

ALUMINIUM, LE MATÉRIAU DE L'AVENIR

NOTICE D'INFORMATION SUR L'ALUMINIUM – 1ÈRE PARTIE

Le soudage de l'aluminium et des alliages d'aluminium n'est pas difficile; il est tout simplement différent du soudage de l'acier inoxydable ou de l'acier. Si on prend les précautions appropriées et si on suit les règles, le soudage se fait sans problèmes. Cet article donne des informations générales sur l'aluminium et traite des problèmes qui peuvent apparaître lors du soudage. Un aperçu est ensuite donné sur les différents types d'aluminium et ce, suivant la classification américaine et la classification européenne. La troisième partie donne un aperçu des procédés de soudage pouvant être utilisés, avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Par Ir. R. Vennekens, EWE - Institut Belge de la Soudure
Ing. B. Verstraeten, IWE - Institut Belge de la Soudure
Ing. K. Broeckx, EWE - Institut Belge de la Soudure
(Traduction: M.C. Ritzen - Institut Belge de la Soudure)



La consommation en aluminium et en alliages d'aluminium augmente d'année en année. Cette hausse se marque principalement dans le secteur du transport et de l'automobile (Toute doc. Marc Martens)

POURQUOI APPLIQUER L'ALUMINIUM?

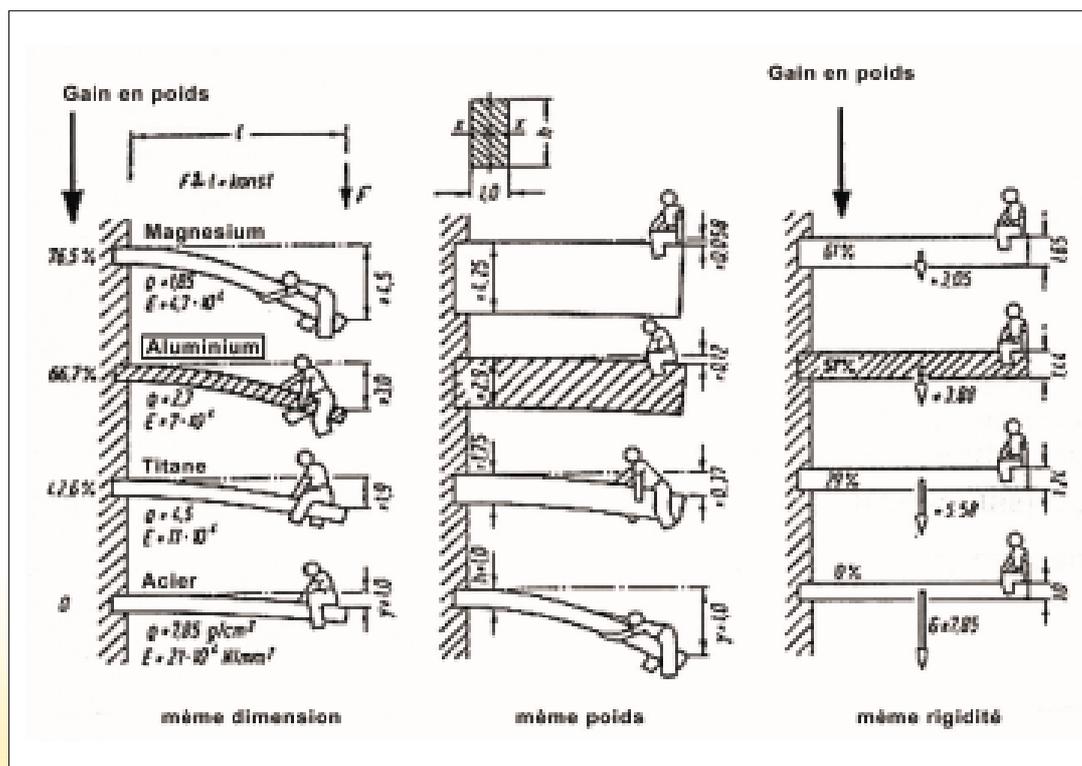
L'aluminium apparaît le plus dans l'écorce terrestre, après le silicium. Le minerai d'aluminium se présente sous forme de bauxite. La consommation en aluminium et en alliages d'aluminium augmente

d'année en année dans tous les secteurs. Cette hausse se marque principalement dans le secteur du transport et de l'automobile. L'aluminium est un matériau très léger mais très résistant quand il est allié à du Mg, Mn, Si, Cu et Zn. Les alliages d'aluminium sont très résistants aux influences

atmosphériques, à la corrosion par l'eau de mer et à de nombreux acides oxydants. La résistance à la corrosion dépend de l'alliage choisi et dépend également du type d'environnement dans lequel l'alliage est appliqué. Si on compare l'aluminium à l'acier, les propriétés mécaniques

sont plus faibles et le matériau est moins rigide que l'acier (module d'élasticité plus faible). Pour une même section et une même charge, l'aluminium fléchira trois fois plus que l'acier. Le poids spécifique de l'aluminium (2,79 g/cm³) est trois fois plus petit que celui de l'acier (7,8 g/cm³). On peut avoir une construction en aluminium 50% plus légère qu'en acier (fig. 1). De plus, l'aluminium ne se fragilise pas à basse température. Un point positif très important: l'aluminium peut être recyclé, ce qui en fait un matériau écologique.

