Document de support de la présentation :

**Soudage friction malaxage**

Contenu développé par :

Lyne St-Georges

# Introduction

Ce document est un complément d’information à la présentation : « Soudage friction malaxage » d’Alu-Compétences. Des informations seront ainsi fournies pour chaque diapositive de la présentation.

Ce module de formation est fourni dans le cadre du projet Alu-Compétences d’AluQuébec, la grappe aluminium du Québec, et ses partenaires. Le projet Alu-Compétences vise à produire et à diffuser des contenus techniques et scientifiques pour l’enseignement de l’aluminium aux niveaux collégial et universitaire, notamment pour les programmes de design industriel, d’architecture et de métallurgie ainsi que pour les facultés de génie civil, mécanique et aérospatial. Alu-Compétences souhaite enrichir la formation des futurs professionnels sur les notions entourant l’aluminium. Il vise également à encourager les institutions d’enseignement à utiliser leur capacité d’adaptation des programmes de formation pour mieux répondre aux besoins des entreprises de l’industrie de l’aluminium en assurant un bassin de main-d’œuvre qualifiée.

Les partenaires du projet Alu-Compétences vous souhaitent bonne lecture.

# Diapositive 4

Pour réaliser le soudage, un outil de forme cylindrique composé d’un épaulement et d’un pion, est mis en rotation avant d’être pressé contre les pièces à souder (on peut voir sur la figure de droite la forme d’un tel outil). Le pion en rotation, pressé contre le matériau s’enfonce dans ce dernier jusqu’à ce que l’épaulement prenne appui sur la surface. Le pion est alors complètement enfoncé dans la matière. Après quelques instants, l’outil en rotation débute un mouvement d’avance ce qui produit le soudage.

Le frottement qui se prend place entre l’épaulement et la surface des pièces, produit un échauffement par frottement, ce qui permet de ramollir le matériau en phase solide pour le déformer et le malaxer. La température maximale atteinte durant le procédé atteint de 0,8 à 0,9 fois la température de fusion du matériau (pour l’aluminium, cela signifie près de 500 °C). La force axiale, aussi appelée force de forgeage, appliquée sur l’outil durant le soudage doit être suffisante pour assurer un frottement adéquat et une génération de chaleur suffisante.

## Figure « Illustration du procédé »

La terminologie utilisée pour décrire les différents éléments du soudage par friction malaxage est présentée sur cette figure. À noter que la rotation de l’outil, jumelée à l’avance de l’outil produit une asymétrie dans les soudures. Sur cette figure, on distingue notamment les deux côtés de la soudure appelé « côté avance » et « côté recul ». Le côté avance est le côté pour lequel la matière est poussée par la rotation de l’outil dans la direction d’avance de ce dernier. Du côté recul, la rotation de l’outil pousse le matériau derrière lui.

## Figure « Montage réel »

Cette figure illustre les différentes composantes du procédé. On peut y voir les pièces à souder et le joint entre celles-ci, l’outil de soudage (le pion est plongé dans les pièces), la soudure réalisée et le système de fixation utilisé.

## Figure « Outil de soudage »

Sur cette figure, on peut voir un outil réel, avec son pion et son épaulement ainsi que la surface d’une soudure. On peut également remarquer que l’extraction de l’outil en fin de soudure, laisse un trou.

# Diapositive 5

Pour réaliser une soudure par friction malaxage, une séquence de mouvement doit être suivie. Ces mouvements correspondent à quatre phases distinctes de soudage. Ces phases sont ici illustrées avec la force axiale (selon l’axe de rotation de l’outil) et le couple exercé sur l’outil de soudage. La forme des courbes ici présentées peut varier selon les conditions de soudage utilisées.

## Phase de plongée :

C’est la phase initiale du soudage. Durant cette phase, l’outil est mis en rotation et effectue un mouvement de descente (direction axiale, normale à la surface des pièces). L’outil pénètre dans les pièces à assembler jusqu’à ce que l’épaulement touche la surface des pièces (ou jusqu’à la position optimale de soudage). Toute la surface de l’épaulement doit s’appuyer sur le matériau pour produire un échauffement suffisant.

Au fur et à mesure que le pion s’enfonce dans le matériau, un volume de matière est éjecté latéralement sous la forme d’un copeau. Le volume total de matière éjectée coïncide avec le volume du pion. Durant cette phase, le matériau est encore relativement froid et uniquement le pion est en contact avec le matériau. La force normale et le couple appliqués sur l’outil augmentent jusqu’à ce que l’épaulement touche la surface du matériau. Les valeurs maximales de force et de couple sont habituellement atteintes durant cette phase.

## Phase d’attente :

Lorsque l’épaulement touche la surface des pièces, le frottement produit un échauffement rapide du matériau ce qui augmente sa ductilité. L’outil est par la suite maintenu en place suffisamment longtemps pour réchauffer le matériau et lui permettre d’atteindre sa température de soudage. Il suffit de quelques secondes pour que la température du matériau atteigne 0,8 à 0,9 fois sa température de fusion.

Durant cette phase, la force normale et le couple appliqués sur l’outil diminuent en raison de l’échauffement.

