

Lassen van titaan en titaanlegeringen

Deze praktijkbeveling is oorspronkelijk vervaardigd in het kader van het "Technologie Centrum voor Verbinden" van het NIL.

Titaan is in vergelijking met staal en aluminium een duur metaal. Titaan wordt voornamelijk gebruikt in de procesindustrie (reactorvaten) vanwege zijn zeer goede corrosiewerende eigenschappen. Het materiaal is verder uitstekend geschikt voor medische toepassingen zoals pacemakers en prothesen. De hoge sterkte/gewichtsverhouding van titaanlegeringen maakt dit materiaal interessant voor toepassingen in de ruimtevaart en voor sportartikelen zoals fietsframes en tennisrackets. De toepassing als brilmontuur heeft dit materiaal te danken aan de combinatie van goede corrosiewerende eigenschappen, licht gewicht en hoge sterkte. Door de recentelijke daling van de titaanprijs worden titaanlegeringen ook toegepast voor offshore constructies vanwege de combinatie van goede corrosiebestendigheid en hoge sterkte. Een geheel nieuwe toepassing is het gebruik van titaan in de architectuur. De decoratieve matgrijze kleur van het titaanoppervlak maakt dit materiaal interessant voor overkappingen van hallen, stationruimtes e.d.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	De ontdekking van titaan	2
1.2	Algemene aspecten	2
1.3	Belangrijkste titaankwaliteiten	2
1.3.1	Ongelegeerd of technisch zuiver titaan	2
1.3.2	Titaanlegeringen	3
2	De lasbaarheid van titaan en titaanlegeringen	3
2.1	Belangrijke eigenschappen i.v.m. de lasbaarheid	3
2.2	Lasprocessen	4
2.2.1	TIG-lassen	4
2.2.2	Praktische adviezen voor het TIG-lassen	5
2.2.3	Plasmalassen	5
2.2.4	MIG-lassen	5
2.2.5	Elektronenbundellassen	6
2.2.6	Laserlassen	6
2.3	Druklassen	6
2.3.1	Weerstandlassen	7
2.3.2	Wrijvingslassen	7
2.3.3	Ultrasoonlassen	7
2.3.4	Explosielassen	7
2.3.5	Wrijvingsroerlassen	7
2.3.6	Diffusielassen en diffusiesolderen	7
2.4	Hoogtemperatuursolderen	8
3	Metallurgische lasbaarheid van titaan	8
4	Thermisch snijden	8
5	Lasnaadvormen	8
6	Lastoevoegmaterialen	9
7	Beschermgassen	9
8	Gloeibehandelingen	9
9	Werkplaatscondities	9
9.1	Algemeen	9
9.2	Lasvoorbereiding en lasuitvoering	10
10	Lassen van titaan aan andere materialen	10
10.1	Titaanbekleding op ander metalen	10
11	Kwaliteitscontrole	10
12	Praktijkvoorbeelden	10
12.1	Apparaten voor de (petro)chemische industrie	11
12.2	Onderdelen voor lucht- en ruimtevaart	11
12.3	Orthesen en prothesen	11
12.4	Brilmonturen, horlogebandjes en sieraden	11
13	Samenvatting	11
14	Normen en handboeken	11

tief omdat deze metalen onmiddellijk reageren met gasen als zuurstof, stikstof en ook heel gemakkelijk carbidvormen boven een temperatuur van circa 450°C. Deze groep van metalen is in de volgende vier clusters in te delen:

- ▶ titaan;
- ▶ zirkoon en hafnium;
- ▶ tantaal en niobium (in de Amerikaanse literatuur vaak columbium genoemd);
- ▶ molybdeen, vanadium en wolfram.

Het zijn allemaal metalen met een hoog smeltpunt en een geringere thermische uitzetting in vergelijking tot staal. Op molybdeen en wolfram na hebben deze materialen een geringe warmtegeleidingsvermogen. Een aantal fysische eigenschappen van deze metalen is in tabel 1 vermeld.

tabel 1 Eigenschappen van reactieve metalen (bij 20°C)

	Ti	Zr	Hf	Ta	Nb	Mo	W
Dichtheid (g/cm ³)	4,5	6,5	13,1	16,6	8,6	10,2	19,3
Smeltpunt (°C)	1668	1852	2230	2996	2468	2620	3390
Uitzettingscoëfficiënt (10 ⁻⁶ /°C)	8,4	5,9	5,9	6,5	7,1	4,8	4,5
Warmtegeleidbaarheid (W/m°C)	16	21	22	54	52	138	175
Elektrische weerstand (nΩm)	420	450	350	130	160	510	540
Soortelijke warmte (J/kg°C)	522	290	147	142	272	276	138
Elasticiteitsmodulus (GPa)	117	101	138	189	105	324	345

1 Inleiding

Titaan heeft een hoge affiniteit tot zuurstof, maar een uiterst dunne titaanoxidelaag bezorgt het materiaal zijn uitstekende corrosiewerende eigenschappen. Die hoge affiniteit tot zuurstof vereist bij het lassen en solderen van dit materiaal speciale voorzorgsmaatregelen. Met de bekende smeltlasprocessen is titaan goed lasbaar. Absolute voorwaarden zijn wel een uiterst zorgvuldige gasbescherming en een zeer schoon oppervlak. Naast de executieve lasbaarheid van titaan en titaanlegeringen worden in deze praktijkbeveling ook de metallurgische aspecten van het lassen van titaan kort behandeld.

Titaan behoort tot de groep van reactieve metalen. Reactie

De hoge reactiviteit van bovenstaande metalen bij verhoogde temperatuur heeft consequenties voor de lasbaarheid. Deze metalen zijn bij het lassen gevoelig voor de geringste verontreiniging op het oppervlak. De executieve lasbaarheid van zirkoon en niobium is vergelijkbaar met die van titaan, maar de andere vijf materialen zijn een orde van grootte gevoeliger voor wat betreft de reactie met actieve gassen en verontreinigingen op het oppervlak. Het lassen van een metaal als tantaal bijvoorbeeld is zo lastig dat dit bijna altijd onder hoog vacuüm wordt gedaan (elektronenbundellassen).

Van alle genoemde reactieve metalen worden technisch zuiver titaan en titaanlegeringen het meest toegepast en om die reden wordt in deze praktijkbeveling alleen ingegaan op de lasbaarheid van dit metaal en zijn legeringen.

1.1 De ontdekking van titaan

Het element titaan werd in 1791 ontdekt door William Gregor en werd later door Klaproth "Titanium" genoemd naar de Titanen uit de Griekse mythologie.

Titaan komt zeer veel voor in de aardkorst (namelijk 0,6%). De mineralen ilmeniet, titanomagnetiet en rutiel worden voor de productie van titaan gebruikt. Het metaal titaan is niet gemakkelijk uit deze mineralen vrij te maken. Aan het begin van de twintigste eeuw slaagde Hunter van General Electric erin titaan met een zuiverheid van 99% te maken door titaanchloride en natrium in vacuüm te verhitten. De toepassing van titaan op grotere schaal werd pas mogelijk toen Kroll in 1940 een methode vond om titaantetrachloride met zuiver magnesium te reduceren tot zuiver titaan (>99,2%). Dit was het begin van de industriële toepassing. Wat de toepassing van titaan en titaanlegeringen beperkt, is de chemische reactiviteit van dit materiaal op hoge temperaturen. De dure raffinagetechnieken en speciale giet-, wals-, en smeedtechnieken maken het materiaal duur.

1.2 Algemene aspecten

De kristalstructuur van titaan van kamertemperatuur tot 882°C is hdp (hexagonaal dichtste pakking) en wordt de α -fase genoemd. Boven 882°C tot aan de smeltemperatuur van 1670°C is de structuur krg (kubisch ruimtelijk gecentreerd) en staat bekend als de β -fase. Titaan is daarmee net als ijzer allotroop (het metaal kent meer dan één kristalstructuur). Door legeren kan de β -fase gestabiliseerd worden en ontstaan $\alpha + \beta$ legeringen. Het is zelfs mogelijk om door legeren een volledige β -structuur bij kamertemperatuur te verkrijgen. De structuur van titaan en zijn legeringen is belangrijk voor hun eigenschappen en verwerkbaarheid, waaronder lassen. Legeringen zijn aanzienlijk sterker dan technisch zuiver titaan. Technisch zuiver titaan is behoorlijk goed vervormbaar bij kamertemperatuur en kan gemakkelijk gesmeed en verspaand worden. Erg dunne spanen en titaanstof vormen echter wel een brandgevaar. Ook de legeringen zijn over het algemeen goed verwerkbaar, maar bij het lassen treedt een extra probleem op, doordat als gevolg van de snelle afkoeling na het lassen structuurveranderingen kunnen optreden.

De mechanische eigenschappen van technisch zuiver titaan worden bepaald door de zuiverheid (met name het zuurstofgehalte) en de hoeveelheid koudvervorming. De sterkte van de titaanlegeringen wordt bepaald door de hoeveelheid en aard van de legeringselementen, door de hoeveelheid koudvervorming en/of gekozen warmtebehandeling. In de gegloeide toestand heeft technisch zuiver titaan een treksterkte van ca. 250 MPa. De treksterkte voor legeringen met een volledige β -structuur kan na een warmtebehandeling oplopen tot 1400 MPa. Technisch zuiver titaan is op de enorme reactiviteit na goed lasbaar, maar het lassen van de hoogsterke legeringen is alles behalve gemakkelijk. Verlies aan sterkte, verandering van structuur en scheurvorming zijn de belangrijkste problemen.

