



Gaz de protection et formiergaz.

Pour le soudage TIG et le soudage MSG sous protection gazeuse des aciers inoxydables.



Gaz de protection et formiergaz pour le soudage des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables conformes à la norme SN EN 10 088, Parties 1 à 3, doivent essentiellement leurs caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques (en termes de tenue à la corrosion) à l'état de leur structure dans la pièce finie, ce qui explique que ces aciers sont classés en différentes familles selon cette structure.

On fait ainsi la distinction entre:

- Aciers austénitiques
- Aciers duplex austéno-ferritiques
- Aciers martensitiques
- Aciers ferritiques

Economiquement parlant, les aciers austénitiques sont les plus importants, mais les aciers duplex connaissent aussi une utilisation grandissante. Les aciers austénitiques sont eux-mêmes subdivisés comme suit:

- Austénites avec et sans molybdène
- Austénites à teneur en carbone particulièrement faible
- Aciers austénitiques stabilisés
- Aciers à structure totalement austénitique

Les propos qui suivent concernent surtout les aciers inoxydables austénitiques, étant donné que ce sont les plus usuels et les plus importants au plan économique. La tenue à la corrosion est une propriété complexe qui dépend non seulement du matériau et des traitements qu'il a subis, mais aussi très fortement du milieu corrosif et des autres conditions environnantes. C'est la raison pour laquelle les différentes qualités d'aciers inoxydables sont conçues en fonction d'exigences diverses que nous ne pourrions décrire ici que grossièrement. Quelques exemples: l'ajout de molybdène augmente la résistance à la corrosion par piqûres et par fissures et les faibles teneurs en carbone permettent de prévenir la corrosion intercrystalline, tandis que la stabilisation par du titane ou d'autres éléments de micro-alliages empêche la dégradation des joints de grains et qu'une structure purement austénitique améliore la tenue à la corrosion en général.

Le soudage des aciers inoxydables – Considérations d'ordre général

Comparativement aux aciers non alliés ou faiblement alliés, les aciers inoxydables présentent une conductibilité thermique beaucoup plus faible et se dilatent nettement plus sous l'action de la chaleur en ayant une tendance marquée à se déformer. Le bain de fusion est relativement plus visqueux, surtout dans le cas des aciers alliés au molybdène. En choisissant le procédé de soudure, les métaux d'apport et les gaz de protection destinés au soudage d'aciers inoxydables hautement alliés, il importe de veiller à ce que le cordon de soudure et son environnement immédiat présentent dans la mesure du possible des caractéristiques technologiques semblables à celles du matériau de base. C'est la raison pour laquelle il est très utile de connaître quelques-unes des caractéristiques physiques et chimiques fondamentales des aciers inoxydables, et plus spécialement le comportement des matériaux en présence de sollicitations thermiques. Le cordon de soudure se caractérise normalement par une structure de métal fondu, tandis que le métal de base présente une structure résultant de plusieurs traitements de formage et de recuit. Lorsqu'on passe de la température d'incandescence ou de laminage à la température ambiante aux vitesses de refroidissement normales, il peut se produire dans la structure des précipitations essentiellement constituées de carbures et de phases intermétalliques,



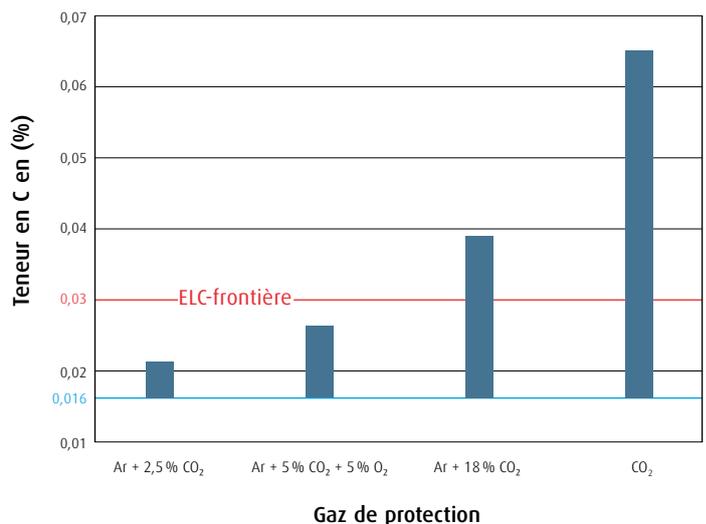
Une technologie qui a fait ses preuves: le soudage sous protection gazeuse des aciers hautement alliés

lesquels ont un effet défavorable sur la tenue à la corrosion: il se forme des carbures mixtes fer-chrome, de préférence au niveau des joints de grains des cristaux métalliques, ce qui entraîne un appauvrissement en chrome de la zone environnante. Si la concentration locale du chrome est inférieure à 12 %, il existe le long de ces zones un risque de dégradation des joints de grains – appelée également corrosion intergranulaire ou intergranulaire – certaines cristallites pouvant alors se détacher. Le recuit de mise en solution et la trempe empêchent efficacement la formation de précipitations, mais on ne peut normalement pas recourir à ce moyen après le soudage. Voilà pourquoi on fait appel en pratique à un autre procédé métallurgique prometteur, à savoir l'obtention des taux de carbone les plus faibles possibles, sachant qu'une teneur en carbone très basse permet de limiter efficacement la formation de carbures. Ces aciers sont qualifiés d'aciers ELC (Extra Low Carbon) dès que leur teneur en C est égale ou inférieure à 0,03 %. Un autre mécanisme efficace consiste à piéger le carbone en le liant à des éléments de micro-alliages. Il se forme ainsi des carbures de titane ou de niobium stables, ce qui empêche la formation de carbures de chrome favorisant la corrosion.

Le soudage des aciers inoxydables sous protection gazeuse

Il en résulte que lorsqu'on choisit un gaz de protection pour le soudage MSG, il faut veiller à empêcher la carburation du cordon de soudure. Or le dioxyde de carbone présent dans les gaz de protection actifs représente une source potentielle de risques à cet égard. Les effets de différentes concentrations de CO₂ sont illustrés par la figure 1: dans une série d'expériences, un fil d'apport inoxydable ayant un taux de carbone de 0,016 % a été soudé en utilisant différents gaz de protection, après quoi la teneur en carbone du métal déposé a été déterminée. Il en ressort que le soudage avec du CO₂ pur est absolument hors de question, mais même un gaz de protection contenant 18 % de CO₂ a encore pour effet une augmentation du poids par réduction qui, au total, conduit à un taux de carbone supérieur à la limite des aciers ELC.