Fig. 1: On peut avoir une construction en aluminium 50% plus légère qu'en acier



DOMAINES D'APPLICATION DE L'ALUMINIUM

Les domaines d'application de l'aluminium sont entre autres:

- constructions: ponts, poteaux d'éclairage, panneaux de circulation, planchers, ponts, ...
- transport: remorques de camions, éléments de carrosserie, éléments de moteurs, construction aérienne et navale, containers, applications spatiales, ...
- équipements électriques et électroniques, conducteurs de courant, câbles, ...
- industrie chimique, industrie alimentaire et agricole, réservoirs, conduites, échangeurs de chaleur, applications cryogéniques, ...
- construction de logements, éléments de façades, fenêtres, portes, ...

- articles de ménage et de bureau, appareils ménagers, ...
- emballage: boîtes et films

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'ALUMINIUM IMPORTANTES POUR LE SOUDAGE

- Comme on l'a déjà dit, le soudage de l'aluminium et de ses alliages est différent du soudage de l'acier.

L'aluminium est couvert d'une pellicule d'oxydes qui se forme spontanément au contact de l'air. Cette pellicule d'oxydes a un point de fusion de 2050°C environ. Le point de fusion de l'aluminium pur n'est que de 658°C. Les alliages d'aluminium ont un intervalle de fusion: pour la plupart des alliages d'aluminium soudables, celui-ci se situe entre 575 et 655°C.

Lorsque la température augmente, l'épaisseur de la couche d'oxyde augmente rapidement. Cette couche d'oxydes ne peut être éliminée que par voie mécanique, chimique ou sous l'action de l'arc de soudage. Comme l'oxyde d'aluminium est plus lourd que le métal même, des particules d'oxyde peuvent s'enfoncer dans le bain de soudage et former ainsi des inclusions dans la soudure.

Un grand problème lors du soudage de l'aluminium est que celui-ci fond sans qu'il y ait de modification de couleur! Le point de fusion ne s'annonce donc pas par une variation de la couleur et pour des soudeurs non expérimentés, le matériau s'effondre soudainement.

De plus, l'aluminium a un coefficient de dilatation (23.10⁻⁶ mm/mm°C) environ deux fois plus élevé que celui de l'acier (12.10⁻⁶ mm/mm°C). Mais comme le point de fusion est beaucoup plus faible, la déformation reste limitée. On peut la comparer à la déformation obtenue quand on soude l'acier.

Un autre problème est la conductibilité thermique élevée de l'aluminium. Celle-ci est environ cinq fois plus élevée que celle de l'acier. La chaleur nécessaire pour



Fig. 2: Exemple d'une soudure poreuse

le soudage, malgré le point de fusion beaucoup plus faible de l'aluminium par rapport à l'acier, est cependant plus élevée que pour le soudage de l'acier. Pour le soudage de l'aluminium, on a besoin de 20% de chaleur en plus que pour le soudage de l'acier.

La pellicule d'oxydes (Al₂O₃) qui a un point de fusion élevé, est également un isolant. Surtout dans des pièces anodisées, cette pellicule d'oxydes est épaisse et peut résister à une tension d'environ 400 V. Si on place donc la prise de masse sur une telle couche d'oxydes, cela donnera certainement des problèmes de soudage. Afin d'éviter ce type de

l'apparition de porosités.

