



# TITANIUM FABRICATION CORP.

## Construction avec placage au titane, au zirconium et au tantale

### Généralités

Dans de nombreuses applications, et notamment dans le cas de gros appareils à pression conçus pour des températures et des pressions élevées, les constructions en acier plaqué au titane et au zirconium peuvent être très économiques, comparativement à la construction solide. Le tantale coûte si cher que le placage est le seul choix économique possible pour la plupart des matériaux utilisés dans les processus de fabrication. En outre, le tantale n'est pas reconnu comme matériel de charpente, au moins par le code de l'ASME, ce qui en limite l'utilisation, même s'il était économiquement avantageux pour la construction solide.

Le plaqué devrait être plus économique que le solide dans les cas où l'épaisseur des parois dépasse  $\frac{3}{4}$  à  $1 \frac{1}{4}$  de pouce pour le titane, et  $\frac{5}{8}$  à  $\frac{3}{4}$  de pouce pour le zirconium.

Pour le titane ou le zirconium, un revêtement interne de 2 mm (0,078 pouce) est généralement spécifié à cause des risques de contamination par le matériel d'appui suite à la chaleur pendant le soudage ou au perçage par brûlure lorsque le soudeur est négligent. L'usage d'un revêtement plus mince est certes possible lorsque le soudage se fait avec un maximum de soins et que les paramètres de soudage sont définis de façon à minimiser la pénétration, mais l'épargne ainsi réalisée est si faible que cette pratique n'a généralement plus cours.

Le tantale est typiquement utilisé à une épaisseur de 1,0 mm (0,040 pouce). À cause du prix élevé et des températures de fusion plus élevées, le revêtement de tantale exige souvent une inter couche en cuivre qui éloigne la chaleur et minimise les risques de contamination des soudures, même avec des placages très minces.

Le placage devient relativement plus coûteux lorsqu'il y a plus de découpage, comme lorsqu'il y a des buses et des pénétrations qui exigent un travail plus élaboré. Le placage peut être très économique dans le cas de vastes surfaces ininterrompues.

La construction solide peut être supérieure lorsqu'il est nécessaire d'obtenir une surface intérieure unie et lisse, car le résultat normal d'une construction avec couvre-joints plaqués est une surface inégale.

Il faut tenir compte de la dilatation thermique et de la tension de cisaillement. Le titane a un coefficient de dilatation thermique égal à environ 85 % de celui de l'acier au carbone, qui constitue généralement le support des appareils, ce qui aide à minimiser les problèmes. Le coefficient d'expansion du zirconium n'est que 56 % de celui de l'acier, ce qui fait que la dilatation thermique peut devenir un problème.

Bien que la chose ne soit pas courante, certains alliages de titane-palladium, de titane-ruthénium ou de titane niobium peuvent être plaqués sur des matériaux au titane. L'application typique se fait dans des cas où il y a des problèmes localisés comme l'accumulation de liquide, la corrosion cavernueuse ou un risque d'incendie. Le tantale est aussi utilisé parfois comme placage sur du titane. Le soudage direct est possible dans le cas de tous ces métaux réactifs.



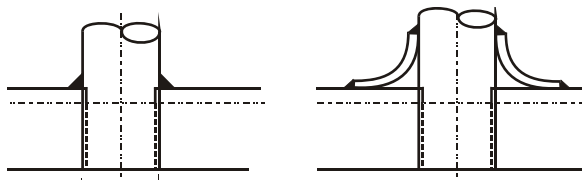
**Fig. 1 Du tantale (0,5mm, 0,020 po) soudé à du titane.**

Le titane est parfois utilisé comme placage sur du cuivre pour fins d'utilisation dans des réseaux électriques comme des cathodes pour la production de cuivre électrolytique. L'adhérence assure un chemin conducteur durable entre la couche de corrosion au titane et le porteur de charge en cuivre.

## Considérations au niveau du design

La simplicité est la considération la plus importante dans le design d'un placage. Tenter de minimiser les soudures est toujours une idée valable dans le cas des métaux réactifs, et s'avère encore plus importante dans le cas des placages.

Évitez les points durs, surtout lorsqu'il y a un changement de section ou d'orientation, ou lorsqu'une contrainte appliquée peut créer un mouvement différentiel. Garder les soudures loin des coins. Utiliser des rayons généreux, surtout lorsqu'un placage est installé dans un coin.



