

# SOUDAGE PAR FAISCEAU D'ELECTRONS

## TECHNIQUE, APPAREILLAGE, PARAMETRES DE SOUDAGE, DEFAUTS, APPLICATIONS, AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Dans le cadre des projets FEDER (Fonds Européen de Développement Régional), IBS (Institut belge de la soudure) et le CEWAC (Centre d'études wallon de l'assemblage et du contrôle des matériaux) vont acquérir une machine de soudage par faisceau d'électrons. Cet achat s'inscrit dans un projet plus vaste, MICROSOUD, ayant pour objectif la création d'une plate-forme consacrée au microsoudage et aux contrôles qualité associés et mettant à disposition des entreprises de nombreuses technologies de microsoudage. Cet article traite de la technique de soudage par faisceau d'électrons: équipement, paramètres de soudage, défauts de soudure, applications, avantages et inconvénients.

Par dr. ir. N. Van Caenegem – IBS; Ing. Petra Svarova – CEWAC (Traduction: M.C. Ritzen - IBS)

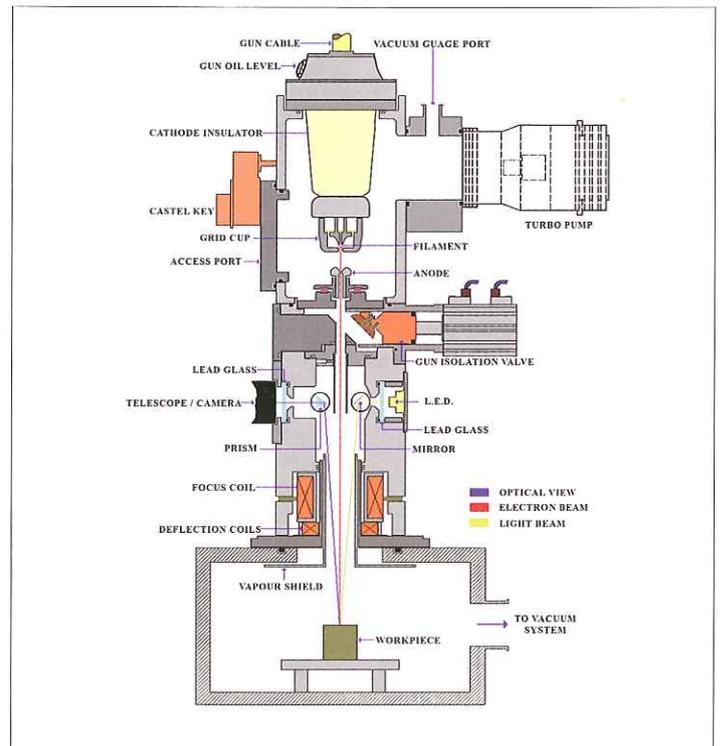


Figure 1: Présentation de l'appareillage

### TECHNOLOGIE

Le soudage par faisceau d'électrons est un procédé de soudage par fusion où la chaleur est générée par l'impact d'électrons émis et accélérés par un canon à électrons. L'émission, l'accélération et le trajet des électrons se fait sous vide.

#### Emission

Le canon à électrons fournit les électrons parce que le matériau de la cathode (tungstène, tantale ou LaB6) est chauffé. La cathode ou le filament est le seul élément d'usure du canon. Lors d'une surchauffe du filament, d'une position erronée ou d'une fatigue thermique, l'émissivité du canon diminue. L'émissivité doit donc toujours être surveillée de telle sorte qu'en cas de nécessité, le filament puisse être remplacé.

#### Accélération

Les électrons sont accélérés par un champ électrique entre la cathode et l'anode. La géométrie spécifique du Wehnelt (ou 'gridcup' sur la figure 1) et l'anode donnent aux électrons une certaine direction et les dirigent vers un seul point (cross-over). Le matériau de l'anode dépend du constructeur.

#### Focalisation

A la sortie de l'anode, le faisceau est très divergent. Celui-ci est focalisé par des bobines de focalisation qui jouent le rôle de lentilles magnétiques. La convergence des électrons peut être ajustée en faisant varier l'intensité du

courant de focalisation (zoom magnétique). Ainsi le point de focalisation sur la surface de la pièce peut être réglé, juste en dessous ou juste au-dessus.

