

ASSEMBLAGES HYBRIDES POUR LES STRUCTURES AERONAUTIQUES LEGERES

PROJET DAHLIAS: SOUDAGE PAR POINTS PAR FRICTION EN COMBINAISON AVEC UN JOINT ADHESIF

L'objectif principal du projet DAHLIAS est l'optimisation des assemblages hybrides (soudage par points par friction en combinaison avec un joint adhésif) pour l'application dans les structures aéronautiques. Le soudage par points par friction est une technique d'assemblage à l'état solide (pas de fusion des matériaux), convenant surtout pour l'assemblage d'alliages légers dans des combinaisons de matériaux (dis)semblables. Le procédé a déjà été appliqué avec succès pour des alliages difficiles et impossibles à souder et est considéré comme un candidat potentiel pour le remplacement d'assemblages mécaniques. Le but du projet est le développement du procédé de soudage par points par friction en combinaison avec un joint adhésif. Dans cette optique, un nouveau type de joint adhésif a été conçu, y compris une méthode de pré-traitement de surface.

dr. ir. Koen Faes, EWE (Institut belge de la Soudure)

EN COLLABORATION AVEC Thijs Peeters (Netalux), Patrick Van Ryment et Arnout Dejans (Maakprocessen en -systemen, KU Leuven Campus De Nayer, Sint-Katelijne-Waver)

CONTEXTE

Le rivetage est à l'échelle mondiale la technologie la plus appliquée pour l'assemblage de structures aéronautiques. Les techniques de fixation mécaniques comme le rivetage et le rivetage auto-poinçonneur augmentent le poids de la construction. Ces procédés impliquent, en outre, des coûts opérationnels élevés en raison de l'infrastructure nécessaire et de l'utilisation de consommables coûteux. Dans le cadre du projet DAHLIAS, une technologie d'assemblage à l'état solide (soudage par points par friction) sera appliquée pour les alliages d'aluminium à haute résistance, en vue d'optimiser la production de structures aéronautiques complexes comme les sections de coque et les parois de séparation. Les procédés de soudage par friction offrent des avantages par rapport aux assemblages rivetés traditionnels. Ils génèrent des assemblages exempts de défauts aux propriétés métallurgiques supérieures. L'apport de chaleur et les tensions résiduelles après le soudage sont, de plus, relativement faibles. Dans le cadre de ce projet, un joint avec une fonction adhésive sera également développé, ce qui ajoute une nouvelle fonction aux assemblages conventionnels. La combinaison du procédé de soudage par points par friction et de la technologie de joint adhésif et son développement constituent l'un des principaux défis scientifiques du projet.

SOUDAGE PAR POINTS PAR FRICTION

Lors du soudage par points par friction, on utilise un outil résistant à l'usure composé de deux éléments rotatifs, un pion et un manchon, ainsi qu'une bague de clamage stationnaire pour assembler des matériaux par recouvrement (voir figure 1). Les assemblages sont produits à une température inférieure au point de fusion des matériaux à souder. Le soudage par points par friction ne laisse pas de cratère final après le soudage. Le procédé évite la plupart des restrictions observées dans le cas des techniques de soudage par points conventionnelles appliquées aux alliages d'aluminium. Il permet également de souder à nouveau des soudures défectueuses dans la production, simplement en répétant le soudage. Le soudage par points par friction a dès lors le potentiel pour remplacer les techniques d'assemblage mécaniques, en particulier pour les applications structurelles en aluminium (voir figure 2). La technologie a été développée et brevetée par le HZG (Helmholtz-Zentrum Geesthacht) à Hambourg. Les principaux avantages du procédé pour les éléments d'avions sont:

- Implémentation d'une technologie respectueuse de l'environnement, facile à utiliser et économe en énergie dans la construction aéronautique;
- Réduction des coûts d'assemblage (tooling) et

du nombre d'opérations et d'usinages dans les lignes d'assemblage, en évitant le perçage de trous;

- Pas de méthodes de montage conventionnelles impliquant de démonter les éléments après le perçage pour les ébavurer;
- Réduction du temps de montage et amélioration de la qualité grâce à l'automatisation des activités dans le montage.