Graphique 1: Augmentation du taux de carbone dans l'acier suivant le gaz de protection



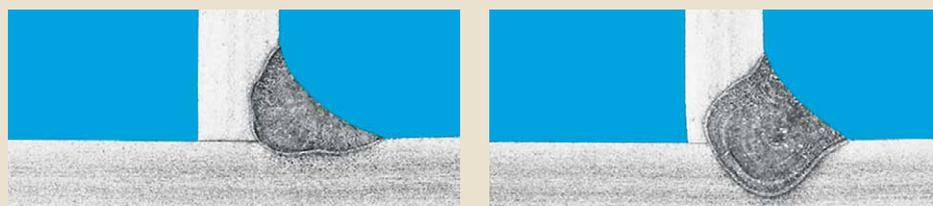
Comme la sensibilité à la corrosion intergranulaire se manifeste dans une certaine plage de température et de temps, il importe de veiller tout particulièrement à cet aspect lorsqu'un traitement thermique ultérieur est prévu. Ce phénomène est bien visible sur les schémas représentant la dégradation des joints de grains. La figure 2 représente un tel schéma pour une soudure réalisée avec le métal d'apport 1.4316 et ce, en opérant avec le procédé MSG et en utilisant les gaz de protection mentionnés plus haut (il a été renoncé à faire un essai avec du CO₂ pur):

M 21: Argon, 18 % de CO₂ (CORGON® 18)

M 23: Argon, 5 % de CO₂, 5 % de O₂ (COXOGEN® 5/5)

M 12: Argon, 2,5 % de CO₂ (CRONIGON®)

Les différentes teneurs en carbone du métal fondu ont un effet durable sur la résistance à la corrosion intergranulaire. Le gaz de protection M 21 est certes utilisable de manière universelle pour les aciers de construction, mais on ne saurait le conseiller pour le soudage des aciers inoxydables. Il est sûr en tout cas qu'on ne court aucun risque en prenant un gaz de protection de type M 12 avec 2,5 % de CO₂, le reste étant de l'argon. Une question se pose tout naturellement ici, à savoir si le

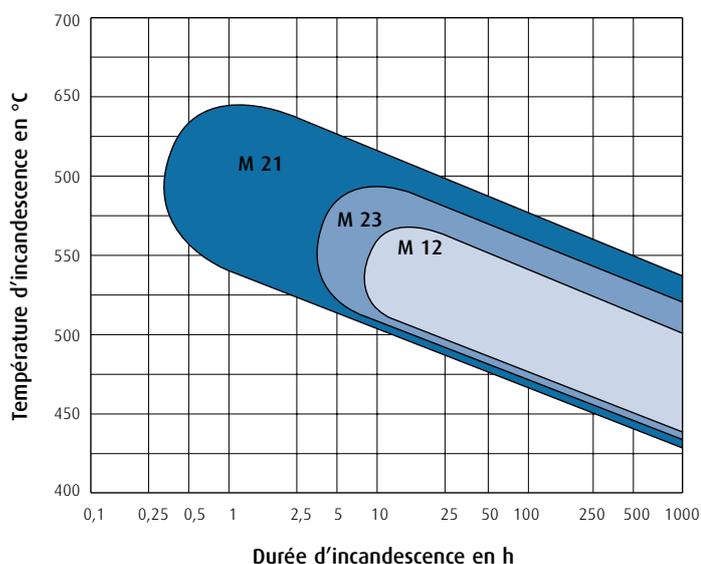


Soudure d'angle réalisée en soudage TIG sous argon

Pénétration plus profonde avec les mélanges argon-hydrogène

fait de renoncer à la présence de dioxyde de carbone dans le gaz de protection – autrement dit un soudage MIG sous argon pur – ne pourrait permettre de résoudre définitivement le problème?

Graphique 2: Schéma illustrant la dégradation des joints de grains



Or il apparaît que sans éléments actifs dans le gaz de protection – il peut s'agir de dioxyde de carbone ou d'oxygène – l'arc électrique se révèle très instable et le processus de soudage est irrégulier. Comme l'argon n'a qu'une faible conductibilité thermique et une faible énergie d'ionisation, l'apport calorifique dans la pièce à souder est limité. Il en résulte que le métal fondu est plutôt visqueux et s'écoule mal sur le métal de base. Le cordon de soudure obtenu a une forme irrégulière, souvent aussi il est très étroit et trop bombé, avec une pénétration qui n'est pas satisfaisante, sans parler des entailles et des fortes projections qui sont observées. De faibles teneurs en oxygène de jusqu'à 3 % peuvent améliorer légèrement la situation – surtout en renforçant la stabilité de l'arc électrique et en réduisant la tendance aux projections – mais on observe alors une sensibilité accrue du métal fondu en ce qui concerne la formation de pores et d'oxydation de surface du cordon. Des teneurs plus élevées en oxygène se traduisent certes par un meilleur apport

de chaleur dans le métal, mais aussi par la présence de couches d'oxydes qui adhèrent encore plus solidement et qu'il est très difficile d'éliminer. Dans le cas des aciers duplex, on constate en outre une chute des valeurs caractéristiques de la ténacité (allongement à la rupture, énergie absorbée pendant le choc) du cordon de soudure.

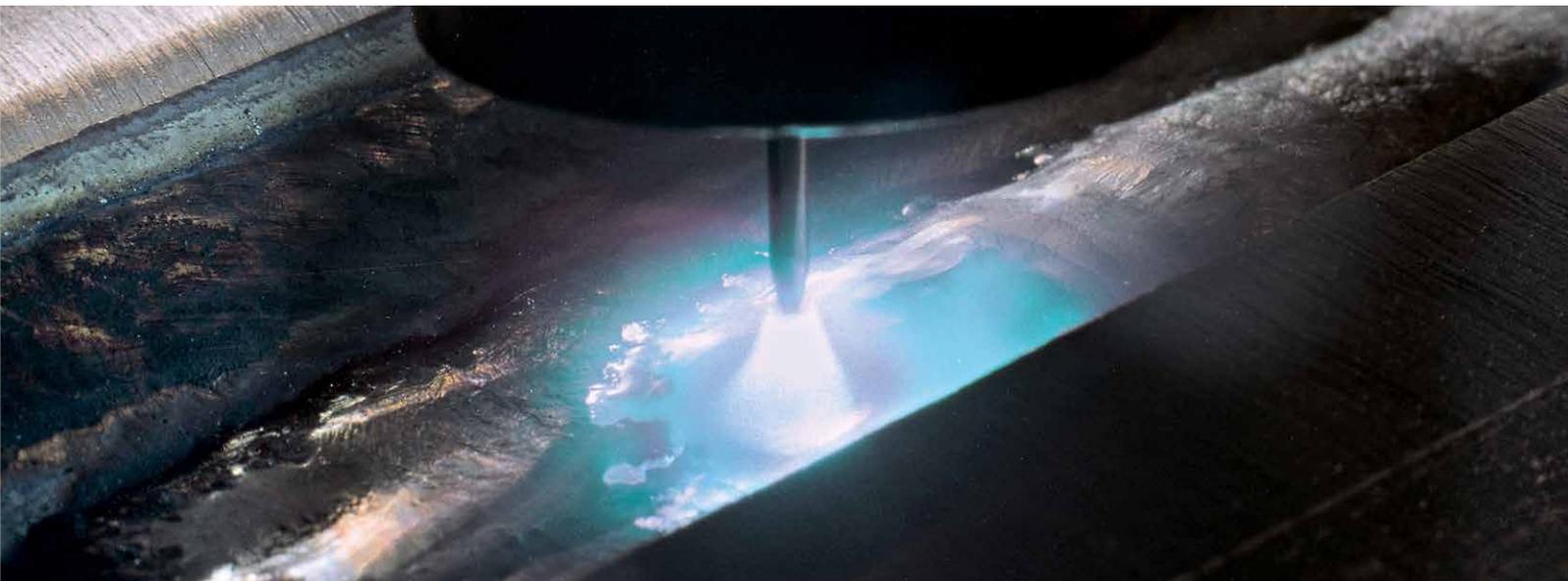
Les gaz de protection qui contiennent du dioxyde de carbone au lieu d'oxygène pur comme élément actif permettent par contre d'éliminer plus facilement les couleurs de revenu. D'une manière générale, ce sont les gaz de protection contenant 2,5 % de CO_2 qui se sont imposés pour le soudage MSG des aciers chrome-nickel. La dissociation dans l'arc électrique et la recombinaison consécutive conduisent à un apport de chaleur sensible, et les résultats sont satisfaisants en termes de pores et d'oxydation. La marque de gaz de protection ayant fait sa preuve est le CRONIGON®.

