



PROJET FINAL

Rapport technique

ISO/DTR 22824.2

Soudage — Bonnes pratiques pour la spécification et le mesurage de la ferrite dans le métal fondu des aciers inoxydables

*Welding — Best practices for specification and measurement of
ferrite in stainless steel weld metal*

IIW

Secrétariat: IIW

Début de vote:
2024-09-23

Vote clos le:
2024-10-21

iTeh Standards
<https://standards.itih.ai/>
Document Preview

[ISO/DTR 22824.2](#)

<https://standards.itih.ai/catalog/standards/iso/d18158e0-cfa6-4511-a577-9070a22c154f/iso-dtr-22824-2>

LES DESTINATAIRES DU PRÉSENT PROJET SONT INVITÉS À PRÉSENTER, AVEC LEURS OBSERVATIONS, NOTIFICATION DES DROITS DE PROPRIÉTÉ DONT ILS AURAIENT ÉVENTUELLEMENT CONNAISSANCE ET À FOURNIR UNE DOCUMENTATION EXPLICATIVE.

OUTRE LE FAIT D'ÊTRE EXAMINÉS POUR ÉTABLIR S'ILS SONT ACCEPTABLES À DES FINS INDUSTRIELLES, TECHNOLOGIQUES ET COM-MERCIALES, AINSI QUE DU POINT DE VUE DES UTILISATEURS, LES PROJETS DE NORMES INTERNATIONALES DOIVENT PARFOIS ÊTRE CONSIDÉRÉS DU POINT DE VUE DE LEUR POSSIBILITÉ DE DEVENIR DES NORMES POUVANT SERVIR DE RÉFÉRENCE DANS LA RÉGLEMENTATION NATIONALE.

iTeh Standards
(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

[ISO/DTR 22824.2](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/d18158e0-cfa6-451a-a577-9070a22c154f/iso-dtr-22824-2)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/d18158e0-cfa6-451a-a577-9070a22c154f/iso-dtr-22824-2>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2024

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11
E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	v
Introduction	vi
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Phénomènes métallurgiques de ferrite dans le métal fondu des aciers inoxydables	2
4.1 Généralités	2
4.2 Mode de solidification	3
4.2.1 Généralités	3
4.2.2 Mode de solidification A (austénitique)	3
4.2.3 Mode de solidification AF (austénite primaire)	3
4.2.4 Mode de solidification FA (ferrite primaire)	4
4.2.5 Mode de solidification F (ferritique)	4
4.2.6 Modes de solidification mixtes	4
4.3 Transformation de phase à l'état solide de ferrite en austénite	5
4.3.1 Généralités	5
4.3.2 Alliages en mode de solidification A	6
4.3.3 Alliages en mode de solidification AF	6
4.3.4 Alliages en mode de solidification FA	6
4.3.5 Alliages en mode de solidification F	7
4.4 Diagrammes de constitution	7
4.5 Effets des conditions de soudage sur la ferrite	11
4.5.1 Généralités	11
4.5.2 Conditions de soudage affectant la composition chimique	12
4.5.3 Conditions de soudage n'affectant pas la composition chimique	13
4.6 Formation de phase alpha prime et intermétallique	13
4.7 Nitrures de chrome et austénite secondaire	14
4.8 Traitement thermique après soudage	14
5 Effets de variations de la ferrite sur le comportement en service du métal fondu des aciers inoxydables	16
5.1 Généralités	16
5.2 Propriétés en traction aux températures ambiantes	16
5.3 Résilience	17
5.4 Résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte par les chlorures (CSCC)	17
5.5 Sensibilité à la corrosion dans certains milieux	18
5.6 Résistance au fluage	18
6 Mesurage de la ferrite dans le métal fondu en acier inoxydable	19
6.1 Généralités	19
6.2 Considérations dans le mesurage de la ferrite	20
6.3 Pourcentage métallographique de ferrite par des méthodes optiques	20
6.4 Mesurage métallographique de la ferrite par EBSD	21
6.5 Mesurage de la ferrite par diffraction des rayons X	21
6.6 Mesurage de la ferrite par dissolution électrochimique de l'austénite	21
6.7 Mesurage de la ferrite par aimantation à saturation	21
6.8 Mesurage de la ferrite par attraction magnétique	22
6.9 Mesurage par perméabilité magnétique (induction magnétique)	23
6.10 Emplacement et volume de mesure	23
6.11 Mesurage dans la ZAT	24
6.12 Reproductibilité de mesurage	24
6.13 Corrélations entre l'Indice de Ferrite et le pourcentage de ferrite	25
7 Spécification de la ferrite dans le métal fondu des aciers inoxydables	26
7.1 Généralités	26