**Mauvaise installation**      **Meilleure installation**

**Fig. 2 Détail de filets pour accessoires**

Un accessoire non contraint peut alléger la contrainte exercée sur un élément sous contrainte, imposant parfois aux soudures d'angle des charges imprévues. Lorsque l'accessoire peut fléchir sous la charge, il devrait être conçu de façon à ce que l'accessoire ou les soudures scellant qui l'entourent ne soient pas exposées à des pressions élevées ou cycliques. Ainsi, lorsqu'une tige ou une barre est fixée mécaniquement sur un matériau en acier, il peut être préférable de sceller la tige à l'aide d'une tôle arrondie plutôt que d'essayer de souder directement le revêtement à la tige ou à la barre. Pour choisir la bonne solution, tenez compte de la possibilité qu'il y ait un mouvement, soit de la tige, soit du revêtement.

## Les avantages du placage

L'économie est la principale raison pour utiliser le placage.

Le placage permet également une application de titane ou de zirconium à des températures dépassant leur capacité en vertu du code de la construction.

## Les désavantages du placage

Il y a une faiblesse structurelle inhérente aux soudures d'angle servant aux articulations avec le revêtement. Le plus gros désavantage est le fait qu'un bris de l'une de ces soudures puisse envoyer des composés corrosifs dans tout le matériel de support. Ceci peut provoquer de la corrosion indétectable. En outre, la présence de fluides contaminants derrière un placage peut rendre difficile, et même impossible, une réparation de qualité. Les placages flottants ne sont généralement pas acceptables dans des conditions sous vide.

Par définition, le placage est complexe, comparativement aux travaux solides, surtout dans le cas des structures comportant des buses, des accessoires ou des intérieurs complexes.

Au moins dans le cas du titane, le matériel plaqué peut être plus lourd que la construction en solide, ce qui peut accroître les coûts des fondations et des supports, ce qui peut constituer un élément déterminant dans le cas d'applications où le poids est un facteur important, comme pour les plates-formes de forage en mer.

L'extérieur d'un appareil peut exiger une peinture et des retouches sur place, en plus d'exiger un entretien constant du secteur peinturé.

## Le placage lâche

La méthode de placage la moins coûteuse consiste à appliquer une gaine de titane ou de zirconium lâche une fois que l'appareil en acier est terminé. Normalement, une feuille de 2 mm (0,078 pouce) est coupée et placée sur la surface intérieure. Les joints entre les feuilles sont faits en superposant les feuilles adjacentes ou en plaçant un couvre-joint et en procédant à des soudages d'angle pour sceller la surface de la gaine. Ensuite, on procède au gainage des buses et au gainage des détails.

Une tôle, généralement de 5 mm (0,1875 pouce), est parfois utilisée en guise de gaine principale pour assurer une meilleure résistance pendant les travaux d'entretien ou simplement pour mieux conserver l'ouvrage.

Le matériel de gainage en titane est généralement choisi à partir des catégories 1, 11, 17 ou 27 afin de profiter de la plus grande ductilité de ces catégories à faible résistance, ce qui permet au matériau de s'adapter aux formes (souvent à l'aide d'un maillet en caoutchouc uniquement). L'alliage au zirconium le plus utilisé pour le gainage est le 702.

En ajustant soigneusement le gainage, il n'est pas nécessaire d'utiliser un renfort. L'utilisation de tiges de retenue et de renforts peut créer plus de

problèmes qu'il n'en règle parce qu'ils créent des points durs et des soudures additionnelles. Là où des renforts sont nécessaires, la solution habituelle consiste à percer un trou dans la gaine et à y placer un petit boulon qui est ensuite fixé à la surface de la feuille par une soudure d'angle. Des gainages lourds, ou une tôle de protection sacrificielle remplaçable, peuvent être utilisés dans des endroits où il y a risque d'érosion ou de dommages mécaniques.

### Le gainage explosif

Le titane, le zirconium et le tantale peuvent être collés par soudage explosif à un support moins coûteux comme de l'acier au carbone. Pour la plupart des appareils à pression, le matériel de gainage est choisi à partir des catégories 1, 11, 17 ou 27 pour profiter de leur plus grande ductilité. On a déjà utilisé des matériaux de catégorie 2 et 7, mais ils présentent des risques accrus de craquelage par cisaillement pendant le collage. Même si le craquelage n'est pas nécessairement mauvais pour l'intégrité finale du produit, cela demeure quand même une préoccupation.

### Le procédé de gainage par explosion

Quelques rares fournisseurs spécialisés pratiquent le gainage par explosion. Ce genre de produit est fabriqué sur commande, bien que l'on trouve parfois de l'acier au carbone avec gaine de titane pour des plaques tubulaires.

