

CONTROLE DE QUALITE EN TEMPS REEL DES PROCESSUS DE SOUDAGE

DÉTECTER LA QUALITÉ DE SOUDURE PENDANT OU IMMÉDIATEMENT APRÈS LE SOUDAGE

L'industrie du soudage est confrontée à la nécessité de mieux contrôler la qualité des produits et structures soudés, afin de garantir la qualité structurelle et la fonctionnalité des produits soudés. La détection rapide, fiable et économique des défauts est une préoccupation majeure. Cependant, les techniques d'inspection traditionnelles sont coûteuses et demandent des délais importants. L'émergence de nouveaux procédés de soudage innovants et l'orientation des développements vers l'assemblage de matériaux dissemblables, voire difficiles à souder complique encore plus le contrôle de la qualité. La solution est une inspection en temps réel.

Koen Faes et Jürgen Feyaerts – Institut Belge de la Soudure (IBS)
Axel Vlaminck et Eli Reekmans – Oqton Belgium



Figure 1: équipement de mesure avec capteur infrarouge



Figure 2: capteurs à ultrasons

AVANTAGES DU CONTRÔLE QUALITÉ EN TEMPS RÉEL

Le contrôle de la qualité du soudage en temps réel réduit le nombre d'essais destructifs et les rebuts. De tels systèmes offrent une flexibilité de production et la capacité de contrôler 100% des soudures, réduisant ainsi le coût de l'énergie, des matériaux et de la main-d'œuvre. Le contrôle en temps réel peut éliminer ou réduire considérablement l'inspection par échantillonnage et augmenter la fiabilité des processus de soudage et des produits finis. Il offre également l'avantage d'une traçabilité complète de la production ou et les enregistrements des données d'inspection et de fabrication. Les données, images ou vidéos peuvent être stockées pour la documentation du système de qualité.

Le contrôle de la qualité en temps réel peut également réduire le délai de détermination des plages de réglage des paramètres et donc les coûts qui y sont associés. De plus, les paramètres du processus dépendent parfois

des variations des propriétés des matériaux de base (par exemple en raison de l'utilisation de différents lots de matériaux). Des mesures pour maintenir la qualité de soudage constante peuvent être prises plus précocement.

Après tout, un processus de production optimal doit également garantir la reproductibilité, qui peut être augmentée par la détection plus rapide des écarts par rapport à la consigne. Si une précision suffisante des techniques de mesure est atteinte, la qualité du soudage peut être garantie de manière simultanément à la production. Le contrôle en temps réel permet de régler les paramètres pendant le processus lui-même. D'autres matériaux ou géométries qui nécessitent un ajustement des paramètres de soudage peuvent être soudés à l'aide de boucles de contrôle et de correction de processus.

TECHNIQUES DE MESURE

Au cours des dernières décennies, de nombreuses nouvelles méthodes de mesure

sont apparues sur le marché qui fournissent des informations importantes sur la qualité des assemblages et des produits soudés. Par exemple, il existe différents types de capteurs pour le contrôle en temps réel du processus de soudage.

Capteurs d'arc

Les capteurs d'arc contrôlent la longueur de l'arc via un système de contrôle automatique de tension / courant lorsque la position de l'électrode par rapport à la pièce change. Par exemple, en soudage TIG, la torche de soudage, équipée d'un servomoteur, peut utiliser le signal d'un capteur d'arc pour ajuster la position de l'électrode de tungstène par rapport à la pièce. Il s'agit de rendre la tension mesurée égale à la tension de consigne.

Capteurs optiques

Il existe de nombreux types de capteurs optiques selon les différents principes et applications (électro-optiques, CCD, capteurs