ISO/DTR 22824.2:2024(fr)

7.2	Exigences non magnétiques.....	27
7.3	Environnements d'utilisation dans lesquels la ferrite est attaquée agressivement.....	27
7.4	Applications cryogéniques nécessitant une résilience du métal fondu.....	27
7.5	Utilisation à haute température.....	28
7.6	Soudures hétérogènes.....	28
7.7	Couches-tampons et placages.....	28
7.8	Soudures duplex austéno-ferritiques.....	29
8	Valeurs aberrantes dans le mesurage de la ferrite.....	29
9	Conclusions.....	30
	Bibliographie.....	32

iTeh Standards (<https://standards.iteh.ai>) Document Preview

[ISO/DTR 22824.2](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/d18158e0-cfa6-451a-a577-9070a22c154f/iso-dtr-22824-2)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/d18158e0-cfa6-451a-a577-9070a22c154f/iso-dtr-22824-2>

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier, de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'ISO attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'ISO ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'ISO n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse www.iso.org/brevets. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié tout ou partie de tels droits de propriété.

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir www.iso.org/avant-propos.

Le présent document a été élaboré par le Comité technique IIW, *Institut International de la Soudure*, Commission II, *Soudage à l'arc et métaux d'apport*, en collaboration avec l'ISO/TC 44, *Soudage et techniques connexes*, Sous-comité SC 3, *Produits consommables pour le soudage*.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO/TR 22824:2003), qui a fait l'objet d'une révision technique.

Les principales modifications sont les suivantes:

- le phénomène métallurgique de la ferrite a été abordé;
- des méthodes de mesurage de la ferrite ont été abordées;
- une bonne pratique pour des spécifications raisonnables et efficaces en ce qui concerne la ferrite a été abordée;
- une bonne pratique permettant de traiter les valeurs aberrantes dans le mesurage de la ferrite a été abordée;
- la liste de références a été étendue.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse www.iso.org/fr/members.html.

Les interprétations officielles des documents de l'ISO/TC 44, lorsqu'elles existent, se trouvent à l'adresse <https://committee.iso.org/sites/tc44/home/interpretation.html> <https://www.iso.org/fr/members.html>.

Introduction

Le présent document a été élaboré par l'Institut International de la Soudure, Commission II, à travers sa Sous-commission II-C, Soudage à l'arc et métaux d'apport, en coopération avec la Commission IX à travers sa Sous-commission IX-H, Soudage des aciers inoxydables et des alliages à base de nickel, pour le compte de l'ISO/TC 44/SC 3. Il représente l'opinion circonstanciée des experts quant au mesurage et à la spécification de la ferrite dans le métal fondu des aciers inoxydables nominale­ment austénitiques et duplex austéno-ferritiques.

iTeh Standards
(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

[ISO/DTR 22824.2](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/d18158e0-cfa6-451a-a577-9070a22c154f/iso-dtr-22824-2)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/d18158e0-cfa6-451a-a577-9070a22c154f/iso-dtr-22824-2>

Soudage — Bonnes pratiques pour la spécification et le mesurage de la ferrite dans le métal fondu des aciers inoxydables