PROJET DAHLIAS

Les objectifs globaux du projet DAHLIAS sont l'acquisition de connaissance pour le développement d'une nouvelle technologie de production (soudage par points par friction) en combinaison avec un nouveau joint adhésif (assemblage hybride) et les défis respectifs lors de l'application de cette technologie pour les structures d'avions, comme le contrôle de la qualité, la surveillance du processus et l'influence des imperfections et de leurs tolérances. Ces objectifs contribuent aux défis identifiés dans CleanSky2 pour l'amélioration des propriétés mécaniques et de la résistance à la corrosion des assemblages, et l'industrialisation de ces technologies. Afin d'atteindre les objectifs posés dans le projet DAHLIAS, un programme de travail a été mis sur pied, constitué de six modules de travail. La suite de cet article s'attarde sur les résultats obtenus jusqu'ici.

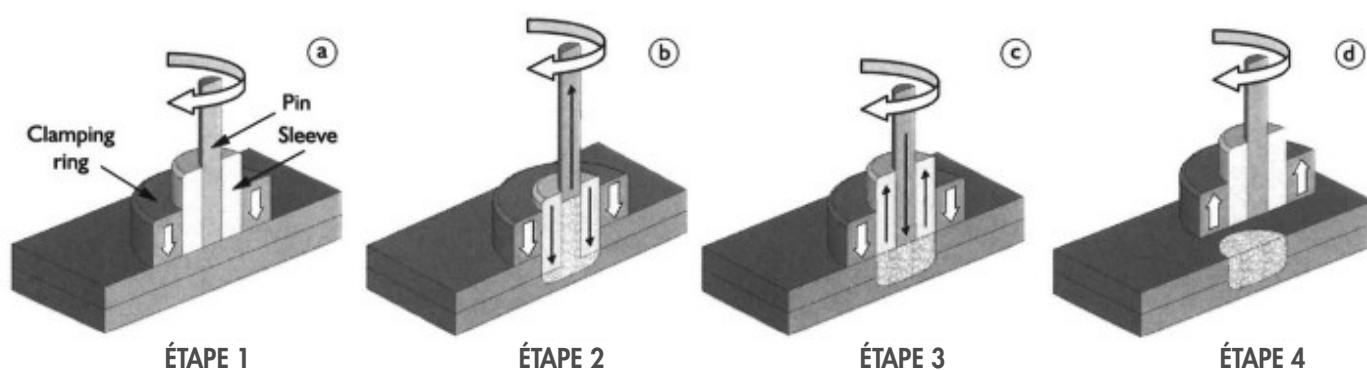


Figure 1: Le procédé de soudage par points par friction



Figure 2: Machine de soudage par points par friction à l'Institut belge de la Soudure (I.B.S.)

Module de travail 1: Examen des assemblages soudés par points par friction sans joint adhésif

Dans le cadre du module de travail 1 (work package ou WP1), le développement du procédé de soudage par points par friction était axé sur le soudage sans joint adhésif des alliages sélectionnés AA2024-T3 et AA7075-T6 dans des configurations semblables et dissemblables.

Le travail prévu consistait en quatre tâches, plus précisément la conception et la production d'échantillons pour le programme de test, le développement de procédé pour les assemblages semblables (AA2024 - AA2024 et AA7075 - AA7075) et dissemblables (AA7075 - AA2024), suivis de l'évaluation de la qualité des assemblages (métallographie, analyse du vieillissement naturel après le soudage, essais quasi statiques et de fatigue et tests de corrosion).