Dans le gainage par explosion, le matériel qu'il faut gainer (le support) a généralement au moins  $\frac{3}{4}$  pouce d'épais et a été sablé et nettoyé. Le matériel qui constitue la gaine (la gaine) est placé sur le support avec des entretoises qui assurent une distance entre les deux matériaux. Le matériel explosif est placé au-dessus de la gaine. L'explosif est généralement détoné à partir du centre de l'une des extrémités de la plaque, près d'une soudure s'il s'agit d'une gaine soudée, de façon à ce que l'onde de choc se propage parallèlement à la soudure.

À mesure que l'onde de choc se déplace vers l'avant, la gaine est poussée sur le support. Au point d'interface, l'énergie se dissipe et crée un jet de matériel à partir de la surface des deux matériaux. Le jet comporte des contaminants et des oxydes et l'énergie de l'explosion crée un contact de niveau quasi-atomique entre les deux matériaux.

Booster = détonateur auxiliaire  
 Explosive = explosif  
 Frame = cadre  
 standoff space = espace  
 Cladding metal = gaine  
 Backing material = support

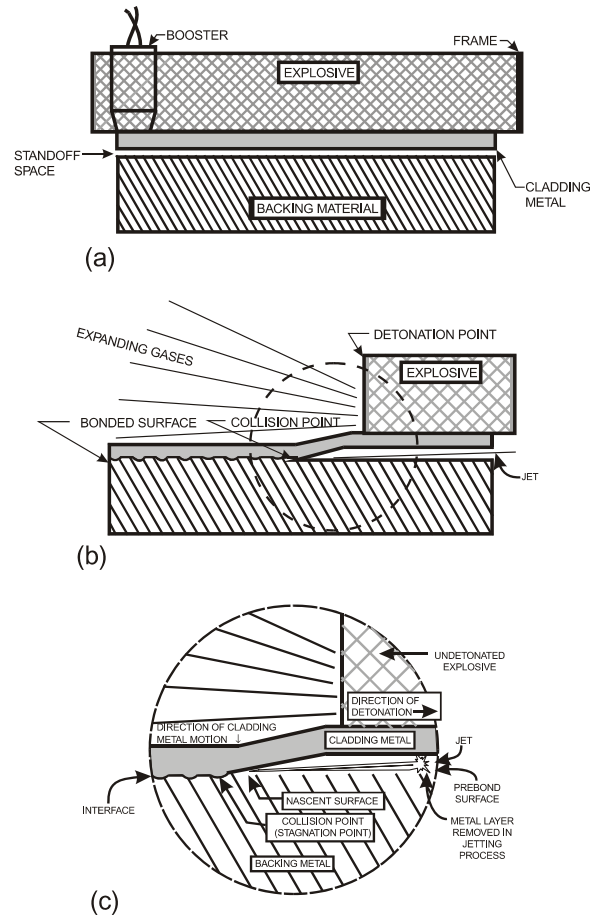


Fig. 3 Le procédé de souage à l'explosif (extrait de « ASM Handbook »)

(a)  
 expanding gases = gaz d'expansion  
 bonded surface = surface collée  
 detonation point = point de détonation  
 explosive = explosif  
 collision point = point de collision  
 jet = jet

(b)  
 direction of cladding metal motion = orientation du métal de la gaine  
 undetonated explosive = explosif non détoné  
 direction of detonation = orientation de la détonation  
 cladding metal = gaine  
 prebond surface = surface avant le collage  
 metal layer removed in jetting process = épaisseur de métal éliminée par le jet  
 nascent surface = surface nouvelle  
 collision point (stagnation point) = point de collision (point d'arrêt)  
 backing metal = support

## La nature de l'adhésion

L'adhésion qui en résulte est de nature métallurgique-métallique. La force du lien provient d'un entrecroisement mécanique des surfaces et d'un collage métallurgique. L'énergie dégagée par l'explosion est suffisamment élevée pour que les composés métalliques friables qui se forment lors d'une soudure normale par fusion de métaux réactifs soient minimisés.

