# Métallographie des soudures

Struers
Ensuring Certainty

**Application** Notes

Jusqu'à la fin du 19ème siècle, des sections de métal étaient jointes par un processus de chauffage et de martelage appelé le soudage à forge. Aujourd'hui, toute une variété de processus de soudage différents est disponible, de sorte que le soudage est utilisé intensivement comme processus de fabrication servant à joindre des matériaux de nombreuses compositions, formes et tailles.

*Soudage à l'arc avec électrode enrobée*

De nombreux types d'industries de production emploient une grande variété de processus de soudage:

- Les industries aéronautique et aérospatiale, pour les ailes et les fuselages, par exemple.
- Les industries navale et maritime, pour les panneaux des ponts et les superstructures, par exemple.
- Les industries de transport terrestre / automobile.
- Les industries du pétrole et pétrochimique pour les plateformes de forage et les pipelines, par exemple.
- Domestique, par exemples les produits électroménagers et les meubles métalliques.

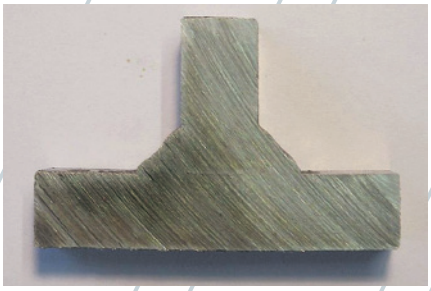
Pour le contrôle des processus, la recherche et l'analyse des défauts, la métallographie est utilisée pour une vérification des nombreux aspects différents dans une soudure, par exemple le nombre et la taille des passes, la profondeur de pénétration, l'étendue de la zone affectée thermiquement (ZAT), et tout autre défaut tel que les porosités et fissures sur les pièces représentatives. Comme les soudures sont réalisées dans une grande variété de matériaux différents, il est essentiel de choisir une méthode de préparation métallographique appropriée.

*Section polie et attaquée à travers un soudage en plusieurs passes d'un acier inoxydable austénitique. Après une attaque colorante selon Lichtenberger et Bloech. Fond clair, 6,5x.*

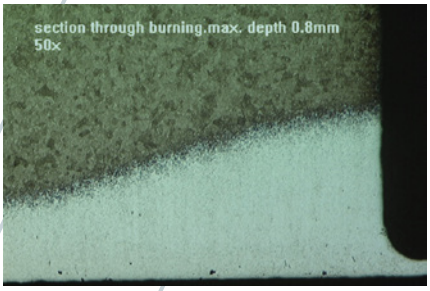
## Difficultés rencontrées lors de la préparation métallographique

L'introduction de tout dommage thermique au cours du processus de tronçonnage doit être évitée, car elle pourra altérer la microstructure et les propriétés dans le joint soudé.

Une compréhension approfondie du processus de préparation est nécessaire pour faire face aux difficultés que représentent les variations des propriétés d'un matériau au cœur et au travers du joint soudé, si l'on veut obtenir une bonne planéité entre les éléments microstructuraux ayant différentes valeurs de dureté.



*Dommage thermique sur une soudure en acier.*




*Section transversale polie et attaquée montrant la profondeur à laquelle un dommage thermique peut pénètrer. Fond clair, 50x.*

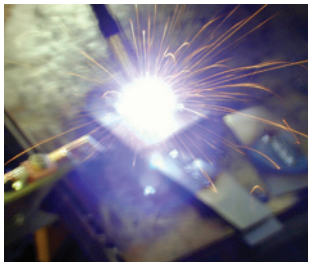
## Solution

Il est important de choisir la meule de tronçonnage correcte ainsi que les paramètres de tronçonnage adéquats afin d'éviter de causer tout dommage thermique à l'échantillon.

Il faudra choisir sa méthode de préparation selon les types de matériaux composant la soudure et l'optimiser pour minimiser le risque de relief entre les phases dures et tendres de la soudure, la zone affectée thermiquement et le matériau de base.

# Procédés d'assemblage nécessitant de la chaleur

# Procédé de soudage



Les procédés disponibles pour la jointure des métaux et alliages sont les suivants
- Le brasage tendre*
- Le brasage fort**
- Le soudage

Ce qui fait la distinction entre le soudage le brasage tendre et le brasage fort sont les points suivants:
- Le brasage tendre (Fig.1) et brasage fort (Fig. 2) impliquent la fusion d'un matériau à une température de fusion plus basse entre les pièces pour former un lien entre elles, sans pour autant faire fondre les pièces.

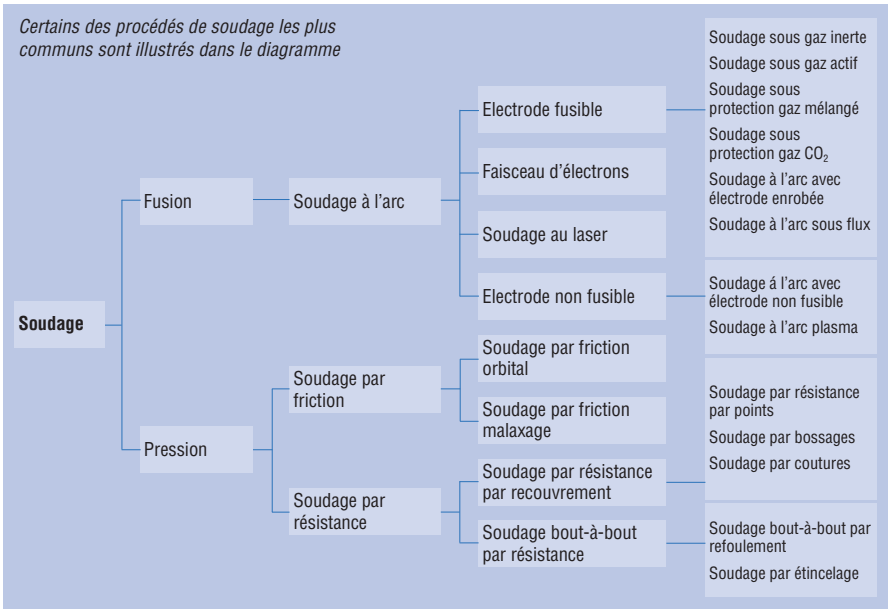
- Les matériaux à souder sont élevés au-dessus de leur point de fusion à proximité du joint, afin qu'il y ait fusion.