1 Domaine d'application

Le présent document décrit les bonnes pratiques, sur la base de l'expérience d'experts, pour la définition d'exigences appropriées, dans des spécifications et d'autres normes et documents contractuels, sur la teneur en ferrite du métal fondu des aciers inoxydables nominale austénitiques ou duplex austéno-ferritique. Il décrit également une bonne pratique sur le mesurage et la reproductibilité de mesurage, et traite des valeurs aberrantes des mesures. Il prend en compte la ferrite dans la zone affectée par la chaleur de soudage d'acier inoxydable duplex. Il ne tient pas compte de la spécification ou du mesurage de la ferrite dans les aciers inoxydables ferritiques ni dans les aciers inoxydables martensitiques.

2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>

3.1 acier inoxydable

tout membre d'une famille diverse d'alliages contenant au moins 10,5 % de chrome (la teneur minimale en chrome qui assure un service sans rouille dans un air ambiant ordinaire exempt de sel), et contenant souvent mais pas toujours une quantité substantielle de nickel, et dans lequel la teneur en fer dépasse celle de tout autre élément lorsque tous les autres éléments sont pris aux valeurs minimales de spécification pour l'alliage

3.2 austénite

structure cristalline cubique à faces centrées d'alliages à base de fer qui n'est pas ferromagnétique aux températures ambiantes

3.3 acier inoxydable duplex austéno-ferritique

métal de base ou métal fondu en acier inoxydable constitué d'une microstructure de *ferrite* (3.4) et d'*austénite* (3.2) à parts approximativement égales

Note 1 à l'article: Les concentrations des deux phases peuvent être assez larges – le terme est souvent abrégé sous la forme acier inoxydable duplex.

3.4

ferrite

structure cristalline cubique à corps centré d'alliages à base de fer qui est ferromagnétique aux températures ambiantes

3.5

Indice de Ferrite

FN

mesure déterminée magnétiquement de la teneur en *ferrite* (3.4), effectuée en utilisant un instrument étalonné selon l'ISO 8249^[1]

Note 1 à l'article: Le terme est toujours mis en majuscules pour signifier la conformité à la norme ISO.

3.6

pourcentage de ferrite

teneur volumétrique en *ferrite* (3.4) qui peut être déterminée métallographiquement, par un instrument magnétique, par diffraction des rayons X, ou par d'autres moyens

3.7

martensite

structure cristalline tétragonale à corps centré d'alliages à base de fer qui est ferromagnétique aux températures ambiantes et est formée par une transformation par cisaillement de l'*austénite* (3.2) sans diffusion

3.8

acier inoxydable nominale austénitique

métal de base ou métal fondu en acier inoxydable qui est majoritairement constitué d'*austénite* (3.2) mais contient une faible quantité de *ferrite* (3.4) lorsqu'il atteint une température ambiante directement après solidification

Note 1 à l'article: Cette *ferrite* (3.4) peut se transformer en totalité ou en partie en *austénite* (3.2) pendant le travail à chaud et/ou le recuit, mais réapparaît sous une certaine forme si l'acier est à nouveau fondu (par exemple par soudage à l'arc autogène sous protection gazeuse avec électrode de tungstène).

4 Phénomènes métallurgiques de ferrite dans le métal fondu des aciers inoxydables

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/d18158e0-cfa6-451a-a577-9070a22c154f/iso-dtr-22824-2>

4.1 Généralités

La ferrite observée dans un métal fondu en acier inoxydable d'une composition chimique donnée à température ambiante est le résultat final de son mode de solidification, des transformations de phase à l'état solide pendant le refroidissement à partir de la température de solidification, et d'autres transformations de phase à l'état solide pendant les cycles de réchauffage, entraînés par un dépôt de passes de soudage ultérieures et/ou par un traitement thermique après soudage.