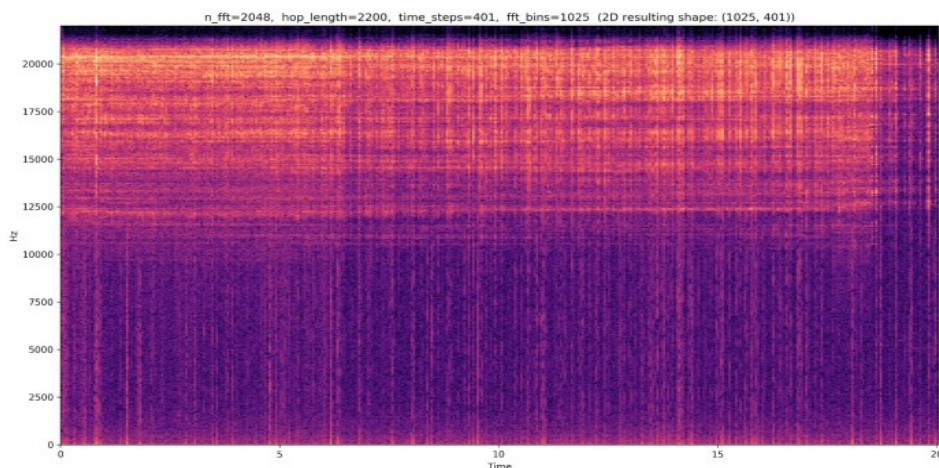


Figure 3: spectrogramme d'un extrait sonore

CMOS, caméra haute vitesse). La lumière détectée par les capteurs optiques peut être utilisée pour mesurer ou estimer les variables du processus de soudage et pour ajuster les paramètres de soudage en temps réel. Des systèmes basés sur la vision sont utilisés, par exemple, pour déterminer la forme du bain de soudure. Les capteurs optiques sont similaires à l'œil humain du soudeur, qui regarde le bain de fusion et ajuste les paramètres tels que le courant ou la vitesse en fonction de ce qu'il voit.

Capteurs infrarouges

Les capteurs infrarouges peuvent détecter le rayonnement infrarouge émis par le matériau (figure 1). C'est pourquoi ces capteurs sont utilisés pour les processus de soudage thermique pour les inspecter et les contrôler. Ils sont similaires aux capteurs optiques qui mesurent l'émission à la surface de la soudure et fournissent des informations sur la vitesse de refroidissement, la largeur du cordon et la pénétration. Ils peuvent également être utilisés pour les systèmes de suivi du cordon.

Capteurs à ultrasons

Des capteurs à ultrasons (figure 2) mesurent l'émission acoustique lors du soudage. Ce sont des ondes sonores à haute fréquence, qui sont produites pendant ou peu de temps après le soudage. Le contrôle des émissions acoustiques est effectué pour toutes les phases caractéristiques du processus de soudage: pendant le processus de soudage lui-même, immédiatement après le soudage et pendant la durée de vie de la soudure.

UTILISATION DES MÉTHODES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Ces capteurs génèrent de grandes quantités de données qui doivent être traitées rapidement et efficacement. Des solutions logicielles intelligentes peuvent analyser les données pour identifier les tendances et les modèles, qui peuvent ensuite être utilisées pour détecter les imperfections de soudage et affiner ou rendre les processus de soudage plus efficaces. De cette façon, les installations s'adaptent en permanence aux nouvelles conditions et sont optimisées sans intervention de l'opérateur. De plus, les systèmes d'explo-

tation Internet des objets (IoT) basés sur le cloud peuvent être utilisés pour connecter des produits, des installations, des systèmes et des machines et pour rendre les énormes quantités de données utiles pour l'optimisation, la simulation et la prise de décision. L'intelligence artificielle offre un énorme potentiel pour analyser les données de mesure et surveiller la qualité des soudures et des produits soudés. Il rend la production plus efficace, flexible, fiable et moins chère. Les concepts d'Industrie 4.0 décrits ci-dessus offrent de grandes opportunités aux entreprises: réduction des coûts, plus grande flexibilité, production de masse adaptée au client, nouveaux modèles économiques ...

MODÈLES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Ces dernières années, l'intelligence artificielle a révolutionné les processus dans diverses industries où l'automatisation n'était auparavant pas considérée comme possible. Ces processus étaient généralement considérés comme simples pour un humain, mais impossibles pour un ordinateur. Un exemple de cela est la détection des objets sur une photo: aujourd'hui, un ordinateur peut reconnaître des milliers d'objets différents, comme le chien sur votre photo de vacances.