## Phase d’avance :

Durant cette phase, l’outil est mis en mouvement (translation) et accéléré pour atteindre la vitesse d’avance requise pour le soudage. Une accélération trop rapide produit des contraintes mécaniques importantes sur l’outil et sur l’équipement de soudage, ce qui réduit la durée de vie des composantes. Durant cette phase, l’outil de soudage peut être incliné de quelques degrés par rapport à la direction normale à la surface (inclinaison prenant place dans le plan formé par la direction normale et la direction longitudinale). Cette inclinaison a pour effet de soulever le bord d’attaque de l’outil et d’appliquer une force additionnelle de forgeage sur le bord de fuite. Lors de la phase d’avance, les forces exercées sur l’outil et le couple fluctuent normalement peu.

Phase de retrait :

Lorsque la soudure est complétée, le déplacement de l’outil est arrêté tout en maintenant celui-ci en rotation et l’outil peut être retiré des pièces par un mouvement normal à la surface soudée. Les forces et les couples chutent alors rapidement. La rotation de l’outil peut par la suite être stoppée.

# Diapositive 6

Des paramètres typiques de soudage, utilisés pour souder des pièces en AA6061-T6 de 6 mm d’épaisseur dans une configuration de joint bout à bout sont ici donnés à titre indicatif. Ces paramètres sont influencés par la géométrie de l’outil utilisé, c’est pourquoi des gammes de valeur sont données pour chaque paramètre. On observe que la force axiale peut atteindre facilement plus de 10 kN.

Pour réaliser un tel soudage, différents paramètres doivent être contrôlés, notamment les vitesses d’avance et de rotation. Selon l’équipement utilisé, la position ou la force axile (ou une combinaison des deux) peut être également contrôlée.

# Diapositive 7

Tous les alliages d’aluminium peuvent être soudés par SFM, même ceux réputés difficilement soudable (AA2XXX et AA7XXX). Même si le SFM est principalement utilisé pour joindre des matériaux similaires, il est possibilité de réaliser des assemblages mixtes, entre deux alliages différents. Pour ce cas, les propriétés des soudures réalisées dépendent des conditions dans lesquelles le soudage est effectué.

Les alliages d’aluminium peuvent aussi être soudés avec d’autres matériaux tels que l’acier, le cuivre et le magnésium. Pour les assemblages avec des matériaux durs ou à haute température de fusion, des outils différents doivent être utilisés pour supporter les contraintes et températures élevées.

# Diapositive 8

Le SFM a été initialement utilisé pour assembler les matériaux ayant une basse température de fusion (alliages d’aluminium, de magnésium et de cuivre). L’utilisation du procédé s’est par la suite étendue aux matériaux ayant une température de fusion plus élevée. Le soudage des aciers, aciers inoxydables, alliages de titane et de nickel, a alors été développé. Pour ces matériaux, des problèmes d’usure et de déformation à chaud des outils sont observés. Pour ces matériaux, le choix du matériau composant l’outil devient critique car ce dernier doit pouvoir supporter des contraintes élevées à haute température.

Sur la photo, on peut voir un réservoir en cuivre de 50 mm d’épaisseur développé par SKB pour entreposer les déchets nucléaires en Suède, soudé par SFM.

# Diapositive 9

Dans le tableau présenté, on peut voir les performances des soudures en terme de résistance ultime, pour différents matériaux et alliages. Le coefficient de soudure utilisé est calculé à l’aide de l’équation présentée. Pour les alliages durcis par écrouissage (traitement « H »), l’effet du SFM est généralement moindre.

# Diapositive 10

Plusieurs avantages techniques sont associés à l’utilisation du SFM. L’un des premiers avantages est de pouvoir réaliser des soudures sur des pièces minces ou épaisses, en une seule opération. Il est également possible de doubler l’épaisseur des pièces soudées en effectuant deux passes de soudage, une de chaque côté des pièces. La figure de droite illustre un assemblage bout à bout entre deux pièces de 25 mm en AA6061-T6, soudé de cette manière à l’aide d’une fraiseuse à commande numérique. Sur la partie supérieure de cette figure, on peut voir la soudure effectuée. Sur la partie inférieure, l’assemblage a été usiné pour montrer la qualité de la soudure.

# Diapositive 11

D’autres avantages du SFM sont liés au fait que la soudure est réalisée à l’état solide. On peut ici voir une liste non exhaustive de ces avantages. La figure présentée illustre une personne effectuant du soudage à l’arc plus conventionnel.

# Diapositive 12

L’utilisation du SFM procure également des avantages qui facilitent sa mise en opération :

* Outil non consommable : ce dernier peut permettre de réaliser plusieurs centaines de mètres de soudage dans certaines conditions (selon l’alliage et les paramètres de soudage) ;
* Aucun métal ou flux requis ;
* Tolérant au jeu entre les pièces : un jeu pouvant atteindre 10-20% de l’épaisseur des pièces peut être toléré sans se traduire par des défauts internes dans la soudure. Toutefois, le manque de matière se fait sentir en produisant une sous-épaisseur de métal dans la zone soudée ;
* Pénétration des soudures : contrôlée par la longueur du pion ;
* Procédé très répétitif car automatisé ;
* Soudage dans différentes positions : l’outil peut être incliné dans toutes les directions, l’épaulement doit toutefois demeurer parallèle aux surfaces à assembler (une inclinaison de quelques degrés est acceptable);
* Peu ou pas de meulage requis : si des conditions de soudage appropriées sont utilisées, la géométrie des surfaces est relativement lisse et ne requiert aucun traitement post soudage.