De corrosieweerstand van titaan in zeewater is uitstekend. Verder is technisch zuiver titaan bij kamertemperatuur goed bestand tegen, zoutzuur, fosforzuur, zwavelzuur, salpeterzuur, citroenzuur, melkzuur en andere oxiderende media. Bij verhoogde temperaturen lost titaan op in zoutzuur en fluorwaterstofzuur. Toevoeging van 0,1% palladium aan titaan wordt gedaan om het materiaal nog beter bestand te maken tegen zoutzuur en chloride-oplossingen. Verder is het met 0,2 % palladium gelegeerde titaan beter bestand tegen vloeistoffen die licht reducerend zijn, of die fluctueren tussen oxiderend en reducerend. Onder sterk reducerende omstandigheden, kan titaan behoorlijk aangetast worden.

1.3 Belangrijkste titaankwaliteiten

Titaan kent twee belangrijke toepassingsgebieden. Het ene waarbij een beroep wordt gedaan op de uitstekende corrosiewerende eigenschappen en de andere waarbij voornamelijk de hoge sterkte-gewichtsverhouding bepalend is voor de keuze. Uiteraard kan de keuze op een titaanlegering ook vallen door de combinatie van goede corrosieweerstand en hoge sterkte. Ongelegeerd of technisch zuiver titaan wordt voornamelijk toegepast vanwege zijn uitstekende corrosiewerende eigenschappen onder oxiderende omstandigheden. Titaanlegeringen worden voornamelijk toegepast vanwege hun hoge sterkte. Titaan is allotroop en de uiteindelijke structuur bij kamertemperatuur is afhankelijk van het percentage legeringselementen en de thermische behandeling (warmtebehandeling in combinatie met fabricagemethode). Naast technisch zuiver titaan met een α -structuur, zijn er legeringen waarbij een geringe hoeveelheid van de β -fase voorkomt. Deze legeringen worden de near α legeringen genoemd. De $\alpha + \beta$ legeringen hebben een hoger gehalte aan legeringselementen en de hoogste percentages bevatten de β -legeringen. In de genoemde volgorde neemt de sterkte van de legeringen toe. Door de combinatie van legeren en thermische behandeling kunnen de eigenschappen van de titaanlegeringen worden beïnvloed en met een betrekkelijk gering aantal legeringen kan een enorm breed gebied aan eigenschappen worden verkregen.

De lasbaarheid van titaan en titaanlegeringen wordt mede bepaald door het type en de hoeveelheid aan legeringselementen. Het is van belang te weten welk type gelast moet worden om de juiste lastechnische maatregelen te kunnen nemen. Om die reden wordt kort ingegaan op de meest voorkomende soorten technisch zuiver titaan en titaanlegeringen.

1.3.1 Ongelegeerd of technisch zuiver titaan

Technisch zuiver of ongelegeerd titaan heeft maximaal 0,5% aan verontreinigingen of legeringselementen. De meest voorkomende verontreinigingen zijn zuurstof, stikstof, koolstof en ijzer. Het ijzergehalte varieert van 0,20 tot maximaal 0,30%. Het stikstofgehalte is aanzienlijk lager en varieert van 0,03 tot 0,05% en het koolstofgehalte is maximaal gelijk aan 0,10%. Omdat zuurstof een grote invloed heeft op de mechanische eigenschappen (zie hieronder) wordt ongelegeerd titaan ingedeeld naar het zuurstofgehalte (zie tabel 2).

tabel 2 Veel gebruikte ongelegeerde titaansoorten volgens ASTM en DIN

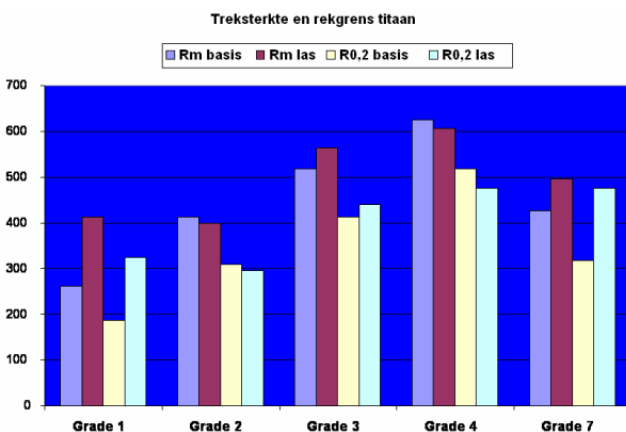
Materiaal	Zuurstofgehalte	Codering ASTM	Codering DIN
Titaan	0,10		3.7025, Ti1
Titaan	0,18	grade 1	3.7035, Ti2
Titaan	0,25	grade 2	3.7055, Ti3
Titaan	0,35	grade 3	3.7065, Ti4
Titaan	0,40	grade 4	
Titaan-Palladium	0,25 (0,12-0,25 Pd)	grade 7	3.7225, TiPd1
Titaan-Palladium	0,18 (0,12-0,25 Pd)	grade 11	3.7235, TiPd2
Titaan-Nikkel-Molybdeen	0,25 (0,2-0,4Mo; 0,6-0,9 Ni)	grade 12	3.7105, TiNi0,8Mo0,3

Voor nog betere corrosie-eigenschappen worden kleine hoeveelheden palladium (ca. 0,2%) toegevoegd. De legering met kleine hoeveelheden molybdeen en nikkel heeft iets betere corrosie-eigenschappen en iets hogere sterkte dan ongelegeerd titaan. Omdat bij deze geringe percentages de structuur niet wordt beïnvloed, worden

de met Pd, Mo en Ni gelegeerde soorten tot de groep van ongelegeerd titaan gerekend.

Technisch zuiver of ongelegeerd titaan wordt bijna uitsluitend toegepast in de chemische industrie en in zee-water.

De mechanische eigenschappen van technisch zuiver titaan (grade 1, grade 2, enz.) zijn in hoge mate afhankelijk van het zuurstofgehalte. Met toenemend zuurstofgehalte neemt de sterkte toe en de taaigheid af. Stikstof heeft een nog groter effect op de sterkte van ongelegeerd titaan, maar stikstof en ook koolstof verbrossen het materiaal sterker dan zuurstof en de gehalten aan deze elementen worden dan ook zo laag mogelijk gehouden. In figuur 1 is de treksterkte en rekgrens van ongelegeerd titaan (grade 1 t/m grade 7) grafisch weergegeven. De rek tot breuk voor deze soorten neemt met toenemende sterkte af van 24 tot 18%. In dit histogram is ook de treksterkte en rekgrens van de las (overeenkomstig lasmetaal) weergegeven.



figuur 1 Minimum waarden voor de mechanische eigenschappen van ASTM Ti-grades voor basismateriaal en lasverbinding

De meest verkrijgbare technisch zuivere titaansoorten zijn: grade 1, grade 2, grade 3, grade 7 en grade 12. Grade 1 wordt gebruikt voor pijpen in de chemische industrie, grade 2 en 3 voor drukvaten. Voor zoutzuur- en choride-oplossingen worden meestal grade 7 en 12 gebruikt. Plaatmateriaal wordt bijna altijd in zachtgegloeide toestand aangeleverd.

1.3.2 Titaanlegeringen

De meest toegepaste titaanlegering is een legering met 6% aluminium en 4% vanadium (Ti-6Al-4V). Het is een $\alpha + \beta$ legering die betrekkelijk ongevoelig is voor variaties in fabricage omstandigheden. Het is een legering die bij kamertemperatuur niet zo gemakkelijk is te vervormen als technisch zuiver titaan. Het materiaal wordt meestal in gegloeide toestand aangeleverd. De meest bekende titaanlegeringen zijn in tabel 6 op bladzijde 9 vermeld. In deze tabel zijn de legeringen gerangschikt naar hun structuur; α , $\alpha + \beta$, enz.

Een aantal titaanlegeringen is speciaal ontwikkeld voor bepaalde toepassing. Bijvoorbeeld voor toepassing op verhoogde temperatuur: (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr). Andere legeringen hebben een hogere kruipweerstand: (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo). De legeringen Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo en Ti-6Al-4V-ELI (Extra Low Interstitials) hebben een hogere weerstand tegen spanningscorrosie in waterige zoutoplossingen en hebben een hogere breuktaaiheid. De legering Ti-5Al-2,5Sn is een $\alpha + \beta$ legering met een goede lasbaarheid en de ELI-kwaliteit van deze legering wordt gebruikt voor cryogene toepassingen. Meer infor-

matie over de diverse titaanlegeringen en hun toepassingsmogelijkheden zijn te vinden in de diverse handboeken, zoals het Metals Handbook van ASTM (zie referentie in hoofdstuk 14 op bladzijde 11).

2 De lasbaarheid van titaan en titaanlegeringen

2.1 Belangrijke eigenschappen in verband met de lasbaarheid

De lasbaarheid van titaan en titaanlegeringen wordt vooral gekenmerkt door de zeer grote reactiviteit bij temperaturen boven ca. 450°C en de extreme gevoeligheid voor de geringste verontreiniging. Twee dingen zijn bij het lassen van titaan dan ook belangrijk:

- ▶ Een zeer goede gasbescherming;
- ▶ Een zeer zorgvuldige lasnaadvoorbewerking.

Een zeer goede gasbescherming is nodig, omdat titaan heel gemakkelijk reageert met zuurstof, stikstof en waterstof. Voorkomen moet worden dat het vloeibare titaan reageert met lucht, omdat zuurstof en stikstof een grote invloed hebben op de sterkte en taaigheid van het materiaal; te veel zuurstof- en stikstofopname in een las maakt deze uiterst bros. De gasbescherming moet zelfs gehandhaafd blijven totdat de las en de directe omgeving van de las afgekoeld zijn tot ca. 250-300°C.

Gasbescherming is ook nodig aan de onderkant van de las en dit maakt het lassen van titaan vrij lastig. Meer informatie over de gasbescherming wordt gegeven bij de diverse lasprocessen (§ 2.2).