La pellicule d'oxydes d'aluminium qui se forme spontanément, est très hygroscopique. Cette humidité se décompose dans l'arc en hydrogène et oxygène. L'oxygène ne donne pas lieu à des porosités. L'hydrogène est dix-neuf fois plus soluble dans l'aluminium liquide que dans l'aluminium solide. Par conséquent, durant la solidification, cet hydrogène s'échappe, ce qui donne des soudures poreuses (fig. 2). Afin d'obtenir des soudures exemptes de porosités, il faut éliminer la pellicule d'oxydes avant le soudage, soit par voie chimique (décapage), soit par voie mécanique (meulage, fraisage, ...). Il faut ensuite souder dans les quatre heures qui suivent car la pellicule d'oxydes se reforme spontanément au contact de l'air. Une autre solution pour éliminer cette humidité est de préchauffer ou de diminuer l'humidité de l'air (assèchement de l'air ambiant). Cette dernière solution est très onéreuse. Elle a été appliquée avec succès, il y a quelques années, dans un très grand atelier en Wallonie. Les éléments à souder avaient été débarrassés de la pellicule d'oxydes, par voie chimique, avant le soudage. (Fig. 2: Exemple d'une soudure poreuse)

Afin de diminuer ou éviter le risque de porosités, il faut nettoyer

soigneusement le métal de base à l'endroit de la soudure et aux environs de la soudure. Ce nettoyage est également nécessaire pour le fil de soudage (métal d'apport).

La graisse peut également être une source d'hydrogène.

Sources d'hydrogène

L'hydrogène qui se dissout dans le bain de fusion est atomique et apparaît dans l'arc. L'hydrogène apparaît rarement sous forme de molécule de gaz dans le gaz de protection sauf si le choix du gaz est erroné. L'humidité et les hydrocarbures qui se trouvent dans le gaz de protection, vont partiellement se décomposer dans l'arc. L'hydrogène atomique ainsi créé peut se dissoudre dans le bain de fusion. Pour limiter et/ou éviter les porosités, il faut empêcher la dissolution de l'hydrogène et toutes les sources d'humidité et d'hydrocarbures doivent être éliminées. Ces sources sont:

Humidité:

- air ambiant humide qui s'introduit dans le gaz de protection
- humidité condensée sur une pièce froide
- oxydes d'aluminium hygroscopiques sur les bords de la soudure
- eau froide d'une torche de soudage non étanche
- infiltration d'air dans un système de distribution de gaz
- diffusion d'humidité par les tuyaux flexibles

Hydrocarbures (huile et graisse):

- impuretés sur les bords de la soudure par des mises en oeuvre
- huile venant d'outil sous pression
- graisse des mains ou des gants
- il y a donc plusieurs causes possibles de porosités.

Il est toujours bon d'éliminer ces sources à l'endroit où on travaille. Un joint bien préparé est l'étape la plus importante pour souder l'aluminium avec succès.

Mais même avec des bords nets, des porosités peuvent apparaître

UN GRAND PROBLÈME LORS DU SOUDAGE DE L'ALUMINIUM EST QUE CELUI-CI FOND SANS QU'IL Y AIT DE MODIFICATION DE COULEUR!

problème, il vaut mieux débarrasser l'aluminium de cette couche d'oxydes à l'endroit où la prise de masse peut être située.

DÉFAUTS DANS LES SOUDURES: POROSITÉS

Le problème le plus important lors du soudage de l'aluminium est

Tableau 1: La relation entre le point de rosée et la concentration en humidité

| Point de rosée | Concentration en humidité |
|----------------|---------------------------|
| -20°C | 1020 ppm |
| -30°C | 378 ppm |
| -40°C | 128 ppm |
| -50°C | 39 ppm |
| -60°C | 10,5 ppm |
| -65°C | 5,3 ppm |
| -70°C | 2,5 ppm |
| -80°C | 0,6 ppm |
| -90°C | 0,1 ppm |

Tableau 2: Perméabilité de divers matériaux de tuyaux pour l'humidité et l'oxygène

| Matériau de tuyau | Coefficient de perméabilité | | Teneur en humidité* |
|-------------------|-----------------------------|-----------|---------------------|
| | Humidité | Oxygène | |
| Uréthane | 3.500-12.500 | 15,2 – 48 | 18 ppm |
| Polyéthylène | 120-2.100 | 11 – 59 | 1 – 2 ppm |
| PVC | 2.500-6.300 | 1,2 – 6 | 6 ppm |
| Butadiène-styrène | 24.000 | 172 | 15 ppm |
| Téflon | 360 | inconnu | 1 – 2 ppm |

