij het afkoelen na het leggen van een lasverbinding. Dit kan voorkomen worden door achter de lastoorts een sleepslof te bevestigen die de afkoelende las beschermd met een argonatmosfeer. Deze bescherming geldt uiteraard ook voor de dooslaszijde. Indien dit niet afdoende heeft plaatsgevonden dan is die gasopname zeer snel een feit en men kan dat niet meer ongedaan maken door bijvoorbeeld een warmtebehandeling. Er ziet dan niets anders op om een laagje titaan mechanisch te verwijderen indien dat geoorloofd is. Anders dient men opnieuw te beginnen. Zodra men titaan gaat legeren neemt deze toegestane temperatuur aanzienlijk toe zonder dat er verbrossing of zoiets optreedt. Bij hoog gelegeerde kwaliteiten mag deze temperatuur oplopen tot zelfs 620°C. Een voorbeeld hiervan is de legering Ti-5.9Al-2.7Sn-4Zr-0.45Mo-0.35Si-0.22Y. M.a.w. dan ligt die mogelijke verbrossing niet meer zo kritisch als bij ongelegeerd titaan en dat maakt het lassen wel een stuk gemakkelijker.

Zodra ongelegeerd titaan heter wordt dan 800°C zal stikstof versneld diffunderen in het oppervlak waardoor titaannitriden ontstaan die het metaal weer extra bros maken. Dat betekent dat men passende maatregelen moet nemen om dat te voorkomen. Dat is de reden dat kritische delen veelal in een couveuse worden gelast waar een argonatmosfeer heerst. In zeer kritische gevallen wordt er zelfs in een hoog vacuüm omgeving gelast. Met sterke hete alkalische oplossingen moet men oppassen dat het titaanoppervlak geen waterstof gaat opnemen. Dat kan namelijk leiden tot de vorming van titaanhydrides in het metaal. Deze verbindingen kunnen ook weer tot verbrossing van het titaan leiden. Indien men enig palladium in het titaan

legeert dan is dat probleem opgelost. Palladium is echter een zeer kostbaar metaal. Titaan grade 7 heeft bijvoorbeeld 0,2% palladium en dat maakt het titaan ruim twee keer zo duur. In de praktijk blijkt echter dat een toevoeging van slechts 0,04% palladium al voldoende is om de vorming van deze titaanhydrides te voorkomen. In dit geval betekent dit dat de kwaliteit Ti-grade 16 toereikend is want die bezit zo'n laag palladiumgehalte. Ongelegeerd titaan is uitstekend bestand tegen zwavelhoudende gassen zoals die ontstaan in bijvoorbeeld scrubbers c.q. gaswassers. Dergelijke gassen mogen zowel nat als droog zijn en dat geeft weer een extra dimensie aan het metaal titaan. Een goed voorbeeld is zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>) die zowel nat als droog tussen 20 en 100°C geen aantasting geeft op titaan. Met zwavelwaterstof (H<sub>2</sub>S) ligt het helaas iets anders want bij een temperatuur van circa 100°C dient men toch engszins rekening te houden met een lichte aantasting van minder dan 0,12 mm per jaar.

Voor meer informatie [www.innometconsultancy.nl](http://www.innometconsultancy.nl)



## Anodiseren van titaan

Anodiseren is een bekend proces met als doel om de dunne natuurlijke oxidefilm van bepaalde metalen en legeringen te vervangen door een beduidend dikkere oxidehuid. Het meest voorkomende metaal dat onderworpen wordt aan dit proces is aluminium. Het anodiseren wordt gerealiseerd d.m.v. een elektrochemisch proces. De verdikte aluminiumoxidehuid is na deze behandeling poreus en zal daarom geseald moeten worden. Dit afdichten gebeurt met kokend demiwater. Voor dit sealen kan het aluminium oppervlak nog van een gewenste kleur worden voorzien. Tijdens het sealen, sluit de oxidehuid zich en worden de kleurstoffen a.h.w. gefixeerd. Ook kan men als alternatief elektrochemisch inkleuren.