- En conséquence de cela, des changements chimiques et métallurgiques complexes ont lieu dans les matériaux autour du joint soudé.
- Ces changements microstructuraux peuvent avoir une influence profonde sur les propriétés du joint et sur son aptitude à l'emploi.

*Le brasage tendre: il s'agit du procédé par le biais duquel deux métaux sont joints par l'intermédiaire d'un troisième métal ou alliage avec un point de fusion relativement bas. Le brasage tendre se caractérise par la valeur du point de fusion du troisième métal ou alliage, qui est inférieur à 450°C. .

**Le brasage fort: a lieu à la température de fusion du métal d'apport pour brasage (par exemple, de 870°C à 980°C pour les alliages de bronze) ce qui est souvent considérablement plus bas que le point de fusion du matériau de base (par exemple, 1600°C pour l'acier doux).

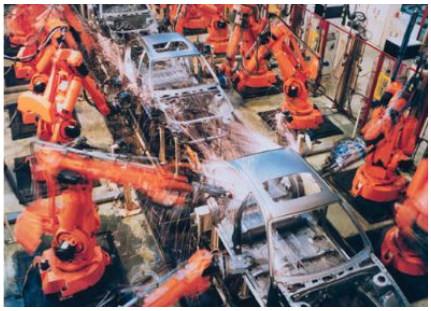
*Certains des procédés de soudage les plus communs sont illustrés dans le diagramme*




En général, une soudure est considérée comme une jonction entre deux pièces de métal ou plus dans lesquelles les surfaces doivent être élevées à un état plastique (par exemple, le soudage par friction linéaire Fig. 3) ou à un état liquide par l'application de chaleur avec ou sans métal ajouté et avec ou sans application de pression.

Chacun de ces processus possède ses caractéristiques propres et uniques, par exemple, la pénétration, la vitesse de soudage, la génération de laitier, le débit de chaleur, les propriétés d'une soudure, etc. et ceci peut, en revanche, avoir une influence considérable sur le détail microstructural qui est résulte.

En conséquence, toute étude sur les effets d'un processus de soudage particulier demandera un examen métallurgique minutieux d'échantillons de soudure représentatifs, que l'objectif soit l'examen de l'intégrité d'ensemble de la soudure ou bien la relation microstructure/propriété, ou encore l'identification de la nature et l'origine des défauts. L'exactitude de l'analyse et l'interprétation microstructurelles vont alors dépendre de la production des échantillons préparés, exempts de tout artefacts pouvant avoir été introduits à n'importe quelle étape du processus de préparation.



*Soudage robotisé*

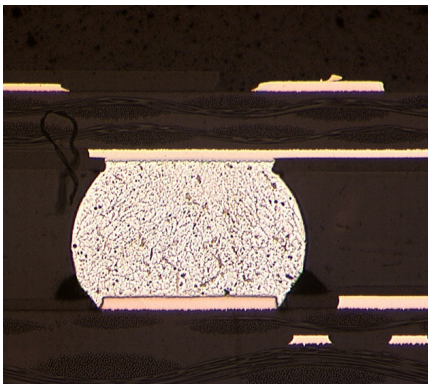


*Fig.1: Section polie d'une brasure tendre entre des connections conductrices de cuivre dans un circuit imprimé. Fond clair, 100x.*

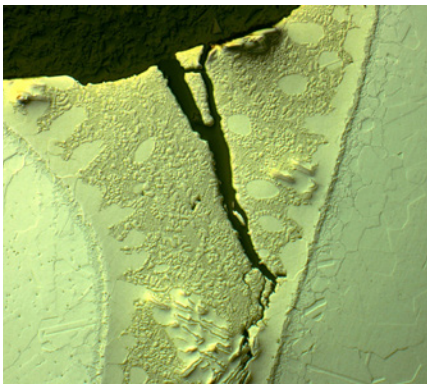


*Fig. 2: Section polie à travers une brasure forte fissurée dans un acier inoxydable austénitique. Contraste interférentiel différentiel, 100x.*

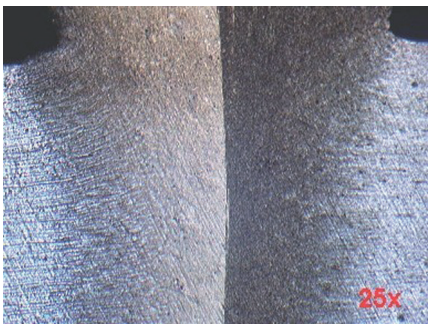



*Fig. 3: Interface de fusion sur un alliage d'acier faiblement allié soudé par friction linéaire sous pression, montrant une zone affectée thermiquement et une déformation plastique associée. Fond clair, 25x.*

*Section transversale d'un alliage à base de nickel soudé par faisceau d'électrons, montrant une microstructure basaltique soudée avec quelques bulles diffusées. Fond clair, 50x.*

*Soudure de tuyaux*

**Prélever des sections test de soudures**
Les principes et pratiques métallographiques peuvent être appliqués à l'examen de sections soudées pour atteindre un certain nombre d'objectifs; les plus communs sont indiqués ci-dessous:

- **Essai d'homologation du soudeur**
  Dans ce type de test, un soudeur individuel soude une pièce de test appropriée, sous des conditions bien spécifiques.
  Cette pièce de test est alors examinée par mesure, inspection visuelle et examen de la section préparée à travers la soudure.
  Si la soudure atteint le standard convenu, le soudeur sera approuvé pour souder des soudures du même type que la soudure testée.