- Pour les **assemblages entre matériaux semblables** d'AA2024, la résistance au cisaillement maximale (3,2 kN) a été obtenue pour une vitesse de rotation de 1.250 tr/min, une profondeur de pénétration de 0,8 mm et une vitesse de pénétration de 0,7 mm/s. La soudure est constituée d'un noyau de soudure, d'une zone affectée thermo-mécaniquement et d'une zone affectée thermiquement, sur la base de l'analyse micro-structurale et des tests de micro-dureté (voir figure 3).
- Pour l'**assemblage dissemblable** entre AA2024 et AA7075, la résistance au cisaillement maximale (3,2 kN) a été obtenue pour une vitesse de rotation de 1.500 tr/min, une profondeur de pénétration de 0,7 mm et une vitesse de pénétration de 1 mm/s.

Les résultats du WP1 ont généré une vaste base de données établissant une corrélation entre les paramètres du procédé et les propriétés de soudage et la présence de défauts dans les alliages examinés. Ces informations constituent une référence de qualité qui soutiendra la poursuite du développement de cette technologie pour l'industrie aéronautique et pour d'autres secteurs industriels, notamment le secteur du transport.

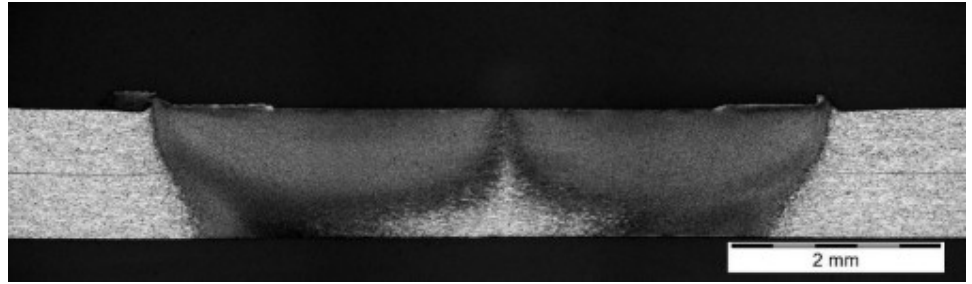


Figure 3: Exemple d'une soudure d'AA7075-T6, sans joint adhésif (décapée)



Figure 4: Exemple d'une soudure d'AA7075-T6, avec joint adhésif (décapée)

Module de travail 2: Développement d'un joint adhésif pour le soudage par points par friction

Les assemblages à recouvrement dans les structures aéronautiques exigent l'utilisation d'un joint d'étanchéité pour la protection contre la corrosion. L'utilisation d'un joint d'étanchéité avec en plus une fonction adhésive renforce encore la qualité des assemblages, non seulement pour la protection contre la corrosion mais également pour le comportement mécanique général de la structure.

Ce module de travail a été bouclé avec succès sur tous les plans. Le produit adhésif EP-80-19 C-4 développé dans le cadre du projet DAHLIAS est un nouveau produit au sein de la ligne de produits Naftoseal de Chemetall, spécifiquement pour l'utilisation en combinaison avec des procédés d'assemblage dans les constructions aéronautiques. Jusqu'ici, un tel produit n'était pas disponible sur le marché. Le produit est basé sur le concept de la création d'une adhérence mécanique par une rugosité affinée, par la combinaison de solutions de décapage alcalines et acides et avec l'utilisation d'une technologie de nettoyage par micro-émulsion.

Le premier lot du joint a été testé et les résultats ont indiqué que la valeur de viscosité était trop basse pour la procédure d'assemblage. De nouvelles expériences avec d'autres joints de viscosités différentes ont contribué à définir la plage de viscosité idéale. Une nouvelle formulation du joint avec fonction de colle à viscosité plus élevée est actuellement produite. Une technologie de préparation de surface a également été développée pour les assemblages soudés par points par friction.