De effectiviteit van de gasbescherming kan worden afgelezen aan de kleur van het gelaste oppervlak. Bij een geringe zuurstofopname heeft de las een lichtgele tot geelbruine kleur. Deze mate van oxidatie is meestal toelaatbaar. Bij hogere zuurstofopname kleurt het oppervlak violet tot donkerblauw en bij nog hogere zuurstofgehalten wordt de las eerst lichtblauw, daarna wit. Een donkerblauwe las kan soms acceptabel zijn, maar een lichtblauwe tot grijs-witte las is absoluut onacceptabel en als dit voorkomt, moet de las in zijn geheel worden verwijderd en moet er opnieuw worden gelast met alle bijkomende voorbereidingen.

Titaan neemt gemakkelijk waterstof op in vloeibare toestand. De opname van waterstof is meestal de oorzaak van poreusheid in de las. Verder worden titaanhydriden gevormd die het materiaal bros maken. Een las in titaan mag zelfs niet meer dan 0,012 gew. % waterstof bevatten. Titaan vormt met koolstof carbiden die eveneens een verbrossende werking hebben. Om die reden moet het te lassen oppervlak uiterst zorgvuldig worden schoongemaakt. Het gebruik van ontvettingsmiddelen als CFC's (chloorfluorkoolstofverbindingen) is verboden. Voor het ontvetten moet aceton of methyl ethyl ketone (MEK) worden gebruikt. Ook mag bij de laatste mechanische bewerking geen snijvloeistof worden gebruikt. Het totaal verwijderen van snijvloeistoffen op een mechanisch bewerkt oppervlak is namelijk uiterst lastig. Verder is het gebruik van markeringsstrepen met bijvoorbeeld een viltstift uit den boze. Krijgt het gelaste product een warmtebehandeling, dan moet erop worden gelet dat het gehele oppervlak vrij is van merkingen en markeringsstrepen met bijvoorbeeld een potlood. De te lassen onderdelen moeten niet met de blote hand, maar met handschoenen worden gehanteerd.

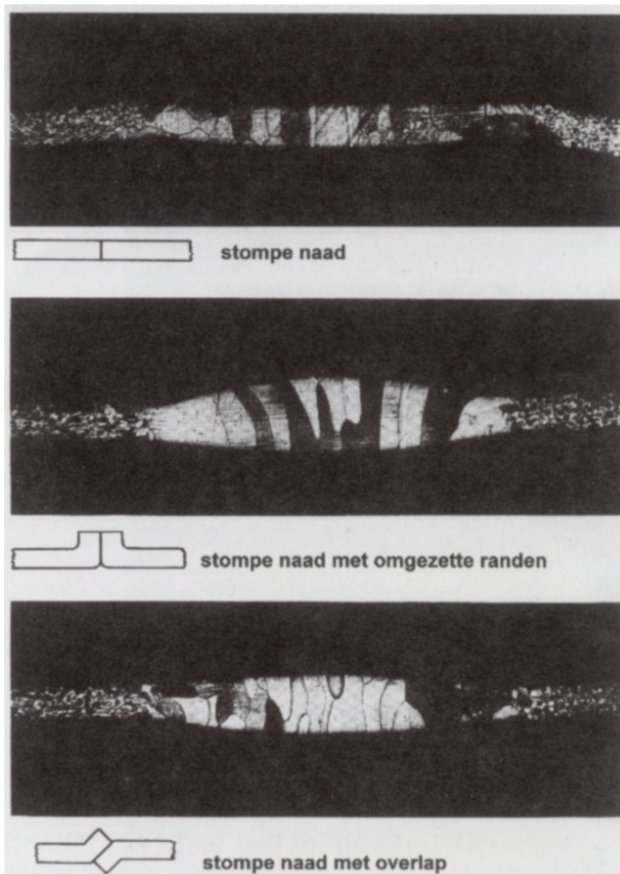
Titaan zet minder uit dan constructiestaal en de vervormingen als gevolg van het lassen blijven dan ook beperkt. De thermische geleidbaarheid van titaan is gelijk aan die van roestvast staal en afgezien van de hoge reactiviteit van titaan lijkt het lassen van titaan op het lassen van roestvast staal.

2.2 Lasprocessen

Zowel smeltlasprocessen als weerstandlasprocessen zijn geschikt om titaan te lassen. Niet alle smeltlasprocessen komen in aanmerking. Zo wordt MIG-lassen van titaan nauwelijks toegepast, omdat de temperatuur van de afgesmolten druppels aanzienlijk hoger is dan de smelttemperatuur van het materiaal. Hoe hoger de temperatuur van het vloeibare titaan, des te hoger de reactiviteit. Een enorme vonkenregen is het gevolg. Toch is het MIG-lassen van titaan niet onmogelijk (zie § 2.2.4). Het onderpoederlassen van titaan wordt niet toegepast, evenmin als het lassen met gevulde draad. Het elektronenbundellassen is voor het verbinden van titaanlegeringen een aantrekkelijk lasproces. Lassen wordt in een ketel onder hoog vacuüm gedaan en zo wordt oxidatie en gasopname van de titaanlas voorkomen. De apparatuur voor het elektronenbundel lassen is duur en slechts weinig bedrijven beschikken over deze apparatuur. Het laserlassen van titaan is goed mogelijk. Echter, de voortloopsnelheid bij het laserlassen is hoog en de las moet over een grote lengte worden beschermd tegen oxidatie. Dit is technisch lastig uitvoerbaar. Desondanks vindt het laserlassen steeds meer toepassing. De lasprocessen waarmee weinig problemen optreden zijn TIG en plasma. Bij beide processen is materiaaltoevoer en warmtetoevoer gescheiden, zodat kan worden voorkomen dat het toevoegmateriaal te warm wordt.

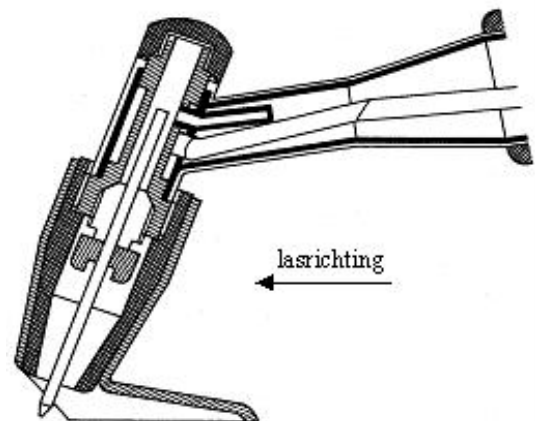
2.2.1 TIG-lassen

Het meest gebruikte smeltlasproces voor het lassen van titaan is het TIG-lassen. Gebruik van toevoegmateriaal vergt veel ervaring, omdat met het inbrengen van de toevoegdraad snel verstoring van de argonbescherming kan optreden. Soms wordt daarom bij dun materiaal gebruik gemaakt van een overlapverbinding. Omgezette randen zijn toe te passen, maar zeer moeilijk in de maatvoering (zie figuur 2).

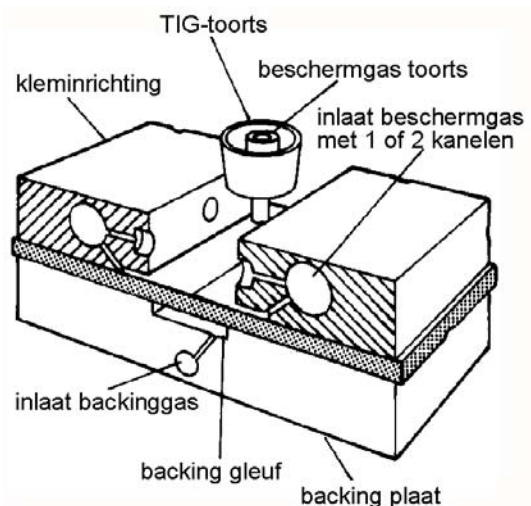


figuur 2 Voorbeelden van stompe naden in dunne titaanplaat

Ook moet extra aandacht worden geschonken aan de gasbescherming. Daarom wordt een speciale gasslof aan de toorts aangebracht (of wordt met een speciaal ontworpen gascup gelast) om het afkoelende materiaal voldoende lang te beschermen (zie figuur 3). Er moet worden gedacht aan het feit dat de las ook aan de onderkant moet worden beschermd om oxidatie te voorkomen (zie figuur 4). In feite gaat het erom dat couveuse condities worden gecreëerd bij het lassen van dit materiaal. Het lassen in een couveuse is, hoewel vaak aangeraden, niet gemakkelijk door de beperkte bewegingsvrijheid. Bovendien moet de couveuse na het inbrengen van het product een aantal malen met beschermgas worden gespoeld en ook moet een inerte gasstroom tijdens het lassen gehandhaafd blijven. Het beste is om ook bij het lassen in een couveuse de gasstroom door de TIG-toorts te handhaven naast de gasstroom in de couveuse.