Dans le fer pur, la solidification se produit à 1 538 °C sous forme de ferrite, couramment appelée «ferrite delta». Durant le refroidissement, cette ferrite se transforme en austénite à 1 394 °C. Puis, refroidie à 912 °C, l'austénite se retransforme en ferrite, cette fois couramment appelée «ferrite alpha». Certains éléments d'alliage, lorsqu'ils sont ajoutés au fer, favorisent la phase austénitique pendant la solidification. Les éléments favorisant notablement la formation d'austénite et constituant couramment les aciers inoxydables sont le nickel, le carbone, l'azote et le cuivre. L'addition d'environ 4,6 % de nickel, ou plus, au fer pur change le résultat de la solidification de la ferrite en austénite.

Certains autres éléments d'alliage, lorsqu'ils sont ajoutés au fer, favorisent la phase ferritique pendant la solidification. Les éléments favorisant notablement la formation de ferrite et constituant couramment les aciers inoxydables sont le chrome, le molybdène et le niobium. D'autres éléments moins courants, constituant occasionnellement les aciers inoxydables, favorisent la formation de ferrite, tels que l'aluminium, le titane, le vanadium et le tungstène.

Il fut un temps où le manganèse était considéré comme un élément favorisant la formation d'austénite pendant la solidification. Plus récemment, il a été prouvé que le manganèse, au moins jusqu'à 12 %, est

neutre pour ce qui est de favoriser la formation de ferrite ou d'austénite pendant la solidification. Toutefois le manganèse^[2], stabilise l'austénite en ce qui concerne la transformation en martensite à des températures très inférieures^[3].

Il fut un temps où le silicium était considéré comme un élément favorisant la ferrite pendant la solidification. Le rôle du silicium est moins clair que celui du manganèse. Des travaux expérimentaux impliquant du métal fondu de composition essentiellement constante, à l'exception du fait que la teneur en silicium avait été portée de 0,34 % à 1,38 %, ont révélé un effet négligeable du silicium sur la teneur en ferrite du métal fondu.^[4] Cependant, des niveaux encore plus élevés de silicium semblent favoriser la formation de ferrite.

4.2 Mode de solidification

4.2.1 Généralités

Dans les aciers inoxydables, deux phases métallurgiques sont possibles à des températures juste au-dessous du solidus. Ces deux phases sont l'austénite et la ferrite. Un acier inoxydable particulier peut se solidifier entièrement sous forme d'austénite (mode de solidification A), entièrement sous forme de ferrite (mode de solidification F), ou comme mélange d'austénite et de ferrite. La solidification mixte peut se produire d'abord sous forme d'austénite, puis sous forme de ferrite (austénite primaire ou mode de solidification AF) ou sous forme de ferrite, puis sous forme d'austénite (ferrite primaire ou mode de solidification FA).

Le mode de solidification est important en ce qui concerne la soudabilité d'un acier inoxydable donné, car il a un effet profond sur la tendance à la fissuration en solidification. La fissuration en solidification peut être facilement visible dans le cratère de fin de cordon ou le long de l'axe de soudure. Mais elle peut également être cachée sous la surface et sous la forme de fissuration longitudinale le long de la racine.

4.2.2 Mode de solidification A (austénitique)

Le métal fondu des aciers inoxydables qui se fige dans le mode de solidification A ne contient généralement pas de ferrite à la fin de la solidification et a généralement la plus forte tendance à la fissuration en solidification parmi les quatre modes de solidification possibles. Une opération de soudage réussie lorsque ce mode de solidification est attendu peut nécessiter le choix d'un métal d'apport ayant des teneurs inhabituellement faibles en soufre, en phosphore et autres éléments-trace. Cela peut également ou alternativement nécessiter des techniques de soudage spéciales, notamment un dépôt de métal fondu sous forme de petites passes convexes avec un faible apport de chaleur, et un remplissage excessif du cratère à la fin de chaque passe. À l'extrême, il peut être nécessaire de meuler les passes convexes et l'excès de remplissage du cratère après chaque passe de soudure pour obtenir un métal fondu sain.