- **Essai d'homologation d'un procédé**
  Dans ce type de test, c'est le procédé de soudage dans un matériau particulier, avec une configuration de joint particulière, qui va être approuvé.
  La soudure est examinée dans son intégralité par différents moyens, l'un d'entre eux inclut une section préparée dans le joint soudé.
  Une mesure de dureté sur une coupe transversale du matériau de base, de la zone thermiquement affectée et du métal soudé est normalement réalisée.

- **Contrôle qualité en Production**
  Dans ce type de test, un nombre représentatif de soudures sont sectionnées, puis examinées comme une étape du processus de production.
- **Analyse des défauts**

- **Recherche et Développement**

**Deux niveaux d'inspection métallographique**
L'examen des sections métallographiques dans les cordons de soudure est habituellement accompli à deux niveaux d'inspection:

**Macro:** Où des grossissements jusqu'à 50x sont utilisés sur des microscopes stéréoscopiques.

**Micro:** Où l'examen a lieu à des grossissements plus élevés (jusqu'à 1000x) sur microscope optique.

L'examen macroscopique est généralement réalisé sur des sections transversales de joints soudés, non-enrobées et ne nécessite que des techniques de tronçonnage et prépolissage grossier/fin. La finition alors obtenue est adéquate pour l'attaque, suivie de l'examen des particularités macrographiques du joint soudé.

Pour les techniques d'examen micrographique et de mesure de dureté sur une coupe transversale à la soudure, l'obtention d'une surface polie et optiquement plane est nécessaire. Ceci implique un tronçonnage, enrobage, suivis d'un prépolissage et polissage. Il faut s'attendre à ce que des artefacts puissent être introduits à tout niveau du processus de préparation. Ceci est particulièrement le cas pour les sections soudées, car non seulement les variations microstructurelles apparaissent sur des distances relativement courtes, mais certaines soudures peuvent aussi joindre des métaux dissemblables avec des propriétés complètement différentes.

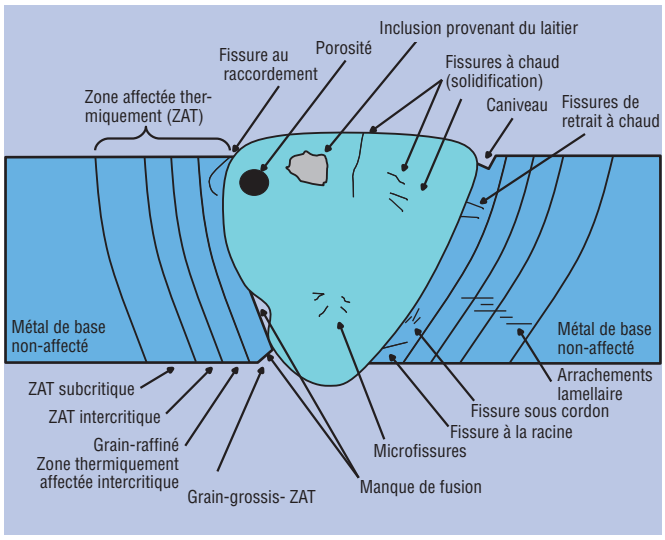
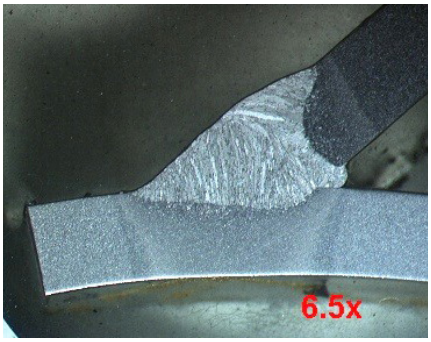



*Schéma illustrant les différentes régions de la zone affectée thermiquement (ZAT) dans une soudure à passe unique et les défauts éventuels.*

# Recommandations pour la préparation des microsections de soudure




*Section macrographique après prépolissage et attaque dans une soudure au MIG (soudage sous gaz inerte) à l'acier au carbone, attaqué au Nital 4%. Fond clair, 6,5x.*

## TRONÇONNAGE

Pour la plupart des essais d'homologation du soudeur, il est suggéré de tronçonner des sections macrographiques transversales à travers les positions d'arrêt/départ de la soudure. C'est à ces emplacements qu'un manque d'habilité du soudeur résultera d'une formation de défauts dans la soudure.

En ce qui concerne la soudabilité et autres études, la section doit être parfaitement représentative. Souvent, une découpe au chalumeau est utilisée comme technique primaire, par exemple pour prélever une section soudée plus facile à manier à partir d'un produit plus grand. Il est important, dans ces cas-là, que la section macro/micrographique soit tronçonnée par un processus de tronçonnage abrasif sous eau, et que la section soit réalisée à distance de tout dommage thermique généré par une opération de tronçonnage thermique préalable.

Pour que la déformation créée par le tronçonnage soit réduite au minimum et que tout risque de dommage thermique sur la surface tronçonnée soit évité, il est important que:

- Le type correct de meule de tronçonnage abrasive soit choisi.
- La vitesse d'avance adéquate soit utilisée.
- Le niveau de liquide de refroidissement soit adéquat tout au long du tronçonnage.

## ENROBAGE

Normalement, les sections macrographiques pour le test procédural sont préparées non-enrobées en raison des contraintes temporelles que cela impliquerait, et aussi parce que la finition après le prépolissage fin est généralement suffisant pour l'examen macrographique. Si la préparation semi-automatique est une option, il existe alors un certain nombre de porte-échantillons qui pourront être utilisés pour les sections transversales non-enrobées des joints soudés. Si un enrobage est requis, deux options sont disponibles: l'enrobage à chaud sous pression ou l'enrobage à froid. Il n'est pas inhabituel, cependant, dans l'examen des soudures, d'avoir des sections transversales relativement grandes. Dans ce cas, des tailles de section jusqu'à 120 x 60 x 45 mm pourront être enrobées dans UnoForm de Struers, desmoules rectangulaires pour l'enrobage à froid.

