

DOI: <https://doi.org/10.24297/jap.v18i.8780>

Composantes de joint de soudage par fusion

A. NAIT SALAH*, M. KADDAMI²

¹Laboratory "Physical Chemistry of Processes and Materials" Faculty of Science and Technology, Hassan First University of Settat, Morocco,

²Laboratory "Physical Chemistry of Processes and Materials" Faculty of Science and Technology, Hassan First University of Settat, Morocco

a.naitsalah@uhp.ac.ma

Abstract

The purpose of this article is to review the basic principles governing the evolution of the composition of the welding joint. The susceptibility to cracking of welded structures is a function of the microstructure, the environment, and the stresses applied; it is essential to understand the basic principles of the composition and evolution of the microstructure during welding. This article will focus primarily on fusion welding.

Keywords: Joint de soudage, AWS, ZAT, ZF, TTAS.

Résumé

Le but de ce travail est de passer en revue les principes de base régissant l'évolution de la composition du joint de soudage techniquement et historiquement. La susceptibilité à la fissuration des structures soudées étant fonction de la microstructure, de l'environnement et des contraintes appliquées, il est essentiel de comprendre les principes de base de la composition et l'évolution de la microstructure pendant le soudage. Cet article se concentrera principalement sur les soudures par fusion.

Introduction

Un certain nombre de processus métallurgiques contrôlent la microstructure et les propriétés des soudures. La fusion et la solidification sont des processus importants, car ils sont la clé pour obtenir des joints acceptables dans tous les processus de soudage par fusion. À la solidification s'ajoutent des processus de ségrégation et de diffusion qui entraînent des variations de composition locales qui influencent à la fois la soudabilité et les performances de service des soudures.

Ces développements de nomenclature technique n'est pas disponibles en français, c'est pour cela le travail s'est concentré sur la recherche bibliographique et la traduction des notions techniques de joint de soudage en se basant spécialement sur les travaux qu'ont marqué l'histoire de ce domaine comme le travail de John C. Lippold [1].

De nombreux processus métallurgiques se déroulent à l'état solide, y compris les transformations de phase, les réactions de précipitation, la recristallisation, la croissance des grains, etc. L'ampleur de ces réactions peut altérer de manière significative la microstructure et les propriétés de la soudure (métal soudé et zone affectée thermiquement (ZAT)) par rapport au métal de base. Bon nombre de ces réactions, ou combinaisons complexes de réactions, peuvent entraîner une fragilisation, ou fissuration, des soudures. Cette fragilisation peut être due à la liquation, à la présence de films liquides dans une matrice par ailleurs solide ou à l'état solide à la suite d'une perte de ductilité [2].

La dilatation thermique pendant le chauffage et la contraction pendant le refroidissement peuvent entraîner des contraintes complexes dans et autour des soudures. Ces contraintes peuvent ensuite affecter la microstructure et les propriétés de la soudure et peuvent favoriser la fissuration dans les régions où la contrainte de traction résultant de ces contraintes dépasse la ductilité du matériau.

La nature de la microstructure de soudure pour un matériau donné résulte de la combinaison du cycle thermique de la soudure et de la composition du matériau. En général, les vitesses de chauffage et de refroidissement

associées au soudage sont assez élevées (10 à 1000 ° C / s) et empêchent généralement la prévision de la microstructure basée sur les principes thermodynamiques à l'équilibre. Tous les processus métallurgiques qui influencent la microstructure de soudure dépendent de la température et de la vitesse de chauffage et refroidissement. Le cycle thermique de soudage joue donc un rôle clé dans l'évolution de la microstructure et, en définitive, dans la soudabilité du matériau, comme le montre schématiquement la Fig. 1.

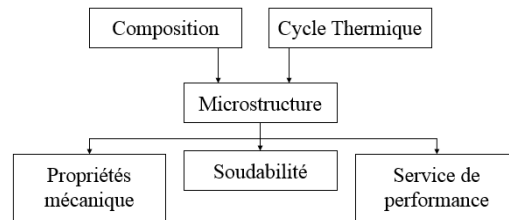


Figure 1. Schéma fonctionnel d'évolution et de performance de la microstructure de soudure

Régions de joint de soudure

La zone de fusion est décrite en tant que telle car il s'agit de la région où la fusion et la solidification se produisent pour former le joint, ou la soudure. Étant donné que tous les métaux sont de nature cristalline, beaucoup possédant des réseaux cristallins cubiques, il existe des phénomènes généraux de solidification communs à tous les métaux. Dans de nombreux matériaux, le comportement de solidification est très sensible à la composition. Par exemple, l'ajout de petites quantités de carbone et d'azote à certains aciers peut modifier leur comportement en matière de solidification de ferritique (CC) à l'austénitique (CFC). Des additions minimales de soufre aux aciers peuvent favoriser une fissuration par solidification importante dans la zone de fusion. Les alliages d'aluminium sensibles aux fissures peuvent être soudés avec un matériau de remplissage contenant plus de 6% de silicium afin d'éviter les fissures. [3]