* après 6 heures de rinçage avec 100 l/h d'hélium

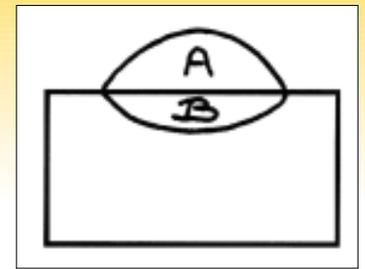
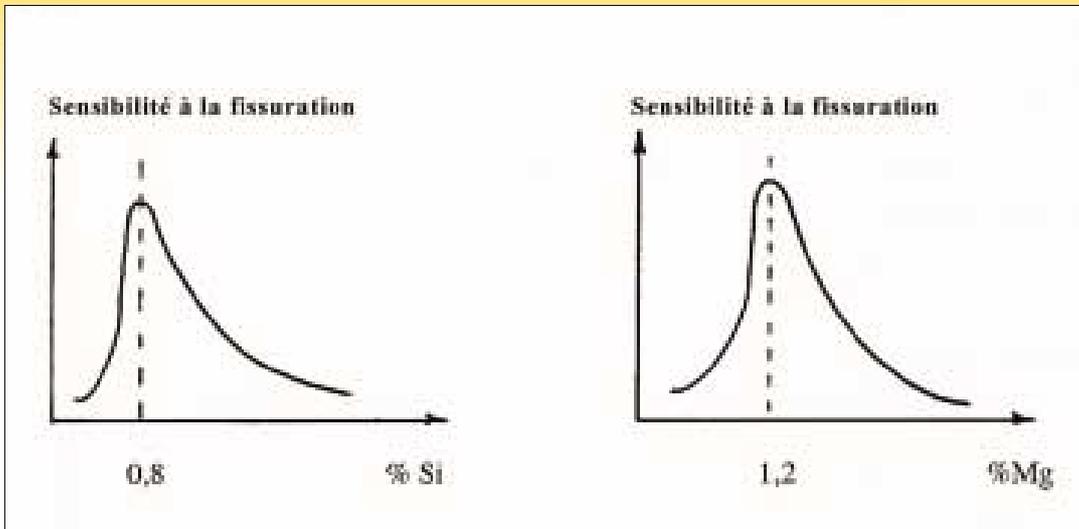


Fig. 3 & 4: Coupe d'une soudure. Pour une teneur en silicium de 0,8% de la soudure (surface A + B dans la fig. 3) ou une teneur en magnésium de 1,2% de la soudure, on aura une sensibilité à la fissuration maximale (Fig. 3)

durant le soudage quand on ne soude pas dans les quatre heures après la préparation. La pellicule d'oxydes se forme spontanément au contact de l'air et l'humidité augmente dans cette pellicule. Cette humidité mène à des porosités. L'humidité ne peut être éliminée que par chauffage ou par élimination des oxydes. Faire un traitement le soir pour souder le lendemain est tout à fait déconseillé.

Souder directement des éléments froids en aluminium posera certainement des problèmes dus à l'humidité sur les pièces. Quand on stocke, par ex., des pièces dehors en hiver, il faudra d'abord les acclimater avant de les souder. L'usinage de l'aluminium doit se faire à sec, sans liquide de refroidissement.

Quand les pièces à souder sont trop grandes pour les dégraisser dans un bain, elles doivent être dégraissées localement avec un dissolvant approprié et il faut veiller à ce qu'elles n'entrent pas en contact avec de l'huile et/ou de la graisse.

Si, malgré les précautions prises, apparaissent encore des porosités, elles ne peuvent être dues qu'à de

l'humidité venant du gaz de protection.

Une des recommandations pour les gaz de protection est que le point de rosée doit être de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou inférieur. C'est un conseil inutile car l'argon ayant un point de rosée supérieur à $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ n'est pas disponible. La relation entre le point de rosée et la concentration en humidité est intéressante à connaître (Tableau 1: Relation entre le point de rosée et la concentration en humidité) Bien souvent, le gaz entre en contact avec l'humidité entre la bouteille et la torche. Il est rare d'avoir la même qualité d'argon venant de la torche de soudage que dans la bouteille. La cause en est la condensation, diffusion ou infiltration d'humidité dans le système de distribution de gaz.

Adsorption:

Dans la technologie du gaz existe une grande crainte de pollution par l'humidité. En raison de son point élevé de condensation, l'humidité condensée se laisse très difficilement éliminer. Si une torche de soudage ou un tuyau de gaz n'est pas utilisé pendant un certain temps, il y aura de la condensation d'humidité dans les tuyaux due aux

variations de températures. Un film d'humidité se déposera à l'intérieur du tuyau de gaz. Ceci s'appelle l'adsorption. Si cette torche de soudage est ensuite utilisée, cette humidité provoquera une forte augmentation de la teneur en humidité dans le gaz de protection. Juste après un certain temps de rinçage, une teneur en humidité comparable à celle de la bouteille sera atteinte à condition qu'il n'y ait pas de diffusion d'humidité par les tuyaux (voir point suivant). Cette teneur élevée en humidité après le début du soudage est grandement responsable des problèmes de porosités; ainsi, après des nuits froides ou après le week-end, des porosités apparaîtront dans les premières soudures. Le soudeur expérimenté sait cela et il rincera sa torche avec de l'argon durant 10-15 minutes environ.