## PRÉPARATION MÉCANIQUE

### Sections macrographiques

Traditionnellement, les sections soudées, destinées à l'examen macrographique, sont préparées manuellement sur des feuilles de papier SiC de granulométrie de plus en plus fine, jusqu'à une taille de grain de 1200. Cela est habituellement suffisant pour la mesure de dureté sur une coupe transversale du matériau de base, de la zone affectée thermiquement et du métal d'apport, tout en étant adéquat pour l'attaque macrographique qui facilitera l'examen macrographique de la soudure. Le papier de carbure de silicium a ses limites pour ce qui est de son efficacité abrasive (de 1 à 1½ min.), ce qui empire encore plus la dimension de la section augmente. Alternativement, les supports de prépolissage/prépolissage fin pour la préparation manuelle, les disques MD-Piano de Struers offrent un certain nombre d'avantages:

- Une plus grande durée des capacités abrasives.
- Un temps d'enlèvement constant sur une période de temps plus longue.
- Adéquats pour une grande palette de dureté de matériaux (HV150-2000).
- Moins de déchets.

Les disques MD-Piano sont des disques diamantés à liant de résine qui ont été développés pour le prépolissage grossier et fin des matériaux dans une plage de dureté de HV150 à 2000, et ils sont disponibles en tailles de grain comparables à celles du papier SiC: 80,120, 220, 600 et 1200.

### Sections micrographiques

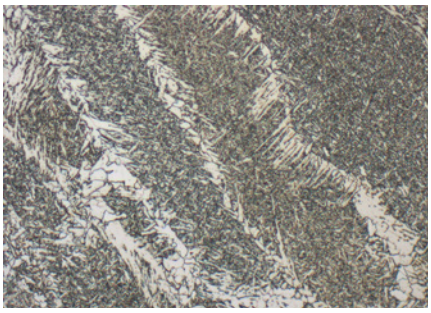
Les matériaux des échantillons de soudures peuvent avoir une dureté très variable de part et d'autre de l'échantillon, soit en raison des changements pouvant avoir lieu dans une phase durant le soudage, soit parce que le joint peut être composé de métaux qui ne sont pas similaires. Le métal d'apport peut contenir des précipités durs ou des défauts de soudure. En conséquence, il est important que la méthode de préparation garantisse un relief de polissage minimal, entre les caractéristiques microstructurelles, et que tous les éléments microstructuraux soient nets. Cela pris en considération, un équipement semi-automatique ou automatique est à préférer, car il garantira l'uniformité et la reproductibilité du polissage, ce qui facilitera la précision de l'analyse microstructurelle. L'intégralité des méthodes de préparation, couvrant la grande variété des matériaux de soudure, pouvant être expérimentées, ne seront pas toutes décrites dans ce document.
Nous allons, cependant, dans ce qui suit, détailler quatre méthodes couvrant les matériaux soudés les plus communément utilisés.

*Enrobages rectangulaires de soudures variées.*

**Soudures au carbone et acier faiblement allié**

| Etape | | PG | FG | DP 1 | DP 2 |
|---|---|---|---|---|---|
| Support | | MD-Piano 220 | MD-Allegro | MD-Plus | MD-Nap |
| Abrasif | Type | | | | |
| | Taille | | | | |
| Suspension / Lubrifiant | | Water | DiaPro Allegro/Largo 9 | DiaPro Plus 3 | DiaPro NapB 1 |
| /m Rrpm | | 300 | 150 | 150 | 150 |
| Force (N | | 150 | 210 | 180 | 150 |
| Temps | | 1 mn. | 4 mn. | 4 mn. | 1 mn. |

*Valable pour 6 échantillons enrobés, 30 mm de diam., fixés dans un porte-échantillons. A la place de DiaPro, il est possible d'utiliser DP-Suspension P, 9 µm, 3 µm et 1 µm avec du DP-Lubricant bleu.*

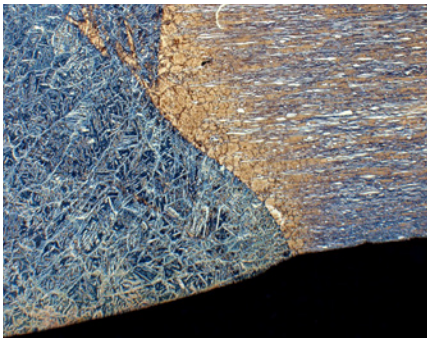


*Section micrographique après polissage et attaque dans une soudure en acier au carbone, soudée au gaz actif. La microstructure est constituée de ferrite aciculaire et primaire. Attaqué au Nital 2%. Fond clair, 200x.*

## Stainless steel welds

| Etape | | PG | FG | DP 1 | DP 2 |
|---|---|---|---|---|---|
| Support | | SiC #220 | MD-Largo | MD-Dac | MD-Chem |
| Abrasif | Type | | | | |
| | Taille | | | | |
| Suspension / Lubrifiant | | Eau | DiaPro Allegro/Largo 9 | DiaPro Dac 3 | OP-A |
| t/m | | 300 | 150 | 150 | 150 |
| Force (N) | | 150 | 180 | 150 | 120 |
| Temps | | 1 mn. | 5 mn. | 4 mn. | 2 mn. |

*Valable pour 6 échantillons enrobés, 30 mm de diam., fixés dans un porte-échantillons. MD-Largo peut être remplacé par MD-Plan.*
*A la place de DiaPro, il est possible d'utiliser DP-Suspension P, 9 µm et 3 µm avec du DP-Lubricant bleu.*
*MD-Chem avec OP-AA peut être remplacé par MD-Nap avec DiaPro Nap B.*



*Interface soudure-métal de base en acier inoxydable Duplex. Après préparation mécanique; attaquée électrolytiquement dans une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à 40%. Fond clair, 25x.*

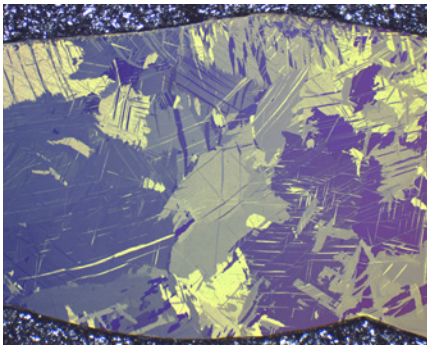
*Même matériau. La microstructure de la soudure consiste principalement de ferrite delta et d'austénite. Fond clair, 200x.*