La microstructure et les propriétés de la ZAT sont uniquement contrôlées par les conditions thermiques rencontrées lors du soudage et du traitement thermique après soudure (TTAS). Les alliages d'aluminium sont systématiquement durcis par précipitation ou durcis au travail pour augmenter la résistance; le soudage peut éliminer complètement ces effets de renforcement dans la ZAT. L'acier subit une transformation de phase, ce qui peut aboutir à une ZAT ayant une microstructure et des propriétés radicalement différentes de celles du métal de base ou de la zone de fusion.

La compréhension des régions d'une soudure a énormément évolué depuis les années 1960. Auparavant, on pensait qu'une soudure par fusion ne comprenait que deux régions, la zone de fusion et une zone de zonage de zirconium environnante, comme le montre la Fig .2 [4, 5 ,6].

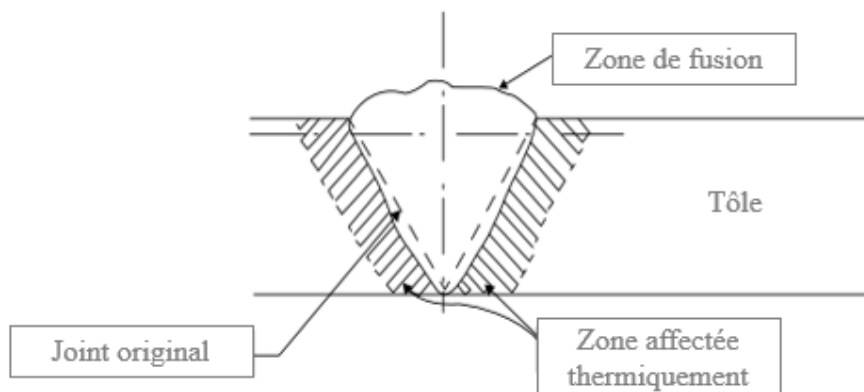


Figure 2. Schéma fonctionnel d'évolution et de performance de la microstructure de soudure (De la réf. [8]. © AWS)

En 1976, Savage et al. [5] ont proposé plusieurs modifications à la terminologie utilisée pour décrire les régions de microstructure de soudure par fusion, comme illustré à la figure .3. La zone de fusion était considérée comme composée de deux régions. La région composite représentait la partie de la zone de fusion où le métal de base et le métal d'apport étaient mélangés dans une composition «composite». Autour de cette région le long de la limite de fusion, ils ont défini une région appelée zone non mélangée (ZNM). ZNM est constitué de métal de base fondu et resolidifié qui ne se mélange pas avec le métal d'apport. Dans certains systèmes d'alliage, la ZNM peut présenter des microstructures et des propriétés très différentes de celles de la région composite, en particulier lorsque des métaux d'addition différents sont utilisés.

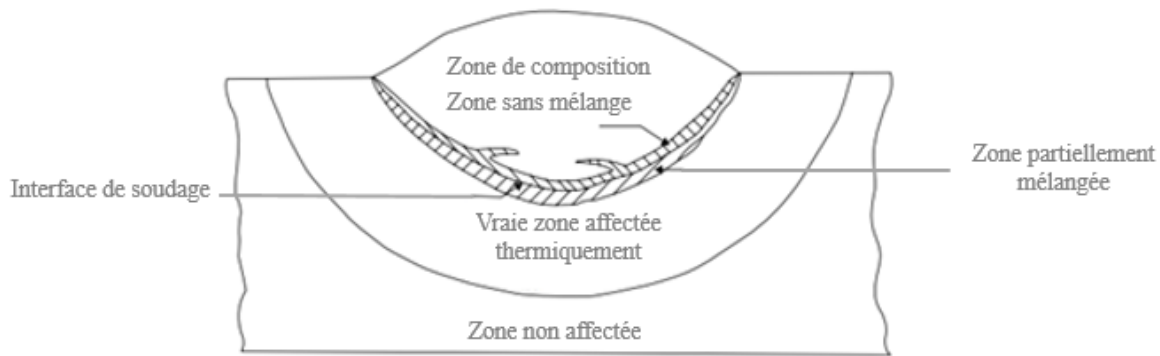


Figure 3. Régions d'une soudure par fusion (De la réf. [9]. © AWS)