#### Impact sur le matériau

L'énergie cinétique élevée des électrons assure, lors de l'impact sur la pièce, la transformation en chaleur (énergie thermique). Grâce à la densité d'énergie élevée, le métal fond localement et s'évapore partiellement ensuite. Apparaît alors un trou (keyhole) qui porte le faisceau d'électrons de plus en plus loin dans le métal. Ceci est comparable au soudage laser qui est également un procédé 'keyhole'. Le faisceau d'électrons peut ainsi finalement atteindre le fond. En déplaçant le faisceau ou la pièce, une soudure peut être réalisée. La plupart du temps, le canon à électrons est fixe ou peut se déplacer linéairement dans un seul sens. Pour les pièces, il existe des tables XY, des manipulateurs rotatifs, ... de telle sorte que la pièce peut être placée dans toutes les positions possibles pour être soudée.

#### Le vide

Dans l'air, le faisceau d'électrons perd de son énergie car la vitesse des électrons diminue à cause des collisions avec les atomes de l'air. C'est pourquoi le soudage par faisceau d'électrons se fait de préférence sous vide bien qu'il existe également des appareillages qui peuvent fonctionner sous un vide

moindre ou dans les conditions atmosphériques. Le soudage sous vide a pour avantage important qu'il n'y a pas d'oxydation ou d'interaction avec l'azote ou l'hydrogène. Ceci est idéal pour le soudage de métaux s'oxydant rapidement tels que le tungstène, le titane, le molybdène et le zirconium. De plus, le risque de fissuration par l'hydrogène ou à froid est faible. Il est possible de souder sous vide élevé (10-3 à 10-6 mbar); ceci donne la pureté maximale, une grande précision et le rapport hauteur/largeur de la soudure le plus élevé. Sous vide moyen/faible (10-1 à 10-3 mbar), on peut également travailler dans un espace pur mais le faisceau est plus dispersé. On l'utilise pour des applications de précision moindre telles que le soudage de l'aluminium ou des applications dans l'industrie automobile. Le soudage est également possible sans vide à condition que la distance entre le canon à électrons et la pièce soit suffisamment faible.

### PARAMETRES DE SOUDAGE

Les paramètres les plus importants:

- Puissance: la tension (énergie cinétique, vitesse des électrons) et l'intensité de soudage (quantité d'électrons). Quand le courant de soudage augmente (ou donc quand la quantité d'électrons qui atteint la pièce par seconde, augmente), la pénétration augmente également. La pénétration augmente également quand la différence de potentiel augmente. Les valeurs typiques pour

la haute tension vont de 30 à 150 kV et pour le courant de soudage de 1mA à 1A.

- Vitesse de soudage: vitesse relative du faisceau par rapport à la pièce (m/min). Quand la vitesse de soudage augmente, la pénétration diminue.
- Focalisation du faisceau. Quand le foyer du faisceau est au-dessus du bain, on a une pénétration peu profonde. Quand le foyer du faisceau est en dessous du bain, on a un bain en forme de V.
- Déflexion et vibration: forme, amplitude, fréquence (Hz), direction.
- Pression de travail de l'enceinte et du canon à électrons.

### PREPARATION/DEFAUTS

Le soudage par faisceau d'électrons impose des exigences élevées à la préparation du joint de soudage. Toute impureté ou graisse doit être enlevée. Sinon le temps de création du vide est beaucoup trop long. De plus, les pièces doivent être démagnétisées. Chaque source de magnétisme (par ex. un outil comme un tournevis resté dans l'enceinte) cause une déviation du faisceau d'électrons. La figure 2a montre un exemple d'une soudure déviée par magnétisme. Les pièces à assembler sont amenées à fusion sans métal d'apport. Les pièces doivent donc être très bien adaptées à la soudure. De plus, il faut travailler d'une façon très précise de telle sorte que la soudure ne soit pas ratée en raison d'un mince faisceau

d'électrons. La figure 2b donne un exemple d'un mauvais alignement du faisceau par rapport au joint soudé. On peut choisir de travailler en pleine pénétration ou avec une pénétration partielle. Les deux ont leurs avantages et leurs inconvénients. Une pleine pénétration donne un aspect moins esthétique: la soudure peut avoir une surépaisseur, présenter un effondrement ou des morsures. L'avantage est qu'il y a moins de risques d'avoir des porosités. Dans le cas où on n'a pas de pleine pénétration, on peut avoir du gaz qui reste emprisonné à la racine de la soudure (figure 2c). Avec une pénétration partielle, une profondeur irrégulière de pénétration peut apparaître, ce qui peut provoquer parfois une mauvaise soudure. Ce type de défaut, présenté à la figure 2d, s'appelle 'spikes' (ou 'doigts de gant'). Un joint sans pleine pénétration a toujours un bel aspect extérieur. Comme on n'utilise pas de métal d'apport et en raison du grand rapport hauteur/largeur, on a un plus grand risque d'avoir des fissures verticales ou des fissures à chaud (figure 2e). Le faisceau d'électrons permet également de réaliser des soudures dans des endroits difficilement accessibles (figure 3). Le faisceau très mince peut être dirigé, au travers d'un trou ou d'une fente, vers l'emplacement de la soudure. Par ex., un anneau peut être soudé en une seule passe du côté supérieur et du côté inférieur tandis qu'avec un autre procédé de soudage, il sera difficilement ou pas accessible du côté inférieur.