Si des performances supérieures sont exigées et que les aciers chrome-nickel sont en outre alliés au molybdène, il est possible d'utiliser un gaz comportant de 20–50 % d'hélium en supplément. Lorsqu'il y a de l'hélium dans un gaz de protection, l'apport de chaleur est très élevé, ce qui permet d'atteindre des vitesses de soudage nettement plus importantes.

Un mélange à trois composants constitué de 77,5 % d'argon, 2,5 % de dioxyde de carbone et de 20 % d'hélium a fait ses preuves comme gaz de protection. Il est proposé dans la gamme de gaz de protection de la société Linde AG sous la marque CRONIGON® He20.

Applications spéciales

Dans les cas où les performances doivent être encore plus grandes et où une bonne soudabilité en position une faible tendance aux projections et peu d'oxydation sont requises, il est possible d'utiliser une variante contenant encore plus d'hélium ainsi qu'un peu d'hydrogène; un tel mélange constitué de 63 % d'Ar, 3 % de CO_2 , 33 % de He et 1 % de H_2 est proposé par Linde sous le nom de CRONIGON® He33. Si les exigences en termes de tenue à la corrosion sont particulièrement élevées, les aciers inoxydables touchent à leurs limites techniques et il faut alors utiliser des alliages à base nickel.



Soudage MSG des aciers inoxydables: les gaz de protection contenant de l'hélium se révèlent avantageux

On fait appel à ces derniers lorsque les contraintes de corrosion sont extrêmes, par exemple dans les installations de désulfuration des gaz de combustion des centrales thermiques ou les usines d'incinération des ordures ménagères.

Lors de la soudure de ces matériaux, il faut trouver une solution qui permette, d'une part, d'assurer la stabilité de l'arc électrique et, de l'autre, d'éviter la formation d'oxyde de nickel sachant que celui-ci n'est pas soudable. Cette solution est apportée par un mélange protecteur constitué d'argon, d'hélium et de faibles proportions de gaz actifs, p.ex. 0,05% de CO₂. L'incorporation de 2% d'hydrogène améliore en outre les possibilités de soudage en position (soudage vertical descendant p.ex.). Le gaz de protection CRONIGON® He30S s'est révélé bien adapté pour les opérations de soudage sur une surface importante effectuées dans le cadre de la réparation des chambres de combustion des usines d'incinération des ordures.

Soudage TIG des aciers austénitiques

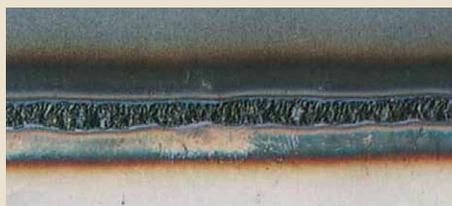
Le soudage TIG des aciers fortement alliés a lieu dans de nombreux cas sous argon pur (figure 3). D'autres ajouts de faibles taux de gaz actifs, comme ils sont utilisés pour le soudage en courant alternatif de l'aluminium (p.ex. 300 ppm d'O₂), restent sans effet avec l'arc TIG stable produit en courant continu et ne sont donc pas nécessaires. Les gaz qui contiennent des éléments oxydants à des concentrations plus importantes ne pouvant être utilisés puisque l'électrode tungstène est réfractaire, ce sont les mélanges argon-hydrogène ayant une teneur de jusqu'à 5% en H₂ qui sont les mieux indiqués pour améliorer l'apport de chaleur. En règle générale, ces mélanges ne posent pas de problèmes avec les aciers austénitiques à l'égard du risque de formation de pores. En revanche, leur utilisation est déconseillée dans le cas des aciers duplex ayant une forte proportion de ferrites afin d'éviter les risques de fissurations induites par l'hydrogène. En cas de doute, des essais de soudage permettront à l'utilisateur de tirer la situation au clair. Si la torche est guidée mécaniquement, des teneurs en hydrogène de jusqu'à 10% sont également possibles pour les aciers austénitiques.

Soudage TIG des aciers totalement austénitiques

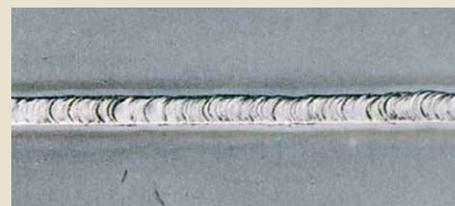
Dans le cas des aciers totalement austénitiques qui sont utilisés en particulier dans le secteur agro-alimentaire et l'industrie chimique, il est souvent exigé que la proportion de ferrites soit inférieure à 1%, voire à 0,5%, pour résister aux contraintes de corrosion les plus importantes, c'est-à-dire pour empêcher la corrosion sélective. Pour le soudage MSG, il existe la possibilité de recourir à un suralliage avec des éléments favorisant l'austénisation comme le nickel. Pour le soudage orbital des tuyauteries à parois minces, il faut par contre travailler sans apport, et les gaz de protection à base d'argon et d'azote ont fait leurs preuves en pareil cas. L'azote est connu pour son remarquable effet sur la formation d'austénite, mais sa dissolution dans l'acier sous forme moléculaire est toutefois limitée. Après le passage dans l'arc TIG, l'azote se trouve cependant sous forme dissociée et atomique et peut ainsi être absorbé beaucoup plus facilement dans l'acier liquide. Pour protéger l'électrode en tungstène, il y a lieu de veiller à ce que la proportion d'azote ne dépasse pas trop les 3%. Une quantité supplémentaire d'hélium ou d'hydrogène a également pour effet d'augmenter la vitesse de soudage. En raison de la formation de nitrure de titane, la stabilisation de l'austénite par l'azote n'est cependant pas possible avec les aciers alliés au Ti. Une gamme de gaz de protection ayant fait leurs preuves en pratique est proposée dans l'assortiment de Linde sous la marque CRONIWIG®.