en 1976, Savage et al. [5] ont proposé plusieurs modifications à la terminologie utilisée pour décrire les régions de microstructure des soudures par fusion, comme indiqué dans La ZAT était subdivisée en deux régions, la zone partiellement fondue (ZPF) et la «vraie» zone affectée par la chaleur (V-ZAT). La ZPF existe dans toutes les soudures par fusion faites dans des alliages puisqu'un passage de 100% de liquide à 100% de solide doit avoir lieu à travers la limite de fusion. En outre, d'autres mécanismes ont été identifiés qui ont entraîné une fusion (ou une liquidation) locale dans une région étroite entourant la zone de fusion. Celles-ci incluent la fusion des joints de grains due à la ségrégation et un phénomène appelé «liquidation constitutionnelle» résultant de la fusion locale associée à une particule constitutive. La désignation d'une zone V-ZAT a été utilisée pour différencier la région de la zone dans laquelle toutes les réactions métallurgiques se produisent à l'état solide, c'est-à-dire qu'il ne se produit ni fusion ni liquation. [7].

Depuis 1976, peu de choses ont changé en ce qui concerne la terminologie utilisée pour décrire les régions d'une soudure par fusion, bien que des recherches approfondies aient été menées sur divers systèmes d'alliage afin de vérifier que ces régions existent réellement dans ces systèmes de matériaux. Des améliorations supplémentaires ont été apportées à cette terminologie originale. Par exemple, la V-ZAT dans les aciers a été subdivisée en diverses sous-régions, telles que les régions ZAT à grain grossier (ZATGG), ZAT à grain fin (ZATGF) et les régions inter-critiques ZAT (ZATIC).

Le seul ajout potentiel à la terminologie de la Fig .3 est une région de transition dans la zone de fusion. Dans les soudures hétérogènes, où le métal d'apport a une composition différente de celle du métal de base, cela représenterait une transition de composition de la région composite à la zone ZNF. Dans certains systèmes d'alliage, cette zone de transition (ZT) peut présenter une microstructure distinctement différente des régions environnantes. Par exemple, dans les soudures entre les aciers inoxydables et les aciers faiblement alliés, une structure martensitique peut se former dans la région de transition, ce qui ne se produit pas ailleurs dans la soudure. [8].

Un nouveau schéma des régions d'une soudure par fusion est fourni à la Fig.4 pour une soudure hétérogène. Il est similaire à l'illustration de la Fig .3 mais contient une composition ZT pouvant être présente dans certains systèmes. Les sections suivantes passeront en revue les différentes régions définies précédemment de manière très détaillée et décriront les mécanismes impliqués dans leur formation.

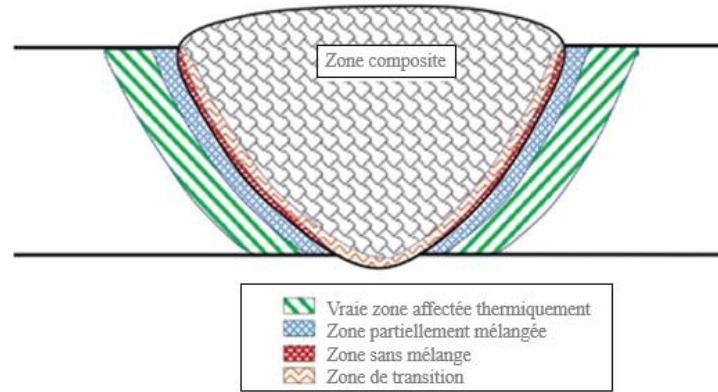


Figure. 4 : Schéma moderne montrant les régions d'une soudure par fusion

1. Zone de fusion

La zone de fusion représente la région d'une soudure par fusion où la fusion et la re-solidification sont complètes au cours du processus de soudage. La microstructure dans la zone de fusion est fonction des conditions de composition et de solidification. De petites différences dans la composition entraînent souvent de grandes variations dans la microstructure et les propriétés. Dans certains systèmes, la modification des vitesses de solidification et de refroidissement peut également altérer la microstructure, parfois de manière spectaculaire.

La zone de fusion est normalement très distincte de la ZAT et du métal de base environnants lorsque les échantillons sont préparés par métallographie. Ceci est dû aux fluctuations macroscopiques et microscopiques de la composition résultant du processus de solidification. [9,10].