Une meilleure solution plus pratique est de ranger les torches, après travail, dans une armoire chauffée et de sécher le tuyau dans la torche.

Pour un travail de très haute qualité, il est même conseillé de rincer la torche de soudage en continu avec une petite quantité

d'azote sec. Ces mesures semblent exagérées mais sans celles-ci, on aura toujours une augmentation de la teneur en humidité de 50 ppm.

Diffusion:

La diffusion de l'humidité par les tuyaux souples se fait avec la plupart des matériaux de tuyaux. Cette diffusion se fait en trois étapes:

- les molécules de gaz se dissolvent dans le matériau des tuyaux du côté de la pression de la vapeur partielle la plus élevée, donc du côté extérieur
- les molécules de gaz diffusent au travers du matériau des tuyaux vers l'intérieur du tuyau
- les molécules de gaz s'échappent du matériau du tuyau à l'intérieur du tuyau.

Même quand le matériau n'est pas poreux, ce processus peut se produire. Cette diffusion se fera lors d'une éventuelle surcharge dans le tuyau. Également par de petites fissures ou mauvais raccords, le gaz de l'atmosphère diffusera vers l'intérieur du système de distribution de gaz. La différence dans la pression de la vapeur partielle est ici la force agissante. Tous les matériaux de tuyaux ne sont pas perméables aux gaz de la même façon. Ceci peut être exprimé par un coefficient de perméabilité. Plus ce coefficient est élevé, plus le matériau est perméable au gaz. Le coefficient de perméabilité ne vaut que pour un seul gaz. Il peut donc arriver qu'un tuyau laisse passer beaucoup d'oxygène mais peu d'humidité, comme le Téflon. Pour l'aluminium, il faut se soucier principalement de l'humidité. Le tableau 2 reprend le coefficient de perméabilité de divers matériaux de tuyaux.

Le PVC est actuellement le matériau le plus utilisé pour les tuyaux. Le butadiène-styrène est le matériau de tuyaux pour oxygène et est fort utilisé pour allonger les tuyaux. Il semble donc que pour le soudage de l'aluminium, on utilise souvent le mauvais matériau. Un remplacement par du Téflon ou

Fig. 5: Exemple d'une fissure à la solidification au coeur d'une soudure TIG aluminium (alliage extrudé avec 0,8% Si)



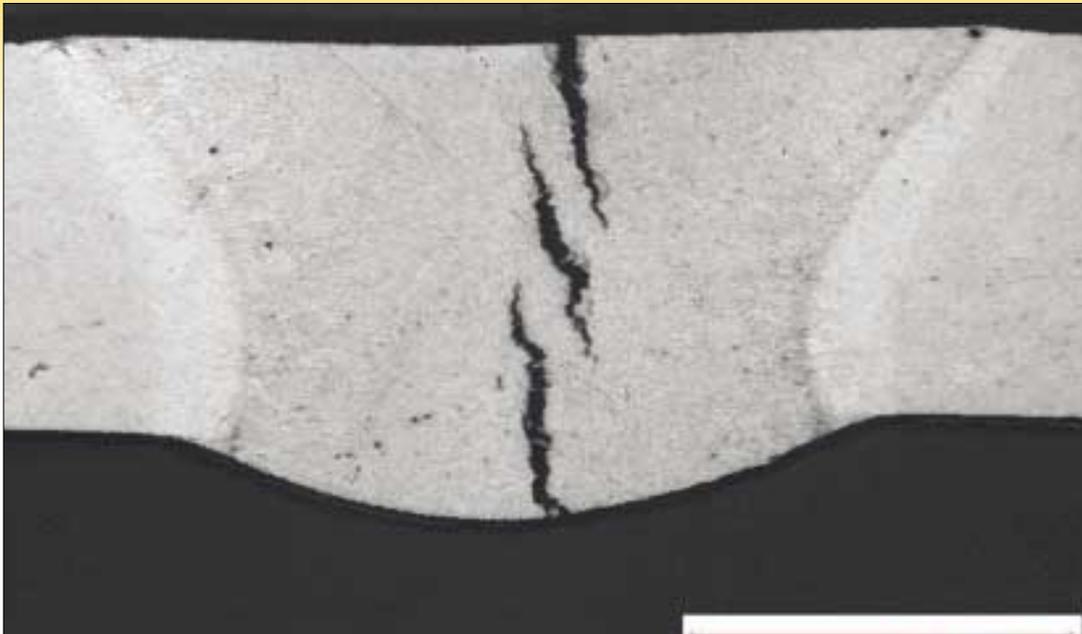


Fig. 6: Coupe d'une fissure à la solidification

encore mieux par du polyéthylène afin de maintenir une teneur en oxygène basse, est fortement recommandé du point de vue des porosités. Le soudage avec des tuyaux en caoutchouc et PVC, de par leur perméabilité élevée, provoquera l'apparition d'humidité dans le système de distribution de gaz, sans parler de l'accumulation d'humidité au repos.