Soudage TIG des aciers duplex

Du fait de leur composition chimique et de la constitution de leur structure, les aciers duplex sont en règle générale insensibles à la fissuration par corrosion sous contrainte et ils se distinguent aussi par une résistance assez élevée à la corrosion par piqûres. Par rapport aux aciers austénitiques, ils présentent en outre l'avantage d'avoir une résistance à la traction et une limite élastique plus élevées tout en ayant des caractéristiques de ténacité pratiquement comparables. Compte tenu de ces remarquables propriétés, les aciers duplex ont une utilisation grandissante et on leur prédit un avenir des plus prometteurs. Ces aciers se caractérisent par une teneur en azote assez élevée, outre la présence d'éléments comme le chrome, le nickel et le molybdène qui se trouvent dans les aciers inoxydables. Lors du soudage de ces matériaux, l'apport



Envers de soudure non protégé



Envers de soudure protégé

thermique perturbe l'équilibre de la structure ferrite-austénite (50:50) et c'est la raison pour laquelle on utilise des éléments d'alliages favorisant la formation d'austénite. Même en ce cas, un gaz de protection constitué d'argon avec 3 % d'azote peut garantir le maintien de la résistance à la corrosion et la conservation des caractéristiques mécaniques. L'incorporation d'hélium dans le mélange peut aussi avoir un effet positif sur les performances; il faut toutefois renoncer à la présence d'hydrogène dans le gaz de protection à cause du risque de fissuration de la phase ferritique.

Aciers ferritiques et martensitiques, procédés TIG et MSG

L'aptitude au soudage des aciers ferritiques et martensitiques n'est donnée qu'à condition que leur taux de carbone soit inférieur à 0,08 %. Il est alors possible de les souder sans problème sous argon pur (TIG) ainsi qu'avec des mélanges d'argon et de petites quantités (2,5 %) de CO₂ (procédé MSG). De bons résultats ont aussi été obtenus avec des mélanges composés de trois gaz de protection, à savoir argon, dioxyde de carbone et hélium (77,5 % Ar, 2,5 % CO₂, 20 % He).

Protection envers des tuyaux en acier inoxydable

Les aciers fortement liés doivent présenter la tenue à la corrosion requise dans chaque cas d'application non seulement au niveau du métal de base, mais bien évidemment aussi au niveau des soudures. Ceci vaut aussi pour les tuyauteries et canalisations, et plus spécialement pour les faces intérieures de celles-ci. L'élimination ou la prévention des couleurs de revenu joue un rôle important sachant qu'il arrive souvent qu'un traitement ultérieur – p. ex. par décapage – ne puisse être réalisé, que ce soit pour des raisons liées à la protection de l'environnement ou par manque d'accessibilité. C'est la raison pour laquelle on envisage de plus en plus comme alternative d'empêcher a priori l'oxydation du cordon de soudure du côté de la racine, à l'intérieur des tubes. Pour s'opposer à l'action oxydante préjudiciable de l'oxygène de l'air, on recourt donc à la protection de l'envers des cordons de soudure à l'aide de gaz spéciaux. Les gaz utilisés pour la protection envers sont appelés «formiergaz» (du verbe allemand «formieren» qui désigne cette opération).

Couche passive

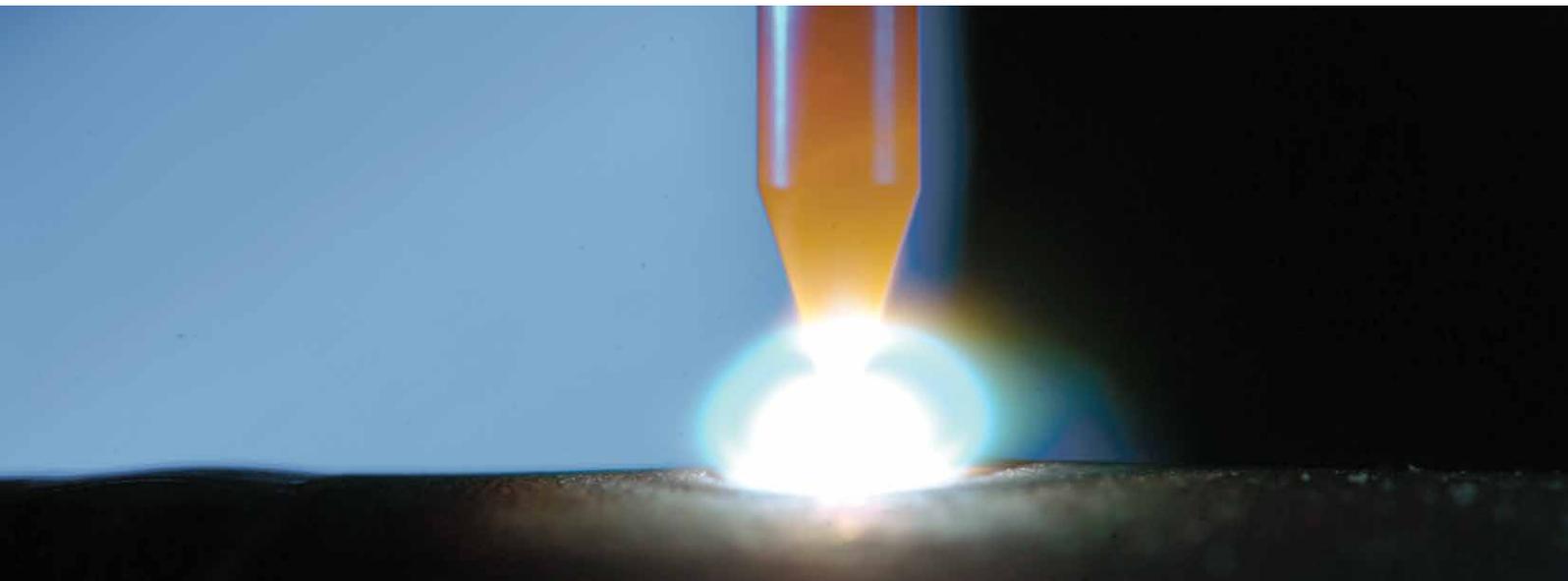
Le comportement des aciers inoxydables face à la corrosion s'explique par la formation d'une couche passive qui empêche que l'élément fer majoritairement présent dans l'acier soit attaqué par l'air humide ou par des acides et qu'il en résulte une désagrégation de la matière sur la pièce. La formation de cette couche passive est étroitement liée à la teneur en chrome de l'acier: à partir d'une teneur en chrome d'environ 12 à 13 %, l'acier résiste à l'air humide; lorsque la teneur en chrome est plus élevée, ainsi que dans les alliages au nickel, au molybdène et au cuivre, on observe que la résistance des aciers continue de s'améliorer vis-à-vis de certains acides.