Dans les soudures où le métal d'apport a une composition différente de celle du métal de base, il existe théoriquement trois régions. La plus grande d'entre elles est la zone composite (ZC), constituée de métal d'apport uniformément dilué avec du métal de base. Adjacent à la limite de fusion, deux régions supplémentaires peuvent exister. La zone non mélangée (ZNM) est constituée de métal de base fondu et resolidifié dans lequel un mélange négligeable avec le métal d'apport a eu lieu. Entre les ZNM et les ZC, une zone de transition (ZT) doit exister où un gradient de composition du métal de base au ZC est présent.

Trois types de zones de fusion ont été définis: autogène, homogène et hétérogène. Les classifications sont basées sur l'utilisation ou non d'un métal d'apport et sur la composition du métal d'apport par rapport au matériau de base. Les trois types de zones de fusion sont couramment rencontrés.

2. Les soudures autogènes

Les soudures autogènes sont celles dans lesquelles aucun métal d'apport n'est ajouté et la zone de fusion est formée par la fusion et la resolidification du métal de base. Celles-ci sont courantes dans les situations où les épaisseurs de coupe sont minimales et où la pénétration peut être facilement obtenue grâce au processus sélectionné. Dans les sections minces, la soudure autogène peut souvent être appliquée à des vitesses élevées, et normalement, une préparation minimale du joint est requise, c'est-à-dire que des joints aboutés peuvent être utilisés. Les procédés de soudage qui sont, ou peuvent être, adaptés au soudage autogène comprennent les procédés de soudage à l'arc sous flux de tungstène, soudage à l'arc plasma, soudage par faisceau d'électrons, soudage par faisceau laser et le soudage par résistance. La zone de fusion a essentiellement la même composition que le métal de base, à l'exception des pertes éventuelles dues à l'évaporation ou au captage des gaz de l'atmosphère de protection. Tous les matériaux ne peuvent pas être assemblés de manière autogène en raison de problèmes de soudabilité. [8]

3. Les soudures homogènes

Les soudures homogènes impliquent l'utilisation d'un métal d'apport qui correspond étroitement à la composition du métal de base. Ce type de zone de fusion est utilisé lorsque l'application nécessite une correspondance étroite entre les propriétés de la charge et du métal de base. Des propriétés telles que la

réponse au traitement thermique ou la résistance à la corrosion sont des exemples de telles propriétés. Parmi les exemples courants, on peut citer l'utilisation de métaux de base de type 316L associés à une charge de 316L pour l'adéquation des propriétés de corrosion et l'utilisation de métal d'addition E10016-D2 sur l'acier AISI 4130 Cr – Mo, généralement doté d'un traitement thermique après soudage (TTAS) complet pour offrir une résistance uniforme.

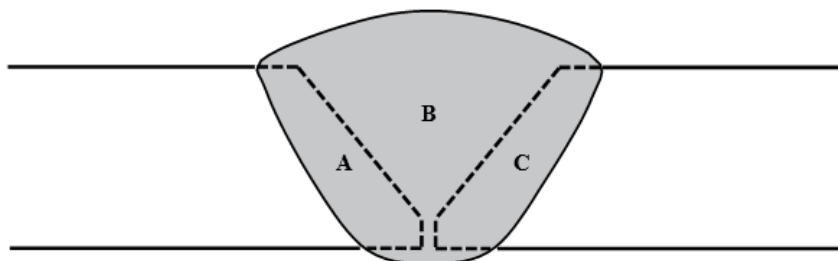
4. Les soudures hétérogènes

Les soudures hétérogènes sont des soudures par fusion à base de métaux d'apport dont la composition est différente de celle du métal de base. Dans de nombreuses situations, les métaux d'apport correspondants peuvent ne pas exister ou les propriétés de soudure souhaitées peuvent ne pas être réalisables avec une composition correspondante. Il convient également de reconnaître que de nombreuses compositions de métaux communs peuvent présenter une soudabilité médiocre et que des métaux d'apport dissemblables sont nécessaires pour obtenir des propriétés ou des performances de service acceptables. Quelques considérations qui nécessiteraient l'utilisation d'un métal d'apport de composition différente, notamment la résistance, la formation de défauts de soudure (par exemple, la porosité), la résistance à la fissuration par soudabilité / solidification, la réponse au traitement thermique, la résistance à la corrosion, le coût du métal d'apport et les caractéristiques de fonctionnement du consommable.

Lors de l'utilisation d'un métal d'apport dont la composition est différente de celle du métal de base, il convient de prendre en compte les effets de dilution sous peine de ne pas obtenir les résultats souhaités. Des exemples courants de soudures hétérogènes comprennent l'utilisation d'un métal d'apport de type 308L sur un métal de base de type 304L pour la soudabilité et la résistance à la corrosion et l'utilisation d'un métal d'apport en aluminium 4043 avec un métal de base en aluminium 6061 pour la résistance à la fissuration par solidification.