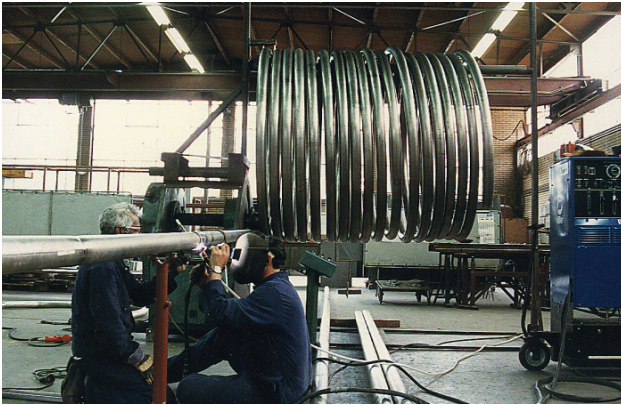


figuur 3 Gasslof voor een TIG-toorts ter bescherming van de afkoelende las



figuur 4 Het TIG-lassen van plaat met extra gasbescherming aan de boven- en onderkant van de platen

Het TIG-lassen van langs- en rondgaande naden in pijpen en drukvaten is goed mogelijk. Belangrijk daarbij is uiteraard een goede gasbescherming aan de buiten- en binnenkant van de pijp. Bij het lassen van een pijp is een toorts voorzien van een aan de diameter van de pijp aangepaste slof onhandig en niet praktisch. Hoe dan toch voor een goede gasbescherming gezorgd kan worden laat figuur 5 zien. Slechts een van de twee lassers is aan het lassen, de andere lasser zorgt voor de extra gasbescherming van de afkoelende las.



figuur 5 Het maken van een spiraal uit rechte pijp bij de firma Oostendorp in Tiel. TIG-lassen met de hand; de tweede lasser zorgt voor bescherming van de afkoelende las

Voor het TIG-lassen moet gebruik worden gemaakt van een hoog zuiver inert gas (meestal argon). De zuiverheid van commercieel verkrijgbare gassen is voldoende, maar voorkomen moet worden dat zuurstof en vocht in het gassysteem kunnen diffunderen. Dit houdt in dat het slangenpakket voor het lassen moet worden gespoeld en gasleidingsystemen onder een geringe overdruk moeten blijven staan. Om diffusie van lucht en vocht in het slangenpakket en leidingsysteem te voorkomen, wordt ook wel een geringe gasstroom gehandhaafd als er niet gelast wordt. Heel gemakkelijk kan worden nagegaan of het gasaanvoersysteem voldoende vrij van zuurstof is, door een proefstuk te lassen. Nog beter is dit ook te doen aan het einde van het lasproces, zodat zekerheid wordt verkregen over de gasbescherming tijdens het lasproces.

2.2.2 Praktische adviezen voor het TIG-lassen

Bij het TIG-lassen moet voor een goede gasbescherming met een voldoende grote gascup worden gewerkt (12,7 tot 19 mm). Oppassen voor gasopname door het toevoegmateriaal, dus het toevoegmateriaal voldoende laten afkoelen in de gasstroom. Gasbescherming handhaven tot de las en toevoegmateriaal afgekoeld zijn tot circa 300°C. Het gebruik van een gaslens voor het creëren van een laminaire gasstroom wordt aanbevolen. Bij het handmatig lassen moet de lasser snelle bewegingen met de toorts voorkomen. Voor het lassen moet de backinggleuf met beschermgas worden gevuld. De gasdruk in de backinggleuf moet laag worden gehouden en bij het lassen van een pijp moet het backing volume zesmaal het volume van het pijpdeel zijn. Om te voorkomen dat las en backingstrip samensmelten, wordt geadviseerd geen vooropening toe te passen. Het oppervlak moet vrij zijn van oxiden en vetten. Maak voor het reinigen van het oppervlak gebruik van aceton of MEK en gebruik een niet pluizende doek.

Voor het TIG-lassen wordt gebruikgemaakt van wolfram elektroden met 1,5 % lantaanoxide. Bij het starten van de boog moet opname van wolfram door de las worden vermeden. Dus niet de boog aanstrijken, maar gebruik maken van een startplaatje, waarop de boog wel kan worden aangestoken, of starten met HF. Voor een optimaal lasresultaat gebruikmaken van een startplaatje en een uitloopplaatje. Kies niet te dun toevoegmateriaal, omdat bij dun toevoegmateriaal de oppervlakte-volumeverhouding van de draad ongunstig is. Hoe kleiner de draad, hoe meer oxiden in de lasnaad. Heb geen haast bij het TIG-lassen van titaan en titaanlegeringen. Het opvoeren van de lassnelheid (voortloop-snelheid) verhoogt de kans op lasfouten. Repareren aan een titaanlas is lastiger dan het repareren van een RVS-

las. De hoge reparatiekosten doen het effect van de hogere lassnelheid op de kostprijs teniet of zullen zelfs hoger zijn. Dus voorkom reparaties.

In tabel 3 wordt een aantal lasparameters gegeven voor het TIG-lassen van titaan.

tabel 3 Richtwaarden lasparameters voor het TIG-lassen van titaan

Plaatdikte (mm)	Toevoegdraad (mm)	Boogspanning (V)	Lasstroom (A)	Lassnelheid (mm/min)
1,5	-	10	90-100	250
1,5	1,6	10	120-130	300
2,3	1,6	12	200-210	300
3,2	1,6	12	220-230	250

Het TIG-lassen wordt toegepast tot materiaaldikte van circa 3 mm. Voor grotere materiaaldiktes komt het plasmalassen in aanmerking. Het is mogelijk tot deze dikte zonder toevoegmateriaal te lassen. Wel moet dan rekening worden gehouden met een lichte inzinking van het gelaste oppervlak.

2.2.3 Plasmalassen

Bij het plasmalassen komen twee technieken in aanmerking. Het zogenoemde key-hole lassen voor materiaaldiktes van 1,5 tot 13 mm en het geleidingslassen. Bij het geleidingslassen kan met een onvolkomen doorlassing worden gewerkt, bij het key-hole lassen is dit niet mogelijk. Het key-hole lassen wordt vaak zonder toevoegmateriaal toegepast, maar dan moet wel met ondersnijding rekening worden gehouden. Een stompe naad in een plaatdikte van 12,7 mm kan met de key-hole techniek worden gelast. De lasverbinding moet dan wel van beide kanten toegankelijk zijn. Voor het lassen van geringe diktes (0,2 tot 0,5 mm) wordt het micro-plasmalassen toegepast.

Als lasnaadvorm bij het key-hole lassen wordt een V-of U-naad toegepast met een opstaand deel afhankelijk van de dikte van het materiaal. De maximale hoogte van het opstaande deel van de lasnaad bedraagt 6 mm. Als sluitlaag wordt dan een geleidingslas met toevoegmateriaal gekozen.

Evenals bij het TIG-lassen zijn een perfecte gasbescherming en het zorgvuldig prepareren van de lasnaad van het grootste belang. Als beschermgassen worden argon en argon-heliumgasmengsels toegepast. Het is bij het plasmalassen van roestvast staal gebruikelijk aan het beschermgas waterstof toe te voegen. Bij het plasmalassen van titaan is dit absoluut niet toegestaan, in verband met waterstofopname door de las en de poreusheid en verbrossing die daardoor optreden.

Door de hogere energiedichtheid van de plasmaboog kan bij vergelijkbare plaatdikte met hogere voortloop-snelheden (lassnelheden) worden gelast. Vergelijk de tabellen 3 en 4. Nog langere gassloffen dan bij het TIG-lassen zijn nodig om de las tegen oxidatie te beschermen.

2.2.4 MIG-lassen

Het probleem bij het MIG-lassen van titaan is dat de temperatuur van de afsplitsende druppels aanzienlijk hoger, en de druppelgrootte veel kleiner is dan bij het TIG-en plasmalassen. De veel hogere reactiviteit van het toevoegmateriaal geeft bij de geringste verstoring van de gasstroom een enorme vonkenregen en een slechte las. Bovendien zorgt de Lorentzkracht als gevolg van de vele kathodevlekken voor een zijdelingse kracht

tabel 4 Richtwaarden voor lasparameters bij het plasma-lassen van titaan en titaanlegeringen

Plaatdikte (mm)	Lastechniek	Beschermgas	Boogspanning (V)	Lasstroom (A)	Lassnelheid (mm/min)	Draadsnelheid (m/min)
0,40	geleidingslas	Ar	-	6	125	-
3,2	key-hole	Ar	24	150	365	1,01
4,8	key-hole	Ar	30	175	365	1,07
6,4	key-hole	Ar	30	160	305	1,14
8	key-hole	Ar	30	172	305	1,22
10	key-hole	75He-25Ar	38	225	250	-
12,7	key-hole	50He-50Ar	36	270	250	-

op de afsplitsende druppel. Afsplitsen heeft plaats via de zwaartekracht, waardoor het lassen in positie sterk bemoeilijkt wordt. Het MIG-lassen is dus allesbehalve gemakkelijk, maar niet onmogelijk. Een ander probleem is de ongunstige oppervlakte-volumeverhouding van de toevoegdraad. De meeste zuurstof wordt dan ook via de draad toegevoerd. Er moet veel meer aandacht aan de oppervlaktekwaliteit van de lasdraad worden besteed dan bij het MIG-lassen van roestvast staal. De lasdraad moet bij voorkeur in een dichte draadkoffer worden opgeborgen en indien dit niet het geval is, worden afgedekt wanneer niet gelast wordt. Tussen twee lasklussen kan de draad het beste in een schone en droge kast worden opgeborgen.

Kortsluitbooglassen, lassen met pulserende stroom en lassen in het sproei-booggebied is dus mogelijk. In het globulaire gebied mag niet worden gelast. Het beste gaat het lassen met pulserende stroom met de draad aan de pluspool. Kortsluitbooglassen is eveneens mogelijk, maar dan moet de draad aan de negatieve pool worden aangesloten, omdat anders geen stabiele kortsluitingen optreden. Bij voorkeur moet worden gelast in horizontale positie. Lassen met pulserende stroom biedt de mogelijkheid om in positie te lassen. Wel moet bij het verticaal neergaand lassen erop worden gelet, dat er geen bindingsfouten ontstaan vanwege de dunvloeibaarheid van het smeltbad. Het MIG-lassen van titaan is de laboratoriumfase nog niet echt ontgroeid en wordt in de praktijk nauwelijks toegepast. Belangrijk is naast het voorkomen van spatten, de beheersing van het smeltbad en het voorkomen van bindingsfouten. Aanbevolen wordt om stekend te lassen onder een geringe hoek (ca. 10°). Om bindingsfouten te voorkomen, moet worden voorkomen dat het smeltbad op de boog gaat voorlopen. Dit is lastig door de dunvloeibaarheid van het titaan. Om het smeltbad te beheersen, wordt bij pulserend lassen o.a. gebruikgemaakt van een dubbelpuls. Tijdens de lage pulsstroomsterkte kan het lasbad enigszins afkoelen en wordt voorkomen dat het te veel gaat uitvloeien. Als beschermgas wordt Ar toegepast. Bij het lassen met pulserende stroom wordt meestal een gasmengsel met 75% Ar en 25% He gebruikt. Evenals bij het TIG- en plasmalassen moet heel veel aandacht worden besteed aan de gasbescherming en de reinheid van oppervlak. In de literatuur worden lasparameters opgegeven voor het MIG-lassen van titaan met een plaatdikte van 3,2 tot 25,4 mm. Voor een eerste keuze van de lasparameters kan het beste worden gewerkt met de lasparameters voor het lassen van austenitisch roestvast staal van vergelijkbare dikte.

