

On the selective silica application to improve welding performance of the tungsten arc process for a plain carbon steel and for aluminium

Stéphane Sire, Surendar Marya

École centrale de Nantes, Laboratoire mécanique et matériaux, 1, rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes cedex 03, France

Received 5 September 2001; accepted 3 December 2001

Note presented by Évariste Sanchez-Palencia.

Abstract

This Note presents ways to improve the weld penetration potential of TIG process by optimising silica application around the joints in a plain carbon steel and an aluminium alloy 5086. Whereas for plain carbon steels, full coverage of joint improves penetration, the presence of a blank zone around the joint in the flux coating on aluminium 5086 using AC-TIG seems to be the best solution for cosmetic and deep welds. *To cite this article: S. Sire, S. Marya, C. R. Mécanique 330 (2002) 83–89.* © 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

material engineering / TIG welding / silica / weld penetration / electric arc

Amélioration des performances du procédé de soudage TIG sur un acier au carbone et un alliage d'aluminium par dépôt de silice

Résumé

Cette Note présente deux méthodes d'amélioration de la pénétration des cordons de soudure en procédé TIG en optimisant la géométrie d'un dépôt de silice à la surface des pièces à assembler. L'étude porte sur un acier de type bas carbone (type S235) et sur un alliage d'aluminium 5086. Alors que pour l'acier un dépôt couvrant entièrement le joint entre les pièces améliore sensiblement la pénétration, dans le cas de l'aluminium, les cordons les plus pénétrés sont obtenus en laissant une zone vierge de silice au niveau du joint. *Pour citer cet article : S. Sire, S. Marya, C. R. Mécanique 330 (2002) 83–89.* © 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

génie des matériaux / soudage TIG / silice / pénétration des cordons / arc électrique

Version française abrégée

1. Introduction

Le procédé de soudage TIG (Tungsten Inert Gas) implique l'établissement d'un arc électrique entre une électrode de tungstène et les pièces à assembler. Le bain de fusion et l'électrode sont protégés de la pollution atmosphérique par un gaz inerte, généralement de l'argon, de l'hélium ou un mélange des deux. Les cordons obtenus sont d'excellente qualité ; le procédé TIG demeure ainsi un procédé de prédilection

E-mail addresses: Stephane.Sire@ec-nantes.fr (S. Sire); Surendar.Marya@ec-nantes.fr (S. Marya).

dans de nombreux secteurs industriels. Cependant, son potentiel de pénétration est faible : 3 mm en une seule passe, sans préparation spécifique des bords et sans métal d'apport.

Il est théoriquement possible d'améliorer ces performances en agissant sur les courants internes au bain de fusion [1] ; la Fig. 1 montre ainsi que certaines forces sont favorables à l'obtention de cordons pénétrés. On peut également augmenter la puissance spécifique de l'arc électrique en le concentrant, notamment au niveau des pièces à assembler. Cette constriction peut être obtenue en réduisant la densité d'électrons dans la périphérie de l'arc ; le nombre d'électrons étant imposé (par l'intensité du courant délivré), la partie centrale de l'arc est donc beaucoup plus dense et plus puissante. Les oxydes, par leur grande affinité électronique sont susceptibles de produire un tel effet. Cette Note présente ainsi l'influence d'un dépôt d'oxyde de silicium (silice) sur le comportement de l'arc électrique lors du soudage d'un acier bas carbone et d'un alliage d'aluminium. La silice est mélangée à un solvant et déposée au pinceau à la surface des pièces ; le solvant, après évaporation, ne laisse qu'une mince couche de silice sur les pièces à souder ; les deux configurations de soudage sont présentées sur les Figs. 2 et 3. Les possibles modifications de géométrie d'arc sont analysées à l'aide d'une caméra CCD, et les caractéristiques géométriques (pénétration D , largeur W) mesurées après un polissage fin et une attaque adéquate.

