



Titaan, een goed alternatief(3)

Ing. N.W. Buijs,

Van Leeuwen Stainless BV, Beesd

De corrosieweerstand van sterke titaanlegeringen, de warmte-overdracht en de mechanische en fysische eigenschappen zijn o.a. de items van deze derde aflevering over het materiaal titaan.

De meeste titaanlegeringen met hogere mechanische sterkten bieden een prima weerstand tegen algemene putcorrosie in neutrale of bijna-neutrale omstandigheden die nooit hoog oxiderend of sterk reducerend worden. De metallurgische conditie van de legering speelt een relatief geringe rol in de corrosieprestatie omdat de stabiele oxidehuid op het titaan ook hier verantwoordelijk is voor de passiviteit.

Indien het metaal met diepe spleten wordt blootgesteld aan hete waterige chloride media zal de weerstand tegen

spleetcorrosie geleidelijk afnemen in tegenstelling tot ongelegeerd titaan. Indien er echter aan het titaan molybdeen is toegevoegd, zal er juist weer een uitstekende weerstand tegen spleetcorrosie ontstaan. Het is om deze reden dat de legering 3Al8V6Cr4Zr4Mo is ontwikkeld, omdat de combinatie van hoge sterkte, lage soortelijke massa en goede corrosiebestendigheid op zich bijzonder uniek te noemen is. Zo'n legering werd al snel favoriet als pijpmateriaal in hete verzuurde oliebronnen, geothermische zoutkoepels

en andere toepassingen die diep in de aarde nodig zijn.

De algemene weerstand tegen corrosie van titaanlegeringen met hoge sterkte in sterk oxiderende- of sterk reducerende milieu's zal afnemen indien het aluminium en/of vanadium gehalte in de legering gaat toenemen. Een toename van deze bestendigheid in hete reducerende zuren kan bereikt worden door het molybdeengehalte te laten toenemen.

De effecten van de diverse legeringselementen op de corrosie van titaan is uitvoerig bestudeerd zodat er aller-

lei geschikte gelegeerde kwaliteiten zijn ontstaan in diverse agressieve milieu's. Een ander belangrijk feit dat men dient te overwegen is de bestendigheid tegen corrosie-spanningsscheuren. Ofschoon de gebruikelijke industriële titaankwaliteiten in het algemeen immuun zijn voor spanningsscheurcorrosie die veroorzaakt wordt door chloriden, blijkt dat titaanlegeringen met hogere sterktes een afnemende taaiheid en/of versnelde groei van scheurtjes te zien geven in halogene omgevingen.

De meeste van deze legerin-

gen zullen tot een temperatuur van 250°C niet of nauwelijks gevoelig zijn voor deze vorm van corrosie ongeacht of het oppervlak glad is of voorzien is van inkepingen. Echter, boven deze temperatuur dient men terdege rekening te houden met het feit dat deze gevreesde corrosievorm zal ontstaan in diverse hete zoutoplossingen. Titaanlegeringen met hoge sterktes kunnen behoorlijk tegen deze spanningsscheurcorrosie worden beschermd door de juiste samenstelling van het metaal en de juiste warmtebehandeling te kiezen waardoor de gewenste microstructuur zal ontstaan.

Het selecteren van extra lage interstitiële legeringen met getransformeerde bèta microstructuren zullen een aanzienlijke verbeterde taaiheid bieden alsmede een betere weerstand tegen deze vorm van spanningscorrosie. Samenvattend kan men dus stellen dat titaanlegeringen met hoge sterktes een bepaalde corrosiebestendigheid bezitten, die veelal nog superieur is t.o.v. vele andere algemene constructiematerialen. Men moet toch een nauwkeurig beeld vormen van alle variabelen opdat men een juiste legeringskeuze kan maken voor een bepaald agressief milieu.

Met de wetenschap dat er tegenwoordig zoveel titaanlegeringen beschikbaar zijn, kan men vrijwel altijd tot een prima compromis komen tussen hoge sterkte, analyse en corrosiebestendigheid voor een bepaald medium. Uiteraard is er ook veel deskundig advies beschikbaar om de ontwerper en/of gebruiker ook op dit terrein van dienst te zijn.