2.2.5 Elektronenbundellassen

Elektronenbundellassen wordt voornamelijk toegepast voor titaanlegeringen zoals Ti-6Al-4V. Voor het elektronenbundellassen van titaan is een vacuüm omgeving nodig. Hoe hoger het vacuüm, des te beter zijn de resultaten. De smalle elektronenbundel en de hoge energiedichtheid maken het lassen van relatief dik materiaal mogelijk. Daarnaast kunnen ook dunne materialen worden gelast, doordat de eigenschappen van de elektronenbundel gemakkelijk zijn te wijzigen. Zelden wordt gebruik gemaakt van toevoegmateriaal, zodat precies uitlijnen van de te lassen delen belangrijk is. Bij het lassen van dikkere delen kan ondersnijding optreden en ook kunnen de standaard lasfouten als poreusheid bij onvoldoend vacuüm, slinkholtes en onvoldoende doorlassing optreden. De smalle elektronenbundel maakt een nauwkeurige positionering van de elektronenbundel noodzakelijk, daar anders de kans bestaat dat de lasnaad wordt gemist. Afhankelijk van het vermogen van de elektronenbundel (versnellingspanning, stroomsterkte bundel) en bundelkwaliteit kunnen diktes tot 50 mm in één procesgang worden gelast bij een voortloopsnelheid van ca. 660 mm/min. Bij geringere diktes zijn voortloopsnelheden in m/min mogelijk.

De warmte-inbreng bij het elektronenbundellassen is geringer dan bij het TIG-lassen. Dit kan gunstig uitpakken voor de mechanische eigenschappen van de gelaste verbindingen. De treksterkte, rekgrens en rek tot breuk van de lasverbinding in de legering Ti-6Al-4V zijn na een warmtebehandeling (5 uur gloeien op 700°C) vergelijkbaar met die van het basismateriaal. Echter, de breuktaaiheidswaarden liggen op een niveau van 60 tot 90% van de waarden voor het basismateriaal.

2.2.6 Laserlassen

Titaan kan zowel met de Nd:YAG- als met de CO₂-laser worden gelast. Zowel met continu als met pulserend vermogen. Afhankelijk van de dikte van het materiaal en de instellingen en het vermogen van de laser kan met de key-hole techniek worden gewerkt of met de geleidingstechniek. Het geabsorbeerde vermogen van de laser kan bij de key-hole techniek oplopen tot 90%. Bij het geleidingslassen ligt het geabsorbeerde vermogen aanzienlijk lager. Voor de standaard $\alpha + \beta$ legering Ti-6Al-4V kan met een CO₂-laser van 15 kW een dikte van 15 mm in één procesgang worden gelast.

Ten opzichte van het elektronenbundellassen heeft het laserlassen het voordeel dat niet onder vacuüm gelast hoeft te worden. Een complicatie bij het laserlassen van titaan is de geïoniseerde titaandamp boven het smeltbad. Met een inerte gasstroom moet deze worden weggeblazen, daar deze metaaldamp de laserbundel te veel zal verstrooien. Bij het laserlassen kunnen dezelfde lasfouten (ondersnijding, onvolkomen doorlassing, poreusheid en slinkholtes) optreden als bij het elektronenbundellassen. De mechanische eigenschappen van een laserlas zijn vergelijkbaar met die van een elektronenbundellasse. De las en warmte beïnvloede zone hebben een iets hogere sterkte, maar lagere breuktaaiheidswaarden dan het basismateriaal.

2.3 Druklassen

Titaan en titaanlegeringen kunnen worden verbonden door de te verbinden delen bij verhoogde temperatuur tegen elkaar te drukken. Diffusie aan het grensvlak van de te verbinden delen zorgt ervoor dat de verbinding tot stand komt. Deze techniek wordt diffusielassen genoemd. Als een tussenlaag wordt gebruikt met een lagere smeltemperatuur dan de te verbinden delen wordt van diffusiesolderen gesproken.

Een ander lasproces waarbij titaan en titaanlegeringen gemakkelijk verbonden kunnen worden, is wrijvingsglas-

sen. Door de beide te verbinden delen onder een geringe druk ten opzichte van elkaar te laten roteren, worden de beide delen in het scheidingsvlak voldoende plastisch gemaakt en onder een verhoogde druk komt dan de verbinding tot stand. Bij het ultrasoonlassen wordt met een hoge bewegingsfrequentie één van de te verbinden delen over een geringe afstand in de richting van het verbindingsvlak bewogen. De wrijvingswarmte die ontstaat zorgt voor de nodige plastificering van beide oppervlakken.

Een moderne variant van het wrijvingslassen is het wrijvingsroerlassen. Bij dit laatste proces wordt een warmvaste metalen pin met een hoge rotatiesnelheid tussen de beide te verbinden delen door bewogen. Door de delen steeds stevig tegen elkaar te drukken vormt zich achter de roterende pin de lasverbinding. Explosielassen is voor bepaalde toepassingen een interessant verbindingsproces. Een voorbeeld van explosielassen is het explosief oplassen van een titaanbekleding op staalplaten. Een titaanvoering kan ook explosief worden aangebracht in een stalen buis. Weerstandlassen behoort ook tot de druklasprocessen. Puntlassen, rolnaadlassen en weerstandstuiklassen van titaan kan zonder gasbescherming plaatsvinden. Het afbrandstuiklassen van titaan wordt niet aanbevolen en moet onder gasbescherming plaatsvinden.

2.3.1 Weerstandlassen

Titaan heeft een relatief lage elektrische en thermische geleidbaarheid en om die reden is titaan gemakkelijker te puntlassen dan aluminium. De ruwheid en de reinheid van het oppervlak zijn bepalend voor het lasresultaat. Dit houdt in het zorgvuldig verwijderen van vetten en vuil van het oppervlak en het verwijderen van de oxidehuid. Bij niet al te grote oppervlakken volstaat het borstelen van het oppervlak met een roestvast stalen borstel. Bij grote oppervlakken is chemisch reinigen effectiever, zie de paragraaf over oppervlakte reiniging. Chemisch gereinigde oppervlakken moeten met pluisvrije handschoenen worden opgepakt en niet langer dan 48 uur in een droge omgeving worden opgeslagen. Bij langer opgeslagen platen bestaat de kans op de vorming van niet acceptabele lassen.

Een gasbescherming is niet nodig bij het puntlassen, omdat de oppervlakken stevig tegen elkaar worden gedrukt. Verder bedraagt de lastijd zelden meer dan 0,2 seconden en vindt een snelle afkoeling na het lassen plaats. Bij het rolnaadlassen moet wel voor een goede gasbescherming worden gezorgd, omdat de lassen aaneensluiten en de te verbinden platen veel langer warm blijven. De lengte van de gasbescherming is afhankelijk van de lassnelheid en kan het beste experimenteel worden vastgesteld.

Om verontreiniging van het oppervlak met koper, afkomstig van de laselektroden, te voorkomen, moeten de elektroden zeer goed worden gekoeld. Koperen elektroden (CuCr1 of CuCr1Zr) met een bolvormig uiteinde worden meestal gebruikt. Dergelijke elektroden geven slechts een geringe en meestal acceptabele beschadiging (indrukking) van het oppervlak. Ook bij het rolnaadlassen wordt van een radius voorzien wieloppervlak gebruikgemaakt.

Voor het puntlassen van technisch zuiver titaan kunnen de lasparameter instellingen (lasdruk, stroomsterkte en lastijd) van roestvast staal worden gebruikt. Voor titaanlegeringen gelden andere instellingen door verschil in thermische en elektrische geleidbaarheid.

2.3.2 Wrijvingslassen

Voor het wrijvingslassen van titaanlegeringen zijn twee technieken; een techniek waarbij een vliegwielfconstructie wordt gebruikt en de rotatiesnelheid tijdens het las-

proces afneemt, en een techniek waarbij de rotatiesnelheid constant is. Voor het wrijvingslassen van titaanlegeringen wordt de vliegwielfconstructie het meest toegepast. De tangentiële snelheden bij het wrijvingslassen variëren van 5 tot 12 m/s en de lasdruk van 50 tot 100 MPa. De lasdruk voor titaanlegeringen is lager dan die voor gelegeerd staal en nikkellegeringen als gevolg van de slechtere warmtegeleiding van dit materiaal. De mechanische eigenschappen van de lasverbinding zijn vergelijkbaar met die van het basismateriaal. Voor hogere vermoeiingseigenschappen moet spanningsarm gegloeid worden.

Snel opwarmen van de te verbinden vlakken en zorgen voor voldoende druk vanaf het begin van het proces zijn belangrijke voorwaarden om een goede lasverbinding te krijgen. De rotatiesnelheid of tangentiële snelheid ligt hoger (tot 40%) dan bij het lassen van koolstofstaal. De lasdruk daarentegen is aanzienlijk lager en varieert van 10 tot 30% van de waarden bij koolstofstaal.

2.3.3 Ultrasoonlassen

Ultrasoonlassen is zowel geschikt voor het lassen van gelijksoortige als ongelijksoortige metalen. Met deze techniek kan titaan aan aluminium, koper, diverse staal-soorten, nikkellegeringen, magnesiumlegeringen en een aantal andere exotische metalen worden verbonden. Het ultrasoonlassen blijft ook voor titaan beperkt tot relatief dunne materialen (folie). Het ultrasoonlassen is voor titaan echter van weinig belang.