Module de travail 3: Optimisation des paramètres du procédé pour le soudage d'assemblages semblables (AA2024 et AA7075) avec joint adhésif

Les paramètres du procédé développés dans le module de travail 1 ont été adaptés et optimisés pour les assemblages avec joint adhésif dans le module de travail 3 (WP3). Celui-ci englobait

trois tâches:

- Développement de connaissance de base sur le comportement du joint adhésif et la formation possible de défauts dans la soudure, et définition d'une procédure pour prévenir ou minimiser les défauts;
- Optimisation des paramètres de soudage pour l'assemblage d'alliages AA2024 et AA7075 semblables avec joint adhésif, en vue d'obtenir des propriétés mécaniques optimales (voir figure 4);
- Etude de l'effet du joint adhésif sur la qualité des soudures et identification de méthodes de test adéquates.

Les principaux résultats peuvent être résumés comme suit: pour le soudage d'AA2024, une résistance au cisaillement maximale de 4,6 kN peut être obtenue en appliquant une procédure spéciale pour refouler le joint adhésif hors de la zone de soudage, suivie d'un programme de soudage standard en combinaison avec du Naftoseal® soit EP-80-19 C-4 (faible viscosité), soit MC-238 B4 (viscosité élevée). La résistance est donc 50% meilleure que lors du soudage sans joint adhésif. L'analyse de la surface de cassure indique toutefois qu'il est probable que le Naftoseal® MC-238 B4 avec une viscosité élevée ait une meilleure fonction d'étanchéité.

L'application du soudage par points par friction en combinaison avec un joint adhésif est un développement relativement nouveau. Seules quatre publications sont actuellement disponibles sur ce sujet dans la littérature. Quatre procédures ont été examinées pour produire des assemblages d'échantillons traités avec une combinaison de solutions de décapage alcalins et acides et nettoyés avec une technologie à micro-émulsion, avec ensuite l'application du produit d'étanchéité. Comme le WP1, le WP3 génère une vaste base de données, mettant les paramètres du procédé en corrélation avec les propriétés de soudage et la présence de défauts pour les alliages étudiés. Une telle base de données n'est pas disponible dans la littérature ou chez les fabricants de machines, et est – avec les informations générées dans le cadre du WP1 – essentielle pour rendre le procédé utilisable.

