

Thèse No. 3999

Étude technologique comparée des  
électrodes de soudage alliées par  
l'enrobage et alliées par le fil

Thèse  
présentée  
à l'École Polytechnique Fédérale, Zurich  
pour l'obtention du  
grade de Docteur ès sciences techniques  
par

JEAN-PIERRE VOIRET

ing. chim. dipl. E.P.F.  
ressortissant français

acceptée sur proposition du  
rapporteur: Professeur E. Amstutz  
corapporteur: Professeur Dr. N. Ibl

4<sup>e</sup> Partie

IV. CONCLUSIONS

Nous pouvons résumer les résultats rassemblés dans ce rapport de la façon suivante:

1. Les essais relatifs aux électrodes à faible teneur en alliages ont porté sur la comparaison d'une électrode alliée par le fil avec une électrode alliée par l'enrobage, les deux donnant la même analyse de métal déposé, à savoir environ: 0,06 % C - 0,5 % Si - 0,9 % Mn - 0,5 % Mo.

Dans l'électrode alliée par le fil, tout le manganèse et tout le molybdène viennent du fil; dans l'électrode alliée par l'enrobage, 1/5<sup>e</sup> du manganèse vient du fil, 4/5<sup>e</sup> viennent de l'enrobage; tout le molybdène vient de l'enrobage.

Les deux types d'électrodes présentent de plus la même résistance à la traction et la même formule d'enrobage pour ce qui a trait aux minéraux formateurs de laitier.

2. L'électrode alliée par l'enrobage se comporte de façon plus agréable au soudage et est plus favorable pour le soudage en position verticale. L'inconvénient corrélatif à cet avantage est un échauffement plus rapide de l'électrode (sauf électrodes à haute teneur en Cr/Ni), pouvant provoquer des variations dans l'analyse du métal déposé.

3. L'électrode alliée par l'enrobage présente une pénétration plus profonde que l'électrode alliée par le fil, et un cordon légèrement plus plat: l'arc de l'électrode alliée par l'enrobage est plus froid et les court-circuits (passage d'une goutte fondue) y sont moins nombreux.

4. L'électrode alliée par le fil présente une vitesse de fusion plus élevée et un rendement spécifique en manganèse supérieur. Toutefois les poudres métalliques dans l'enrobage

permettent d'obtenir à volonté un "rendement" global de l'électrode supérieur pour un prix de revient intéressant.

5. Les gouttes en formation en bout d'électrodes alliées par le fil et l'enrobage, analysées à la microsonde électronique, présentent assez peu de différences d'homogénéité (coefficients de variation pour l'électrode alliée par le fil, analyse du Mn:  $v = 7,16 \%$ ; par l'enrobage:  $v = 9,70 \%$ . Analyse du Mo, électrode fil allié:  $v = 5,05 \%$ ; enrobage allié:  $5,77 \%$ ); les gouttes de l'électrode alliée par le fil sont légèrement plus homogènes.

6. Les différences d'homogénéité sont encore plus faibles dans le métal déposé des 2 types d'électrodes, aussi bien dans les couches profondes que superficielles.

7. Les gouttes alliées par le fil et alliées par l'enrobage ont une teneur moyenne en Mo pratiquement identique à celle du métal déposé. Par contre leur teneur en Mn est très variable, bien que la variation soit la même pour les deux types de gouttes, et elle est plus basse que celle du métal déposé. La teneur des gouttes alliées par l'enrobage en Mn est inférieure à celle des gouttes alliées par le fil.

8. Des analyses au spectrographe-X confirment les résultats obtenus à la microsonde.

9. Dans les couches centrales d'un cordon en plusieurs passes, les variations moyennes de la résilience (tachycohérence) sont plus élevées pour le métal d'apport de l'électrode à fil allié que pour celui de l'électrode à enrobage allié, c'est à dire que ce dernier est mécaniquement plus homogène. Le nombre de sections de rupture à tendance fragile est plus élevé, à températures correspondantes, pour le métal déposé par l'électrode à fil allié.

10. Dans un cordon mince en une ou deux passes, les valeurs de résilience (tachycohéracie) présentent des variations moyennes pratiquement équivalentes pour le métal déposé par les deux types d'électrodes. Le nombre de sections de rupture à tendance fragile est plus élevé, à températures correspondantes, pour le métal déposé par l'électrode alliée par le fil.

11. La fissuration à chaud est d'environ 8 à 9 % plus importante dans le métal déposé par l'électrode alliée par l'enrobage.

12. Dans un dépôt superficiel en une passe, comme dans une soudure épaisse en plusieurs passes, le métal déposé par l'électrode à fil allié présente une macrostructure en cristaux allongés grossiers, tandis que le métal déposé par l'électrode à enrobage allié a un aspect plus raffiné.

13. Dans les mêmes conditions, la microstructure présente un type de cristallisation différent selon le type d'électrode employé, les cristaux du métal déposé par l'électrode à enrobage allié étant de dimensions plus faibles et présentant un aspect de phase cristalline de transition. Un effet de germe doit probablement être attribué pour les électrodes à enrobage allié à des grains de ferro-alliages passant dans l'arc sans fondre complètement.

14. A l'état brut de soudage, le métal d'apport de l'électrode à enrobage allié présente une répartition des valeurs de micro-dureté plus homogène (coefficient de variation  $v(\text{enrob. allié}) < v(\text{fil allié})$  que le métal déposé par l'électrode à fil allié.

L'inverse se présente après un recuit de détentionnement. L'état original ( $v(\text{enrob. allié})$  plus faible) se retrouve après un traitement thermique de normalisation.

15. Les essais relatifs à des électrodes austénitiques ont porté sur la comparaison d'une électrode à fil allié avec une électrode à enrobage allié, les deux types donnant la même analyse de métal d'apport, à savoir environ 19 % Cr, 13 % Ni, et 1,5 % Mo.

16. Ainsi qu'il a été montré par Erdmann-Jesnitzer et al., (29), et confirmant les résultats obtenus pour les électrodes à basse teneur en alliages, il s'est vérifié que le métal déposé par une électrode austénitique à enrobage allié ne présente pas de différence d'homogénéité notable avec le dépôt d'une électrode austénitique à fil allié (mesures à la microsonde).

17. Le début du cordon donné par une électrode alliée par l'enrobage apointée a une teneur moindre en Cr et Ni que le cordon proprement dit. Il est donc nécessaire de revenir sur les premiers mm de cordon avec l'électrode si l'on veut éviter une corrosion excessive des points d'amorçage et des raccords entre deux cordons successifs. La tenue à la corrosion du cordon proprement dit est la même pour une électrode à enrobage allié que pour une électrode à fil allié.

18. Les électrodes austénitiques à enrobage allié s'échauffent moins lors du soudage, et présentent moins de fissuration à chaud du métal d'apport que les électrodes à fil allié.