## Titanium welds

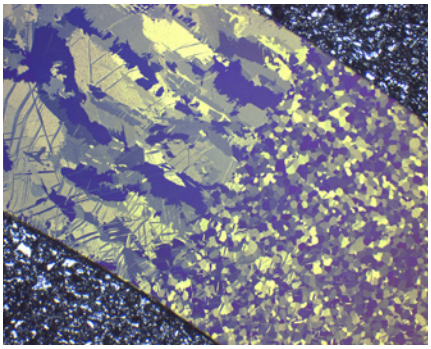
| Etape | | PG | FG | OP |
|---|---|---|---|---|
| Support | | SiC #220 | MD-Largo | MD-Chem |
| Abrasif | Type | | | |
| | Taille | | | |
| Suspension / Lubrifiant | | Eau | DiaPro Allegro/Largo 9 | OP-S* |
| t/m | | 300 | 150 | 150 |
| Force (N) | | 150 | 180 | 120 |
| Temps | | 1 mn. | 5 mn. | 5-10 mn. |

*Valable pour 6 échantillons enrobés, 30 mm de diam., fixés dans un porte-échantillons. A la place de DiaPro, il est possible d'utiliser DP-Suspension P, 9 µm avec du DP-Lubricant bleu.*

*Noter: OP-S avec un ajout de 10-30% par volume de péroxyde d'hydrogène (30%).



*Zone soudée. Section d'une soudure en titane de qualité 1 après polissage mécanique.*
*La microstructure de la soudure est constituée d'une phase α Widmanstätten. En lumière polarisée avec une lame teinte sensible (plaque λ1/4), 50x.*

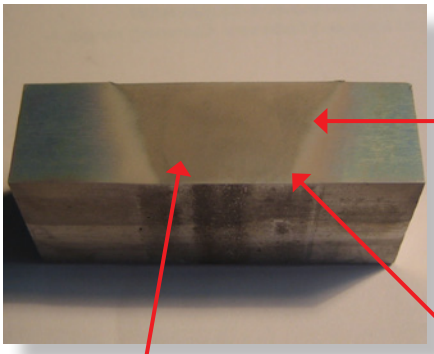


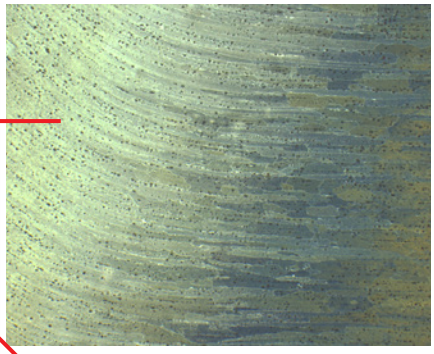
*Même matériau. Interface base-zone affectée thermiquement. En lumière polarisée avec une lame teinte sensible (plaque λ1/4), 50x.*

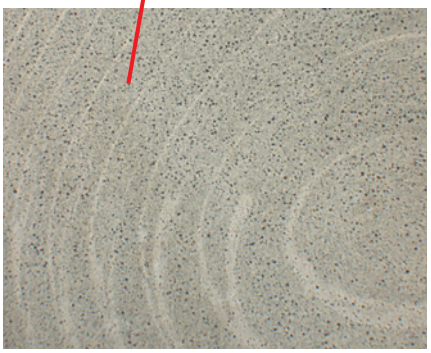
## Aluminium Welds (Friction stir welding)

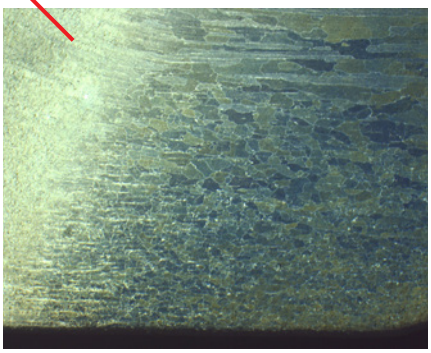
| Etape | | PG | FG | DP | OP |
|---|---|---|---|---|---|
| Support | | SiC #220 | MD-Largo | MD-Mol | MD-Chem |
| Abrasif | Type | | | | |
| | Taille | | | | |
| Suspension / Lubrifiant | | Eau | DiaPro Allegro/ Largo 9 | DiaPro Mol R 3 | OP-S NonDry |
| t/m | | 300 | 150 | 150 | 150 |
| Force (N) | | 120 | 150 | 120 | 100 |
| Temps | | 1 mn. | 5 mn. | 4 mn. | 1-2 mn. |

*Valable pour 6 échantillons enrobés, 30 mm de diam., fixés dans un porte-échantillons. A la place de DiaPro, il est possible d'utiliser DP-Suspension P, 9 µm et 3 µm avec du DP-Lubricant bleu et rose.*









*Aluminium soudé par friction malaxage, après attaque externe selon Barker, utilisant 15V pendant 3 mn. En lumière polarisée avec une lame teinte sensible (plaque λ1/4), 25x*