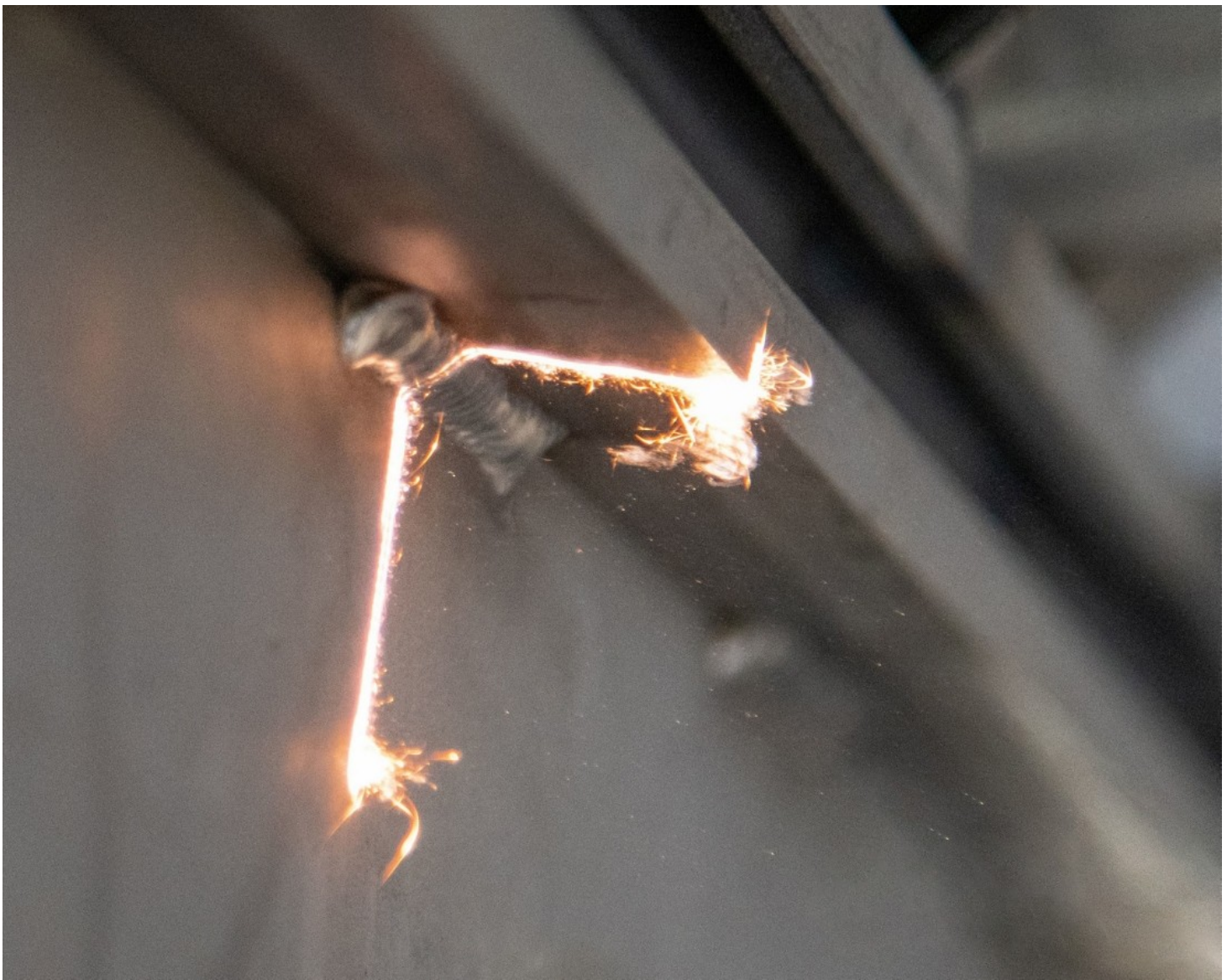


Figure 5: Nettoyage au laser de soudures (Source: Netalux)

Module de travail 4: Tests comparatifs d'assemblages soudés par points par friction et d'assemblages conventionnels

Les assemblages hybrides développés dans ce projet ont été comparés avec des technologies d'assemblage conventionnelles afin de démontrer leur potentiel. Le principal objectif du module de travail 4 (WP4) consiste à établir une référence afin de positionner la performance des assemblages soudés par points par friction par rapport aux assemblages réalisés par soudage par points par résistance.

Soudage par points par résistance d'alliages d'aluminium

Les propriétés de surface des alliages d'aluminium ont une forte influence sur le soudage par points par résistance, sur la qualité de soudage et sur la dégradation de l'électrode. Les propriétés de surface les plus influentes sont la présence d'une couche d'oxyde, la rugosité de la surface et la présence de substances chimiques. En raison de la grande affinité avec l'oxygène, un film d'oxyde dur, non conducteur et adhésif (Al_2O_3) se forme sur la surface d'alliages d'aluminium. Bien que cette couche d'oxyde offre une protection contre la corrosion, elle génère aussi une forte résistance de contact au niveau de l'électrode, ce qui entraîne une grave dégradation de l'électrode et altère la qualité du soudage. La forte résistance de

contact résultant de la présence de la couche d'oxyde et la nécessité d'utiliser des courants de soudage élevés lors du soudage par points donnent lieu à une usure rapide de l'électrode et à une qualité de soudage imprévisible. Pour obtenir une longévité acceptable de l'électrode, il est important que la résistance de contact entre l'électrode et la surface de la tôle soit aussi réduite que possible et reste à un niveau constant. La résistance de contact dépend de l'épaisseur et de la composition de la couche d'oxyde présente sur les tôles en aluminium. En nettoyant la surface de la tôle, la couche d'oxyde est éliminée. La résistance de contact est donc faible et peut être maintenue à un niveau constant. Un nettoyage complet de la couche d'oxyde se traduit généralement par une meilleure qualité de soudage, une plus grande plage de réglage du procédé et une moindre tendance à coller de l'électrode. Le nettoyage peut se faire mécaniquement avec du papier abrasif ou chimiquement avec par ex. une solution de $NaOH$. Dans ce projet, on a utilisé une nouvelle technique, à savoir le nettoyage au laser pour éliminer les couches d'oxyde.