# Diapositive 13

Une analyse réalisée par ESAB a permis d’évaluer le temps requis pour réaliser une soudure de pièces de 15 mm d’épaisseur en AA6082-T5 par soudage MIG et SFM. Le tableau présenté donne un sommaire des temps mesurés pour les différentes opérations requises pour chaque type de soudage. Au total, pour les pièces étudiées, le soudage MIG requiert 34 minutes pour réaliser un mètre de soudure, ce temps total est réduit à 2 à 5 minutes pour le SFM.

# Diapositive 14

Plusieurs avantages économiques sont liés à l’utilisation du SFM :

* Réduction du matériel : la résistance des soudures réalisées par SFM est accrue, ce qui permet de réduire l’épaisseur des pièces soudées ;
* Pas de métal d’apport ou flux requis : gestion et entreposage réduit ;
* Haute efficacité énergétique : le matériau est chauffé à une température inférieure lors du soudage (phase solide), il y a moins de pertes de chaleur, et donc, d’énergie. La puissance mécanique utilisée pour mettre en mouvement l’outil est en grande partie transférée vers le matériau. Certaines pertes mécaniques sont néanmoins présentes dans les équipements utilisés (frottement) ;
* Procédé répétitif : lorsque le soudage est maîtrisé et que les paramètres opératoires ont été optimisés, le procédé est stable et peu de reprises sont nécessaires.

On peut voir sur la figure présentée la photo de la fusée Delta II dont une partie de l’assemblage a été réalisée par SFM.

# Diapositive 15

Pour réaliser une soudure par SFM, l’épaulement de l’outil doit prendre appui sur la surface des pièces à souder. Cela limite l’utilisation du SFM à certaines géométries de soudure. La figure présentée illustre les principales configurations utilisées. D’autres configurations sont également possibles, tout en préservant l’appui de l’épaulement sur les surfaces.

Pour les soudures en T et en recouvrement, le pion traverse la pièce supérieure pour atteindre la pièce inférieure. La profondeur avec laquelle le pion s’enfonce dans la pièce inférieure peut être variable.

# Diapositive 16

Pour effectuer une soudure, des forces imposantes (plusieurs kN) doivent être appliquées sur l’outil de soudage. Ces forces sont par la suite transmises aux pièces, par conséquent, celles-ci doivent être maintenues fermement. De plus, la force exercée par l’outil sur le matériau force ce dernier à se déformer. Celui-ci doit donc être efficacement contenu par une surface de support appropriée sous sa surface inférieure.

La chaleur produite par le soudage est partiellement transmise à la surface de support. Le flux de chaleur sur la face envers des soudures dépend de la diffusivité thermique de cette surface et joue un rôle sur la vitesse de refroidissement des soudures. Plus la diffusivité thermique du matériau utilisé est élevée, plus le refroidissement produit dans la soudure sera grand.

# Diapositive 18

La figure présentée illustre les principales composantes d’une cellule de soudage, ainsi que la terminologie utilisée pour décrire les différentes directions.

L’axe de rotation de l’outil définit la direction axiale aussi parfois appelé axe de forgeage. La direction longitudinale correspondant à la direction selon laquelle s’effectue le soudage et finalement, la direction transversale représente la dernière direction.

# Diapositive 19

L’outil de soudage de base est composé de deux parties, l’épaulement et le pion. Un outil peut être monobloc (d’une pièce) et formé par deux composantes distinctes :

* Monobloc : coût moindre mais si on casse le pion, on doit remplacer l’outil au complet ;
* Deux pièces : permet de changer le pion si ce dernier s’use ou est brisé.

# Diapositive 20

On peut voir sur cette page différentes formes de pions. La géométrie de ceux-ci varie selon les applications. Leur fonction est de briser la couche d’oxyde présente à la surface des pièces, dans la zone soudée, pour permettre la réalisation d’une soudure. Leur géométrie doit aussi permettre de déformer le matériau dans la zone soudée, sans créer de défaut interne.

La pénétration de la soudure est habituellement légèrement supérieure à celle du pion. Par ailleurs, l’extrémité du pion ne doit pas toucher la surface de support sous les pièces, sinon une usure prématurée ou un bris du pion peut être produit.

# Diapositives 21 et 22

L’utilisation de gorges ou de surfaces plates sur le pion permet d’emprisonner une certaine quantité de matière près du pion ce qui améliore le malaxage lors de la rotation de l’outil et augmente les déformations produites dans le matériau, tout en réduisant la force transversale et le couple devant être appliquée sur l’outil. Pour les matériaux à haute température de fusion ou abrasif, les pions de section circulaire sont davantage utilisés car les arêtes vives s’usent rapidement dans de telles conditions.

# Diapositives 23 et 24

Certains outils utilisent un pion indépendant de l’épaulement, qui peut être déplacé de manière distincte en utilisant un équipement de soudage approprié. Lorsqu’un tel outil est utilisé, la longueur du pion peut être ajustée pour souder différentes épaisseurs de matériau ou pour retirer graduellement le pion du matériau durant le soudage.

Le retrait graduel du pion lors du soudage permet d’éliminer le trou en fin de soudure, toutefois aucune matière additionnelle n’est ajoutée. Par conséquent, une certaine quantité de matière, perdue en début de soudure sous la forme d’un copeau, demeure absente. Un certain amincissement des soudures est donc à prévoir.