Infiltration:

En plus des fissures et des mauvais raccords, l'infiltration de l'air joue, également un rôle. Des raccords usés, des tuyaux non étanches ou des fissures dans le tuyau peuvent rapidement contribuer à l'encrassement du système de distribution de gaz. La réalisation régulière d'un essai d'étanchéité en mettant le système sous pression est obligatoire lors du soudage de l'aluminium. Afin de contrôler le système de distribution de gaz, il faut régulièrement, de préférence journalièrement, comparer la quantité de gaz venant de la torche avec la valeur indiquée sur le détendeur. Une différence est inacceptable, surtout dans le cas de l'aluminium. La cause doit être détectée directement.

Dégraissage:

L'immersion ou le rinçage avec un dissolvant ou le frottement avec des étoffes de coton propres avec des dissolvants organiques sont des méthodes appropriées pour l'élimination de la graisse, huile, impuretés ou particules sur la surface du matériau.

Nettoyage mécanique:

Le nettoyage avec des brosses rotatives en acier inoxydable, le raclage ou le limage sont de bonnes méthodes pour éliminer les oxydes et les impuretés à la surface. Le dégraissage doit toujours se faire avant le nettoyage mécanique.

Nettoyage chimique:

Une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) peut être utilisée comme bain de décapage mais doit être suivie d'un rinçage dans une solution de 5-10% d'acide nitrique (HNO₃) et de l'eau propre afin d'éliminer les produits de réaction à la surface. Durant le soudage à l'arc, l'introduction de l'air dans le gaz de protection doit être évitée afin de garantir la protection gazeuse. Il faut protéger l'environnement de la soudure des courants d'air.

Pour des travaux de soudage de très haute qualité, il faut veiller à ce qu'aucune vapeur d'eau venant des

tuyaux et de la torche n'entre en contact avec l'atmosphère de l'arc. Il est donc conseillé de rincer les lignes d'alimentation de gaz durant une heure au moins avec le gaz de protection sec pour des travaux de soudage de très haute qualité.

FISSURATION À CHAUD:

Influence de la teneur en magnésium (Mg) et silicium (Si) sur la fissuration:

Sensibilité à la fissuration du métal déposé

Le choix correct du métal d'apport et de la procédure de soudage peut fortement diminuer le risque de

fissuration à chaud. Pour ce faire,
 - on adaptera la préparation du joint et on limitera la dilution
 - on évitera le bridage
 - on tendra vers une vitesse de refroidissement élevée afin de limiter les ségrégations au milieu de la soudure
 - on choisira une séquence de soudage appropriée.

Le choix du métal d'apport dépend de la composition du métal de base en tenant compte de la dilution obtenue. Celle-ci dépend de la préparation du joint, du procédé de soudage et de la procédure de soudage suivie.

En pratique, on choisit souvent un métal d'apport égal ou supérieur au métal de base afin de diminuer la sensibilité à la fissuration et d'obtenir une résistance à la traction de la soudure égale ou supérieure à celle du métal de base.

La dilution est définie par:

$$\frac{\text{Surface B}}{\text{Surface (A + B)}} \times 100 (\%)$$

(Fig. 3: Coupe d'une soudure)

Dilution:

Si on choisit mal le métal d'apport en fonction du métal de base, des fissures apparaîtront toujours. Pour une teneur en silicium d'environ 0,8% de la soudure (surface A + B dans la fig. 3) ou une teneur en magnésium de 1,2% de la soudure, on aura une sensibilité à la fissuration maximale (Fig. 4). Quand, par ex., on soude un alliage d'aluminium ayant une teneur de 0,8% Si, sans métal d'apport, des fissures apparaissent certainement. La fissure apparaît au milieu de la soudure et suit le sens du soudage (fissuration à chaud). Quand, par ex., on soude de l'aluminium pur avec un métal d'apport AlMg3 (3% Mg) avec le procédé de soudage MIG, la dilution (dans des conditions normales) peut être estimée à 30%. On obtient ainsi une soudure ayant une teneur en Mg de 2,1% environ et on n'aura aucun problème de fissuration à chaud.

Cependant, si on soude en MIG un matériau AlMg3 avec un fil Al pur (avec 30% de dilution), on obtient alors une soudure ayant une teneur en Mg de 0,9% et le risque de fissuration à chaud est très élevé!!