La couche passive se forme en présence de substances oxydantes, elle a une très faible épaisseur et adhère solidement à la surface par suite de l'existence de forces d'adsorption. En empêchant que se poursuive la réaction du fer avec des oxydants, cette couche est à l'origine de l'état passivé. En l'état actuel des connaissances, on considère que la couche passive est une couche statique, mais qui se trouve en équilibre dynamique avec de l'oxygène dans le milieu environnant.

En conséquence, le phénomène de la corrosion par fissuration peut aussi être interprété comme une perturbation de cet équilibre dynamique. Des examens approfondis de la couche de passivation au moyen de la spectroscopie AES (Auger Electron Spectroscopy) révèlent que la couche superficielle externe qui a une épaisseur de moins de 5 nm est enrichie de chrome et se présente sous forme d'oxyde de chrome difficilement soluble. Cette couche est déterminante pour la bonne résistance à la corrosion des aciers chrome-nickel fortement alliés.

Couleurs de revenu

Les couleurs de revenu apparaissent lors des traitements thermiques ou du soudage, surtout à l'intérieur des tubes, en l'absence d'une protection suffisante contre l'oxydation. Même si les gaz sont amenés par un dispositif sophistiqué, ce phénomène peut être provoqué par de l'oxygène résiduel qui adhère à la superficie du tube lorsque le gaz de protection ne contient pas de composants réducteurs. Les cou-



La choix d'une protection gazeuse appropriée joue un rôle déterminant lors du soudage TIG des aciers inoxydables fortement alliés

leurs de revenu détruisent la couche passive et la remplacent par une nouvelle couche de structure totalement différente qui, elle, n'a pas d'effet protecteur. Ce processus étant complexe, nous n'en esquisserons ici que les grandes lignes en nous limitant à ce qui est nécessaire à sa compréhension. L'apport thermique au moment du soudage provoque des modifications dont les plus importantes au niveau du matériau sont les suivantes:

- Modifications structurales dans la zone de fusion
- Épaississement de la couche passive dans la zone d'apport thermique
- Apparition de nouvelles couches dans les zones de fusion et d'apport thermique par suite de la diffusion d'éléments constitutifs de l'alliage
- Précipitations d'éléments d'alliages sur les joints de grains et augmentation de la sensibilité à la corrosion intergranulaire

Les couleurs de revenu sont le résultat d'une oxydation de la surface par l'oxygène de l'air, l'oxygène résiduel, le dioxyde de carbone ou l'eau, et la couche d'oxyde ainsi formée a en général la même épaisseur pour une même couleur. Cette couleur est déterminée essentiellement par la température maximum atteinte ainsi que par l'évolution de la température en fonction du temps. C'est ce qui explique que les couches d'oxyde obtenues après le soudage TIG soient fondamentalement différentes de celles observées à la suite d'un soudage laser où, étant donné la baisse rapide de la température, il n'y a que peu de temps disponible pour les processus de diffusion. La couleur perçue dans chaque cas est imputable à des interférences qui résultent de la réflexion et de la réfraction de la lumière du fait des différentes épaisseurs des couches.

Les diverses couleurs correspondent chacune à une couche de structure caractéristique dont il résulte également des propriétés différentes en termes de résistance à la corrosion. Dans la plage de température allant jusqu'à environ 400 °C, l'oxygène réagit de préférence avec le chrome en donnant des couches irisées de couleur jaunâtre. Une oxydation notable du fer n'a manifestement pas lieu de sorte que l'on peut considérer qu'une couleur jaune clair correspond à des couches passives renforcées. Aux températures comprises entre 400 et 700 °C, il apparaît des couleurs allant du rouge au bleu et au gris-brun qui correspondent à une toute autre structure. Elles sont dues à une phase superficielle contenant des oxydes de fer et pauvre en chrome qui

se trouve au-dessus d'une phase riche en oxyde de chrome. Du fait de la superposition de ces deux couches, on parle aussi de structure duplex des couleurs de revenu dans cette plage de température. Au-delà de 700 °C, on observe des couleurs de revenu bleu cobalt à bleu pâle correspondant à des couches d'oxydes de fer et de chrome redevenues homogènes du fait de la plus grande mobilité du chrome. Lorsque les cycles de chauffe sont très courts, comme c'est le cas pour le soudage laser, ces couches sont toutefois aussi constituées de deux phases.

Couleurs de revenu et corrosion

Compte tenu de ce qui a été exposé précédemment, il est évident que les caractéristiques de résistance à la corrosion diffèrent suivant les conditions dans lesquelles se sont formées les couleurs de revenu. Pour pouvoir les mettre en évidence et les quantifier, on fait appel à la mesure de ce que l'on appelle le potentiel de corrosion perforante, c'est-à-dire le potentiel électrique à partir duquel la surface perd sa passivité et commence à se détériorer.

Une forte diminution de la résistance à la corrosion a surtout été mise en évidence dans la zone de transition du jaune au rouge, ce que l'on peut expliquer par la présence d'une couche superficielle riche en oxydes de fer. Dans une certaine mesure, la structure des couleurs de revenu est fonction de la composition chimique de l'acier, et les couches des aciers plus fortement alliés au chrome sont plus résistantes.

Table 1: Couleurs de revenu des aciers fortement alliés

Couleur	Température	Épaisseur de la couche
Jaune chrome	< 400 °C	<= 5 nm
Jaune paille	> 400 °C	<= 25 nm
Jaune d'or	~ 500 °C	50-75 nm
Rouge brun	~ 650 °C	75-100 nm
Bleu cobalt		100-125 nm
Blue clair	~ 1000 °C	125-175 nm
Incolore		175-275 nm
Gris brun	~ 1200 °C	> 275 nm



Une protection envers économique grâce aux systèmes Linde

Conclusions

Les couleurs de revenu ne sont pas des couches passives et elles ne peuvent donc pas réduire sensiblement la tenue à la corrosion des aciers inoxydables. C'est la raison pour laquelle il faut les éliminer. On observe toutefois une certaine résistance à la corrosion si les couleurs observées sont exclusivement jaune clair. Dans tous les autres cas, il y a lieu soit d'éliminer les couleurs de revenu après le soudage, soit de prévenir leur formation en utilisant des formiergaz pour protéger l'envers des soudures.