Axé sur les données

L'automatisation de ces processus est rendue possible par des systèmes qui apprennent à partir d'exemples. Un ordinateur apprend à reconnaître des objets dans une photo en comparant de nombreuses photos avec des objets connus par le système. En interne, un modèle identifiera les modèles, puis les liera à certains objets.

Nous appelons les modèles d'apprentissage à partir d'exemples un système basé sur les données. Les gens travaillaient différemment: un expert devait définir le motif de chaque objet à plusieurs reprises. Il va sans dire que ce processus était très exigeant en main-d'œuvre et, dans de nombreux cas, il a donné de moins bons résultats que les nouveaux schémas d'apprentissage basés sur les données. Cette méthode basée sur les données a été utilisée pour déterminer la qualité de la soudure en fonction du son d'une soudure et pour reconnaître et classer les imperfections qui se produisent.

Spectrogramme

Pour détecter des modèles dans les échantillons sonores, le son est converti en spectrogramme (figure 3). Ici, nous apprenons à reconnaître les modèles qui déterminent la qualité de la soudure, le type d'arc et éventuellement l'imperfection de la soudure. Un spectrogramme est une représentation du son où le temps est tracé sur l'axe horizontal et la fréquence sur l'axe vertical (voir figure 3). La quantité d'énergie à un moment donné dans une bande de fréquence donnée est représentée par la décoloration dans le diagramme. En raison du caractère bidimensionnel d'un spectrogramme, il peut être représenté de la même manière qu'une photo traditionnelle, avec un tableau de pixels. Cela permet d'utiliser certains modèles d'intelligence artificielle développés pour l'analyse photo pour analyser le son enregistré lors du soudage. Les modèles reconnaissent de façon similaire les motifs dans la matrice bidimensionnelle.

EXPÉRIENCES DE SOUDURE

Dans le cadre du projet SoundWeld (voir encadré), des expériences ont été menées au cours desquelles le soudage robotisé MIG / MAG a été contrôlé en fonction des émissions acoustiques. Différents types de capteurs ont été utilisés pour cela; à la fois des capteurs piézoélectriques et un microphone. Le soudage a été effectué avec les différents

PROJET SOUNDWELD

Dans le cadre du projet «SoundWeld», nous avons investi dans un système de mesure des émissions acoustiques, qui peut être utilisé comme technique non destructive pour évaluer la qualité du soudage pendant le soudage. Dans ce projet, cette nouvelle technique de mesure en ligne non destructif est évaluée pour différents procédés de soudage. Cette méthode d'essai a été développée sur la base du fait que chaque matériau émet des vibrations propres naturelles et que les machines et les processus émettent des sons. Pendant la réalisation d'un assemblage soudé, il se crée une émission acoustique, consécutive à la formation de la soudure, à l'apparition de défauts ou d'influences perturbatrices. La forme dans laquelle se produit l'émission acoustique dépend du processus de soudage, du matériau, de la température et de la géométrie de la pièce. La forme sous laquelle l'émission acoustique se produit dépend du processus de soudage, du matériau, de la température et de la géométrie de la pièce. L'objectif fondamental de ce contrôle est d'obtenir des informations utiles sur la qualité des assemblages et l'adéquation des paramètres de soudage utilisés lors du soudage. En utilisant les appareils corrects, et le logiciel d'analyse adéquats, nous pouvons différencier les différentes sources d'émission acoustique et détecter les éventuels défauts de soudage.