2.3.4 Explosielassen

Het explosief oplassen van staalplaat en het inwendig bekleden van stalen buizen met titaan is al genoemd. Titaan kan met een groot aantal metalen explosief worden verbonden, maar op commerciële basis worden alleen verbindingen gemaakt met koolstofstaal, gelegeerd staal, roestvast staal, aluminium-, koper- en nikkellegeringen.

2.3.5 Wrijvingsroerlassen

Wrijvingsroerlassen wordt in de scheepsbouw en lucht- en ruimtevaart al veelvuldig toegepast voor het verbinden van aluminiumlegeringen. De goede mechanische eigenschappen, het milieuvriendelijke proces en de geringe optredende vervormingen maken dit proces ook aantrekkelijk voor het lassen van titaan. Regelmatig verschijnen er publicaties over het wrijvingsroerlassen van titaan en titaanlegeringen. Het wrijvingsroerlassen van titaan is echter de laboratoriumfase nog niet ontgroeid. Dit wil niet zeggen dat het onder praktijkomstandigheden onmogelijk is, maar als gevolg van de hogere smelttemperatuur van titaan worden aanzienlijk hogere eisen aan het materiaal van de roerpen gesteld. Zo wordt ook aanbevolen de schouder van de roerpen te koelen. Extra complicerend bij het wrijvingsroerlassen van titaan is, dat bij voorkeur gewerkt moet worden in een inerte atmosfeer.

2.3.6 Diffusielassen en diffusiesolderen

Dit is een van de meest gebruikte verbindingstechnieken voor titaanlegeringen in de vliegtuigbouw en kan het beste in een beschermende atmosfeer (Argon) worden uitgevoerd. Meestal wordt geen tussenlaag gebruikt, maar voor kritische toepassingen in hoogsterke titaanlegeringen wordt bijvoorbeeld technisch zuiver titaan als tussenlaag toegepast. Het behoeft geen verdere uitleg dat het oppervlak vlak, glad en heel schoon moet zijn. Er wordt zowel bij relatief hoge als lage temperaturen gelast. Hoe hoger de temperatuur, des te geringer de druk. Boven een temperatuur van circa 550°C neemt de sterkte van titaanlegeringen sterk af. De drukken voor het diffusielassen zijn daardoor gering en vaak niet hoger

dan enkele MPa's. Belangrijker is de temperatuur waarop wordt gelast. Het diffusielassen wordt ook wel gestuurd door de druk zo in te stellen, dat een bepaalde deformatiesnelheid wordt bereikt. Voor de $\alpha + \beta$ legeringen wordt een procestemperatuur van 25 tot 40°C beneden de β -overgangstemperatuur gekozen. De veel toegepaste legering Ti-6Al-4V met een overgangstemperatuur van 996°C wordt gelast in het temperatuurgebied van 925 tot 955°C. De lastijd is afhankelijk van de ruwheid van het oppervlak, de temperatuur en de druk, en bedraagt minimaal 30 tot 60 minuten, maar ligt meestal tussen 2 tot 4 uur. De mechanische eigenschappen van de verbinding komen overeen met die van het basis-materiaal.

De techniek van het diffusiesolderen is identiek met die van het diffusielassen, met dit verschil dat de druk lager is en de aandrukkracht eigenlijk alleen dient om de te verbinden delen bijeen te houden. Er wordt meestal gebruikgemaakt van een tussenlaag uit koper, die elektrolytisch wordt aangebracht. Het koper vormt aan het grensvlak met titaan een vloeibaar eutecticum. De sterkte van diffusiegesoldeerde verbindingen is vergelijkbaar met die van het basismateriaal, maar de corrosie-eigenschappen en de kerftaaiheid liggen lager.

2.4 Hoogtemperatuursolderen

Structuurveranderingen in titaanlegeringen zullen bij het solderen als gevolg van de lagere temperaturen kleiner zijn dan bij het smellassen. Om die reden is solderen vooral interessant voor de hoogsterke titaanlegeringen. Toch moet er voor opgepast worden dat de fasetransformatietemperatuur van de titaanlegering niet wordt overschreden, daar anders te grote structuurveranderingen zullen optreden. Voor de precipitatiehardende legeringen moet met de oplos- en precipitatie-temperatuur rekening worden gehouden.

Zowel het in vacuüm of onder inerte atmosfeer bij hoge temperatuur solderen van titaanonderdelen wordt op grote schaal toegepast. Het beschermgas moet zeer zuiver zijn, sporen van vocht of waterstof en sporen zuurstof en stikstof maken het titaan bros. Het bij het vacuüm solderen vaak toegepaste geforceerd koelen moet dan ook met zeer zuiver inert gas gebeuren. Verschillende toevoegmaterialen zijn beschikbaar, maar onder corrosieve omstandigheden moet eerst worden nagegaan of het soldeer niet preferent wordt aangetast.

Voor soldeertemperaturen onder de 600°C wordt de zilverlegering Ag-9Pd-9Ga veel toegepast. Als de soldeercyclus kort kan worden gehouden, dan kan bij dit soldeermateriaal zonder gasbescherming worden gewerkt. Zuiver zilver als soldeermateriaal geeft betere resultaten dan de zilverlegeringen, maar is wel duurder. De aluminiumlegeringen 3003 en 4043 kunnen ook worden gebruikt als de lagere smeltemperatuur van deze legeringen acceptabel is. In de literatuur wordt een groot aantal soldeermaterialen vermeld. Vaak zijn die ontwikkeld voor een speciale legering en/of speciale toepassing. De verkrijgbaarheid van dergelijke soldeersoorten is echter heel beperkt. In tabel 5 wordt een aantal meest gangbare en goed verkrijgbare soldeersoorten vermeld.

Voor de Ti-Ni-Cu legeringen winnen aan belangstelling en zijn in verschillende samenstellingen verkrijgbaar.

Bij het gebruik van binddraad en/of stelgereedschap dient er aan gedacht te worden dat titaan en titaanlegeringen bij hoge temperatuur kunnen reageren met andere materialen. Bijvoorbeeld, dat titaan het zuurstof uit de oxidehuid van roestvast staal kan opnemen, maar ook nikkel dat met titaan een laagsmeltend eutecticum vormt bij 940°C.

Een bijzondere toepassing van het hoogtemperatuursolderen is de verbinding van titaan aan keramiek en ook het verbinden van keramiek aan andere metalen door

gebruik te maken van een titaanhoudend soldeer. Hoogspanningsisolatoren zijn hier een goed voorbeeld van.

tabel 5 Soldeermaterialen voor het hoogtemperatuursolderen van titaan

Soldeerlegering	Liquidus temperatuur (°C)	Smelttraject (°C)
Ag-5Al	810	30
Ti-20Zr-20Cu-20Ni	848	6
Ti-15Ni-15Cu (diffusie)	960	50
Ag-26,7Cu-4,5Ti	850	20
Ag-9Pd-9Ga	880	35
Ag-21,3Cu-24,7Pd	950	50

3 Metallurgische lasbaarheid van titaan

Technisch zuiver of ongelegeerd titaan is op de hoge reactiviteit van het materiaal na uitstekend lasbaar. Wel moet met een zo laag mogelijke warmte-inbreng worden gelast, om korrelgroei in de las en aan de smeltlijn te beperken. De stolling van de las verloopt via kiemvorming op bestaande kristallen aan de smeltlijn (epitaxiale groei). Bij langzame afkoeling (lassen van dunne plaat) ontstaan daarbij grote kolomvormige kristallen in de las (zie figuur 2). Dit is nadelig voor de sterkte en taaiheid van het materiaal. De warmte-inbreng bij het lassen van ongelegeerd titaan moet dan ook beperkt blijven. Bij het lassen van dikker materiaal daarentegen kan in de las een martensietachtige structuur worden gevormd bij geringe warmte-inbreng. Een dergelijke structuur is nadelig voor de taaiheid van het materiaal.

De metallurgische lasbaarheid van de titaanlegeringen zal afhangen van de chemische samenstelling en de warmtebehandeling die het materiaal heeft ondergaan. Voor de precipitatiehardende hoogsterke legeringen is opnieuw een precipitatieharding na het lassen nodig voor het bereiken van optimale mechanische eigenschappen. De veel gebruikte $\alpha + \beta$ legering Ti-6Al-4V is betrekkelijk ongevoelig voor de snelheid waarmee wordt afgekoeld en een warmtebehandeling na het lassen is meestal niet nodig.

4 Thermisch snijden

Het thermisch snijden van titaan is niet gemakkelijk door de hoge reactiviteit van dit materiaal. Het acetyleen-zuurstof of autogeen snijden is mogelijk, maar door de aanzienlijke opname van zuurstof aan het snijvlak is mechanisch nabewerken noodzakelijk tot een diepte olopend tot 1,5 mm. Hoewel titaan met een drie keer zo hoge snelheid als staal kan worden gesneden, is het autogeen snijden geen optie voor titaan en titaanlegeringen. Snijden met de laser en plasmasnijden zijn betere methoden en worden veelvuldig toegepast. Bij lasersnijden wordt gebruik gemaakt van argon als beschermgas en als gas om het vloeibare metaal weg te blazen. Lasersnijden is aantrekkelijk door de hoge snijprecisie. Echter, de ontwikkelingen op het gebied van het plasmasnijden hebben dit proces tot een duidelijke concurrent van het lasersnijden gemaakt. Snijnsnelheid en precisie bij het plasmasnijden zijn vergelijkbaar geworden. Mechanische nabewerking van het gesneden oppervlak is ook bij lasersnijden en plasmasnijden nodig.