Weerstand tegen erosie

De taai titaanoxidehuid voorziet gewoonlijk in een zeer goede weerstand tegen abrasieve omstandigheden zoals erosie en erosie-corrosie in processtromen met hoge snelheden. Enige vergelijkbare grootheden voor diverse legeringen zijn weergegeven in tabel 3. In deze tabel wordt zichtbaar gemaakt de superieure slijtage-eigenschappen van titaan t.o.v. koper- en aluminiumlegeringen in stro-

mend zeewater. Zelfs in zeewater met een hoge concentratie aan zand was de materiaalfname eigenlijk te verwaarlozen tot een snelheid van 5,5 meter/sec.

Daarom kan men, in tegenstelling tot koperlegeringen, titaanpijpen en apparatuur alsmede warmtewisselaars van titaan ontwerpen voor hoge stroomsnelheden zonder nadelige effecten van turbulentie, vloeistofbotsingen of kavitatie. Dit heeft bovendien een optimalisatie van de warmteoverdracht tot gevolg vanwege het feit dat men met veel dünnere wanddiktes kan volstaan.

Ook leidt e.e.a. tot meer betrouwbare installaties die een langere standtijd hebben, hetgeen weer de nodige economische voordelen oplevert. Dit is dan ook de reden dat titaanlegeringen, zowel in de gesmede als in de gegoten vorm een metaal is dat primair wordt gekozen t.b.v. chemische fabrieken en elektriciteitscentrales die aan de kust zijn gelegen en voor allerlei toepassingen in zeewatermilieu's.

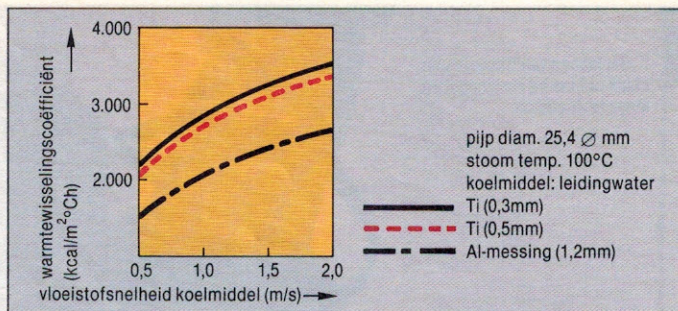
Warmte-overdracht

Titaan is als metaal ook een goede keus om er warmtewisselaars van te vervaardigen zoals bijvoorbeeld de pijp/pijpenplaat uitvoering en als platenkoelers.

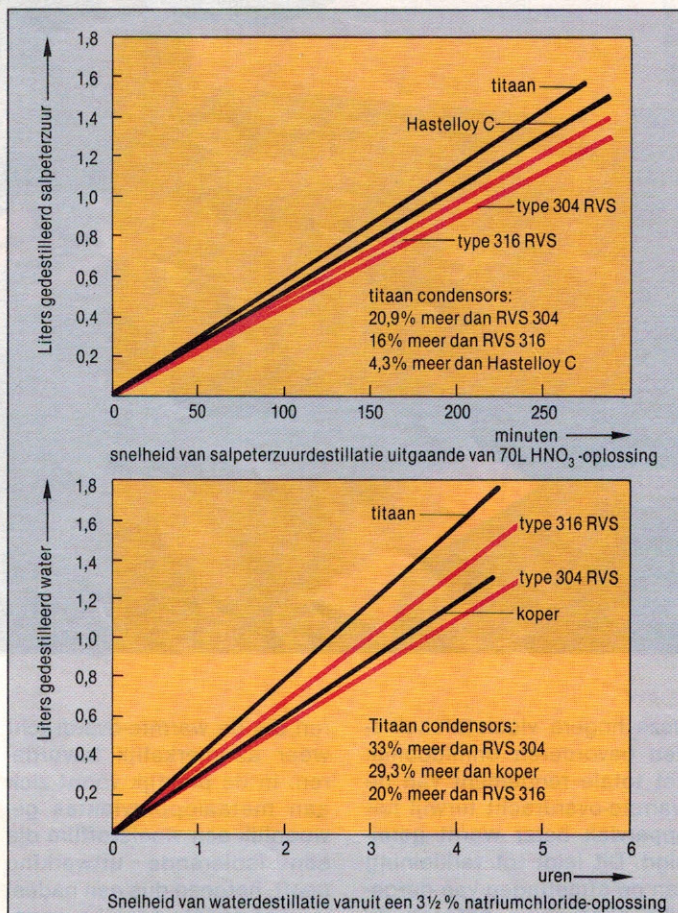
Als toevoeging op de uitstekende corrosiebestendigheid zijn er nog een aantal significante voordelen op te noemen om titaan toe te passen in warmteoverdrachtapparatuur, zoals bijvoorbeeld:

- goede sterkte;
- weerstand tegen erosie en erosie-corrosie;
- harde gladde en moeilijk te verwijderen oxidehuid;
- het oppervlak bevordert een druppelvormige condensatie.

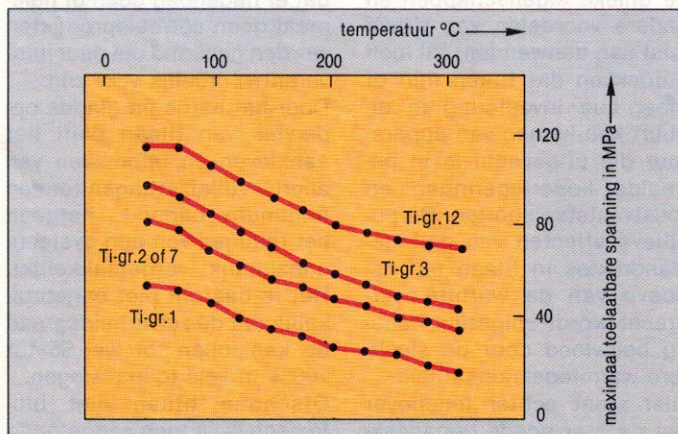
Gebaseerd op haar excellente corrosiebestendigheid en weerstand tegen erosie-corrosie kan titaan worden uitgevoerd met zeer dunne wanddiktes. Dit is mede te danken aan de goede sterkte-eigenschappen. Bovendien kan men zeer hoge vloeistofsnelheden toelaten in warmtewisselaars van titaan, aangezien dit materiaal geen problemen heeft met vloeistoferosie, ka-



4. Warmtewisselingswaarde van condensorbuisen na 6 maanden in gebruik



5. De destillatiesnelheden en condensatie zijn hoog voor titaan vergeleken met andere warmtewisselaarmaterialen en -oppervlakken



6. Maximaal toelaatbare ontwerpspanningen voor ASME-code gekwalificeerde titaanlegeringen

7. Het lassen van titaan in een clean-cabine bij Hoefnagel en Meyn te Zaandam



Deze hogere vloeistofsnelheden bevorderen onmiddellijk het totale rendement van de warmte-overdracht terwijl het oppervlak beter wordt gereinigd. Dit leidt tot verkleining van de afmetingen van dergelijke apparatuur, hetgeen direct economische voordelen oplevert.

Indien men de combinatie van de unieke eigenschappen en andere voordelen van titaan juist kan aanwenden, zal men ontdekken dat titaan min of meer qua investering in de buurt kan komen van apparatuur die uitgevoerd is in bepaalde koperlegeringen en roestvaststaalsoorten. De positieve effecten van geringe wanddiktes in titaan ten behoeve van de warmte-overdracht wordt enigszins nadelig beïnvloed door de slechtere warmtegeleidbaarheid. Hier staat echter tegenover dat de zeer goede oppervlaktekarakteristieken van titaan veel extra voordelen opleve-

ren die de warmte-overdracht weer aanmerkelijk bevorderen. In de praktijk vormt zich aan metaaloppervlaktes gewoonlijk een vloeistoffilm die een isolerende uitwerking heeft, hetgeen dus een nadeel is voor de uiteindelijke warmte-overdracht. Bij titaan is de vorming van een dergelijke film aanmerkelijk minder, omdat er nagenoeg geen of helemaal geen corrosieproducten worden gevormd die daar juist verantwoordelijk voor zijn.