Le métal de base des aciers inoxydables austénitiques et le métal fondu correspondant qui ont une teneur élevée en nickel présentent généralement le mode de solidification A. Des exemples de métal fondu qui peuvent présenter un mode de solidification A incluent le 25 20 (310), le 18 36 H (330), le 27 31 4 Cu L (383), et le 20 25 5 Cu L (385).

Une certaine amélioration de la résistance à la fissuration en solidification peut également être observée si un métal d'apport à teneur anormalement élevée en manganèse est disponible. Une teneur normale en manganèse se situe habituellement entre 1 % et 2 %, tandis qu'une teneur anormalement élevée en manganèse se situe habituellement entre 3 % et 9 %. Des exemples de métaux d'apport à mode de solidification A ayant une teneur anormalement élevée en manganèse comprennent le 25 20 Mn et le 20 16 3 Mn L (316LMn).

4.2.3 Mode de solidification AF (austénite primaire)

Le métal fondu des aciers inoxydables qui se fige dans le mode de solidification AF forme généralement une petite quantité de ferrite dans les espaces interdendritiques entre les cristaux d'austénite colonnaires dans les dernières étapes de solidification. Un certain partitionnement des éléments d'alliage se produit généralement, les éléments favorisant la ferrite, à savoir le chrome et le molybdène (si ce dernier est présent) se concentrant davantage dans la ferrite, et les éléments favorisant l'austénite, à savoir le nickel, le carbone et l'azote (si ce dernier est présent) se concentrant davantage dans l'austénite. Le métal fondu qui se solidifie dans le mode AF a généralement seulement une tendance légèrement inférieure à la fissuration

en solidification qu'un métal fondu qui se solidifie dans le mode A. Les mêmes techniques de soudage et les mêmes modifications de la composition du métal fondu qui sont bénéfiques pour le mode de solidification A sont également bénéfiques pour le mode de solidification AF.

Parfois, le mode de solidification AF peut être trouvé dans le métal fondu du 19 12 3 L (316L), du 25 20 (310) et du 20 16 3 Mn L (316LMn). Le mode de solidification AF peut également être trouvé dans du métal fondu dilué tel que celui d'un placage et/ou d'un assemblage de métaux dissemblables lorsqu'un ou plusieurs métaux de base est en acier au carbone ou en acier faiblement allié, et qu'un métal d'apport tel que le 23 12 L (309L) est déposé.

4.2.4 Mode de solidification FA (ferrite primaire)

Le métal fondu des aciers inoxydables qui se solidifie dans le mode de solidification FA forme généralement des grains de ferrite colonnaires avec une petite quantité d'austénite qui se forme dans les espaces interdendritiques pendant les dernières étapes de solidification. Un certain partitionnement des éléments d'alliage se produit généralement, les éléments favorisant la ferrite, à savoir le chrome et le molybdène (si ce dernier est présent) se concentrant davantage dans la ferrite, et les éléments favorisant l'austénite, à savoir le nickel, le carbone et l'azote (si ce dernier est présent) se concentrant davantage dans l'austénite. Le métal fondu qui se solidifie dans le mode FA présente généralement la résistance la plus élevée à la fissuration en solidification de tous les modes de solidification. De tels métaux fondus peuvent généralement être déposés sans crainte de fissuration en solidification. Aucune technique de soudage spéciale ou modification de la composition n'est nécessaire pour obtenir un métal fondu sain.

Les aciers inoxydables nominale ment austénitiques les plus courants et leurs métaux d'apport correspondants sont généralement destinés à se solidifier dans le mode FA. Ils incluent le 19 9 L (308L), le 23 12 L (309L), le 19 12 3 L (316L) et le 19 9 Nb (347). Bien que la ferrite puisse ne pas être détectée dans les métaux de base correspondants, en raison d'une transformation de phase à l'état solide pendant le travail à chaud et le recuit du métal de base, la ferrite réapparaît généralement lorsque ces métaux de base sont soudés de manière autogène. Cela est dû au fait que les aciéries manipulent la composition du métal de base pour obtenir une solidification FA qui améliore la production d'un acier de qualité pendant le travail à chaud.