Pureté

- Il faut éviter l'humidité et la graisse (l'oxyde d'aluminium est hygroscopique)

- Avec un fil de soudage sale (soudage MIG), une grande quantité d'impuretés, lors de vitesses de dépôt élevées, entrera dans le bain de fusion (porosités!)

- Afin de maintenir au minimum le rapport oxyde/dépôt, un fil de diamètre aussi grand que possible sera utilisé.

Le fil d'apport en aluminium doit également être traité avec le plus grand soin:



Fig. 7: Exemple d'une fissure de cratère typique

- conserver dans un endroit sec (éviter la formation de condensation)
 - maintenir l'emballage fermé jusqu'à utilisation
 - ne pas toucher le fil à mains nues
 - veiller à ce que le mécanisme d'entraînement du fil n'apporte pas d'impuretés
 - conserver le reste du fil dans son emballage, après soudage.
- L'expérience pratique montre qu'un fil vieux de plus de trois ans, peut donner lieu à des problèmes de soudage!

La fissuration à chaud peut également apparaître dans la zone influencée thermiquement quand des films liquides se forment à partir de l'aluminium à faible point de fusion et se déposent sur les joints de grains.

La cohésion du matériau est ainsi perdue et les grains s'écartent les uns des autres sous l'influence des tensions de retrait.

Les alliages traités thermiquement de la série 6xxx, 7xxx et 8xxx sont surtout très sensibles à ce type de fissuration. Le risque de ce type de fissuration peut être diminué en appliquant un métal d'apport ayant un intervalle de fusion plus petit que celui du métal de base; ainsi les alliages 6xxx sont soudés avec des métaux d'apport 4xxx. Ces métaux d'apport 4xxx ne peuvent pas être appliqués pour des métaux de base à haute teneur en Mg (comme le 5083) en raison de la formation d'un alliage de magnésium sur la ligne de fusion qui diminue fortement la ténacité et augmente la sensibilité à la fissuration à chaud et à froid.

FISSURATION À LA SOLIDIFICATION

Les fissures à la solidification apparaissent dans les soudures d'aluminium à cause d'une combinaison de tensions de retrait transversales élevées à la suite d'un coefficient élevé de dilatation (deux fois plus grand que l'acier) et à la suite d'un retrait important à la solidification (environ 50% plus

LES TENSIONS PEUVENT ÊTRE CONTRÉES PAR UNE PRÉPARATION DU JOINT APPROPRIÉE, UNE OUVERTURE ADÉQUATE ET UNE BONNE SÉQUENCE DE SOUDAGE

élevé que l'acier). Les fissures à la solidification apparaissent principalement au cœur de la soudure tant durant la solidification que juste après (fig. 5 et 6).

Les fissures de cratère (fig. 7) appartiennent également à cette catégorie.

Les causes principales de fissuration à la solidification sont:

- métal d'apport inapproprié pour le métal de base
 - forme défavorable de la soudure
 - soudure où le retrait est empêché en raison de la rigidité des éléments de construction.
- Le risque de ce type de fissuration peut être réduit en appliquant des métaux d'apport ayant une résistance élevée à la fissuration, ayant une composition fort différente du métal de base

(souvent de la série 4xxx ou 5xxx). Cependant, l'inconvénient de cette pratique est que la soudure a souvent une résistance moindre que celle du métal de base qui ne peut pas être améliorée par un traitement thermique après soudage. Les cordons doivent également être suffisamment épais afin d'avoir une section suffisante pour pouvoir résister aux tensions de retrait dans la phase de solidification et de refroidissement. De plus, les tensions peuvent être contrées par une préparation du joint appropriée, une ouverture adéquate et une bonne séquence de soudage. Les fissures en fin de cratère peuvent être évitées en alimentant en fil jusqu'au bout lors du soudage TIG. Une autre technique consiste à faire marche arrière à la fin de la soudure et à s'arrêter sur le cordon de soudure.

MAUVAIS ASPECT EXTERIEUR

Un mauvais réglage des paramètres sur l'appareil de soudage et une visibilité et aptitude insuffisante du soudeur peuvent engendrer très facilement des défauts tels que: manques de liaison, pénétration insuffisante, caniveaux, manques d'épaisseur et surépaisseurs. La conductibilité thermique élevée de l'aluminium et la rapidité de solidification du bain de fusion en combinaison avec la présence d'éventuels restes d'oxydes rendent les alliages d'aluminium très sensibles aux défauts susnommés. Un soudeur d'aluminium qui connaît ces défauts