Door het harde en gladde oppervlak van titaan blijft het aankleven en opbouwen van allerlei vuilafzettingen tot een minimum beperkt, hetgeen het reinigen van een systeem aanzienlijk vergemakkelijkt. Het is daarom niet ongebruikelijk dat de zuiverheidsgraad op kan lopen tot wel 95 tot 100% in vele toepassingen. Ofschoon titaan niet biotoxisch is, is toch aangetoond dat succesvol voorkomen van micro-organismevoorming be-

reikt kan worden door een periodieke chloreerbehandeling of door een mechanische behandeling (zoals borstels, sponsballen enz.). Op deze wijze kan men een vervuilingfactor van 0,0005 gemakkelijk bereiken in zeewatertoepassingen.

Hoewel koperlegeringen een betere warmtegeleiding en warmteoverdrachtcoëfficiënt bezitten, blijkt toch dat nieuwe en schone titaanapparatuur een betere algehele coëfficiënt te hebben bij langere gebruiksduur (afbeelding 4).

Titaan is ook uniek om een druppelvormige condensatie te creëren op haar oppervlakte. Als waterdamp condenseert op metaal dan vormt zich in de meeste gevallen een onafgebroken condensatiefilm op het oppervlak. Dit condensatiemechanisme heeft een slechter rendement dan de druppelvormige condensatie zoals die op titaan

ontstaat tot gevolg. Een paar voorbeelden, zoals het destilleren van pek en salpeterzuur worden getoond in afbeelding 5.

Samenvattend kan men stellen dat als alle voordelen van titaan in ogenschouw worden genomen, men zeer betrouwbare en efficiënte warmtewisselaarsystemen kan verkrijgen. Niet alleen de relatief aantrekkelijke aanschafprijs van apparatuur in titaan zal de doorslag geven dit metaal te kiezen doch ook het hoge rendement met relatief lage onderhoudskosten kan dit besluit nog eens extra bevestigen. Titaan is daarom ook beschikbaar in de gelaste en naadloze buisuitvoering in diverse kwaliteiten alsmede in geperste platen ten behoeve van platenkoelers.

Mechanische eigenschappen

De gehele titaanlegeringenfamilie biedt een gespreid ge-

bied aan sterkte-eigenschappen vanaf de kwaliteiten die relatief lage tot en met de kwaliteiten die zeer hoge sterkten bezitten. De meeste alfa- β - en β -legeringen bieden ontelbaar veel combinaties aan sterkte-ductiliteit eigenschappen, indien men de juiste warmtebehandeling gecombineerd met de gewenste legering kiest. Met andere woorden er is altijd wel een optimale titaanlegeringskeuze te doen bij een specifieke toepassing.

Een van de meest in het oog springende eigenschappen van titaan is de unieke verhouding van de hoge sterkte tot het gewicht in vergelijking met de vele andere constructiematerialen. Hierdoor kan men efficiënter construeren en bouwen omdat het eigen gewicht van een systeem minder zal vragen van de uiteindelijk te bepalen afmetingen. Het is dan ook deze hoge sterkte met het relatief lage gewicht die vaak als drijfveer heeft gefungeerd om dit metaal uitgebreid toe te passen in de luchtvaartindustrie.

Vele innovatieve toepassingen buiten het gebied van de luchtvaartindustrie, zijn de laatste jaren ontwikkeld mede dankzij deze unieke sterkte/gewicht verhouding van titaan dat bovendien gecombineerd werd met de uitstekende corrosiebestendigheid.

Voorbeelden hiervan zijn diepzeeklokken, ballasttanks, buissystemen voor olieboorinstallaties e.d. Ook heeft titaan over een groot gebied prima vermoeiings-, kruip-, en taaiheidseigenschappen tot een temperatuur van 540 °C. Tabel 2 vermeldt diverse relevante mechanische eigenschappen van diverse titaan-kwaliteiten.

Veel titaanlegeringen zijn goedgekeurd ten behoeve van drukvaten en apparatuur die vallen onder de keur van bijvoorbeeld ASME Boiler Code en Stoomwezen. Afbeelding 6 geeft de maximaal toelaatbare ontwerpspanning weer voor titaanlegeringen die vallen onder de ASME Code. Het is een bewezen feit dat de kwaliteit Ti3Al2,5V een hoge ontwerpspanning biedt ten behoeve van drukvaten doch ondanks dit feit is de kwaliteit

noch niet toegelaten door de ASME Code.