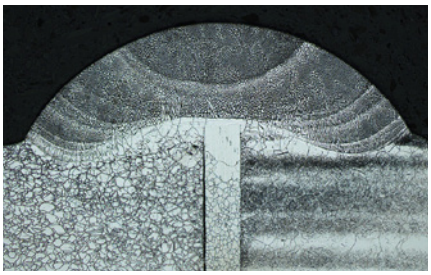
# Attaque

## POLISSAGE/ATTAQUE ÉLECTROLYTIQUES

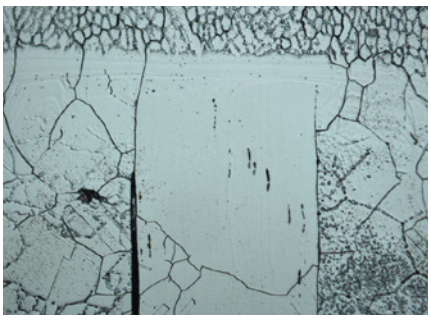
Il n'est pas inhabituel, pour les applications de contrôle de la production, de voir le polissage/l'attaque électrolytiques être utilisés comme méthode pour obtenir des sections transversales de soudure prêtes pour l'examen macrographique. Dans ces cas-là, les sections sont prélevées en utilisant un processus de tronçonnage sous eau, puis après une unique étape de prépolissage, les échantillons sont polis et attaqués électrolytiquement pour offrir une section adéquate pour l'examen macrographique. Les avantages de cette technique sont:

- Sa rapidité.
- Sa facilité d'opération.
- Le fait qu'elle minimise le contact de l'utilisateur avec les réactifs d'attaque acidiques.
- Une option plus adéquate pour une grande variété de types d'acier inoxydable et autres métaux qui sont difficiles à attaquer par une simple attaque chimique.

Pour les applications où une analyse microstructurelle détaillée est requise, les échantillons pour le polissage et l'attaque électrolytiques devront être prépolis jusqu'à une granulométrie de 1000.



*Section polie mécaniquement et attaquée électrolytiquement dans une soudure par gaz inerte de tungstène par micropulsion dans de l'alliage Inconel 625. Après attaque à l'acide oxalique 10%; 10 Volts pendant 10 s. Fond clair, 2,5x.*



*Même matériau. La microstructure dans la soudure consiste d'une solution solide primaire et de phases secondaires fines irrésolvables. La section montre un grossissement des grains prononcé dans le matériau de base à proximité de la face fusionnée. Fond clair, 10x.*

**Certains des** réactifs d'attaque chimique et électrolytique les plus communs pour les joints soudés dans une variété de matériaux sont indiqués ci-dessous.

| Matériau | Réactif d'attaque | Commentaires |
|---|---|---|
| **Aciers au carbone et faiblement alliés** | 100 ml d'éthanol (95%) ou méthanol (95%)<br>1 à 5 ml d'acide nitrique<br>(Nital) | Bon réactif pour usage général; peut être augmenté à 15% d'acide nitrique pour l'attaque macrographique. |
| | 100 ml d'eau distillée<br>10 g de persulfate d'ammoniaque | Bonne attaque macrographique |
| **Aciers inoxydables** | 480 ml d'eau distillée<br>120 ml d'acide hydrochlorique (32%)<br>50 g de chlorure ferrique (III), | Attaque macrographique |
| | 100 ml d'eau distillée<br>10 g d'acide oxalique | Attaque électrolytique de 4 à 6 volts pendant quelques s. |
| | 100 ml d'eau distillée<br>5 % d'acide sulfurique (95-97%) | Attaque électrolytique de 2 à 4 volts pendant quelques s. |
| **Alliages de nickel** | 100 ml d'eau distillée<br>5 % d'acide sulfurique (95-97%) | Attaque électrolytique de 3 à 6volts pendant quelques s. |
| **Alliages de cuivre** | 10 ml d'hydroxyde d'ammonium (25%) avec quelques gouttes de péroxyde d'hydrogène aqueux 3% dans de l'eau distillée | Utiliser fraîchement mélangé |
| **Alliages d'aluminium** | 100 ml d'eau distillée<br>15 g d'hydroxyde de sodium | Attaque macrographique |

*Il est important de suivre les précautions de sécurité recommandées lors de la manipulation des réactifs chimiques et lors de l'utilisation des réactifs d'attaque chimique.*

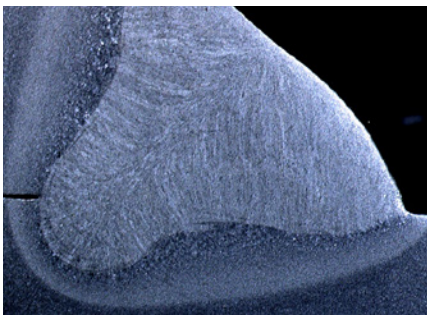
## MÉTALLOGRAPHIE

### Sections macrographiques

Les sections macrographiques attaquées permettent l'identification des limites du métal de soudure, de la zone affectée thermiquement, de la limite de fusion, de la croissance des grains et des passes individuelles dans les soudures en plusieurs passes. De plus, les défauts de soudure tels que fissures, porosités/vides, manque de fusion, et manque de pénétration peuvent être identifiés.

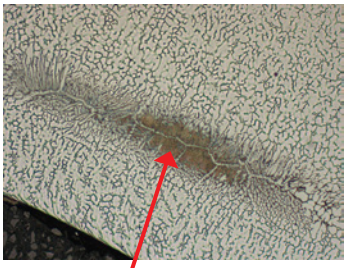
### Sections micrographiques

Certains tests métallographiques les plus communs réalisés sur les joints soudés sont détaillés ci-dessous:



*Section macrographique d'un cordon de soudure à forte pénétration dans de l'acier au carbone. La section a été attaquée au Nital 5%. Fond clair, 2,5x.*

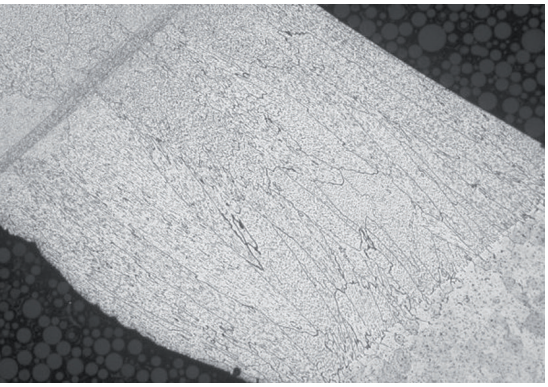
**Proportions de phases** - identification des phases individuelles et détermination de la proportions de phases, par exemple la ferrite delta dans les soudures en acier inoxydable austénitique.