Par ailleurs, lorsque le pion est retiré graduellement, des soudures ayant des pénétrations incomplètes sont effectuées. Pour contourner ce problème, ce retrait peut être combiné à un changement de direction du soudage, afin de faire revenir l’outil sur ses pas. Pour terminer, le trou en fin de soudure peut aussi être éliminé en terminant le soudage dans une pièce sacrificielle, qui sera retirée à la fin de l’assemblage.

# Diapositive 25

Le diamètre de l’outil joue un rôle déterminant sur la chaleur produite par frottement. Celui-ci doit être optimisé. L’épaulement contrôle la qualité des soudures en surface.

# Diapositive 26

Des rainures en forme de spirale peuvent être placées sur l’épaulement pour produire une force de traction sur le matériau vers l’axe central de l’outil, ce qui permet de contenir plus facilement la matière sous l’épaulement. Cela a pour effet d’améliorer le fini de surface des pièces soudées et de réduire la taille des bavures. Lorsque des rainures ou nervures sont présentes sur la surface de l’épaulement, celui-ci doit être maintenu parallèle aux surfaces des pièces à souder (l’axe de l’outil est alors normal à la surface).

# Diapositive 27

Il existe deux classes d’outils à double épaulement :

* Les outils ayant une distance constante entre les deux épaulements (communément appelé « *bobbin tool »* en raison de leur géométrie rappelant une bobine);
* Les outils pour lesquels la distance entre les deux épaulements est ajustable (mouvement du pion similaire à celui du pion ajustable, nécessite d’utiliser un équipement permettant de réaliser un tel mouvement).

Pour débuter une soudure avec des outils à double épaulements, le pion de ceux-ci peut être pressé contre l’arête des matériaux en début de soudage. Lorsque l’épaulement inférieur est démontable, un trou initial peut être réalisé dans les pièces pour installer l’épaulement inférieur et initier le soudage directement dans les pièces.

Lorsque la distance entre les épaulements est ajustable en cours du soudage, il peut être possible de contrôler l’effort de forgeage appliqué sur le matériau et de souder des pièces d’épaisseurs variables.

# Diapositives 28 et 29

Le choix d’un matériau pour fabriquer un outil de soudage doit tenir compte de plusieurs caractéristiques. Le choix final dépend grandement de la disponibilité du matériau, de sa facilité de mise en forme, de sa résistance (durée de vie) et de son coût d’achat.

# Diapositive 30

Tous les équipements utilisés pour le SFM ont des composantes communes : une tête de soudage, un mécanisme pour produire un déplacement et une base rigide. Le déplacement de l’outil, relativement au matériau, peut être produit par un déplacement de la tête de soudage (les pièces sont alors fixes) ou par un déplacement des pièces (la tête demeure fixe).

# Diapositive 31

La liste des principaux paramètres mesurés durant le soudage pour assurer un contrôle ou un suivi durant le soudage sont ici présentés. À cette liste peut s’ajouter les mesures de température dans les outils (pion et/ou épaulement).

# Diapositive 32

Différents modes de contrôle peuvent être utilisés pour le SFM. Le mode choisi dépend en grande partie des possibilités de l’équipement utilisé.

Contrôle de position

Le contrôle de position est souvent utilisé en raison de sa simplicité. Dans ce mode de contrôle, la trajectoire et les vitesses de l’outil sont programmées en fonction de la géométrie des pièces et des paramètres souhaités pour le soudage. En utilisant ce mode de contrôle, il est difficile de tenir compte des faibles variations de dimensions des pièces (tolérances) ou des variations d’origine mécanique, thermique (dilation des pièces lors de l’échauffement de celles-ci) ou des jeux entre les pièces. Bien qu’efficace, cette façon de faire limite la répétitivité du procédé.

Contrôle de force

Certains équipements de soudage sont instrumentés afin de mesurer les forces exercées par l’outil durant le soudage (principalement la force axiale de forgeage), ce qui permet de contrôler ce paramètre. En utilisant ce mode de contrôle, il est possible de maintenir constante la force de forgeage appliquée sur le matériau, ce qui permet de moduler la position de l’outil pour suivre la surface des pièces à souder. Pour utiliser ce mode de contrôle, des essais préliminaires doivent cependant être effectués pour déterminer les forces devant être appliquées; l’application d’une force trop grande produira un enfoncement excessif de l’outil, tandis qu’une force trop faible pourrait empêcher l’outil d’atteindre la position souhaitée.

Contrôle de température

Les températures atteintes dans le matériau lors du soudage ont un effet déterminant sur la qualité des soudures. La température dans la zone soudée est l’un des paramètres de soudage qui doit être contrôlé pour obtenir une qualité de soudure uniforme. Pour contrôler cette température, il est possible d’instrumenter les pièces soudées. Toutefois, une telle instrumentation doit être réalisée pour chaque assemblage. Afin d’avoir une estimation des températures de soudage, c’est plutôt la température des outils qui est mesurée. Cette température n’est pas égale à celle dans le matériau mais est néanmoins représentative de ce qui s’y produit. Pour une vitesse d’avance et une force de forgeage constante, il est possible de déterminer une plage de température optimale pour le soudage de divers matériaux. La vitesse de rotation de l’outil est par la suite modulée pour contrôler la température de l’outil.

# Diapositive 33

Les systèmes de bridages ou de fixation des pièces doivent être rigides et pouvoir soutenir les forces variables appliquées sur les pièces durant le soudage. La force transversale produite durant le soudage peut être imposante, cette dernière n’est pas constante et varie tel qu’illustré sur la figure de droite. En plaçant une sonde latéralement sur les pièces soudées, on peut voir que la force transversale augmente lors du passage du l’outil de soudage (2) pour devenir pratiquement nulle après le passage de ce dernier (3).