2. Soudage d'un acier bas carbone

Pour ce matériau, la silice recouvre complètement le joint ; cette technique connue sous le nom ATIG (Activated TIG) a été initiée à l'Institut PATON de Kiev [2] et permet d'accroître simplement la productivité du procédé TIG. Son action sur l'arc est sensible : l'arc est davantage collé à la surface des pièces (Fig. 4) et sa géométrie est modifiée ; une zone intense plus importante traduit également une modification des gradients thermiques et ainsi de la puissance spécifique de l'arc. Une explication possible de ce changement est la grande affinité électronique de la molécule SiO présente en périphérie de l'arc [3,4]. L'arc étant beaucoup plus chaud en son centre, la dissociation des molécules de silice y est totale et la densité électronique peu modifiée.

L'analyse géométrique des cordons (cf. Tableau 1) montre que la pénétration est fortement augmentée par l'addition de silice. Leur largeur est également réduite comme le traduisent les valeurs comparatives des rapports D/W (profondeur/largeur) ; on en déduit donc que la chaleur émise par l'arc électrique est beaucoup plus évacuée vers le fond du bain de fusion que sur les côtés. La silice permet ainsi d'accroître considérablement les performances du procédé TIG sur acier au carbone et notamment d'atteindre des pénétrations supérieures à 3 mm.

3. Soudage d'un alliage d'aluminium

Le soudage des alliages d'aluminium est beaucoup plus délicat ; leur conductibilité thermique est largement supérieure à celle de l'acier et il faut donc au maximum concentrer l'énergie thermique pour limiter la largeur des cordons. De plus, une mince couche d'alumine, oxyde réfractaire, est présente à la surface des pièces et fait barrage aux électrons issus de l'arc, empêchant ainsi la formation du bain de fusion. Souder en courant alternatif permet aux électrons, toutes les demi-périodes, de briser cette couche réfractaire ; mais cela au détriment d'un apport calorifique insuffisant pour atteindre des fortes pénétrations. Nous présentons dans cette Note une nouvelle technique, appelée FBTIG pour *Flux Bounded TIG*, dans laquelle la silice astucieusement déposée permet de canaliser le flux des électrons et donc d'augmenter la puissance spécifique du procédé (Fig. 3). Ainsi, comme le traduisent les photos d'arc de la Fig. 5, l'arc alternatif en FBTIG est beaucoup plus intense qu'en procédé TIG, notamment au niveau des pièces à souder. La résistivité électrique de la silice et sa température de fusion environ deux fois supérieure à celle de l'aluminium permettent en effet de concentrer l'arc dans sa partie inférieure.

Ceci se traduit par une augmentation sensible du rapport profondeur/largeur (D/W) des cordons en procédé FBTIG (cf. Tableau 2). Les pénétrations atteintes sont deux fois supérieures à celles obtenues

classiquement en TIG ; il nous a ainsi été permis de souder jusqu'à 6 mm d'alliage 5086 sous une intensité de 175 A (courant alternatif) et une vitesse de 15 cm/min.

4. Conclusions

Cette Note montre que la productivité du procédé de soudage TIG peut être considérablement augmentée par addition de silice à la surface des pièces à assembler. Cette augmentation est possible aussi bien en courant continu (étude sur un acier au carbone) qu'en courant alternatif (étude portant sur un alliage d'aluminium). Dans les deux cas il y a constriction d'arc, même si la géométrie du dépôt de silice est différente (voir Figs. 2 et 3). Pour le soudage de l'acier au carbone, les vapeurs de silice semblent capturer les électrons de la périphérie de l'arc, réduisant ainsi sa conductivité électrique et renforçant la puissance spécifique du procédé. La forte résistivité électrique de la silice ainsi que sa température de fusion élevée sont les deux propriétés qui contribuent à la très forte constriction d'arc en procédé FBTIG pour le soudage des alliages d'aluminium.