Technologie du nettoyage au laser

Avant, le nettoyage au laser était utilisé comme technique pour la conservation d'œuvres d'art (en pierre).

Ce n'est toutefois que depuis le début des années 2000 qu'il est utilisé dans un contexte

industriel. Aujourd'hui, l'attention pour cette technologie respectueuse de l'homme et de l'environnement croît rapidement. Les entreprises dans les secteurs les plus divers sont, en effet, en quête de techniques de nettoyage durables. Or, la technologie ne produit pas de déchets secondaires. De la grenaille ou des produits chimiques nocifs ne sont pas ajoutés, et la pollution est aspirée directement.

Lors du nettoyage au laser, on utilise la lumière émise par une source laser pulsée. Une machine de nettoyage au laser consiste en une unité reliée à un appareil manuel qui abrite la source laser, produisant des impulsions lumineuses de seulement quelques nanosecondes. Via une fibre, ces impulsions lumineuses sont transportées vers l'appareil manuel, où la lumière est concentrée et envoyée vers la surface. La lumière laser pénètre à travers la contamination, atteint la surface à nettoyer et est réfléchi par cette surface. La saleté à éliminer absorbe alors l'énergie de la lumière. Le processus survenant ensuite s'appelle *ablation laser*, un nom collectif pour les procédés de surface comme l'évaporation et la pulvérisation. Cela génère la formation d'une fine couche de gaz entre le substrat et le contaminant, qui se détache ainsi.

Avantages du nettoyage au laser

Le nettoyage au laser comporte plusieurs avantages par rapport aux techniques de nettoyage traditionnelles.



Figure 6: Section d'un échantillon soudé – plaquettes non traitées (EN AW-7075-T6)



Figure 7: Section d'un échantillon soudé – plaquettes nettoyées au laser (EN AW-7075-T6)

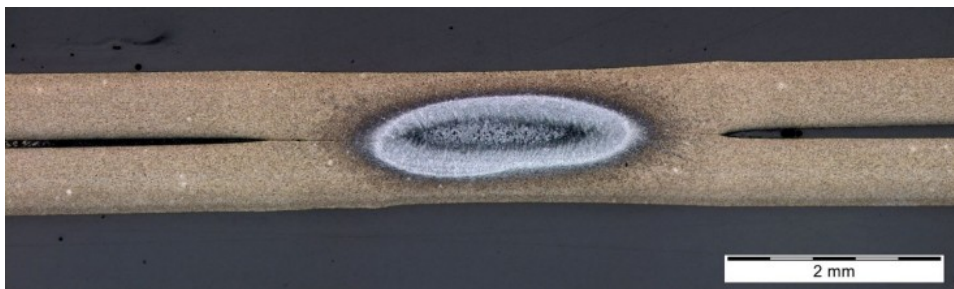


Figure 8: Section d'un échantillon soudé - plaquettes nettoyées au laser (EN AW-2024-T3)

Comme nous l'avons déjà dit, des déchets supplémentaires ne sont pas produits comme par ex. lors du grenailage et des produits chimiques toxiques ne sont pas utilisés.

Le nettoyage repose purement sur la lumière, ce qui en fait une technologie respectueuse de l'homme et de l'environnement. Des déchets secondaires ou des mouvements d'air ne sont donc pas créés.

L'extraction des substances libérées peut être rapide et simple. Il ne faut, de ce fait, pas construire de confinement, ce qui représente un important gain de temps et d'argent vu que les temps de préparation et de nettoyage sont limités au minimum.

Moyennant les bons réglages, le substrat n'est en outre pas endommagé. Des substrats coûteux peuvent donc être nettoyés sans souci.