Les gaz de protection envers

La protection envers est un procédé économique, respectueux de l'environnement et propre qui permet d'éviter les couleurs de revenu en garantissant la résistance à la corrosion. La procédure consiste d'abord à chasser l'air en purgeant par balayage, puis à recouvrir la racine du cordon de soudure avec un gaz de protection pendant le soudage. Il importe de veiller à ce que toutes les zones du métal de base et du métal d'apport qui sont soumises à l'action de la température sur les deux faces du cordon soient recouvertes par le gaz de protection jusqu'à une température limite. Ce n'est qu'en deçà de cette limite d'environ 250 °C que l'on peut exclure une absorption critique d'oxygène dans le cas des aciers inoxydables chrome-nickel. Comme l'oxygène peut provenir non seulement de l'atmosphère environnante mais aussi de dépôts adsorbés, il se révèle avantageux d'utiliser de l'hydrogène, à différentes concentrations, comme composant réducteur du gaz. Il est possible en outre de faire appel à cet effet aux gaz ou mélanges de gaz de protection envers suivants:

- Argon, gaz inerte
- Azote, gaz peu réactif
- Mélanges azote-hydrogène, réducteurs
- Mélanges argon-hydrogène, réducteurs
- Mélanges argon-azote, ajout d'azote pour les aciers duplex.

En pratique, on trouve surtout les mélanges de gaz standard qui sont mentionnés dans le tableau ci-après. L'important est que ces gaz de protection envers aient la teneur la plus faible possible en humidité

résiduelle ainsi qu'une teneur en oxygène résiduel qui soit inférieure à 25 ppm pour les aciers austénitiques et de 10 ppm au maximum pour les aciers duplex. En outre, pour les mélanges à base d'hydrogène contenant plus de 10 % de H₂, il y a lieu de brûler le gaz à la sortie afin de prévenir les risques d'explosion. Les différents gaz de protection envers sont destinés à des matériaux déterminés, le tableau de la page suivante donne un aperçu de leurs champs d'utilisation.

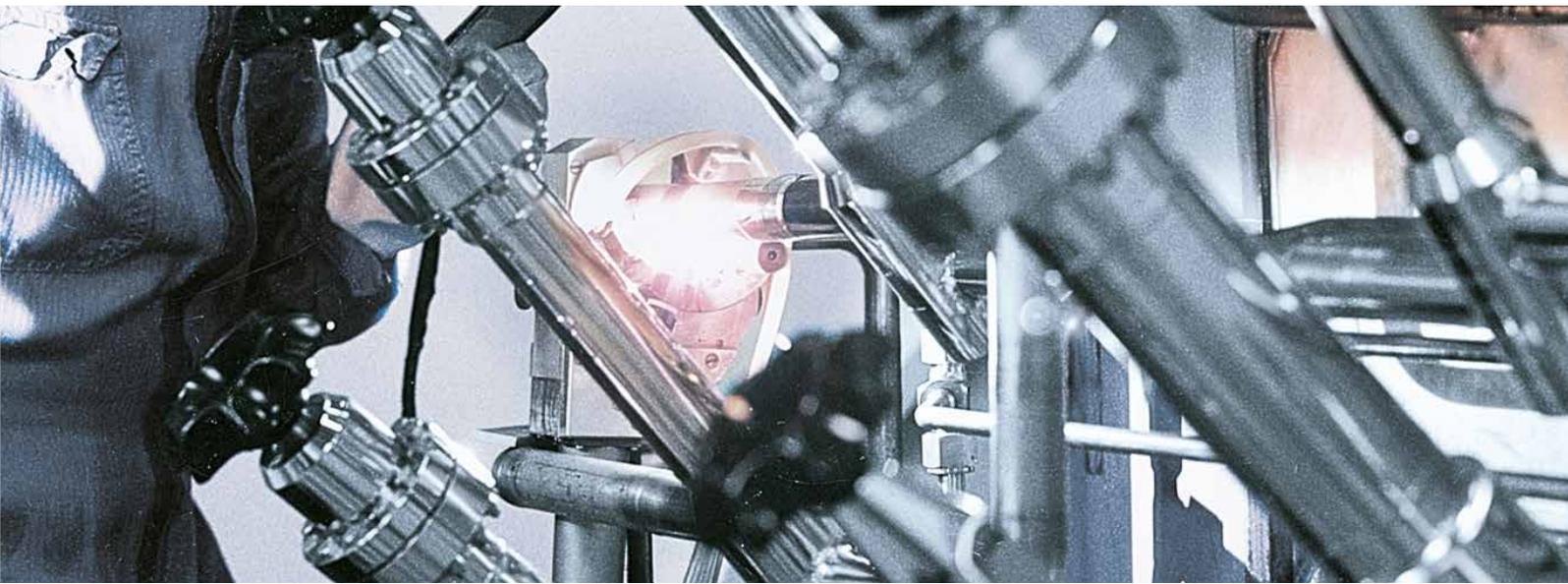
Table 2: Les gaz de protection envers et leurs champs d'application

Gaz de protection	Matériau
Argon	Tous les matériaux
Mélanges Ar/H ₂	Aciers austénitiques, Ni et alliages à base Ni
Mélanges N ₂ /H ₂	Aciers, sauf aciers de construction à grain fin haute résistance, aciers austénitiques (non stabilisés au Ti)
N ₂ Mélanges Ar/N ₂	Aciers CrNi austénitiques, aciers Duplex et Super Duplex

Les gaz de protection envers ne servent pas seulement à éviter l'apparition de couleurs de revenu, ils ont aussi un effet positif sur la formation de la racine de soudure: dans certaines circonstances, la température de fusion nettement plus élevée des oxydes et/ou l'écoulement moins bon du métal sur les bords des joints préoxydés peuvent empêcher le cordon de se fermer à la racine si celle-ci n'est pas protégée. En revanche, lorsqu'on utilise un gaz de protection envers, il est possible d'obtenir une pénétration sans défaut en racine, tous les paramètres de soudage restant par ailleurs absolument identiques.

Aspects pratiques de la protection envers

La plus grande attention doit être accordée à une protection optimale de la racine de soudure par le gaz. Cela signifie qu'il faut chasser l'oxygène à cet endroit pendant toute la durée de l'opération de soudage jusqu'au refroidissement à une température inférieure à la température critique. On y parvient au mieux lorsque le flux de gaz de protection envers est laminaire, sans tourbillonnement avec l'air.