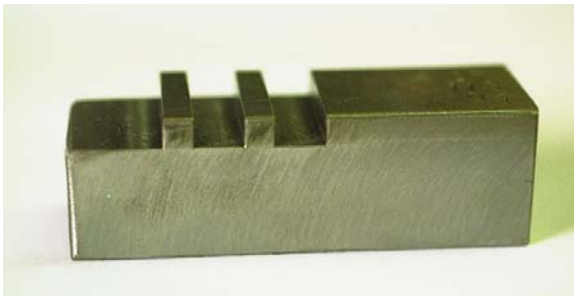
## Les propriétés mécaniques de l'adhésion

Les propriétés du titane et du zirconium fixé par explosion à un acier au carbone SA-516-70 sont généralement les suivantes :

Titane	Zirconium
Résistance au cisaillement 35-45 000 psi	35-45 000 psi
Résistance à la traction 30 000 psi	30 000 psi



**Fig. 4 Soudage par explosion de titane sur de l'acier au carbone**  
(Photo : Produit de placage)



**Fig. 5 Spécimen de test de cisaillement sur une gaine par explosion**  
(Photo : Produit de placage)

---

## La vérification du lien

La vérification la plus courante pour les propriétés du lien est l'essai de cisaillement. Le pliage des côtés donne aussi une bonne idée de la qualité du lien, même si on n'utilise pas cette méthode en Amérique du Nord pour vérifier les gaines métalliques. Un spécimen de cisaillement est usiné à partir d'un morceau rectangulaire, et une charge est appliquée à la gaine, parallèlement au lien.



**Fig. 6 Spécimen de test sur un pli latéral de gaine soudée à l'explosif.**  
(Photo : Produit de placage)



**Fig. 7 Spécimen de test de tension d'un éperon de gaine**  
(Photo : Produit de placage)

Bien que peu utilisée, la résistance à la traction peut être déterminée en pratiquant dans la gaine un cercle de faible diamètre, à travers la ligne de jonction, et en alésant un trou à travers le support et jusqu'à la gaine. Un petit anneau de la surface collée reste entre les deux. L'essai se fait en poussant une tige plate sur la gaine, contre un anneau de retenue qui retient le support. La résistance à la traction du joint est basé sur la superficie de l'anneau.

#### Considérations particulières

Évitez de placer la ligne de jonction dans un milieu corrosif. Bien que la chose semble simple, il est courant d'utiliser un matériau gainé en guise de transition dans une structure. Dans ces cas, la corrosion galvanique peut devenir un problème. En outre, comme la ligne de jonction comporte de minuscules fissures, des liquides ou des vapeurs corrosives peuvent facilement pénétrer dans le joint et provoquer une défaillance. Pour réussir ce genre d'application, la ligne de jonction doit être protégée par un revêtement de protection.

#### Les limites en matière de pliage de la gaine

La résistance au cisaillement du matériel soudé par explosion peut limiter le rayon minimal de pliage. Les tensions de cisaillement peuvent être calculées en fonction de l'épaisseur du support et de la gaine, et le pliage à froid peut être limité à moins de 50 % de la résistance au cisaillement au niveau de la ligne de jonction.

#### Les limites de la dimension des gaines soudées par explosion

L'épaisseur du support est généralement d'au moins 1/2 pouce afin de minimiser la déformation et le renforcement subséquent nécessaire pour obtenir un produit adéquat.

La dimension des feuilles froides est limitée par la dimension de la feuille de la gaine. Comme une feuille est généralement produite en largeur de 96 à 102 pouces et qu'environ 2 pouces sont perdus de chaque côté lors du processus, une gaine d'une épaisseur de 5 mm (0,1875 pouce) ou plus a une largeur limite variant de 90 à 92 pouces. Pour les gaines soudées, on a déjà produit des feuilles de titane atteignant 190 pouces de large et 400 pouces de long.

Pour dépasser la largeur limite pour l'épaisseur des feuilles, comme l'épaisseur courante de 2 mm (0,078 pouce), Titanium Fabrication Corporation fournit depuis 1975 aux vendeurs de gaines des feuilles de double largeur obtenues par soudage. Une procédure de préparation spéciale comportant

l'alésage des bords et une soudure à double face permettent de produire des soudures de qualité supérieure tout en conservant l'aspect lisse requis pour le collage. Les forces inhérentes au processus de collage interdisent le soudage contraire à l'orientation de l'onde de l'explosion ; les dimensions sont donc limitées par la longueur des tôles disponibles. Titanium Fabrication Corporation a fourni des tôles de 2 mm (0,78 pouce) mesurant jusqu'à 148 pouce x 192 pouce, même si les dimensions courantes sont plutôt de l'ordre de 96 pouces par 148 pouces. De la même façon, il est possible d'assembler des tôles de titane de 192 pouces, qui vont donner un produit fini de l'ordre de 190 pouces de large.