5. Introduction

TIG, which stands for tungsten inert gas welding is an arc based process between a tungsten electrode and the workpiece. An inert gas, argon helium or a mixture shroud the tungsten electrode so as to assure protection of the weld pool and electrode. TIG is extensively used for applications requiring weld cosmetics and excellent joint characteristics in applications with stringent performance requirements. However, the process is not cost competitive due to its low penetration potential. Workpieces thicker than 3 mm require joint preparations and filler additions with multi run welds. In recent years much effort has been expended to improve overall process performance of TIG as this remains a very simple technology with low initial investment. Improvements in weld penetration can be accomplished, from a theoretical standpoint, both by constricting the arc so that it becomes a high energy density heating source and modifying weld pool dynamics. The latter determines how heat from the arc is dissipated in work materials. Soon after the arc strikes, a weld pool is formed beneath the arc and the convection pattern then determines its overall profile. Whereas the size of the weld pool is determined by the overall heat input, its width and depth are structured by flow dynamics controlled by four forces: buoyancy, aerodynamic drag, surface tension γ and electromagnetic forces (Fig. 1). Under nominal currents below 150 A, Lorentz electromagnetic forces do not seem to be important compared to surface tension or thermocapillary forces. Surface tension, which is a measure of cohesive forces generally decreases with increasing temperature, i.e., $d\gamma/dT$ is negative. Due to temperature gradients prevailing over the pool, the melt flows radially outwards, generating a wider pool with low penetration. However, in the presence of some surface active species (sulphur, oxygen in steels. . .), the normal surface tension temperature gradient can be inverted, i.e., $d\gamma/dT$ becomes positive. The melt then flows radially inward and a deeper pool is then anticipated [1].

On the arc front, although theoretical details of charge carriers are complex, it is suggested that all that reduces peripheral electron density would contribute to arc constriction by the lever effect. In fact, reduced electron density in outer regions is compensated by more electrons in the central region. Further, as the welding current is fixed, the arc voltage as well as the arc power are expected to increase. Oxygen with a strong electron affinity is one of the possible elements susceptible to producing the desired effect. On this basis, oxides are potential candidates and amongst others silica has been used in the past in the fabrication of fluxes for cored wires or manual welding electrodes. In the present study, we will present some results on arc profiles subsequent to silica coating of two work materials, namely a low carbon steel and an aluminium alloy 5086.

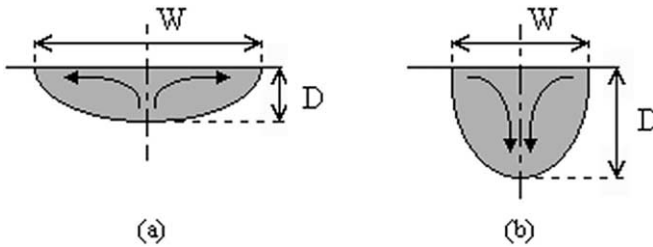


Figure 1. (a) Outward forces Marangoni with $dy/dT < 0$, aerodynamic drag, buoyancy and (b) inward forces Marangoni with $dy/dT > 0$, electromagnetic.

Figure 1. (a) Forces « mouillantes » Marangoni avec $dy/dT < 0$, cisaillement aérodynamique, flottabilité et (b) forces « pénétrantes » Marangoni avec $dy/dT > 0$, Lorentz.

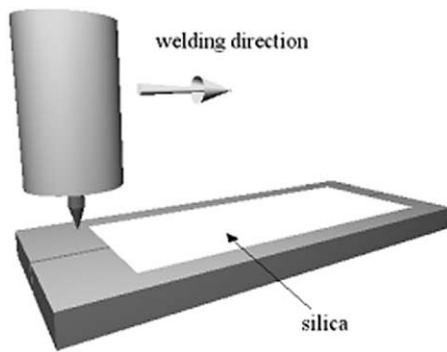


Figure 2. Carbon steel welding configuration.

Figure 2. Soudage d'un acier au carbone.