De nombreux métaux fondus des aciers inoxydables nominale ment martensitiques, et le métal de base correspondant, se solidifient en tant que FA, y compris le 13 (410), le 13 4 (410NiMo), le 420 et 17-4PH, mais ceux-ci n'entrent pas dans le domaine d'application du présent document.

4.2.5 Mode de solidification F (ferritique)

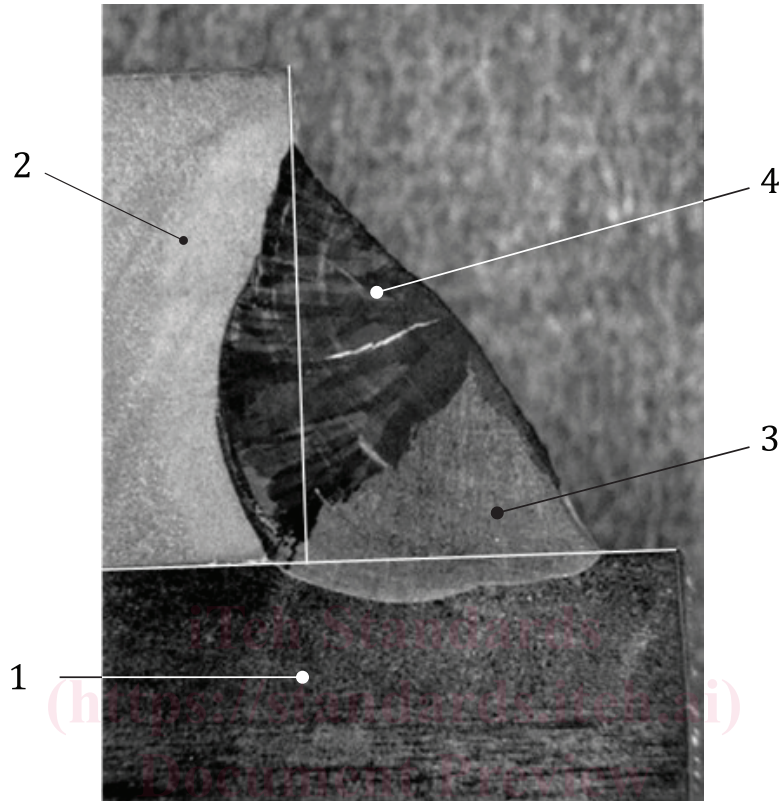
Le métal fondu des aciers inoxydables qui se solidifie dans le mode de solidification F ne contient pas d'austénite lorsque la solidification est terminée et est généralement beaucoup plus résistant à la fissuration en solidification que le métal fondu du mode de solidification A ou AF, mais pas aussi résistant que le métal fondu du mode de solidification FA. Avec les compositions en mode F, si une fissuration à la solidification est rencontrée, les techniques de soudage mentionnées sous le mode de solidification A résolvent généralement le problème.

Des exemples d'aciers inoxydables et du métal fondu correspondant qui se solidifient en mode F comprennent les aciers inoxydables duplex, lean duplex et superduplex tels que le métal de base 2205 et son métal d'apport 22 9 3 N L (2209), le 2101 et son métal d'apport usuel 23 7 N L (2307), et le 2507 et son métal d'apport correspondant 25 9 4 N L (2594). D'autres métaux de base et métaux d'apport qui se solidifient en mode F incluent le 29 9 (312), le 17 (430) et le 18 L Nb. Toute austénite décelée à des températures ambiantes dans ces aciers et dans le métal fondu correspondant résulte de la transformation de phase à l'état solide d'une partie de la ferrite en austénite, comme évoqué en 4.3. Les aciers et le métal fondu tels que le 17 (430) et le 18 L Nb n'entrent pas dans le domaine d'application du présent document, contrairement au 29 9 (312).