#### **Quelques détails sur le gainage**

La méthode habituelle pour unir des tôles de gainage consiste à utiliser un couvre-joint tel qu'illustré à la figure 8. Le gainage de titane (ou de zirconium) est éliminé le long d'une lisière, sur le support d'acier, et la zone est préparée pour faire les soudures, suite aux procédures habituelles suivies pour l'acier ordinaire. Les seules différences sont les suivantes : la base de la soudure peut être éloignée du bord de la gaine afin de diminuer la largeur du couvre-joint, et la surface de titane sera protégée des étincelles du meulage et du soudage à l'aide d'une couche protectrice. D'habitude, tout le travail sur l'acier est effectué avant que ne commence le travail sur le titane ou le zirconium.

Une fois le soudage de l'acier terminé, radiographié et accepté, l'appareil est soigneusement nettoyé.

Lorsqu'il est nécessaire d'éliminer un peu de tension thermique, il faut préparer l'appareil sans le couvre-joint. Protégez le titane ou le zirconium avec un anti-oxydant. Complétez la réduction de la tension thermique à la plus basse température permise. Nettoyez l'appareil et les surfaces des joints.

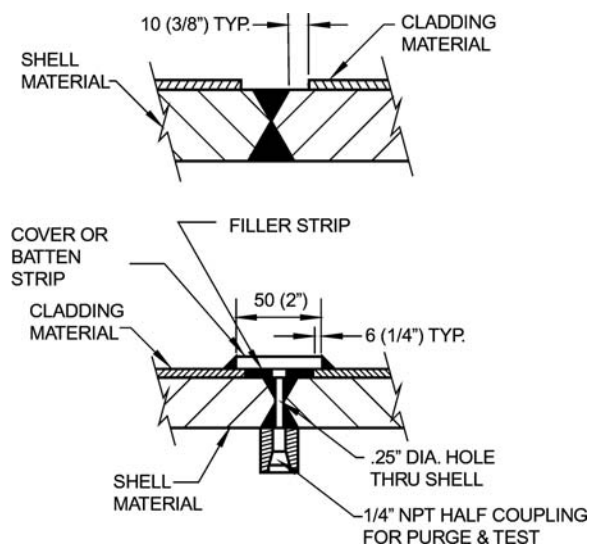
L'appareil peut être déplacé vers une zone propre de l'atelier, ou des ouvertures peuvent être recouvertes, et l'intérieur de l'appareil peut être utilisé comme environnement propre.

Suite à l'inspection visuelle finale, des bandes de bourrage (qui peuvent être en cuivre, en titane ou même en acier) sont ajustées le long de chaque soudure et sont ensuite recouvertes de couvre-joints en titane qui sont fixés au moyen de soudures par pointage. Les côtés du couvre-joint sont scellés à l'aide de ruban-cache, et les espaces sont vidés depuis l'arrière à l'aide d'argon (ou d'hélium, ou de mélanges). On retire ensuite le ruban d'une petite partie de la zone à souder, et la soudure d'angle est complétée en suivant la

procédure habituelle pour la soudure du zirconium. L'influx de chaleur devrait être contrôlé, et il faut s'efforcer de minimiser les contraintes résiduelles de la soudure. Les soudures doivent être soigneusement vérifiées visuellement, pendant le processus, et vérifiées à l'aide de pénétrants liquides, de fuite de gaz (halogène) ou de solutions d'eau et de savon

Cladding material = gaine  
Shell material = support

Cover or batten strip = couvre-joint  
Filler strip = bande de bourrage  
Cladding material = gaine  
Shell material = support  
.25 dia hole thru shell = trou de 0,25 po de diamètre dans le support  
1/4 npt half coupling for purge & test = demi-manchon d'accouplement de 1/4 po pour vidage et vérification



**Fig. 8 Joint normal de la gaine**

La façon de rattacher les revêtements lâches est semblable, sauf qu'il est courant de superposer les bords des deux feuilles adjacentes afin de faire moins de soudure.

Il existe des cas où une combinaison de construction solide, de gainage à l'explosif et de recouvrement lâche peut être indiquée. Ainsi, un échangeur de chaleur peut exiger un gainage soudé

par explosion pour les tubulures, une gaine soudé par explosion pour le canal, du solide pour le séparateur du canal, et un gainage lâche pour les buses et les recouvrements de canalisations plates.