Applications du nettoyage au laser

Le nettoyage au laser a plusieurs applications et peut être utilisé dans différents secteurs. Il permet

notamment de nettoyer des cuves, des pales de turbine et des gabarits. Le substrat est généralement composé de métaux ou d'alliages, vu la bonne réflexion de ces matériaux. La saleté éliminée peut aller de revêtements et de peinture à des oxydes de soudage, et même des substances toxiques comme le chrome VI, le plomb et l'amiant en passant par des résidus de produit, de l'huile et de la graisse. Afin d'étudier l'influence du nettoyage au laser sur le résultat de soudage, des essais de soudage étaient exécutés via le soudage par points par résistance avec des échantillons nettoyés et non traités. Dans les soudures exécutées avec des échantillons nettoyés, on remarque nettement moins de fissures thermiques que dans le cas d'échantillons non nettoyés, ce qui peut potentiellement être imputé au nettoyage au laser (voir figures 6 et 7). La résistance des alliages était aussi meilleure lorsque le nettoyage au laser était appliqué (voir tableau 1).

Module de travail 5: Développement de spécifications et d'exigences pour l'inspection d'assemblages soudés par points par friction

Les aspects liés au contrôle de la qualité pour cette nouvelle technologie sont traités dans le module de travail 5 (Wp5). Les tâches prévues consistaient au départ en le développement de connaissance sur les défauts et les imperfections de soudage lors du soudage par points par friction en combinaison avec un joint adhésif. Une fois une vue d'ensemble des imperfections possibles établie, l'étape suivante était le développement d'un test non destructif pour l'inspection de la qualité. Ici, des méthodes de test non destructif existantes étaient évaluées pour la détection des défauts observés. Une méthode pour le contrôle de la qualité pendant le soudage par points par friction a enfin été développée, avec l'accent sur une stratégie en ligne pour garantir la qualité des assemblages produits.

Module de travail 6: Développement de pièces de démonstration

Au cours de la dernière phase de ce projet, des pièces de démonstration seront produites afin d'évaluer les possibilités de la technologie en question pour les structures aéronautiques. Le projet sera finalisé en appliquant cette nouvelle technologie de production sur deux démonstrateurs: une structure plate constituée d'une plaque de base dans l'alliage AA2024-T3 avec des raidisseurs (*stringers*) et des profilés et une partie de coque typique constituée d'assemblages entre les plaques et les raidisseurs et d'assemblages bout à bout (module de travail 6: conception, fabrication et test des démonstrateurs et module de travail 7: conception, fabrication et test des démonstrateurs avec joint adhésif).

CONCLUSION

Le projet européen DAHLIAS ; *Développement et application d'assemblage hybride dans les structures aéronautiques légères* est axé sur la validation d'une technologie d'assemblage hybride ultra moderne, à savoir le soudage par points par friction en combinaison avec un joint adhésif. La technique développée sera appliquée pour la production de structures légères pour le secteur aéronautique. Ce projet développera également une stratégie de monitoring en ligne sur la base de l'émission acoustique en guise de contrôle de qualité. La connaissance générée constituera une mine d'information permettant de cartographier l'effet des paramètres du procédé sur les propriétés des assemblages et sur la formation de défauts. Une telle base de données pourra être couplée à des systèmes de surveillance de processus en ligne pour le contrôle de qualité. □

RESULTATS DES ESSAIS DE TRACTION

| EN AW-7075-T6 | | EN AW-2024-T3 | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Echantillons non traités | Echant. nettoyés au laser | Echantillons non traités | Echant. nettoyés au laser |
| 1,57 | 1,75 | 1,37 | 2,0 |

Tableau 1: Résultats des essais de traction exécutés sur des échantillons soudés, avec et sans nettoyage au laser

Le consortium est composé du Helmholtz-Zentrum Geesthacht (DE), de l'Institut belge de la Soudure, de Chemetall (DE), de l'Institut de Soudure (FR) et de TRAC Industries (FR). Le projet est soutenu par le programme CleanSky2 de la Commission européenne (contrat N° 821081).