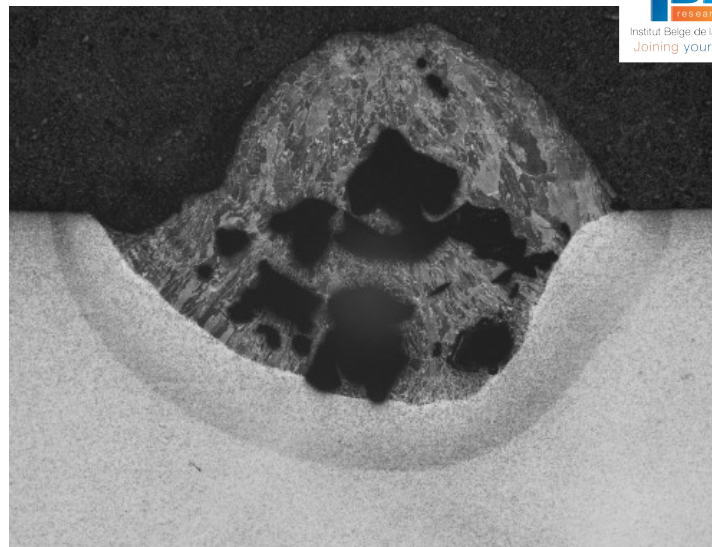
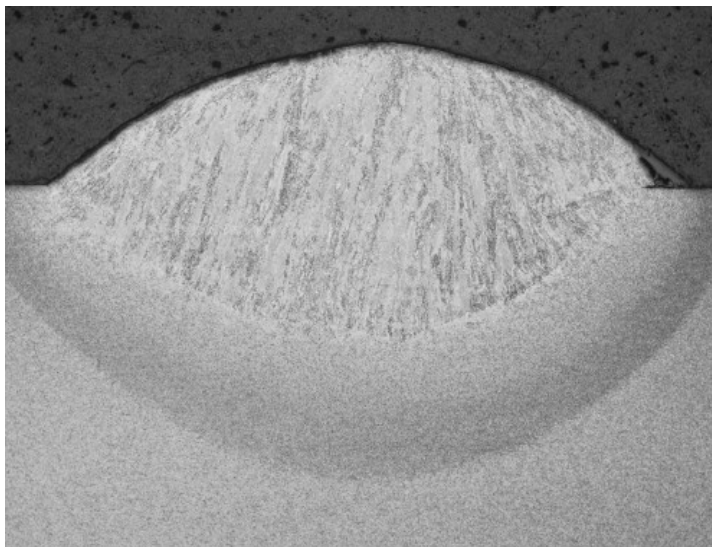


Figure 4: coupe transversale d'une soudure (condition de référence; soudage mode pulvérisation axiale) - soudure avec des imperfections (soudage en mode pulvérisation axiale effectué avec un « stick out » trop long)

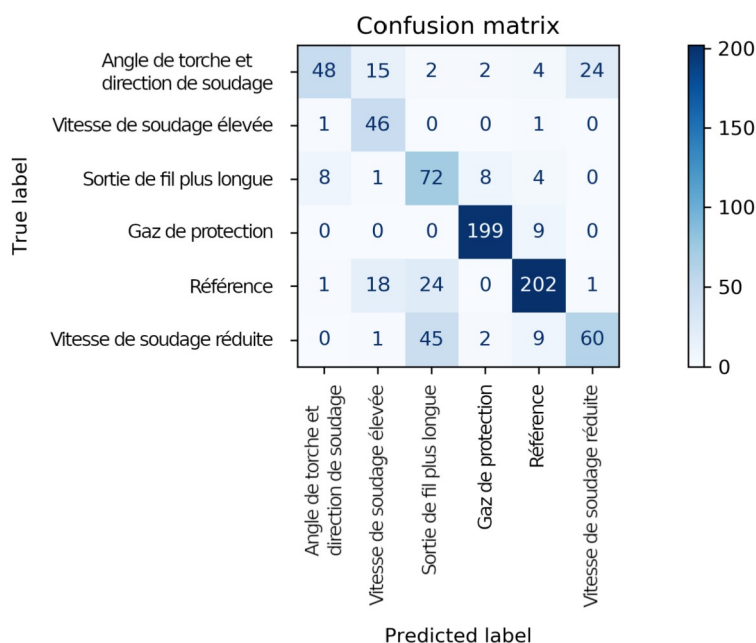
modes de transfert du procédé MIG / MAG; soudage en court-circuit, globulaire, pulvérisation axiale et pulsé. Les cordons de soudure ont été réalisés sur une plaque (soudure « beads on plate »). Les soudures ont été réalisées avec des paramètres optimaux, qui ont servi de référence. Des soudures ont également été effectuées en faisant varier un paramètre; la vitesse de soudage, le « stick out », l'angle de torche et le sens de soudage (en tirant ou en poussant). Il s'agit d'introduire des imperfections de soudage. Des essais de soudage ont également été effectués sans gaz de protection. Une vitesse de déplacement inférieure conduit à une soudure plus large, une plus grande convexité et une pénétration plus importante, pour tous les modes de transfert d'arc,. A une vitesse plus élevée, l'effet inverse est observé, par conséquent plus de porosités, notamment en soudage en mode pulvérisation axiale et en soudage pulsé. À mesure que le « stick out » augmente, la soudure devient légèrement plus étroite et la convexité augmente légèrement. En particulier dans le soudage en mode pulvérisation axiale, des porosités sont introduites via ce réglage, et on observe aussi des caniveaux (voir figure 4).