Pour sa part, la surface supportant le matériau durant le soudage doit être assez solide pour soutenir la force appliquée par l’outil et ne pas se déformer de manière importante lors du soudage. Si le soudage est réalisé en mode contrôle de position, une telle déformation pourrait changer la position de la surface du matériau sans que la position de l’outil ne soit modifiée, ce qui entraînerait une variation de la pénétration de l’outil dans la pièce.

# Diapositive 34

Des équipements sont conçus spécifiquement pour le SFM. Ces équipements sont typiquement robustes pour appliquer des forces axiales de forgeage pouvant atteindre plusieurs dizaines de kN et peuvent prendre plusieurs configurations. L’équipement ici illustré, a une configuration de type « portique ». Ces équipements peuvent avoir jusqu’à six degrés de liberté, ce qui permet d’incliner l’outil de soudage dans toutes les directions et de souder des surfaces courbes.

Voici quelques caractéristiques techniques de l’équipement illustré :

Surface de travail :

* longueur (x) : 18 m ;
* largeur (y) : 3,5 m ;
* hauteur (z) : 1 m.

Position et déplacement :

* Six degrés de liberté ;
* Précision en position : 0,16 mm ;
* Vitesses : jusqu’à 6 m/min et 3 000 RPM ;
* Rotation axes y et z axis : 100° et 360°.

Force maximale de forgeage :

* de 0° à 30° par rapport à l’axe vertical : 67 kN ;
* de 31° à 90° par rapport à l’axe vertical : 30 kN.

# Diapositive 35

Des fraiseuses peuvent également être utilisées pour le SFM. L’utilisation d’un tel équipement est toutefois limité par sa capacité à appliquer des charges importantes et, dans certain cas, la tête ne peut pas être inclinée ; uniquement des pièces planes peuvent alors être soudées. De plus, si aucun ajout n’est fait à ce type d’équipement, les forces utilisées lors du soudage ne sont pas connues. Un contrôle en force est alors impossible. Certaines têtes de soudage sont disponibles sur le marché pour faciliter la mise en application du SFM avec ce type d’équipement (à titre d’exemple, voir le site de Stirweld : <https://stirweld.com/produits-stirweld/tete-fsw/>).

Voici quelques caractéristiques techniques de l’équipement illustré :

Surface de travail :

* longueur (x) : 1,5 m ;
* largeur (y) : 1 m ;
* hauteur (z) : 0,75 m.

Position et déplacement :

* quatre degrés de liberté (déplacements x, y, z et rotation selon l’axe vertical);
* Vitesses : jusqu’à 2 m/min et 2 000 RPM.

Force maximale de forgeage : inconnue

# Diapositive 36

Les robots industriels utilisés pour le SFM doivent être munis d’une tête de soudage et avoir une charge utile atteignant quelques milliers de kilos newtons. Les principales limitations de ce type d’équipement sont leur manque de rigidité et de force qui se traduit fréquemment par des écarts entre la trajectoire programmée et celle réalisée en soudage. L’utilisation de ce type d’équipement permet cependant d’atteindre des endroits plus restreints.

Voici quelques caractéristiques du robot illustré, avec sa tête de soudage :

Rayon d’action : 2,8 m

Position et déplacement :

* Six degrés de liberté ;
* Précision en position : 1 mm ;
* Vitesse de soudage : jusqu’à 2 m/min.

Force maximale de forgeage : 15 kN

# Diapositive 38

Le SFM produit différentes modifications à la microstructure du matériau dans la zone soudée. On peut voir sur cette page une liste des principales modifications observées. De plus, certaines contraintes résiduelles sont présentes dans les soudures même si l’assemblage est réalisé phase solide. Une partie de ces contraintes sont attribuables au système de fixation utilisé. Ce dernier limite la contraction du matériau après soudage ce qui produit des contraintes résiduelles dans les directions transversales et longitudinales. Ces contraintes résiduelles peuvent provoquer des distorsions, influencer les caractéristiques mécaniques des soudures et modifier la résistance à la corrosion et à la fatigue des assemblages.

# Diapositive 39

Une vue en coupe illustrant les différentes zones métallurgiques les plus couramment observées pour une soudure bout à bout réalisée par SFM est ici présentée.

MB : matériau de base

Le matériau dans lequel est réalisé le soudage, dans son état initial avant soudage, est ici appelé matériau de base (MB). Dans cette zone, la microstructure du matériau est très peu ou pas affectée par l’opération d’assemblage. Aucune modification de la microstructure ou des propriétés mécaniques du matériau par rapport à son état d’origine n’y est détectable. Les principales modifications qui peuvent y prendre place sont dues à la présence de contraintes résiduelles internes dans la soudure qui introduisent des distorsions et des contraintes secondaires dans le matériau situé dans cette zone.

ZM : zone malaxée

La zone directement affectée par le mouvement du pion est la zone malaxée (ZM). Dans cette zone, le mouvement produit par le pion et l’épaulement génère d’intenses déformations et une élévation importante de température. Pour plusieurs matériaux, cette combinaison produit une recristallisation dynamique de la microstructure. Les nouveaux grains formés sont équiaxes et généralement plus fins que ceux du matériau de base (avec une orientation aléatoire). La température atteinte lors du soudage et le taux de refroidissement après soudage influencent la taille des grains. La zone malaxée est fréquemment caractérisée par la présence d’une série d’anneaux circulaires ou elliptiques concentriques. Cette caractéristique est visible après une attaque chimique et prend le nom de « rondelles d’oignons » en raison de son apparence. Ce patron est produit par une variation de la taille des grains, un effet de la texture, une variation de la densité des dislocations ou une variation de la distribution de particules dans le matériau.