### Le gainage des plaques tubulaires

Les plaques tubulaires constituent l'une des applications les plus courantes de ce genre de placage. La conception permet de procéder au soudage direct du matériau supportant l'acier sur l'enveloppe ou sur la structure adjacente.

L'épaisseur minimum recommandée pour souder le placage des tubulures est de 9 mm (3/8 pouce), bien qu'on ait déjà utilisé avec succès du matériel de 3mm (1/8 pouce) d'épais.

Le matériel soudé par explosion est supérieur au matériel lâche dans le cas des tubulures. Les gaines de tubulures lâches sont soumises à une contraction radiale lorsque les tubulures sont soudées. Ceci produit une contrainte de cisaillement élevée sur la paroi de la tubulure, et, dans les cas les plus prononcés, peut provoquer une distorsion de la paroi ou une séparation de la gaine. Si les tubulures sont roulées durement avec un gainage lâche, il y a une tendance à éloigner la gaine du support lorsque la tubulure subit une dilatation longitudinale, ce qui permet aux tubulures adjacentes de se dilater aussi dans l'espace entre le support et la gaine. Pour minimiser les risques et les problèmes, utilisez une séquence d'enroulement par étape, qui permet d'enrouler la tubulure sur le support, sans dilatation près de la gaine. De cette façon, la dilatation longitudinale de la tubulure n'a aucun effet sur la gaine. Une deuxième étape, de préférence après avoir effectué une vérification par fuite de gaz sur les joints enroulés, consiste à enrouler la tubulure en maintenant un léger contact avec la gaine. Une séquence d'enroulage léger doit commencer par établir un tracé intermittent sur la totalité de la surface de la feuille. Le recours à un dispositif de contrainte extérieure peut être utile tant qu'il n'y pas assez de tubulure enroulée pour contenir la gaine. Avec des matériaux soudés par explosion, les tubulures peuvent généralement être enroulées fermement sur toute leur longueur, dans la mesure où l'adhésion offre suffisamment de résistance à la traction pour vaincre la tendance à la séparation de la gaine. Toutefois, lorsque l'adhésion est très légère ou lorsque la qualité de l'adhésion est compromise, il faut songer à utiliser la procédure utilisée dans le cas des gainages lâches.

Il est toujours possible qu'il y ait de petites ratées dans le soudage par explosion. Les fabricants livrent un produit correspondant à une garantie de

95 % ou même de 99 % d'adhésion, en se basant sur une inspection par ultrason. En général, dans la mesure où la zone ratée (sans adhésion) n'est pas trop grande, la performance n'est pas menacée. Toutefois, comme les tubulures sont enroulées dans des zones de non-adhérence séparées, elles peuvent se dilater dans l'espace et ajouter ainsi une charge pour défaire l'adhésion.

Titanium Fabrication Limited recommande toujours de sceller par soudage les tubulures gainées afin de diminuer le risque de fuite dans l'espace entre la gaine et le support (même s'il y a apparemment plus de tubulures gainées sans scellage par soudure). Lorsqu'on souhaite avoir un sillon dans la gaine, une épaisseur supérieure de 12 à 15 mm (1/2 à 5/8 pouce) est indiquée. En procédant à l'enroulement avant la soudure, l'oxygène est exclu de la racine de la soudure grâce au contact étroit entre la paroi du tuyau et la gaine, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de chasser le gaz. Il y a exception lorsqu'on utilise des gaines lâches d'une épaisseur inférieure à 6 à 9 mm (1/4 à 3/8 pouces).

Fabricants et utilisateurs doivent prévoir la possibilité que la zone de non-adhésion soit plus grande, et avoir une solution de remplacement. La façon la plus facile est de prévoir, dans l'échéancier des travaux, un temps suffisant pour procéder au remplacement du matériel défectueux. Il serait cependant préférable de collaborer avec le fabricant pour voir si le matériel peut être utilisé dans un secteur où la zone de non-adhésion ne posera aucun problème. Enfin, il faut faire preuve de jugement lorsqu'on évalue l'importance de l'intégrité de l'adhésion dans la performance réelle du matériel.

**Fig. 9** Partie d'un réacteur construite en acier au carbone SA-516-70 avec gaine de titane.



**Fig. 10** Réacteur en acier au carbone de catégorie 1, de 1/8 pouce (SA-516-70) avec gaine de titane, pour la production de produits chimiques organiques.



Adressez-vous à Titanium Fabrication Corporation pour obtenir plus de renseignements et d'aide dans la conception d'équipements avec gaines de titane, de zirconium ou de tantale.