Utilisation de gaz de protection HYDRAGON® pour le soudage orbital

Table 3: Densité des formiergaz

	Densité absolue (kg/m ³)	Densité relative
Azote	1,25	0,97
Formiergaz 95/5	1,19	0,92
Formiergaz 90/10	1,14	0,88
Formiergaz 85/15	1,08	0,83
Formiergaz 80/20	1,02	0,79
Argon	1,78	1,38
Argon-hydrogène 98/2	1,75	1,28
Argon-hydrogène 95/5	1,70	1,27
Argon-hydrogène 93/7	1,67	1,26

Un procédé a fait ses preuves en pratique pour assurer un écoulement laminaire sans turbulences; il consiste à faire passer le gaz de protection dans la tuyauterie par un distributeur constitué de métal fritté. Par ailleurs, l'utilisation de systèmes à compartiments spécifiques se révèle indiquée sous l'angle de la rentabilité du procédé. Pour le soudage orbital, il convient dans la mesure du possible de souder sans écartement des bords afin d'éviter une arrivée d'air incontrôlée. Si un écartement est prévu pour des tubes à parois épaisses ou pour le soudage en position, il y a lieu de recouvrir la fente à l'aide d'un ruban adhésif approprié (ruban aluminium/fibre de verre) et de ne libérer que la zone se trouvant à proximité immédiate du point de soudage. D'autres exemples de conception de dispositifs de protection envers sont décrits dans la Fiche technique DVS 0937 où l'on trouve également des indications concernant les durées de balayage à respecter en fonction du diamètre intérieur des tuyaux pour différents débits de gaz. Si plusieurs tuyaux ayant les mêmes dimensions doivent être soudés sous protection gazeuse envers, il peut être intéressant financièrement d'utiliser un dispositif de régulation automatique de la quantité de gaz et de la durée de purge par balayage préliminaire, ce qui permet de limiter la consommation de formiergaz à la quantité

strictement nécessaire. Il importe également de veiller à ce que le matériau constitutif des tuyaux d'alimentation en gaz ait la plus faible perméabilité à l'eau et à l'oxygène possible afin d'éviter qu'en cas de débit prolongé de gaz de protection, l'humidité ou l'oxygène de l'air puissent pénétrer dans le formiergaz par diffusion ou par effet venturi.

Les flexibles à base de Téflon ou les flexibles en caoutchouc et tissu se sont révélés particulièrement bien adaptés à cet usage. Différentes variantes sont utilisées pour la protection envers étant donné qu'il existe des pièces soudées, tuyaux et systèmes d'amenée de gaz d'une grande diversité qui nécessitent dans chaque cas la mise en œuvre d'une solution spécifique. Pour le soudage des tuyauteries, on fait généralement la distinction entre trois modes de protection envers suivant la manière dont le gaz est guidé:

- Protection envers avec débit axial de gaz pour les soudures orbitales sur les tubes de petits et moyens diamètres ainsi que pour les soudures longitudinales
- Protection envers avec débit radial de gaz pour les soudures orbitales sur les tubes de moyens à grands diamètres
- Purge par balayage préliminaire pour le soudage des tubes de grand diamètre.

Dans le dernier cas, le choix du gaz de protection envers doit être effectué en fonction de la densité de ce gaz de protection envers par rapport à l'air. Pour un balayage ascendant, il y a lieu de prendre des gaz de densité supérieure, pour le balayage descendant, des gaz de densité inférieure à l'air. L'injection du gaz de purge a lieu par le bas pour les gaz assez denses. Les mélanges à base d'azote qui sont plus légers que l'air sont injectés par le haut.





Les gaz de protection spéciaux de Linde permettent aussi le soudage MSG des aciers réfractaires fortement alliés

Bibliographie

DVS Merkblatt 0937

Wurzelschutz beim Schutzgasschweißen

DVS Verlag

Düsseldorf, 1990

DIN EN 439

Schutzgase zum Lichtbogenschweißen
und Schneiden

Ausgabe Mai 1995

Brune, E.

Technique du soudage et du découpage

Guide pratique

PanGas AG

Dagmersellen, 2003

Brune, E., Spichale, B.

Schweissschutzgase

Technica 10/99, S. 50–54

Ruppertswil, 1999

Spichale, B.

Formiergase und Wurzelschutz...

Tirage spécial 48/91

PanGas Lucerne, 1991

Trube, S., Amann, T.

Jahrbuch Schweisstechnik 2001, S. 77–84

DVS-Verlag Düsseldorf, 2000

Brune, E.

Choisir le bon gaz.

Pour souder, couper et protéger.

Tirage spécial PanGas AG

Dagmersellen, 2006

Gümpel, P. et al.

Rostfreie Stähle

Grundwissen, Konstruktions- und Verarbeitungshinweise

Expert-Verlag

Renningen-Malmsheim, 1996

Finke, M., Pries, H., Wohlfahrt, H.

Schweisbedingte Anlauffarben und ihr Einfluß auf die Korrosion
hochlegierter CrNi-Stähle

DVS-Berichte Band 204

Düsseldorf, 1999

Geipl, H.

Formieren beim Schweißen,

Schutzgase, Anwendung, Arbeitssicherheit

Der Praktiker

Schweißen & Schneiden

Band 47 (1995) Heft 1

Geipl, H.

Formieren beim Schweißen,

Spülgase und Formiereinrichtungen

Der Praktiker

Schweißen & Schneiden

Band 47 (1995) Heft 3

Trube, S.

Auswahl von Schutzgasen zum Schweißen von Stahlwerkstoffen

Sonderdruck 04/99

Höllriegelskreuth, 1999

Glossaire

Acier ELC, qualité ELC: désignation d'aciers fabriqués par des procédés spéciaux dont le taux de carbone est extrêmement faible (l'abréviation ELC vient de l'anglais Extra Low Carbon) et qui ont de ce fait une meilleure tenue à la corrosion.

Adsorption: rétention de gaz, de vapeurs ou de substances dissoutes à la surface d'un corps solide.

Analyse chimique: détermination de la composition chimique d'une substance, p. ex. les éléments d'alliage qui se trouvent dans une qualité d'acier.

Argon (Ar): gaz rare incolore et inodore qui est totalement inerte, c'est-à-dire qu'il ne réagit pas chimiquement avec d'autres substances.

Austénite, structure austénitique: constituant de la structure des alliages du fer, à face cubique centrée, souvent appelé aussi fer gamma, n'est stable à température ambiante que dans les alliages au nickel, manganèse et azote.

Azote (N₂): gaz présent dans l'air qui n'entretient pas les combustions. Ne réagit pas à la température ordinaire.

Carbure: composé chimique résultant de la combinaison d'un élément avec du carbone, p. ex. le carbure de fer Fe₃C.

Chaleur de recombinaison: chaleur libérée lors d'une recombinaison (voir Recombinaison).

Corrosion fissurante: phénomène de corrosion qui se produit lorsqu'il ne peut y avoir d'échange de matière dans les fissures.

Corrosion intercrystalline: forme spéciale de corrosion des aciers fortement alliés que l'on observe à la suite d'un traitement thermique inapproprié et qui a pour conséquence un appauvrissement local en chrome.