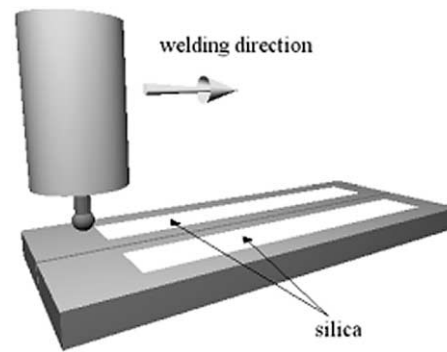


Figure 3. Aluminium welding configuration.

Figure 3. Soudage d'un alliage d'aluminium.

A silica paste is obtained by mixing a silica fine powder in a liquid carrier (acetone or alcohol). This is then applied around the joint on the work material with a brush. The liquid evaporates leaving a fine silica adherent to the metal. The two welding configurations used are shown in Figs. 2 and 3.

6. Low carbon steel welding

The silica layer is applied on the surface of the parts to be welded according to the schematic of Fig. 2. This flux covered TIG process is known in western Europe as ATIG process (*Activated TIG*) and was first developed by the Ukraine PATON Institute in the 1970s [2]. Although fluxes are composed of oxides, the exact formulation remains unknown. In our study, welding experiments were carried out at different process conditions such as welding current and travel speed in order to investigate the influence of the silica layer on the welding arc behavior. A CCD camera with appropriate filters was used to view and record the electric arc. After welding, the specimens were cut transverse to the weld, polished and etched in a 4% vol. nital solution to observe the bead morphology. Depth (D) and width (W) of beads were measured (Fig. 1) and D/W ratio calculated because it best defines welding efficiency for a given heat input.

As shown in Fig. 4, the silica causes a modification of the arc shape: the arc root on the plate is lagging behind the electrode on the advancing front and the arc is, moreover, much brighter. The arc lagging is anticipated from the higher resistance of nonmelted silica layer on the advancing front. The overall arc length with silica is increased and this induces the higher arc voltage of about one volt compared to a conventional TIG arc. With silica, the arc becomes hotter and overall increase in weld pool size is expected, though it remains difficult to ascertain whether this additional heat would be used principally to increase weld penetration, its width or instantaneous pool length.

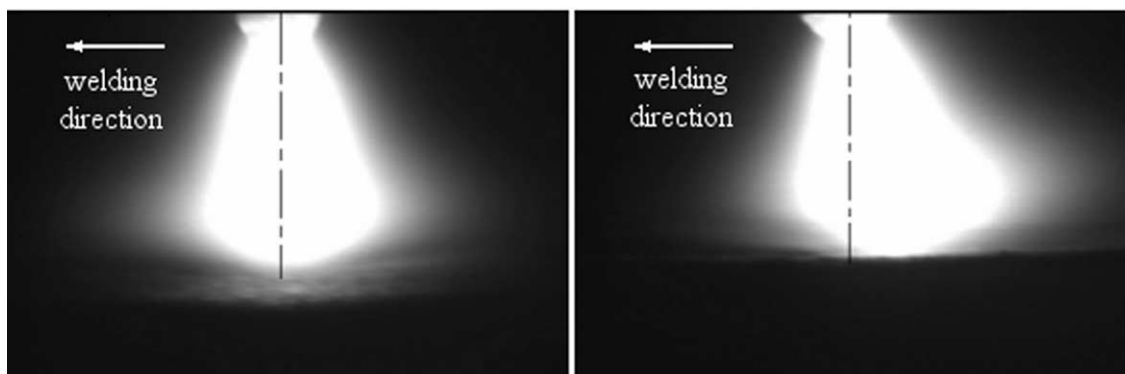


Figure 4. Video captures of arc: conventionnal TIG arc (left) and arc with silica layer (right).

Figure 4. Photographies d'arcs : TIG conventionnel (gauche) et avec dépôt de silice (droite).