De fabrikanten werken hier wel aan en de verwachting is, dat de toelating waarschijnlijk binnen afzienbare tijd zal volgen.

Ofschoon het voor de hand ligt dat dergelijke titaanlegeringen in de luchtvaart worden toegepast, is toch ook gebleken dat titaan zeer geschikt is voor roterende- en op-en-neer gaande compo-

singen zijn veren, balgen, golfstaven en tennisrackets. De uitzettingscoëfficiënt van titaan is significant lager dan die van staallegeringen. Deze eigenschap maakt het titaan veel meer geschikt om het aan keramiek en glas te verbinden dan de meeste andere metalen. Het relatief hoge smeltpunt van titaan heeft er toe geleid dat het toegepast wordt in ballistische pantseringen. Het hogere smeltpunt verlaagt de gevoeligheid van de smeltneiging en ontbranding tijdens de ballistische inslag. De goede taaiheid en de lage massa zijn additionele belangrijke factoren om titaan toe te passen in deze applicatie.

Titaan is niet magnetisch en dat maakt het metaal geschikt voor vele toepassingen waar de elektro-magnetische storingen tot een minimum beperkt moeten blijven zoals bijvoorbeeld bij behuizingen van elektronische uitrustingen. Titaan heeft een uiterst korte halfwaardetijd en daarom is het zo goed geschikt als metaal in de nucleaire industrie. In tegenstelling tot vele staallegeringen kan men stellen dat de meeste titaanlegeringen dusdanig weinig legeringselementen bevatten dat de kans op het radio-actief worden van deze elementen te verwaarlozen is.

Verwerking

De produktietechnologie van titaan heeft zich geleidelijk aan ontwikkeld van aanvankelijk simpele processen tot hoog geavanceerde technieken. Tegenwoordig zijn er vele hoog ontwikkelde processen beschikbaar teneinde kwalitatief zeer hoge apparatuur te verkrijgen. De uiteindelijke toepassing en economische belangen zullen bepalend zijn voor het te kiezen vervaardigingsproces. Om dit proces optimaal te kunnen bepalen dient men ook het legeringstype, type warmtebehandeling en de kristalstructuur in overweging te nemen.

Ofschoon titaan zich redelijk goed laat verwerken, dient men toch de algemene verschillen met andere metalen voldoende aandacht te geven zoals de lagere elasticiteitsmodules, hogere smeltpunt, lagere ductiliteit, gevoelig-

Tabel 2. Mechanische eigenschappen van enkele titaan materiaal typen

materiaaltype	0,2 % rekgrens	treksterkte MPA	rek %	s.g.	lasbaarheid
Ti35A/115	170	240	24	4,51	uitstekend
Ti50A/125	275	345	20	4,51	uitstekend
Ti65A/130	380	450	18	4,51	uitstekend
Ti75A/160	485	550	15	4,51	uitstekend
TiO.2% Pd (Gr. 7)	275	345	20	4,51	uitstekend
Ti Code 12	345	483	18	4,51	uitstekend
Ti-6Al-4V/318	830	1100	10	4,45	goed
Ti-4Al-4Mo-2.5Sn	860	1160	10	4,60	redelijk
Ti-10-2-3	1100	1250	8	4,65	goed
Ti-15-3	1100	1280	10	4,76	uitstekend
Ti-6-2-4-2	830	1100	10	4,54	goed
Ti-6-2-4-6	970	1300	10	4,65	behoorlijk

Fysische eigenschappen

Titaan en haar legeringen bezitten zeer aantrekkelijke fysische eigenschappen die het gebruik van dit metaal voor vele toepassingen bevorderen en dat zelfs indien de hoge corrosiebestendigheid en/of hoge sterkte niet maatgevend zijn.

Deze unieke eigenschappen zijn:

- lage soortelijk massa;
- lage elasticiteitsmodules;
- lage uitzettingscoëfficiënt;
- hoog smeltpunt;
- niet magnetisch;
- extreem korte radio-actieve halfwaardetijd.