être cependant dévié par chaque source magnétique aux environs du faisceau. Le rendement énergétique du faisceau d'électrons est très élevé: 95 % en comparaison avec les 5 à 10% pour le laser. Quand un faisceau d'électrons touche une surface, des rayons X sont produits de sorte que l'appareil de soudage doit être bien protégé. Le faisceau laser ne produit pas de rayons X. Quant au risque de lésions oculaires ou de brûlures par l'intensité élevée de lumière, la prudence est certainement de mise.

**APPLICATIONS**

La technologie du faisceau d'électrons est connue depuis longtemps (1949) – au début uniquement en laboratoire – et a connu une percée industrielle en raison du grand avantage de pouvoir souder de fortes épaisseurs en une seule passe. La figure 4 compare une soudure bout à bout EBW, réalisée en une seule passe, avec un joint en X soudé en MIG en 94 passes, sur une épaisseur de 125 mm d'alliage d'aluminium. Le vide offre des avantages pour le soudage du zirconium et du titane appliqués dans l'industrie aéronautique et spatiale. Le secteur de l'automobile s'est également intéressé à cette technique: les déformations minimales sont un avantage pour le soudage des roues dentées d'une boîte de vitesse, dans le cas d'une production en grandes séries. Des solutions sont développées pour réduire le temps 'perdu' à mettre l'enceinte sous vide. Ainsi, il existe des systèmes de rotation qui permettent de préparer complètement une pièce tandis qu'une autre pièce est soudée. Ont suivi également des applications de précision dans le domaine médical : pacemakers, prothèses, ... Des éléments électroniques sont également soudés avec le faisceau d'électrons en raison de sa précision élevée et du faible apport calorifique, ce qui signifie que l'électronique sensible peut être bien protégée. A quelques mm de la soudure, on ne remarque aucune influence de la chaleur. L'application du faisceau d'électrons est donc double. D'une part, production en grandes séries avec une reproductibilité élevée, d'autre part, applications de très haute précision.

**ASPECTS ECONOMIQUES**

Le soudage par faisceau d'électrons a pour avantage une grande qualité de soudures et des vitesses de production élevées. Si ces deux arguments sont importants, le soudage par faisceau d'électrons peut être attractif du point de vue économique. Par contre, il faut tenir compte de l'investissement élevé en appareillage et de la nécessité d'une préparation très soignée des pièces à souder. L'investissement dans cette technique peut donc être justifié pour le soudage de grandes séries ou le soudage de produits ayant une haute valeur ajoutée. □

**COMPARAISON AVEC LE SOUDAGE AU LASER**

Les deux techniques présentent de nombreuses similitudes. Cependant, il y a également quelques différences. Le faisceau laser est constitué d'un flux de photons qui se propulsent à la vitesse de la lumière tandis que le faisceau d'électrons est constitué d'électrons ayant une vitesse liée à la racine de la différence de potentiel. L'énergie d'un photon est de l'ordre de 0,1 à 2,0 eV tandis que l'énergie d'un électron est de 30 à 150 keV. Le rayon laser peut être focalisé à l'aide de lentilles optiques et de miroirs; le faisceau d'électrons à l'aide de moyens électrostatiques et magnétiques. Comme les deux techniques peuvent fortement concentrer le faisceau, la densité d'énergie est très grande. Un faisceau laser peut se déplacer dans l'air sur une distance respectable sans perdre trop d'énergie. Par contre, le faisceau d'électrons perd très rapidement son énergie à cause des collisions des atomes dans l'air (c'est pourquoi l'utilisation du vide est souvent nécessaire). Un faisceau laser peut être réfléchi au travers d'une surface métallique lisse; de ce fait, le transfert d'énergie vers la pièce est contrecarré. Le faisceau d'électrons n'a pas cet inconvénient, mais peut