Table 1. Welds characteristics in TIG and ATIG processes (carbon steel, direct current).

Tableau 1. Caractéristiques géométriques des cordons TIG et ATIG (acier au carbone, courant continu).

I (A)	W_s (cm/min)	D_{TIG} (mm)	D_{ATIG} (mm)	D_{TIG}/W_{TIG}	D_{ATIG}/W_{ATIG}
100	20	0.9	1.74	0.3	0.7
150	20	1.38	2.42	0.25	0.48
200	20	2.4	3.25	0.28	0.5
250	25	2.39	3.71	0.26	0.53
300	25	2.69	5	0.23	0.53

Viewed from the arc front, the arc is seen to be more constricted, particularly when low travel speeds are used to reduce arc lagging. It is suggested that elements originating from the silica layer (silicon and oxygen) are able to catch electrons in the outer part of the arc (where the temperature is relatively low) which causes a decrease in the electron current density, resulting in constriction of the arc, i.e., the peripheral electric resistance of the arc would increase [3,4]. Indeed, in the center of the arc, the temperature is high enough to cause complete dissociation of silica (SiO_2); in the cooler regions however, dissociation is incomplete and SiO molecules will be present. Since SiO has a positive electron affinity, SiO molecules tend to capture electrons forming negative ions. Since this constriction occurs, deeper welds are expected with silica application. Table 1 lists bead characteristics (D and D/W) of several specimens welded in TIG and ATIG (TIG with coating) processes.

Whatever the welding current, weld depths obtained with silica coating are always higher than those obtained without coating. Moreover, from the results on depth to width ratio, higher values are observed with silica application. These results show that welded joints are optimized with silica addition: the heat is transferred to the inside of the joint to satisfy the criterion of maximum penetration at the lowest heat input. It can thus be argued that the silica improves the process productivity of TIG welding because deeper and narrower welds are produced.

7. Aluminium alloy welding

The TIG welding of aluminium requires alternating currents (AC) mode as electrode positive portion of current cycles then allows the blasting of off inherent refractory surface oxides. As an extension of the

above work, silica application on aluminium was investigated. First, it was observed that a silica application according to Fig. 2 lay out was not workable in AC mode due to the higher electrical resistance of the coating. In fact, AC mode arc becomes erratic which results in equally fluctuating weld pool. To provide a channel to current flow under the electrode, only two symmetric silica coatings with a small clearance of 4 mm are applied close to the joint (Fig. 3). It is then anticipated that the arc would remain confined to the in-between narrow bare zone with the higher electrical conductivity. We designate this new process as FBTIG which stands for *Flux Bounded TIG*. Arcs in TIG and FBTIG processes were video recorded through a CCD camera. After welding, the weld bead profiles were observed (D and W then measured) on the cross section after a fine mechanical polish and chemical etch in a solution containing 50 ml of Poultons etchant, 25 ml of nitric acid and 12 g of chromic acid dissolved in 40 ml of water.

As shown in Fig. 5, an arc constriction occurs. The white spot which represents highest temperatures zones is tightened to the bottom on the pool's surface in FBTIG process. Moreover, in this process the weld pool seems to be increasingly depressed under the arc. The flux gap, maintained constant in these experiments, governs the root size of the with the spot, i.e., arc temperatures near the plates; this characterises well the electric resistance of the silica layer which channels electrons. We can thus conclude that the presence of silica modifies the specific energy input and deeper welds are then expected.

The penetration potential is indeed enhanced. 6 mm thickness welds in FBTIG process were obtained at 175 A (AC) and the travel speed of 15 cm/min compared to about 3 mm in conventionnal AC TIG (see Table 2). In fact, both weld penetrations and D/W ratios are higher (about twice) with FBTIG welding.