5 Lasnaadvormen

Afgezien van de eisen die de lasprocessen stellen aan de te gebruiken lasnaadvormen, moet bij alle titaankwaliteiten rekening worden gehouden met de mogelijk-

heid tot optimale bescherming van boven- en onderzijde van de lasnaad en lasomgeving. Laskanten en de directe omgeving van de las moeten uiterst zorgvuldig worden gereinigd (zie ook hoofdstuk 9).

Zoals reed eerder aangegeven, wordt bij het TIG-lassen van zeer dunne plaat geen toevoegdraad gebruikt maar een overlapas toegepast.

6 Lastoevoegmaterialen

In het algemeen wordt als toevoegmateriaal dezelfde samenstelling als het basismateriaal gekozen, met dien verstande dat meestal gekozen wordt voor een ELI-kwaliteit (zie tabel 6). Bij het lassen van starre constructie uit ongelegeerd titaan, bijvoorbeeld grade 3, kan om scheurvorming in de las te voorkomen, worden gekozen voor grade 2 als toevoegmateriaal.

7 Beschermgassen

Zeer zuiver argon is het meest gebruikte beschermgas voor alle titaankwaliteiten. Bij het TIG-lassen wordt zuiver argon toegepast. Ook voor het MIG-lassen wordt meestal argon gebruikt. Voor het lassen van grotere materiaaldiktes wordt bij het plasmalassen ook wel gebruik gemaakt van argon-helium gasmengsels (zie tabel 4).

8 Gloeibehandelingen

Ongelegeerd titaan en de meeste titaanlegeringen worden als regel in de zachtgegloeide (annealed) conditie gelast. Slechts enkele legeringen worden na het lassen opnieuw gegloeid en veredeld (hardening + ontlaten of een precipitatieharding).

Spanningsarmgloeien van ongelegeerd titaan is zelden nodig. Het is bovendien lastig, omdat dit bijna altijd in een inerte atmosfeer moet gebeuren. Voor grotere materiaaldiktes en bij aanzienlijke vervormingsbeperking

tijdens het lassen, kan spanningsarmgloeien wel nodig zijn. Verder is spanningsarmgloeien gunstig voor verbetering van de vermoeiingseigenschappen van de gelaste constructie en neemt de gevoeligheid voor spanningscorrosie af. In tabel 7 wordt voor één type ongelegeerd titaan en een tweetal veel toegepaste titaanlegeringen de spanningsarmgloeitemperatuur vermeld.

9 Werkplaatscondities

9.1 Algemeen

Het verwerken en lassen van titaan en titaanlegeringen kan het beste in een afzonderlijke, schone ruimte plaatsvinden. Deze ruimte moet niet gebruikt worden voor het lassen en verwerken van constructiestaal en aluminiumlegeringen, want slijpstof van andere materialen is funest. De ruimte moet tochtvrij zijn en stofvrij worden gehouden. Werkbanken moeten van een kunststof toplaag worden voorzien. Vaak worden vellen dik papier toegepast om werkstukken en gereedschappen op te leggen.

tabel 7 Spanningsarmgloeitemperaturen en tijden voor een drietal titaansoorten

Legeringstype	Temperatuur (°C)	Gloeitijd (h)
Ongelegeerd Ti-0,15Pd	425	8
	480	0,75
	540	0,5
Ti-20Zr-20Cu-20Ni	480	20
	540	6
	595	2
	650	1
Ti-6Al-4V (gegloeid)	480	20
	540	2
	595	1

tabel 6 Chemische samenstelling in gewichtsprocenten van titaan en titaanlegeringen gebruikt als lastoevoegmaterialen volgens AWS-A5.16-classificatie

AWS classificatie	%C	%O	%H	%N	%Al	%V	%Sn	%Cr	%Fe	%Mo	%Nb	%Ta	%Pd
ongegeerd α-titaan													
ERTi-1-ELI	,03	,10	,005	,012					,10				
ERTi-2	,05	,10	,008	,020					,20				
ERTi-3	,05	,15	,008	,020					,20				
ERTi-4	,05	,25	,008	,020					,30				
ERTi-0,2Pd	,05	,15	,008	,020					,25				,15-,25
$\alpha(\beta)$titaanlegeringen													
ERTi-5Al-2,5Sn	,05	,12	,008	,030	4,70-5,60		2-3		,40				
ERTi-5Al-2,5Sn-ELI	,04	,10	,005	,012	4,70-5,60		2-3		,25				
ERTi-6Al-2Nb-1Ta-1Mo	,04	,10	,005	,012	5,50-6,50				,15	,50-1,50	1,5-2,5	,5-1,5	
ERTi-8Al-1Mo-1V	,05	,12	,008	,030	7,35-8,35	,75-1,25			,25	,75-1,25			
$\alpha\beta$-titaanlegeringen													
ERTi-3Al-2,5V	,05	,12	,008	,020	2,50-3,50	2,0-3,0			,25				
ERTi-3Al-2,5V-ELI	,04	,10	,005	,012	2,50-3,50	2,0-3,0			,25				
ERTi-6Al-4V	,05	,15	,008	,020	5,50-6,75	3,5-4,5			,25				
ERTi-6Al-4V-ELI	,04	,10	,005	,012	5,50-6,75	3,5-4,5			,15				
β-titaanlegering													
ERTi-13V-11Cr-3Al	,05	,12	,008	,030	2,50-3,50	12,5-14,5		10-12	,25				
N.B.:													
- $\alpha(\beta)$ titaanlegeringen met een gering % β -fase worden ook wel super- α of near- α genoemd.													
- de enkele % waarden zijn maxima.													
- ELI zijn legeringen met een zeer laag % interstitiële elementen													

Het papier kan gemakkelijk worden vervangen bij vervuiling. Het gereedschap moet uitsluitend voor titaan en titaanlegeringen worden gebruikt. Voor de snijdende mechanische bewerkingen geen zwavel- en chloorhoudende snijolie gebruiken. Werkstukken ontvetten met aceton en/of alcohol.

Soms moet aanvullend worden gebeitst. Werkkleding met een lichte kleur heeft de voorkeur om het schoon werken te benadrukken. Bij het hanteren van schoon-gemaakte oppervlakken moeten niet pluizende handschoenen worden gebruikt ter voorkoming van vingerafdrukken.

9.2 Lasvoorbereiding en lasuitvoering

Een zorgvuldige gasbescherming die gehandhaafd moet worden tot de las voldoende is afgekoeld is een primaire vereiste bij het smeltlassen van titaan en titaanlegeringen (zie de § 2.2.1 over het TIG-lassen en § 2.2.2 over de te nemen maatregelen bij het TIG-lassen). Voor de andere lasprocessen geldt dat de gasbescherming lastiger wordt en meer aandacht vereist, naarmate de voortloopt snelheid (lassnelheid) toeneemt.

Vóór het lassen de lasapparatuur controleren en daarbij vooral aandacht besteden aan de gastoevoerleidingen. Op een testplaat een proeflas maken ter controle van de juiste lascondities en de gas voor- en nastroomtijden. Alle laskanten en de directe lasomgeving moeten absoluut schoon zijn. Licht schuren en ontvetten met aceton is een gebruikelijke werkmethode. Bij het meermalen lassen na elke lasrups eventuele oxidatie (kleuring) door schuren of slijpen wegnemen en schuur- of slijpresten zorgvuldig verwijderen. Alleen strogeel en lichter is toelaatbaar. Voorkom tocht tijdens de laswerkzaamheden (openstaande deuren en het in- en uitlopen van ander personeel). Constructief zijn er geen bijzondere beperkingen aan het gebruik van titaan, zolang boven- en onderzijde van de lassen goed beschermd kunnen worden. Belangrijk is dat voor het lassen het oppervlak en de laskanten goed schoon worden gemaakt. Voor het afspoelen van het oppervlak moet geen water uit de kraan worden gebruikt, maar gedeïoniseerd water. Om olie, vingerafdrukken, vet, verf en ander vreemd materiaal van het oppervlak te verwijderen, moet bijvoorbeeld aceton worden gebruikt of methyl ethyl ketone (MEK). De op het oppervlak aanwezige oxidehuid kan met een roestvaststalen borstel worden verwijderd bij kleine producten, maar voor grote oppervlakken kan het beste gebeitst worden met een waterige oplossing van 2 tot 4 % waterstoffluoride (HF) en 30 tot 40 % salpeterzuur (HNO₃), gevolgd door spoelen met gedeïoniseerd water en drogen. Met HF moet voorzichtig worden omgegaan en contact met de huid moet absoluut worden vermeden. Na het beitsen moeten de plaatdelen met pluivrije handschoenen aangepakt worden om opnieuw contaminatie te voorkomen.

10 Lassen van titaan aan andere materialen

Bij het lassen van ongelijksoortige titaanlegeringen wordt meestal het toevoegmateriaal van de titaankwaliteit met de laagste sterkte en/of hoogste taaiheid gekozen.

Titaan is metallurgisch gezien goed te lassen aan zirkoon, niobium, tantaal, molybdeen, vanadium en wolfram. Deze combinaties zijn echter van weinig praktisch belang. Met vrijwel alle andere metalen geeft titaan brosse intermetallische verbindingen die het smeltlassen onmogelijk maken. Kouddruklassen, zoals o.a. het wrijvingslassen van titaan aan aluminium, koper, nikkel en roestvast staal is wel mogelijk en wordt ook op ruime schaal toegepast, evenals het explosief bekleden van staalplaat met titaan (titaan-cladsteel), zie § 2.3.4 'explosielassen'.