Comme indiqué précédemment, l'utilisation de soudures hétérogènes nécessite souvent une attention particulière aux effets de dilution. La dilution peut être définie comme une modification de la composition d'un métal d'apport due à son mélange avec le métal de base pendant le processus de fusion. Dans de nombreux cas, la dilution n'est pas souhaitable et doit être soigneusement contrôlée. La modification par dilution de la composition de métal de soudure déposée peut annuler ou diminuer les propriétés souhaitées du métal de soudure qui seraient obtenues par un métal d'apport à l'état non dilué. Un cas de dilution particulièrement indésirable concerne les opérations de surfacage dans lesquelles les métaux d'apport sont très différents du matériau de base et choisis pour produire des propriétés très spécifiques telles que la résistance à l'abrasion, la résistance à la corrosion ou les propriétés antichocs. Par exemple, si les aciers inoxydables sont utilisés comme revêtements pour la résistance à la corrosion, une dilution importante (~ 40%) peut réduire la teneur en chrome à un niveau tel que la couche de revêtement ne résiste plus à la corrosion.

La dilution est exprimée en termes de dilution du métal d'apport par le métal de base et est schématisée à la figure .5. Mathématiquement, la dilution est le rapport entre la quantité de métal de base fondu et la quantité totale de métal en fusion. Par exemple, une soudure avec une dilution à 10% contient 10% de métal de base et 90% de métal d'apport. Pour la plupart des procédés de soudage, la dilution est normalement contrôlée en dessous de 50%. Les sections transversales des soudures, illustrées à la Fig.5, peuvent être utilisées pour estimer la dilution en fonction de la géométrie initiale du joint, ou bien la composition réelle du métal fondu peut être déterminée par analyse et la dilution est calculée en fonction de la composition du support et de la matière de remplissage les métaux sont connus. [9]



$$\text{Dilution (\%)} = [(A+B)/(A+B+C)]*100$$

Figure. 5 : Illustration schématique de la détermination de la dilution dans une soudure hétérogène.

Conclusions

L'évolution des principes de base régissant l'évolution de la composition du joint de soudage, est importante pour comprendre et interpréter les résultats dans chaque zone.

Ces clarifications et détails de chaque zone va nous aider dans les prochaines parties bibliographiques de la microstructure de chaque zone et l'étude des contraintes internes.

La prochaine partie traitera spécialement la fusion et la solidification de joint de soudage qui sont des processus importants, car ils sont la clé pour obtenir des joints acceptables dans tous les processus de soudage par fusion. À la solidification s'ajoutent des processus de ségrégation et de diffusion qui entraînent des variations de composition locales qui influencent à la fois la soudabilité et les performances de service.

Références

1. John C. Lippold. *Welding Metallurgy and Weldability*. 2015 John Wiley & Sons, Inc.
2. Kou S. *Welding Metallurgy*. 2nd ed. Hoboken NJ: John Wiley and Sons, inc.; 2003. 176.
3. Easterling K. *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*. London: Butterworths and Co.; 1983. 73.
4. Nippes EF. The weld heat-affected zone. *Weld J* 1959;38 (1):1s–17s.
5. Savage WF, Nippes EF, Szekeres ES. A study of weld interface phenomena in low alloy steel. *Weld J* 1976;55 (9):260s–268s.
6. BY C. RODRÍGUEZ, J. GARCÍA CABEZAS, E. CÁRDENAS, F. J. BELZUNCE, AND C. BETEGÓN Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test 192-s SEPTEMBER 2009, VOL. 88
7. Miguel Lozano, Miguel A. Serrano * ID, Carlos López-Colina ID, Fernando L. Gayarre, and Jesús Suárez The Influence of the Heat-Affected Zone Mechanical Properties on the Behaviour of the Welding in Transverse Plate-to-Tube Joints, *Materials* 2018, 11, 266.
8. AWS D1.1/D1.1M:2010 An American National Standard Structural Welding Code Steel. 22nd Edition. March 11, 2010
9. Cynthia L. Jenney Annette O'Brien Handbook. Ninth Edition. Volume 1. WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2001 by American Welding Society
10. [A. Nait Salah, M. Kaddami. Effect of Filler Metal Diameter on Weld Joint of Carbon Steel SA516 Gr 70 and Filler Metal SFA 5.17 in Submerged Arc Welding SAW. *International Journal of Chemical, Materials and Biomolecular Sciences*. ISSN: 2415-6620. Vol:13, No:2, 2019