4.2.6 Modes de solidification mixtes

Lorsque la composition de métal fondu est très proche de l'une des limites entre des modes de solidification, des modes de solidification mixtes peuvent se produire. Il peut s'agir de A/AF, AF/FA, ou FA/F. Du point de vue de la résistance à la fissuration en solidification, il importe peu que les modes de solidification soient mixtes A/AF (probabilité similaire de fissuration en solidification) ou que les modes de solidification

soient mixtes FA/F (résistance similaire à la fissuration en solidification). Mais une solidification mixte AF/FA peut être significative car le mode AF a une tendance significativement supérieure à la fissuration en solidification que le mode FA. Une solidification en mode mixte peut se produire à une échelle microscopique ou à une échelle macroscopique. La [Figure 1](#) montre une soudure d'angle monopasse réalisée à l'arc sous flux présentant un mode de solidification mixte macroscopique, avec une fissuration en solidification dans la région du mode de solidification AF.



Légende

- 1 tôle d'acier inoxydable
 2 tôle d'acier au carbone
 3 zone de la soudure en mode de solidification FA
 4 zone de la soudure en mode de solidification AF

NOTE La différence d'attaque – la région de la soudure proche de l'acier inoxydable 304 s'est solidifiée en mode FA, tandis que celle proche de l'acier de construction au carbone s'est solidifiée en mode AF. Les lignes de séparation indiquent les surfaces de métal d'origine avant le soudage. L'acier inoxydable 304 a contribué à favoriser la solidification FA, tandis que l'acier de construction au carbone a contribué à faciliter la solidification AF. Une fissuration en solidification peut être observée dans la région du mode de solidification AF.

Figure 1 — Soudure réalisée sous flux entre un acier inoxydable 304 (en bas) et un acier de construction au carbone (en haut) à l'aide d'un métal d'apport 309L

4.3 Transformation de phase à l'état solide de ferrite en austénite

4.3.1 Généralités

Lorsque la ferrite et l'austénite coexistent dans un acier inoxydable et son métal fondu, les deux phases diffèrent en composition. Lyman^[5] a montré que dans un métal fondu 19 9 L (304L), avec mode de solidification FA, la ferrite contenait environ 25 % de Cr, 4 % de Ni, tandis que l'austénite adjacente contenait 18 % de Cr, 11 % de Ni. Ogawa et Koseki^[6] ont montré que dans un acier inoxydable duplex 2205 (composition nominale 22 % de Cr, 6 % de Ni, 3 % de Mo, 0,12 % de N), la ferrite dans le métal recuit et laminé à chaud contenait plus de 25 % de Cr, environ 5 % de Ni, environ 4 % de Mo et près de 0 % de N, tandis que l'austénite adjacente contenait moins de 21 % de Cr, plus de 7 % de Ni, environ 2,5 % de Mo et près de 0,30 % de N. Toutefois, à l'état brut de soudage, le Cr, le Ni et le Mo n'ont pas varié sensiblement entre les deux phases,

mais la ferrite contenait près de 0 % de N tandis que l'austénite adjacente contenait près de 0,30 % de N, et il y avait beaucoup plus de ferrite à l'état brut de soudage que dans l'état recuit et laminé à chaud. Cela illustre que, lors du refroidissement de la soudure, seul l'azote se diffuse sensiblement dans cet acier pour permettre la formation d'austénite à l'état solide. Le carbone dans le métal fondu 29 9 (312) joue le même rôle que l'azote dans le 2205 et son métal fondu.