10.1 Titaanbekleding op andere metalen

Bij het lassen van met titaan beklede staalplaat wordt het titaan ter plaatse van de naad weggenomen en het staal separaat gelast (zie figuur 6). Daarna afdekken van de staalverbinding door een losse plaat titaan, die met hoeklassen op het titaan-clad wordt gelast. Door voor een voldoende dikke titaanlaag te kiezen, wordt voorkomen dat bij het aanbrengen van de hoeklassen opmenging van titaan en staal kan plaatsvinden.



figuur 6 Lasverbinding in met titaan beklede staalplaat

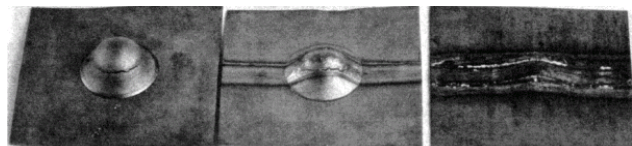
11 Kwaliteitscontrole

Als er iets mis is gegaan met de gasbescherming, is dit te zien aan de verkleuring van het oppervlak. Uitsluitel of die las moet worden afgekeurd, kan worden verkregen door een hardheidsmeting. Afgekeurde lassen moeten in hun geheel worden verwijderd, omdat de eenmaal opgenomen zuurstof en/of stikstof in de las op geen enkele manier er weer uit te halen is. Via microhardheidsmetingen kan een schatting worden gemaakt van het zuurstofgehalte van de las. Het percentage zuurstof volgt uit de relatie:

$$\%O_2 = \left(\frac{VHN - 65}{310} \right)^2$$

Globaal is een absolute toename van $\leq 0,05$ % zuurstof toelaatbaar, bij een toename van meer dan 0,2% zuurstof wordt de las zo bros, dat vaak direct scheurvorming optreedt. Uit de praktijk is gebleken dat een hardheidsverschil tussen de las en het moedermateriaal van niet meer dan 40 punten toelaatbaar is. Een gegloeide plaat heeft een hardheid van maximaal 140 HV, de las mag dan een maximale hardheid hebben van 180 HV.

Voor het bepalen van de mechanische eigenschappen van de lasverbinding en de controle op het lasproces kunnen kwalificatieproeven worden uitgevoerd. Als er dan voor wordt gezorgd dat bij het lassen van het product geen extra verkleuring van de las optreedt, kan er vanuit worden gegaan dat de lassen voldoen aan de gestelde waarden voor de mechanische eigenschappen. Voor het meten van de taaiheid van een lasverbinding kunnen buigproeven worden uitgevoerd, of kan gebruik worden gemaakt van de Erichsenproef (zie figuur 7).



figuur 7 Erichsenproeven op gelaste titaanplaat

12 Praktijkvoorbeelden

Titaan en titaanlegeringen combineren een goede sterkte met een relatief laag gewicht (hoge sterkte-gewichtsverhouding) en zijn om die reden aantrekkelijke constructiematerialen. De hoge prijs van titaan heeft echter een ruime toepassing ervan beperkt. Verbeteringen in het productieproces hebben weliswaar geleid tot een ruimere toepassing, maar de prijs van dit metaal blijft een remmende factor. Voor toepassingen in de sport heeft titaan de nodige concurrentie gekregen van de

vezelversterkte kunststoffen (koolstof-, aramide- en glasvezel) en van de hoogsterkte aluminiumlegeringen. Technisch zuiver titaan of ongelegeerd titaan vindt ruime toepassing in de (petro)chemische, farmaceutische en voedingsmiddelenindustrie. De grootste toepassing van titaanlegeringen is het gebruik voor hoogbelaste onderdelen in de lucht- en ruimtevaart. De legering Ti-6Al-4V wordt daarbij het meest toegepast.

Een interessante toepassing van titaan is het gebruik voor brilmonturen, horlogebandjes en voor sieraden. Van de mogelijkheid om door oxidatie van het oppervlak een kleur aan te brengen, wordt ruimschoots gebruik gemaakt.

In de architectuur wordt titaan vanwege zijn decoratieve eigenschappen (matgrijze kleur) en goede weersbestendigheid, ondanks de hoge prijs, meer en meer toegepast. Overkappingen van spoorwegstations en sporthallen in een aantal Arabische landen zijn daarvan voorbeelden.

12.1 Apparaten voor de (petro)chemische industrie

Het lassen van titaan is, als voor een optimale gasbescherming wordt gezorgd, niet veel moeilijker dan het lassen van roestvast staal. Voor kritische toepassingen in de chemische industrie is echter een gedegen kennis van het materiaal en de manier waarop het gelast moet worden van groot belang in verband met veiligheid en milieu. Ook in Nederland is er een aantal bedrijven dat ruime ervaring heeft op dit gebied.

Een voorbeeld van zeer hoogwaardig laswerk voor de (petro)chemische industrie wordt gegeven in figuur 8.



figuur 8 Kolom in 13 mm dik technisch zuiver titaan grade 2 (Oostendorp Apparatenbouw, Tiel); Lasproces plasmalassen

12.2 Onderdelen voor lucht- en ruimtevaart

De zeer gunstige sterkte-gewichtsverhouding van titaanlegeringen, gecombineerd met de uitstekende weers- en corrosiebestendigheid, zijn uitgangspunten voor vele toepassingen in lucht- en ruimtevaart: Voorbeelden daarvan zijn:

- ▶ heteluchtsystemen in vliegtuigen (airconditioning);
- ▶ "anti-icing-systems" (leidingsystemen);
- ▶ "fire-walls" (in vliegtuigen);
- ▶ brandstoftanks;
- ▶ vleugelsecties.

Voor toepassingen in de lucht- en ruimtevaart wordt vaak gekozen voor het elektronenbundellassen, omdat met dit lasproces een optimale laskwaliteit wordt verkregen bij minimale krimp en vervorming. Ook economisch gezien is dit vaak de beste oplossing. Voor legeringen waarbij door het lassen de eigenschappen sterk worden beïnvloed, wordt vaak voor diffusielassen of diffusiesolderen gekozen als verbindingsproces.

12.3 Orthesen en prothesen

Titaan is volkomen resistent tegen lichaamsvocht, geeft geen allergische reacties en is sterk en licht, dus het aangewezen materiaal voor orthesen en prothesen. De toepassing in de medische wereld is dan ook enorm toegenomen. Ondanks de hoge prijs van titaan is het belang voor de patiënten enorm. Een titaan orthese is vele malen lichter dan de uitvoering in een hoog gelegeerde roestvaste staalsoort. Denk daarbij eens aan orthopedische orthesen van heup tot voet die vele kilo's wegen.

12.4 Brilmonturen, horlogebandjes en sieraden

In deze branche wordt meer en meer gebruik gemaakt van titaan, omdat het volkomen resistent is tegen lichaamsvocht en bovendien sterk en licht is. Een aantrekkelijk lasproces voor deze toepassingen is laserlassen. Daarbij wordt in een couveuse gelast. Ook edelsmeden maken tegenwoordig gebruik van deze door verschillende leveranciers vervaardigde laserlasinstallaties.

13 Samenvatting

Ongelegeerd titaan is goed lasbaar, mits de juiste voorzorgen ten aanzien van bescherming worden genomen. De meeste titaanlegeringen zijn in de zachtgegloeide conditie goed tot redelijk lasbaar. Voor het verkrijgen van de optimale eigenschappen moeten sommige legeringen na het lassen een gloeibehandeling ondergaan. Indien men nooit met deze materialen heeft gewerkt, doet men er goed aan eerst informatie in te winnen bij de leverancier of bij bedrijven en/of instellingen die hier reeds ervaring mee hebben.

14 Normen en handboeken

Normen

NEN-EN-ISO 24034 Ontw. A1 (mei 2007)
Welding consumables-Solid wires and rods for fusion welding of titanium and titanium alloys. Classification (ISO/DIS 24034:2005/DAmD 1:2007, IDT).

NEN-EN-ISO 24034 (oktober 2005)
Lastoevoegmaterialen - Massieve draad en staaf voor smellassen van titanium en titaniumlegeringen - Indeling.

NEN-EN-ISO 5817 (nl)
Lassen - Smeltlasverbindingen in staal, nikkel, titanium en hun legeringen (elektronenbundel- en laserlassen uitgezonderd) - Kwaliteitsniveaus voor onvolkomenheden (ISO 5817:2003, gecorrigeerde versie 2005, inclusief correctieblad C1: 2006. IDT).

Handboeken

Welding Handbook Volume 4, Part 2, Eight edition (1998). Selection and Weldability of Conventional Titanium Alloys.

ASM Handbook on line, Ninth Edition, Selection of Nonferrous Corrosion-Resistance Materials; Selection of Cobalt-, Titanium-, Zirconium- and Tantalum-Base Corrosion-Resistance Alloys.

Toelichting:

Deze voorlichtingspublicatie is opgesteld in opdracht van de Vereniging FME-CWM in het kader van het project 'Updaten VM publicaties' en is een update van de door het NIL uitgegeven publicatie "Lassen van titaan en titaanlegeringen" uit 1998. Hierbij waren de volgende organisaties betrokken: NIL, NIMR, SenterNovem, Syntens, TNO Industrie en Techniek en de Vereniging FME-CWM/Industrieel Technologie Centrum (ITC).

Auteur:

De auteur, Theo Luijendijk (Technische Universiteit Delft), heeft de oorspronkelijke publicatie aangepast aan de eisen van deze tijd.

Technische informatie:

Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,
2713 HX Zoetermeer
Correspondentie-adres: Postbus 190,
2700 AD Zoetermeer
Telefoon: 088 - 400 85 60
Fax: 079 - 353 11 78
E-mail: info@nil.nl
Internet: www.nil.nl

Informatie over, en bestelling van VM-publicaties, Praktijkaanbevelingen en Tech-Info-bladen:

Vereniging FME-CWM/Industrieel Technologie Centrum (ITC)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,
2713 HX Zoetermeer
Correspondentie-adres: Postbus 190,
2700 AD Zoetermeer
Telefoon: (079) 353 11 00/353 13 41
Fax: (079) 353 13 65
E-mail: info@fme.nl
Internet: www.fme.nl

© Vereniging FME-CWM/april 2008 - 01

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM
Afdeling Technologie en Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon 079 - 353 11 00
telefax 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: www.fme.nl



Netherlands Institute
for Metals Research



SenterNovem