*Fond clair, 100x*

*Fond clair, 500x*

*Section polie et attaquée d'une soudure en acier inoxydable austénitique, le métal montre des Îlots de ferrite delta et des petites zones de perlite.*

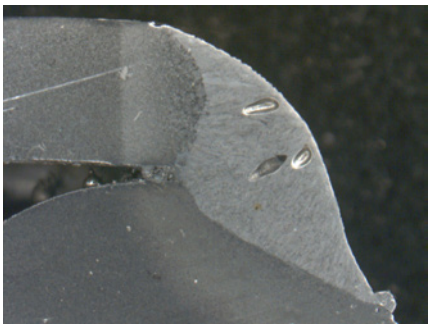


**Taille de grain** / mesures de la taille de grain dans les régions de grains grossis / affinés dans le métal d'apport et la zone affectée thermiquement.

*Soudure d'aluminium montrant diverses microstructures dans le métal d'apport, de base et la zone affectée thermiquement. Après attaque avec 2 ml d'acide hydrofluorique dans l'eau distillée. Fond clair, 100x.*

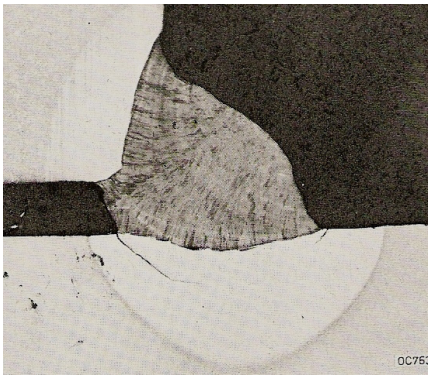
**Type de microstructure** / morphologie / identification des produits de transformation microstructuraux dans le métal d'apport et dans la zone affectée thermiquement.

*Zone affectée thermiquement dans une soudure d'acier inoxydable duplex. Attaquée électrolytiquement par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium 40%. Fond clair, 200x.*



**Analyse des défauts** / identification et caractérisation des défauts de soudures.

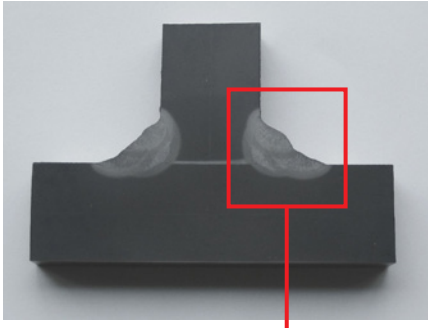
*Porosité gazeuse interne dans des composants d'acier soudés automatiquement sous gaz actif. Prépoli et attaqué au Nital 10%. Fond clair, 2x.*



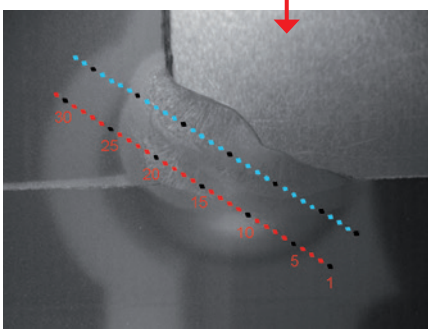
*Zone affectée thermiquement au-dessous du cordon de soudure dans une acier faiblement allié. Font clair, 5x.*

*Porosités dans une soudure en acier inoxydable austénitique. Fond clair, 100x.*

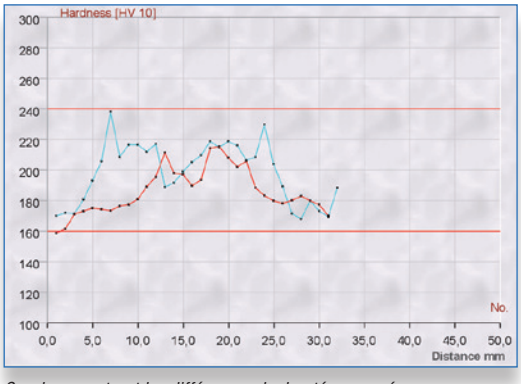
**Estimation de la dureté** - normalement une mesure de la dureté / microdureté sur une coupe transversale de la zone thermiquement affectée et du métal soudé dans le matériau de base est réalisée pour garantir que les propriétés de la soudure et de la zone affectée thermiquement sont satisfaisantes.



*Soudures d'acier.*




*Soudure avec empreintes de dureté (selon le standard DIN EN 1043).*




*Courbes montrant les différences de duretés mesurées sur Duramin-A300.*

# Récapitulatif

Struers
Ensuring Certainty

**Struers ApS**
Pederstrupvej 84
DK-2750 Ballerup, Denmark
Phone +45 44 600 800
Fax +45 44 600 801
struers@struers.dk
www.struers.com

L'application de bonnes pratiques métallographiques appliquées aux joints soudés a été décrite. Une méthode de préparation adéquate devra être choisie selon les propriétés physiques du/des matériau(x) soudé(s). Il est important de prendre toutes les précautions nécessaires à chaque étape du processus de préparation afin d'aboutir à une analyse correcte de la microstructure et des propriétés de la région de la soudure.

**Application Notes**

Métallographie des soudures

Bill Taylor, Anne Guesnier, Struers A/S
Copenhague, Danemark

**Remerciements**

Nous désirons remercier Mme Erika Weck et Mme Elisabeth Leistner pour la permission de reproduire la quatrième photographie de la première page, "Section polie et attaquée à travers un soudage en plusieurs passes d'un acier inoxydable austénitique. Après une attaque colorante selon Lichtenberger et Bloech. Fond clair, 6,5x".

Nous remercions Mme Brigitte Duclos, Struers S.A.S. pour les trois micrographies de la page 7:

*Soudure d'aluminium montrant diverses microstructures dans le métal d'apport, de base et la zone affectée thermiquement.*

*Zone affectée thermiquement dans une soudure d'acier inoxydable duplex.*

*Porosités dans une soudure en acier inoxydable austénitique.*

**Bibliographie**

Metallographic instructions for colour etching by immersion, Part 2: Behera colour etchants and their different variants, Erika Weck and Elisabeth Leistner.