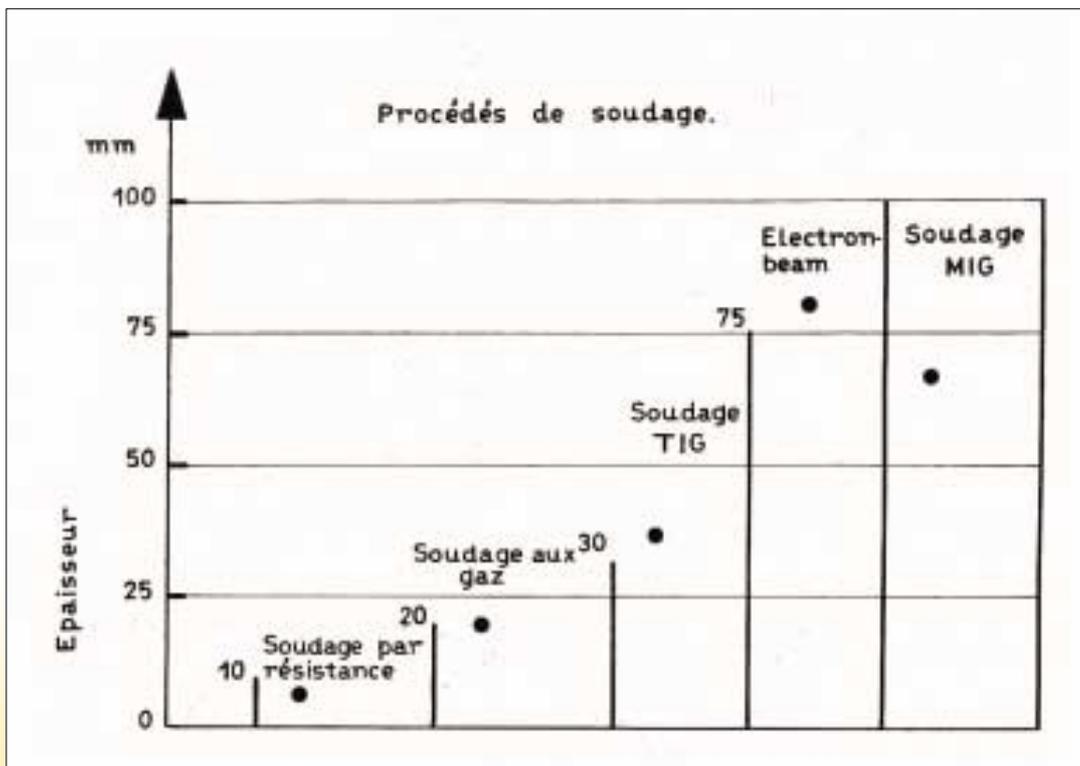
et qui sait les éviter, peut sans conteste être considéré comme un spécialiste!

COLLAGES - MANQUES DE FUSION

Les collages peuvent être dus à un apport calorifique trop faible ou à une teneur en oxygène trop élevée dans l'arc.

L'apport calorifique est lié au procédé. Ceci signifie (dans des conditions normales comme par ex. soudage à température ambiante sans préchauffage) que le choix du procédé de soudage est déterminé par l'épaisseur du matériau (fig. 8). □

Fig. 8: L'apport calorifique est lié au procédé. Ceci signifie que le choix du procédé de soudage est déterminé par l'épaisseur du matériau



BIBLIOGRAPHIE

- NIL - "Laskennis opgefrist" Traduction de "Job knowledge for Welders" de TWI Connect par Co van der Goes, Rédaction Lastechniek
- "Understanding Aluminium Alloys" Welding Journal, avril 2002, pp. 77-80
- Aluminiumcentrum (Nederland) Het lassen van aluminium (II) Algemeen Het lassen van aluminium (II) TIG-lassen Het lassen van aluminium (III) MIG-lassen Het lassen van aluminium (IV) Weerstandslassen "Fouten bij het lassen van aluminium en hoe ze te voorkomen"
 - R. Vennekens, Lastijdschrift/Revue de la Soudure 3/2000, pp. 4-13
 - "Slimme constructie werkt kostenbesparend" H. Lammertz, H. Brantsma, EWE, Aluminium 4/98, pp. 27-29
 - "Combinatie van laser en plasmaboog" Lastechniek, novembre 1998, pp. 9-12
 - "Lasmetallurgie der metalen buiten het ijzer" Prof. dr.ir. E. Wettinck, Laboratoire Métallurgie Non Ferr., RUG Welding Handbook Vol. 3, part 1, Materials and Applications, 8th Ed., 1996 American Welding Society, pp. 1-120
 - "Het lassen van aluminium en aluminiumlegeringen"
 - R. De Mulder (ESAB) - Conférences Technologiques IBS "Het lassen van aluminium en aluminiumlegeringen"
 - R. Vennekens, B. Verstraeten "BIL Workshops 2000" "Porositeit bij het lassen van aluminium - Technische Gegevens"