ZATM : zone affectée thermo mécaniquement

Cette zone est située de chaque côté de la zone malaxée. Dans cette zone, le matériau est déformé plastiquement et subit une augmentation de température (cycle thermo mécanique). L’élévation de température qui y est produite peut modifier l’état de précipitation du matériau et produire une certaine restauration.

ZAT : zone affectée thermiquement

La zone affectée thermiquement est située en périphérie de la soudure, le matériau subit un échauffement durant le soudage sans toutefois être déformé (cycle thermique). Cet échauffement peut produire une restauration plus ou moins importante dans les matériaux déformés avant le soudage, entraîner une augmentation de la taille des grains et modifier l’état de précipitation. L’apport de chaleur qui y est produit est limité comparativement aux méthodes d’assemblage produisant une fusion du matériau; les modifications qui y sont observées sont généralement moindre que pour ces autres procédés. De plus, la taille de cette zone est généralement réduite par rapport aux procédés de soudage conventionnels par fusion.

# Diapositive 40

Alliages durcissables thermiquement

Pour ces alliages, l’élévation de température obtenue lors du soudage par friction malaxage et le refroidissement qui s’ensuit a pour effet de modifier l’état de précipitation du matériau. Ces modifications produisent un profil de dureté qui prend souvent une allure caractéristique en forme de « w », semblable à celui illustré.

Dans la zone affectée thermiquement, un survieillisement est généralement observé, ce qui entraîne une diminution de la dureté. Dans la zone malaxée, une dissolution des phases durcissantes peut être obtenue. Ce mécanisme est généralement accompagné par la recristallisation du matériau et par l’apparition d’une microstructure généralement plus fine et souvent plus dure. Ces deux mécanismes combinés ont pour effet de produire une dureté finale supérieure à celle observée dans la ZAT qui peut atteindre une valeur presqu’égale à celle du matériau de base. Finalement, la ZATM est caractérisée par une transition entre les états observés dans la zone affectée thermiquement et la zone malaxée. Les limites de la ZATM sont parfois difficiles à identifier clairement. Sur le profil de dureté présenté, uniquement les limites de la ZM sont clairement identifiables.

Pour les alliages durcissables par traitement thermique, le profil de dureté obtenu évolue au cours du vieillissement. Pour les zones ayant subies une mise en solution plus ou moins complète suivi du refroidissement rapide produite par le SFM, un retour partiel vers l’état d’équilibre s’effectue lentement à température ambiante.

## Alliages non durcissables thermiquement

Pour les alliages non durcissables thermiquement dans la condition O (état recuit et recristallisé), l’élévation de température produite lors du soudage dans la zone affectée thermiquement ne modifie habituellement pas les propriétés mécaniques du matériau puisque celui-ci est déjà dans un état recuit. La principale modification observable dans cette zone est une croissance des grains. La zone malaxée est caractérisée par une recristallisation plus ou moins fine. Pour cette zone, une augmentation de la dureté du matériau comparativement à son état initial est possible.

# Diapositive 41

Les principaux défauts rencontrés lors du SFM d’une soudure bout à bout sont ici présentés. Ces défauts peuvent avoir des causes multiples :

* Un outil de forme inappropriée ;
* Un pion de longueur insuffisante ;
* Un mauvais ajustement des vitesses d’avance et de rotation ;
* Une force de forgeage trop élevée ou trop faible ;
* Un mode de fixation ou de serrage insuffisant des pièces ;
* Un positionnement inadéquat de l’outil relativement aux pièces ;
* Etc.

**Sous épaisseur de métal :** produit lorsque l’épaulement est enfoncé trop profondément dans la pièce. Le matériel est éjecté latéralement ce qui crée bavure en périphérie de la soudure.

**Défauts de surface :** toutes ces irrégularités de surface sont une source importante d’initiation de fissure. Ils ont pour effet de réduire la résistance mécanique des soudures et leur durée de vie en fatigue. Ils sont produits par un mauvais ajustement des paramètres de soudage, à l’exception du trou en fin de soudure qui est inhérent au procédé de soudage.

**Alignement d’oxydes :** observés lorsque la couche d’oxyde sur les faces soudées est trop importante ou que le malaxage réalisé par l’outil est insuffisant pour briser et distribuer adéquatement ces oxydes dans la zone soudée. Ces alignements d’oxydes ont pour effet de créer une zone fragilisée dans la soudure et sont parfois difficile à éliminer. Il peut être nécessaire de modifier la forme des outils utilisés.

**Vides internes**: ce type de défaut, surtout présent dans la ZATM, prend parfois la forme d’un trou longitudinal et est ainsi appelé « trou de vers ». Ce type de défaut n’est pas visible sur la surface et pour le détecter, on doit recourir à des techniques d’essais non destructifs où à des essais destructifs (coupe transversale de la soudure).