De relatief lage soortelijk massa van titaan, dat ruwweg slechts 56% is van dat van staal, betekent dat men met dezelfde massa bijna twee keer zo groot volume heeft. Ook als men het nog combineert met de hoge sterkte zal men constructies kunnen vervaardigen die kleiner en/of veel lichter zijn.

nenten zoals in centrifuges en pompen. Lagere massa's van componenten is ook van belang in zekere agressieve milieu's zoals bijvoorbeeld apparatuur in een olieschacht en buissystemen in geothermische bronnen. In zeewateromstandigheden zal het gebruik van titaan alleen maar gaan toenemen vanwege alle voordelen; gedacht kan worden aan onderdelen voor pleziervaartuigen, koelwatersystemen voor (duik)boten, enz. De elasticiteitsmodules van titaan is slechts ongeveer de helft dan die van staal. Deze lage elasticiteitsmodules betekent dat het titaan uiterst flexibel is hetgeen een basis vormt voor het gebruik in dentale fixaties (gebitsbeugels e.d.) en prothesen voor het menselijk lichaam zoals boten heupimplantaten. De weefselvriendelijkheid maakt het titaan uiterst biocompatibel, waardoor het gebruik in dit gebied een snelle voortgang doormaakt. Andere toepas-

heid tot allerlei verbindingen met elementen uit de lucht tijdens het lasproces.

Titaan kan in het algemeen koud vervormd worden op werktuigen die ook geschikt zijn voor roestvaststaal. Plaatpersen, plaatscharen, koudwalsen, waterdrukvorming en het dieptrekken kunnen allemaal gebruikt worden om titaan in zijn gewenste vorm te krijgen. De meeste componenten t.b.v. de luchtvaart-industrie en ook sommige industriële onderdelen moeten in hoge temperatuurgebieden gevormd worden om het terugspringeffect van titaan te voorkomen. Bovendien verlaagt het de inwendige spanningen en het reduceert de benodigde hoge vervormingskrachten die normaliter altijd nodig zijn om titaan te deformeren.

Thermische vormgeving

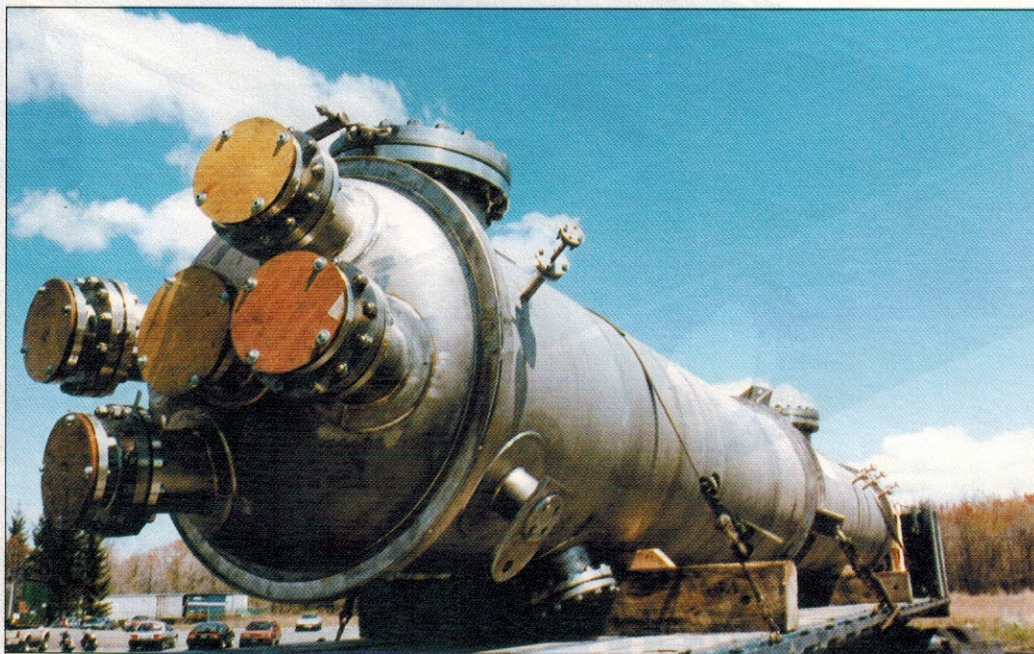
Bovenstaande zaken en andere processen die zich afspelen bij verhoogde temperatuur, spelen een belangrijke rol in het verkrijgen van de gewenste vormen met een minimum aan materiaalverbruik. Smeedstukken in allerlei maatvoeringen zijn in feite de werkpaarden van de luchtvaartindustrie.