4.3.2 Alliages en mode de solidification A

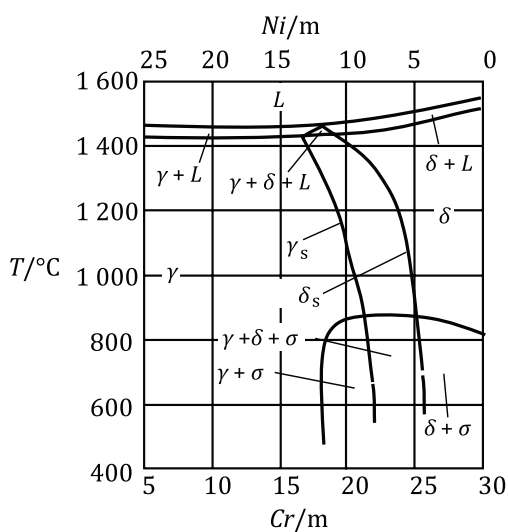
Une fois le mode de solidification A terminé, le métal fondu est déjà de l'austénite et aucune transformation de ferrite en austénite ne se produit.

4.3.3 Alliages en mode de solidification AF

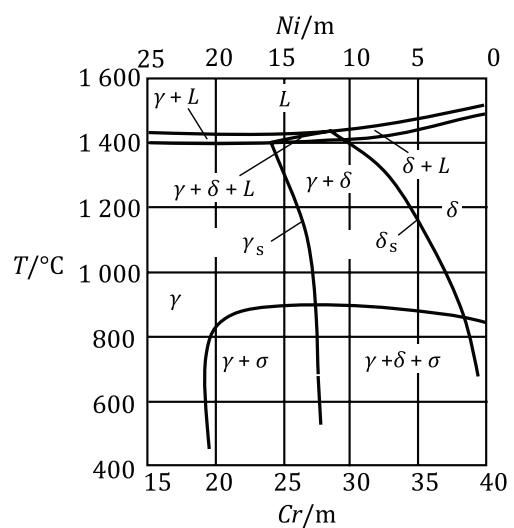
Une fois le mode de solidification AF terminé, une partie de la ferrite peut se transformer en austénite pendant le refroidissement. Un recuit ultérieur dans la gamme de températures allant d'environ 800 °C à 1 200 °C, ou un travail à chaud dans cette gamme de températures, peut entraîner la transformation d'une partie ou de la totalité de la ferrite en austénite, sachant qu'une partie du nickel et d'autres éléments favorisant l'austénite se diffusent dans la ferrite et qu'une partie du chrome (et du molybdène, s'il est présent) se diffuse en dehors de la ferrite.

4.3.4 Alliages en mode de solidification FA

Une fois le mode de solidification FA terminé, une grande quantité de la ferrite présente à l'origine à la fin de la solidification se transforme en austénite, en partie parce que la ferrite devient thermodynamiquement moins stable, et en partie parce qu'une partie du nickel et d'autres éléments favorisant l'austénite se diffusent dans la ferrite tandis qu'une partie du chrome (et du molybdène, s'il est présent) se diffuse en dehors de la ferrite. En conséquence, la ferrite observée à des températures ambiantes est très inférieure à ce qui était présent à la fin de la solidification. Un recuit ultérieur dans la gamme de températures allant d'environ 800 °C à 1 200 °C, ou un travail à chaud dans cette gamme de températures, provoque généralement la transformation d'une plus grande quantité de ferrite en austénite. Ce comportement de transformation de la ferrite en austénite peut être mieux compris en faisant référence à la [Figure 2](#),^[7] où il apparaît que la gamme de compositions sur laquelle coexistent les deux phases, l'austénite et la ferrite, se déplace vers une teneur plus élevée en chrome avec une chute de température. Un recuit et un travail à chaud peuvent faire disparaître la totalité de la ferrite dans certains alliages tels que le 19 9 L (308L ou 304L) et le 19 12 3 L (316L). Cependant, une refusion, tel que celle réalisée en soudage TIG autogène, entraîne la reformation de la ferrite pendant la solidification.



a) 70 % Fe



b) 60 % Fe