Met anodiseren ontstaan er allerlei aluminium producten die een veel hogere corrosiebestendigheid hebben. Een bekende toepassing vindt men in de utiliteitsbouw waar met veel geanodiseerde aluminium profielen wordt gewerkt. Naast de doelstelling om de corrosiebestendigheid te verbeteren, kan het anodiseren ook gebruikt worden voor decoratieve doeleinden. In dat geval gaat het dus vooral om de vereiste kleurstelling. Het element silicium geeft beperkingen aan dit proces. Dat betekent dat het percentage silicium niet te hoog mag zijn anders kleurt het aluminium product onaangenaam donker. Ook het metaal titaan kan worden gekleurd m.b.v. het anodiseerproces. Ook dan gaat het veelal om decoratieve doeleinden. Op onderstaande afbeelding is te zien hoe de van nature zilverachtige uitstraling van titaan kan veranderen d.m.v. het anodiseerproces.



Geanodiseerde titaanstaven (foto Titanium Finish Company).

In tegenstelling met wat vaak wordt aangenomen, bewerkt het verdikken van de titaanoxidehuid nauwelijks een verbetering van de corrosiebestendigheid en de slijteigenschappen. Wel geeft een geanodiseerd oppervlak een grotere weerstand tegen de diffusie van zuurstof bij verhoogde temperatuur en van waterstof in galvanische omstandigheden.

Het elektrolyt, dat veelal gebruikt wordt, is 80% fosforzuur plus 10% zwavelzuur en 10% water. Na een behandeling van circa 10 minuten heeft men reeds een behoorlijke verdikking verkregen van een goed samenhangende oxidehuid. Bovendien kan men met deze methode, gecombineerd met een droog smeermiddel, de drang tot het invreten van schroefdraden aanmerkelijk verlagen. Voor stijgbuizen die o.a. toegepast zijn in het Heidrun project in Noorwegen heeft men met succes Ti-6Al<sub>4</sub>V (Ti-grade 5) bouten gebruikt die voorzien waren van een epoxycoating op basis van polyamide molybdeendisulfide.

Dat middel was aangebracht op een oppervlak dat eerst behandeld was met shot-peening, gevolgd door anodiseren. Naast deze technieken zijn er meerdere varianten met hun specifieke eigenschappen mogelijk. Bijvoorbeeld met alkalische anodiseerprocessen die vaak nog dikkere oxidehuiden geven. Dergelijke processen zijn gebruikt voor titaanonderdelen die gebruikt zijn door de NASA t.b.v. de ruimtevaart. Een bijzonder neveneffect van het anodiseren is, dat de dikkere oxidehuid een andere brekingsindex geeft van het invallende licht op het materiaal. Dat leidt dan tot prismawerking. Op deze wijze zijn alle kleuren van de regenboog te bereiken. Van deze eigenschap maken vooral kunstenaars, architecten en edelsmeden dankbaar gebruik. Voor deze zaken wordt veel gebruik gemaakt van een elektrolyt die bestaat uit een oplossing van 3 - 5% natriumtrifosfaat in gedestilleerd water.

De kleuren die op het titaan ontstaan, zijn afhankelijk van de samenstelling van het elektrolyt en het voltage. Gekleurd en ongekleurd titaan wordt steeds meer ontdekt door architecten omdat naast de fraaie uitstraling, geen enkel probleem te verwachten is met corrosie. Er zijn fabrikanten die zonder meer een eeuw garantie geven op dit metaal in de bouwsector. Deze garantie wordt gegeven ongeacht waar het gebouw zich op de wereld bevindt. Daarnaast is

de uitzettingscoëfficiënt nagenoeg gelijk aan dat van glas en dat maakt het metaal nog interessanter voor de bouw. Heel soms wordt het anodiseren ook gebruikt om ijzercontaminatie te verwijderen, die op het titaanoppervlak kunnen voorkomen. Een dergelijke actie kan gezien worden als de laatste handeling om apparatuur in titaan optimaal af te leveren. Het zal overigens duidelijk zijn dat dit dan een alternatief is voor het beitsen.

[www.innometconsultancy.nl](http://www.innometconsultancy.nl)