# Diapositive 42

Les défauts observés dans les soudures en recouvrement sont principalement produits par la déformation de l’interface entre les pièces et par une mauvaise distribution des oxydes superficiels dans la zone soudée. Pour éliminer ces couches d’oxyde quasi-continues, des outils adaptés au soudage en recouvrement doivent être utilisés pour assurer un meilleur transport de la matière selon la direction axiale.

Une remontée de l’interface entre les pièces, de chaque côté de la soudure, peut aussi représenter un défaut important. Cette remontée affaiblie de manière importante l’une des pièces en réduisant son épaisseur à cet endroit. Un telle réduction d’épaisseur de la pièce supérieure est ainsi présentée et caractérisée par sa hauteur « h ».

# Diapositive 43

L’équation ici présentée n’est valide que pour la phase de soudage et n’est pas valide durant la phase de plongée, phase durant laquelle le pion pénètre dans le matériau jusqu’au moment où l’épaulement comprime la face endroit de la soudure. Pour évaluer la puissance mécanique durant la phase de plongée, l’effet de la force axiale de forgeage doit être ajouté et le deuxième terme, associé au déplacement dans le sens de soudage, doit être annulé puisque la vitesse d’avance *v* est alors nulle.

# Diapositive 44

Le rapport vitesse d’avance / vitesse de rotation est souvent utilisé pour l’optimisation des paramètres de soudage durant la phase d’avance. Un exemple d’une telle utilisation est présentée dans une étude de cas, à la diapositive 49 de la présentation.

# Diapositive 45

Lors de la phase de plongée, des contraintes importantes sont imposées sur l’outil et puisque celui-ci est pressé contre un matériau froid, difficilement malléable. Les paramètres de soudage lors de la plongée doivent assurer une entrée relativement lente de l’outil dans la pièce pour minimiser ces contraintes.

# Diapositive 46

L’optimisation des paramètres de soudage pour la phase d’avance s’effectue encore principalement par essais / erreurs. Certains modèles numériques ont été développés pour faciliter une telle optimisation. Toutefois, en raison des grandes déformations et des vitesses de déformation élevées produites dans le matériau, les modèles numériques ont encore de la difficulté à reproduire adéquatement tous les aspects physiques du soudage.

# Diapositive 47

Les méthodes d’inspection usuelles doivent être adaptées au SFM car les défauts présents pour les soudures produites ont des caractéristiques différentes. L’inspection visuelle est souvent combinée à des analyses métallographiques afin de détecter adéquatement les défauts de surface et internes.

# Diapositive 48

Cette page présente les paramètres d’une étude de cas de SFM pour un AA6061-T6 en configuration bout à bout. La résistance ultime de l’alliage utilisé a été obtenue à l’aide d’un essai de traction. Cette résistance est mesurée transversalement à la direction de soudage afin de calculer le coefficient de soudure.

# Diapositive 49

On peut ici voir les différents essais de soudage réalisés pour identifier les conditions optimales de soudage avec la microstructure des soudures obtenues, vue en coupe.

Pour les soudures effectuées avec un rapport k < 0,8, la vitesse de rotation est grande par rapport à la vitesse de rotation. Pour ces soudures, le matériau est parfois surchauffé et les déformations produites par la rotation de l’outil sont trop importantes pour produire une soudure adéquate.

Pour les cas ayant un rapport k > 1,6, la vitesse d’avance est trop grande par rapport à vitesse de rotation. De telles conditions correspondent à des soudures « froides ». L’apport de chaleur est alors insuffisant pour réaliser de bonnes soudures.

# Diapositive 50

Le graphique illustré présente le résultat de quatre essais de traction, effectués pour des soudures sans défaut et produites avec la même combinaison de paramètres de soudage. La valeur moyenne de la contrainte ultime obtenue pour ces quatre essais est de 213 MPa. Pour le matériau utilisé, des essais de traction faits sur le matériau de base ont permis d’établir sa limite ultime à 284 MPa.

# Diapositive 51

Une deuxième étude de cas est ici présentée. Dans ce cas, un joint en recouvrement est produit entre deux matériaux différents : un alliage d’aluminium 5083-H19 et un acier inoxydable 201LN ¼ dur. Le soudage est réalisé en plaçant la pièce d’aluminium à la surface de l’assemblage. Ce choix permet de minimiser l’usure de l’outil de soudage. Une telle usure est typiquement rapide lorsque l’outil de soudage est en contact avec des métaux à haute température de fusion, comme l’acier inoxydable.

L’outil utilisé pour le soudage est fabriqué en WC-25% Co. Son extrémité est convexe et seulement celle-ci est en contact avec l’acier inoxydable.

# Diapositive 52

Le tableau illustré présente les conditions de soudage mise à l’essai pour optimiser la résistance des soudures. Cette résistance est déterminée par un essai de traction, semblable à celui ici réalisé. Dans un tel essai, la soudure est à la fois sollicitée en traction et en flexion. C’est pourquoi la valeur utilisée pour comparer les soudures n’est pas une valeur de contrainte, mais plutôt une valeur de force maximale à la rupture.

# Diapositive 53

On peut ici voir le mode de rupture des échantillons soudés. Pour la plupart des soudures, la rupture se produit dans la pièce en aluminium, dans la zone malaxée.

Une analyse de l’interface entre les pièces par FEG-SEM (microscope électronique à balayage à effet de champ) révèle la présence de composés intermétalliques. Une image de cette interface pour la condition de soudage no. 1 est ici présentée. On peut voir dans le tableau de droite l’analyse de composition prise à différents endroits dans la soudure.