Couche passive: la résistance à la corrosion des aciers inoxydables s'explique par la présence à la surface du métal d'une couche très mince qui est formée d'oxyde de chrome et qui protège la couche de métal se trouvant par dessous des attaques par la corrosion. Cette mince couche d'oxyde est appelée couche passive.

Couleurs de revenu: couches d'oxyde très minces visibles à la surface des métaux. Les diverses colorations correspondent à des couches de différentes épaisseurs.

Cristallite: zones visibles dans la structure microscopique, entourées par des joints; souvent aussi appelées grains.

Décapage: traitement des surfaces métalliques à l'aide de produits tels que les acides dans le but d'obtenir une surface ayant des propriétés déterminées.

Diffusion: déplacement de particules (atomes, molécules) par suite d'une agitation thermique; peut aussi avoir lieu dans des corps solides comme les métaux.

Dissociation: séparation, désagrégation, décomposition d'un composé chimique ou d'une molécule.

Écoulement laminaire: écoulement lors duquel les gaz ou les liquides se déplacent sans former de tourbillons. Le contraire est un écoulement turbulent.

Effet réducteur: effet d'une substance capable de diminuer le degré d'oxydation d'une autre, par exemple en donnant un métal à partir d'un oxyde métallique.

Énergie de dissociation: énergie nécessaire pour rompre une liaison chimique ou scinder une molécule; il s'agit souvent d'énergie calorifique.

Équilibre dynamique: état d'équilibre apparent caractérisé par l'ajout et le retrait constants de particules.

Ferrite: constituant des alliages du fer composé presque uniquement de fer pur et ayant une structure cubique à corps centré; est souvent aussi qualifié de fer alpha.

Flux axial: flux suivant l'axe longitudinal d'un tuyau.

Flux radial: flux suivant le rayon d'un tuyau.

Formiergaz: mélange composé d'azote et d'hydrogène qui est utilisé pour la protection envers dans le cas des aciers austénitiques inoxydables.

Gaz de protection: pendant les opérations de soudage, le gaz protège le métal fondu de l'atmosphère et empêche ainsi les réactions avec l'oxygène ou l'azote contenus dans l'air. Dans le cas du procédé TIG, il protège en outre l'électrode.

Hydrogène (H₂): gaz combustible ayant des propriétés réductrices.

Inerte: les substances qui ne donnent aucune réaction chimique au contact d'autres substances sont appelées inertes. En font partie les gaz rares comme l'argon ou l'hélium.

Ion: atome ou groupes d'atomes chargé d'électricité positive ou négative.

Ionisabilité: indique la tendance d'un atome ou d'une molécule à se charger électriquement pour donner un ion.

Ionisation: passage d'un atome ou d'une molécule à un état chargé électriquement.

Interférences: en physique, phénomène résultant de la superposition dans l'espace de vibrations ayant la même longueur d'ondes; des couleurs d'interférence sont visibles aussi lorsqu'il y a un film d'huile à la surface de l'eau.

Joints de grains: les métaux sont constitués de multiples cristaux de taille minuscule qui sont séparés les uns des autres par des interfaces que l'on appelle joints de grains (les cristaux sont aussi souvent qualifiés de grains). Comme les impuretés et les précipitations s'y accumulent fréquemment, les joints de grains sont des points d'attaque préférentiels de la corrosion.

Métal fritté: Métal ayant une structure spongieuse (poreuse) qui est de ce fait perméable aux gaz.

Molécule: Plus petite entité d'un composé chimique, constituée de deux ou plusieurs atomes qui peuvent aussi être identiques.

Molybdène (Mo): Élément métallique dont la présence dans les alliages améliore la résistance à la corrosion par piqûres et par fissuration.

Nickel (Ni): Élément non métallique qui stabilise la structure austénitique des aciers.

Nitru: Composé résultant de la combinaison chimique d'un élément avec l'azote.

Oxyde: Composé résultant de la combinaison chimique d'un élément avec l'oxygène.

Oxydation: Absorption d'oxygène, combinaison avec l'oxygène.

Oxydation du fer: Réaction chimique entre le fer et l'oxygène; il existe différents oxydes de fer (Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeO).

Oxyde de chrome: Composé chimique résultant de la combinaison du chrome et de l'oxygène.

Oxygène résiduel: Petites quantités d'oxygène qui subsistent, p. ex. à cause de l'humidité.

Passé de fond: Couche inférieure déposée lors de la première passe au cours d'un soudage en plusieurs passes.

Peau d'oxyde: Couche très mince constituée d'un oxyde.

Perte au feu/augmentation du poids par réduction: Correspondent respectivement à la perte d'éléments d'alliage lors du soudage et à une augmentation de la concentration.

Potentiel de corrosion: Tension électrique à partir de laquelle commence la corrosion superficielle d'un métal, c'est-à-dire à laquelle la surface perd sa passivité.

ppm: Parties par million, unité utilisée pour exprimer les très petites quantités.

Recombinaison: En chimie, ce terme est employé lorsqu'il se produit une nouvelle combinaison d'atomes ou de molécules d'une substance qui avaient été dissociée précédemment. Exemple: décomposition du dioxyde de carbone en carbone, monoxyde de carbone et oxygène, suivie d'une nouvelle formation de dioxyde de carbone.

Soudage orbital: Soudage circulaire autour d'un tube utilisé pour l'assemblage de deux parties de tuyau.

Structure duplex: Constituée de deux couches de différentes compositions.

Sulfure: Composé résultant de la combinaison chimique d'un élément avec le soufre. Exemple: le sulfure ferreux (FeS).

A la pointe de l'innovation, partout dans le monde.

Filiale du Linde plc, l'un des chefs de file mondiaux du secteur gaz, Linde joue un rôle de pionnier sur le marché grâce à ses concepts innovants de production et d'approvisionnement. Leadership technologique oblige, nous nous devons de placer la barre toujours plus haut. C'est donc dans un esprit d'entreprise et de progrès que nous œuvrons sans cesse à développer des produits de pointe et des procédés résolument novateurs.

Au-delà, Linde apporte à sa clientèle une réelle valeur ajoutée, des avantages concurrentiels significatifs et une optimisation de la rentabilité. Chaque solution constitue une réponse aux exigences spécifiques d'un client. Elle est unique et personnalisée. Cette approche individualisée s'applique à toutes les entreprises, grandes ou petites, et à tous les secteurs d'activité.

Pour faire face à la concurrence de demain, vous avez besoin d'un partenaire averti qui maîtrise parfaitement les enjeux du futur en terme de qualité, d'efficacité et de productivité. A nos yeux, un partenariat ne signifie pas simplement présence ou assistance, mais une véritable collaboration avec vous. La réussite commerciale n'est-elle pas le fruit d'une activité conjointe?

Linde – ideas become solutions.