RÉSULTATS

Des modèles d'auto-apprentissage, basés sur l'intelligence artificielle, ont été utilisés pour reconnaître et prévoir les conditions de processus utilisées (mode de transfert d'arc et paramètres de soudage, pouvant ou non conduire à des imperfections de soudage). Les conditions de soudage prévues, basées sur les mesures d'émission acoustique, ont été comparées aux conditions utilisées dans la pratique. Les modèles utilisés lors des tests préliminaires ont atteint une précision de 85%. Le tableau ci-dessous montre la précision des prédictions des conditions de soudage utilisées. L'axe X montre les prévisions, l'axe Y montre les conditions réellement utilisées pendant le soudage. La diagonale du haut à gauche au bas à droite identifie les cas où la prédiction correspond à la réalité; les autres zones correspondent aux cas incorrectement prédits. Sur base d'analyse métallographique de tous les assemblages soudés, un certain nombre de conditions de soudage utilisés engendrent des défauts de soudage. Les imperfections de soudage résultant de l'utilisation de ces conditions de soudage peuvent donc être détectées par les modèles.

ment validé dans un environnement industriel, où le bruit ambiant sera un facteur d'interférence important. Dans une étape ultérieure, il sera également étudié dans quelle mesure les écarts dans le spectre acoustique peuvent être liés au type d'imperfection de soudage, défini conformément à EN ISO 6520-1. En d'autres termes, le spectre acoustique perçu peut-il indiquer le type d'imperfection de soudure présente dans la soudure et sur l'endroit où se produit cette imperfection?

On étudiera aussi si le spectre acoustique en question peut être utilisé pour déterminer si une imperfection de soudage est acceptable ou non conformément à la norme EN ISO 5817 (niveau de qualité C). De cette façon, il serait non seulement possible de détecter les imperfections de soudage en temps réel, mais aussi de les évaluer immédiatement en fonction du spectre acoustique transmis. Si l'imperfection de soudage n'est pas acceptable, dans les installations continues (par exemple les installations de robots), il est possible de faire réagir le système de manière adaptative sur la base de ces données en ajustant les paramètres de soudage. Enfin, on étudie toujours si la combinaison de différents capteurs peut fournir une meilleure analyse. L'architecture des modèles d'Intelligence Artificielle utilisés permet de combiner facilement des signaux de différents capteurs avec des modélisations différentes.



Prochaines étapes

Cette expérience a été réalisée dans un environnement de laboratoire avec une quantité minimale de données. Plus de données sont nécessaires pour améliorer la précision de ce type de modèle axé sur les données. Mais l'expérience indique déjà qu'il est possible d'extraire des informations du son produit lors du soudage. Dans une prochaine étape, davantage de données seront collectées et le fonctionnement du modèle sera égale-

CONCLUSION

Une méthode prometteuse pour l'assurance qualité est l'émission acoustique. Cette méthode est une technique de contrôle non destructif, qui peut être appliquée au cours du processus de production. L'Institut Belge de la Soudure mène un projet de recherche pour cartographier les possibilités de cette technique et la tester en pratique. L'objectif est d'évaluer cette technique pour différents procédés de soudage, dont le soudage à l'arc robotisé. Des tests de soudage ont été effectués avec différentes conditions de processus pour produire des soudures avec différents niveaux de qualité. Des modèles basés sur les données sont utilisés pour prédire la qualité de la soudure et toute imperfection du son enregistré pendant le soudage. Les modèles utilisés lors des tests préliminaires ont atteint une précision de 85%. Cette recherche se poursuit pour améliorer les prévisions. □