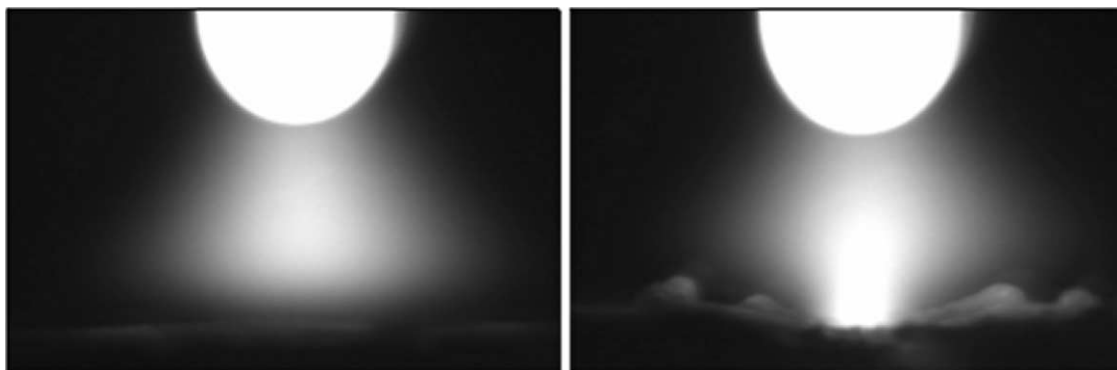


Figure 5. Video captures of arc (front views): normal arc in alternative current (left) and arc with 4 mm clearance between silica coatings of Fig. 3 (right).

Figure 5. Photographies d'arcs (vues de face) : TIG conventionnel en courant alternatif (gauche) et avec deux bandes de silice autour du joint distantes de 4 mm (droite) (voir Fig. 3).

Table 2. Welds characteristics in TIG and FBTIG processes (aluminium alloy, alternating current).

Tableau 2. Caractéristiques géométriques des cordons TIG et FBTIG (alliage d'aluminium, courant alternatif).

I (A)	W_s (cm/min)	D_{TIG} (mm)	D_{FBTIG} (mm)	D_{TIG}/W_{TIG}	D_{FBTIG}/W_{FBTIG}
75	15	0.1	0.5	0.05	0.13
100	15	0.26	0.77	0.06	0.19
125	15	0.4	1.12	0.08	0.27
150	15	1.5	2.39	0.24	0.41
175	15	3.1	6	0.34	0.75

Higher D/W ratios imply that welds width is small; the silica melting point is more than twice as big as aluminium's one so that the molten pool gets narrower. These results show that two properties of silica are used to enhance penetration: its high melting point and its electrical resistance which channel the arc and contribute to its constriction. Through this new process, aluminium AC-TIG welding productivity is drastically enhanced.

8. Conclusions

Experiments presented in this Note show that it is possible to enhance TIG welding productivity with a silica layer on the surface of the parts to be joined. Even if the layer geometry is different for carbon steel and aluminium alloy, the silica coating causes an arc constriction which increases the power density and contributes to penetration enhancement. In the case of ATIG welding, it is suggested that silica vaporized particules capture electrons in the outer part of the arc and then reduce its electrical conductivity. In the FBTIG process on the other hand, arc constriction is attributed to the high electrical resistivity and melting point of the silica.

References

- [1] C.R. Heiple, J.R. Roper, Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry, *Welding Journal* 61 (1991) 97–117.
- [2] S.M. Gurevich, V.N. Zamkov, N.A. Kushnirenko, Metallurgical and technological features of titanium alloy welding using fluxes, *Titanium Science of Technology* (1973) 541–551.
- [3] W. Middel, G. Den Ouden, The effects of additives on arc characteristics in GTA welding, in: 5th Int. Conf. on Trends in Welding Research ASM/AWS, 1998, pp. 394–399.
- [4] N. Perry, S. Marya, E. Soutif, Enhanced weld penetration in titanium during GTA and laser welding through flux applications, in: *Titanium 99, Science and Technology*, Vol. III, 1999, pp. 1746–1753.