Nieuwe ontwikkelingen in precisiesmeden leveren producten op die reeds zeer nauwkeurig in de buurt komen van de definitieve maatvoering met onnodige materiaalverliezen. Gietprocessen worden gebruikt met zowel modellen van grafiet of zand alsmede de verlorenwas methode.

Deze technieken zijn enorm in betekenis toegenomen door de toevoeging van het isostatisch persen (het zgn. HIP proces) dat borg staat dat alle inwendige leemtes worden gevuld en dat de algemene eigenschappen van het eindprodukt worden verbeterd.

Extrusie en het walsen bij hoge temperatuur worden gebruikt om bepaalde staafvormen te verkrijgen. Warmgewalste plaat wordt uitgebreid toegepast ten behoeve van componenten voor de luchtvaartindustrie. Superplastisch vormen onder druk en verhoogde temperatuur gaat langzamerhand wat meer terrein winnen.

Tabel 3. Vergelijking tussen de erosie/corrosieweerstand van diverse legeringen in diverse Amerikaanse strandlocaties					
locatie	vloeistof snelheid in m/sec	duur in maanden	corrosiesnelheid in mm/jaar		
			Ti-gr. 2	CuNi-70/30	Aluminium
Brisham Kure Beach	9,8	12	<0,0025	0,3	1,0
	1,0	54	$7,5 \times 10^{-7}$	—	—
	8,5	2	$1,2 \times 10^{-4}$	0,05	—
	9,0	2	$2,8 \times 10^{-4}$	2,1	—
Wrights-ville Beach	7,2	1	$5,0 \times 10^{-4}$	0,12	—
	0,6-1,3	6	$1,0 \times 10^{-4}$	0,02	—
	9,1	2	$1,8 \times 10^{-4}$	—	—



8. Titaan reactorketel

Diffusiellassen wordt vaak gelijktijdig toegepast bij het superplastisch vormproces.

Lassen

Om een goede lasverbinding te verkrijgen in titaan dient men zorgvuldig alle regels die ten behoeve van dit proces zijn opgesteld na te komen. Reinheid van het te lassen materiaal en het inert houden van de lasomgeving zijn primaire zaken waarin men geen concessies mag doen. Het lassen met behulp van het TIG (wolfram electrode met een inert gas) is de meest gebruikte methode.

Plasma-, laser-, weerstand-, elektrodeboog-, MIG- en wrijvingslassen hebben ook een plaats ingenomen in de voor komende lasprocessen. Er zijn allerlei technieken ontwikkeld om titaan te lassen voor zowel in de werkplaats als ter plaatse op het fabrieksterrein.

Cladden, ook wel bekleden genoemd, wordt in principe alleen toegepast bij industriële apparaten. Het bekleden kan plaats vinden met behulp van het explosieve lasproces of door het mechanisch aanbrengen van een titaandeklaag (ook wel 'los hemd' genoemd).

Laatstgenoemde processen worden al vele jaren met succes toegepast en thans is er ook een ontwikkeling om titaan als deklaag aan te brengen met behulp van walscladding, weerstandslasbekleden en met behulp van het diffusielasproces.

Het snijbranden met een acetylenevlam kan plaats vinden bij onderdelen tot een maximale dikte van 150 mm. Men dient echter veel zorg te besteden aan het verwijderen van alle oppervlakteverontreinigingen. Om de gebrande delen schoon te krijgen, kan men dit doen door deze te slijpen met roterend schuur-

papier voorzien van een grove slijpkorrel.

Verspanend bewerken

Het verspanend bewerken van titaan wordt net zo uitvoerig gedaan zoals men dat gewend is met andere metalen. Er worden wel speciale procedures aanbevolen zoals het gebruiken van scherpe gereedschappen, starre snijgereedschapopstellingen, hoge voedingen, lage snij snelheden en een overvloed van snijolie en/of koelvloeistoffen.

Het koudversterkings-effect is lager dan die van roestvaststaalsoorten. Het boren en zagen vereist het gebruik van scherpe en schone gereedschappen alsmede een afdoende spaanafvoer en overvloedige koelvloeistoffen.

(vervolg in MK 20)