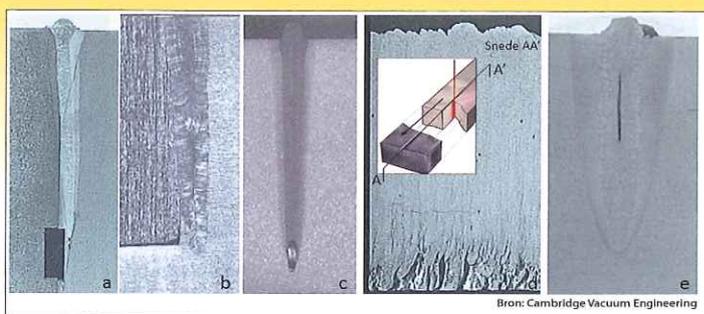


Figure 2: Défauts de soudage les plus courants ; (a) déviation par magnétisme (b) manque d'alignement (c) porosités (d) spikes (doigts de gant) (e) fissuration à chaud

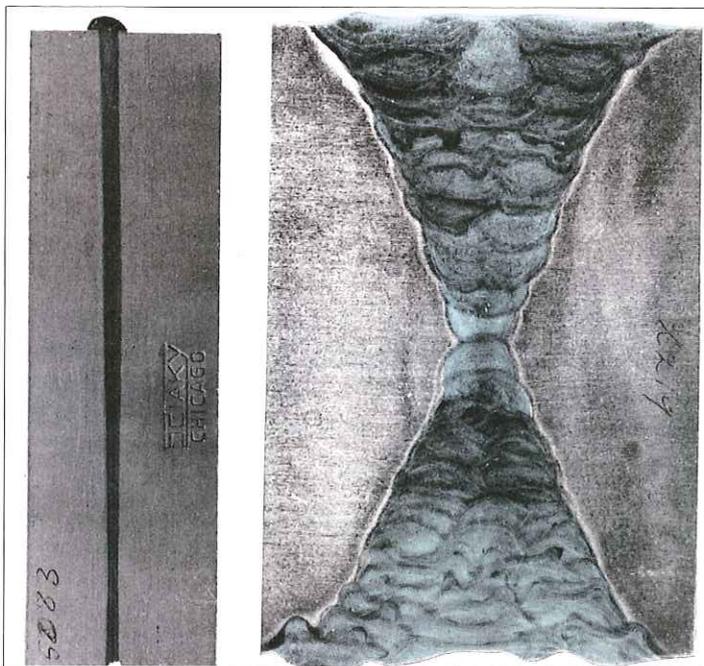


Figure 4: Alliage d'aluminium de 125 mm d'épaisseur. (a) soudure par faisceau d'électrons ayant un rapport H/L de 44/1, 54 kV, 0.5A, 1 passe, 40 cm/min (b) soudure MIG, 94 passes, 1cm/min

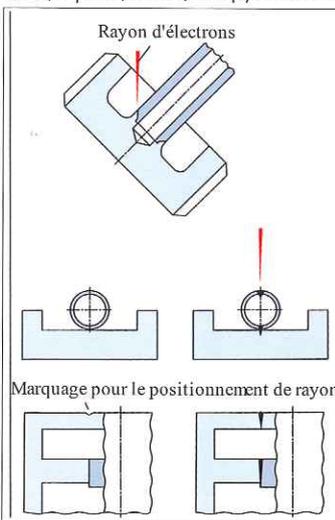


Figure 3: Soudures difficilement accessibles et même non accessibles

**AVANTAGES**

- Pénétration importante – soudure en une seule passe
- Peu d'apport calorifique, zone affectée thermiquement très étroite
- Déformations minimales
- Vide: pas d'impuretés (Ti, Zr, Ta, W, Mo ...)
- Des soudures difficilement accessibles
- Vitesse de soudage élevée
- Soudure bout à bout sans métal d'apport, matériau tant épais que mince
- Assemblages hétérogènes
- Métaux à haute conductibilité thermique sont bien soudables
- Environnement: pas de fumées, protection complète contre le rayonnement dangereux

**INCONVENIENTS**

- Appareillage onéreux
- Préparation précise et soignée
- Temps pour faire le vide
- Les dimensions de l'enceinte sous vide peuvent être une entrave pour de grandes pièces (il existe bien des enceintes de 700 m<sup>3</sup>)
- Sensible au magnétisme
- Matériaux magnétiques en permanence non soudables
- Pas de métal d'apport et le rapport H/L augmentent le risque de fissuration à chaud
- Distance limitée dans le non vide