Process and Physical Metallurgy; J. E. Garside
2rd Edition 1967.

Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, K. Geels, ASTM, 2007.

Metallographic etching. 2nd Edition, G. Petzow, ASM, Metals Park Ohio, 1999.

**AUSTRALIA & NEW ZEALAND**
**Struers Australia**
27 Mayneview Street
Milton QLD 4064
Australia
Tel.: +61 7 3512 9600
Fax: +61 7 3369 8200
info.au@struers.dk

**BELGIUM (Wallonie)**
**Struers S.A.S.**
370, rue du Marché Rollay
F- 94507 Champigny
sur Marne Cedex
Tel.: +33 1 5509 1430
Fax: +33 1 5509 1449
struers@struers.fr

**BELGIUM (Flanders)**
**Struers GmbH Nederland**
Zomerdijk 34 A
3143 CT Maassluis
Tel.: +31 (10) 599 7209
Fax: +31 (10) 5997201
netherlands@struers.de

**CANADA**
**Struers Ltd.**
7275 West Credit Avenue
Mississauga, Ontario L5N 5M9
Tel.: +1 905-814-8855
Fax: +1 905-814-1440
info@struers.com

**CHINA**
**Struers Ltd.**
No. 1696 Zhang Heng Road
Zhang Jiang Hi-Tech Park
Shanghai 201203, P.R. China
Tel.: +86 (21) 6035 3900
Fax: +86 (21) 6035 3999
struers@struers.cn

**CZECH REPUBLIC & SLOVAKIA**
**Struers GmbH Organizační složka**
vědeckotechnický park
Přílepská 1920,
CZ-252 63 Roztoky u Prahy
Tel.: +420 233 312 625
Fax: +420 233 312 640
czechrepublic@struers.de
slovakia@struers.de

**GERMANY**
**Struers GmbH**
Carl-Friedrich-Benz-Straße 5
D- 47877 Willich
Tel.: +49 (0) 2154 486-0
Fax: +49 (0) 2154 486-222
infoservice@struers.de

**FRANCE**
**Struers S.A.S.**
370, rue du Marché Rollay
F-94507 Champigny
sur Marne Cedex
Tel.: +33 1 5509 1430
Fax: +33 1 5509 1449
struers@struers.fr

**HUNGARY**
**Struers GmbH**
Magyarországi Fióktelep
2040 Budaörs
Szabadság utca 117
Phone +36 (23) 80 60 90
Fax +36 (23) 80 90 91
hungary@struers.de

**IRELAND**
**Struers Ltd.**
Unit 11 Evolution@ AMP
Whittle Way, Catcliffe
Rotherham S60 5BL
Tel.: +44 0845 604 6664
Fax: +44 0845 604 6651
info@struers.co.uk

**ITALY**
**Struers Italia**
Via Monte Grappa 80/4
20020 Arese (MI)
Tel.: +39-02/38236281
Fax: +39-02/38236274
struers.it@struers.it

**JAPAN**
**Struers K.K**
Takanawa Muse Bldg. 1F
3-14-13 Higashi-Gotanda,
Shinagawa
Tokyo
141-0022 Japan
Tel.: +81 3 5488 6207
Fax: +81 3 5488 6237
struers@struers.co.jp

**NETHERLANDS**
**Struers GmbH Nederland**
Zomerdijk 34 A
3143 CT Maassluis
Tel.: +31 (10) 599 7209
Fax: +31 (10) 5997201
netherlands@struers.de

**NORWAY**
**Struers ApS, Norge**
Sjøskogenveien 44C
1407 Vinterbro
Tel.: +47 970 94 285
info@struers.no

**AUSTRIA**
**Struers GmbH**
Zweigniederlassung Österreich
Betriebsgebiet Puch Nord 7
5412 Puch
Tel.: +43 6245 70567
austria@struers.de

**POLAND**
**Struers Sp. z o.o.**
Oddział w Polsce
ul. Jasnogórska 44
31-358 Kraków
Tel.: +48 12 661 20 60
Fax: +48 12 626 01 46
poland@struers.de

**ROMANIA**
**Struers GmbH, Sucursala Bucuresti**
Str. Preciziei nr. 6R
062203 sector 6, Bucuresti
Tel.: +40 (31) 101 9548
Fax: +40 (31) 101 9549
romania@struers.de

**SWITZERLAND**
**Struers GmbH**
Zweigniederlassung Schweiz
Weissenbrunnenstraße 41
CH-8903 Birmensdorf
Tel.: +41 44 777 63 07
Fax: +41 44 777 63 09
switzerland@struers.de

**SINGAPORE**
**Struers Singapore**
627A Aljunied Road,
#07-08 BizTech Centre
Singapore 389842
Tel.: +65 6299 2268
Fax: +65 6299 2661
struers.sg@struers.dk

**SPAIN**
**Struers España**
Camino Cerro de los Gamos 1
Building 1 - Pozuelo de Alarcón
CP 28224 Madrid
Tel.: +34 917 901 204
Fax: +34 917 901 112
struers.es@struers.es

**FINLAND**
Struers ApS Suomi
Sahaajankatu 20-22 A6
00880 Helsinki
Tel.: +358 (0)207 919 430
finland@struers.fi

**SWEDEN**
**Struers Sverige**
Box 20038
161 02 Bromma
Tel.: +46 (0)8 447 53 90
Fax: +46 (0)8 447 53 99
info@struers.se

**UNITED KINGDOM**
**Struers Ltd.**
Unit 11 Evolution @ AMP
Whittle Way, Catcliffe
Rotherham S60 5BL
Tel.: +44 0845 604 6664
Fax: +44 0845 604 6651
info@struers.co.uk

**USA**
**Struers Inc.**
24766 Detroit Road
Westlake, OH 44145-1598
Tel.: +1 440 871 0071
Fax: +1 440 871 8188
info@struers.com

28.01.2020 / 62340409