# Diapositive 55

Dans les navires, le SFM est utilisé à différents endroits et pour différentes raisons. La figure présentée illustre quelques applications. Le SFM a été employé pour fabriquer de grandes surfaces planes en aluminium à partir d’extrusions qui sont utilisées dans la fabrication des ponts et des parois latérales des navires. Entre 1996 et 1999, Marine Aluminium en Norvège, a produit 1 700 panneaux de ce genre pour lesquels plus de 100 km de soudure ont été exécutés.

# Diapositive 56

On peut ici voir deux applications concrètes dans lesquelles le SFM est utilisé. Le détail des soudures effectuées n’a cependant pas été dévoilé.

# Diapositive 57

Dans l’industrie ferroviaire, les premières applications du SFM remontent à 2001.

Au Japon, Hitachi a employé le SFM pour produire une enveloppe à paroi double pour des voitures de train. Cette enveloppe est construite à partir d’extrusions en aluminium soudées sur deux faces. Le SFM est actuellement utilisé pour assembler des trains de banlieue et des trains express. Pour ces applications, le principal avantage du SFM est la possibilité de réaliser des joints de grandes dimensions avec peu de distorsion.

On peut voir sur les figures présentées une application canadienne du SFM : la réalisation d’une grande partie de la surface du toit pour le train léger d’Alstom le Citadis Spirit, utilisé à Ottawa. La figure de droite présente le large panneau confectionné pour ce train par SFM et produit en assemblant différents profilés extrudés.

# Diapositive 58

Dans la fabrication automobile, les soudures effectuées pour l’assemblage de différentes pièces suivent généralement un parcours tridimensionnel et sont relativement courtes (moins d’un mètre). Dans un environnement de grande production, les assemblages doivent être robustes aux variations de géométries des pièces. La plupart des assemblages sont ainsi réalisés à l’aide de soudures en recouvrement.

Dans l’industrie automobile, la fabrication de flancs soudés sur mesure (« *tailor welded blank »*) est également largement réalisée. Ce type de joints est produit lorsque des pièces de différentes épaisseurs sont soudées ensemble. Pour ce type d’assemblage, l’inclinaison de l’outil se détermine en fonction des variations d’épaisseurs entre les pièces. Cette inclinaison doit assurer un bon contact entre l’épaulement et le matériau, tout en minimisant l’amincissement de la pièce la plus mince.

La technique de soudage par points par friction malaxage (SPFM) est aussi couramment utilisée dans l’industrie automobile. Le SPFM est similaire au soudage linéaire SFM, à la différence que l’outil ne se déplace pas le long du joint à effectuer. Le soudage est réalisé entre les pièces superposées (assemblage en recouvrement) dans lesquelles plonge l’outil de soudage. Ce procédé comporte ainsi trois phases :

* La phase de plongée ;
* La phase de malaxage ;
* La phase de retrait.

L’assemblage est alors produit par une zone soudée plus ou moins mince, ici illustrée en gris foncé, qui est produite en périphérique du pion.

# Diapositive 59

On peut ici voir deux applications concrètes du SFM : l’une avec un soudage par point, et l’autre, avec un soudage en flanc.

# Diapositive 60

Le SFM ou sa variante, le SPFM (soudage par point par friction malaxage) a été et est encore utilisé dans la fabrication de plusieurs types de voitures. Quelques exemples sont ici donnés.

# Diapositive 61

La première application importante du SFM pour la fabrication d’avions remonte à 2003 et est attribuable à Eclipse Aviation. L’utilisation du SFM pour remplacer le rivetage du fuselage du jet commercial Eclipse 500 a permis de sauver entre 20 et 25 kg sur le poids de l’appareil. Sur cet appareil, 128 m de soudure est réalisé ce qui permet de remplacer environ 7 000 rivets.

# Diapositive 62

Spirit Aero System a également utilisé le SFM pour assembler certaines composantes entrant dans la fabrication du nez du Boeing 747 cargo, ce qui a permis une réduction de poids de 6,3 kg. TWI a pour sa part introduit le SFM dans l’assemblage de panneaux de fuselage pour les avions d’Embraer Legacy 450 et 500.

# Diapositive 63

Bombardier Transport s’est récemment doté d’un équipement de SFM. La première application connue est l’assemblage d’un échangeur de chaleur pour une motoneige. Peu de détails ont cependant été divulgués par l’entreprise sur cette application.

# Diapositive 64

Il existe plusieurs applications du SFM pour la fabrication de structure au monde. Les cas ici présenté sont ceux réalisés au Québec. À noter que seulement l’assemblage des composantes entrant dans la fabrication de la passerelle piétonnière a été réalisé au Québec (au Centre de Soudage par Friction Malaxage de l’UQAC).

# Diapositive 65

Le SFM est maintenant utilisé dans diverses applications. L’une d’entre elle est son utilisation par Apple pour assembler son iMac ultra mince. Pour cette application, Apple utilise plusieurs robots soudeurs. Le SFM a été choisi car il produit peu de déformations et qu’en raison d’un apport de chaleur limité, il permet d’encapsuler des composantes ne pouvant pas résister à des températures élevées.

Une autre application de plus en plus répandue du SFM est son utilisation pour la fabrication de plaque creuse, permettant le passage d’un liquide de refroidissement. Dans ce type d’application, un tunnel ouvert est usiné dans une plaque puis refermé à sa surface en soudant une plaque plane par SFM.