



HAL
open science

Fabrication additive de points de fixation multi-matériaux

Amela Kusuran, David Mercs, Geoffrey Darut, Ludovic Vitu, Maire-Pierre Planche

► **To cite this version:**

Amela Kusuran, David Mercs, Geoffrey Darut, Ludovic Vitu, Maire-Pierre Planche. Fabrication additive de points de fixation multi-matériaux. 25ème Congrès Français de Mécanique, 2022, Nantes, France. ⟨hal-04153292⟩

HAL Id: hal-04153292

<https://hal.science/hal-04153292v1>

Submitted on 6 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Fabrication additive de points de fixation multi-matériaux

**Amela KUSURAN^{a,b}, David MERCS^b, Geoffrey DARUT^a, Ludovic VITU^a,
Maire-Pierre PLANCHE^a**

a. ICB-PMDDM, UMR 6303, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, 90010 Belfort, France
amela.kusuran@utbm.fr

b. LISI Automotive, 2 rue Juvénal Viellard, 90600 Grandvillars, France

Résumé :

La fabrication additive par projection à froid (Cold Spray) couplée à la texturation laser (création de motifs micro-géométriques à la surface d'un matériau) permet de créer un point de fixation entre deux matériaux disjoints, l'acier et l'alliage d'aluminium par exemple, dans le but d'obtenir un assemblage multi-matériaux robuste et résistant. Les dépôts obtenus par Cold Spray possèdent des propriétés métallurgiques élevées du fait de la forte déformation des particules lorsqu'elles impactent le substrat. Cela induit une porosité et une rugosité faibles, une dureté élevée mais une rupture fragile. Les forces de rupture en traction uniaxiale sont comprises entre 20 et 40 MPa en moyenne, la rupture se faisant systématiquement dans le cordon d'assemblage. Dans le cas d'une rupture en cisaillement, les valeurs sont comprises entre 25 à 80 MPa en moyenne, la rupture se faisant au niveau des pieds d'ancrage à la surface du matériau.

Abstract :

Cold Spray additive manufacturing combined with laser texturing (creation of micro-geometric patterns on the surface of a material) allows the creation of a bonding point between two disjointed materials, steel and aluminum alloy for example, in order to obtain a strong and resistant multi-material assembly. Cold Spray deposits have high metallurgical properties due to the strong deformation of the particles when they impact the substrate. This results in low porosity and roughness, high hardness but brittle failure. The uniaxial tensile failure forces are between 20 and 40 MPa on average, the failure being systematically done in the assembly bead. In the case of a shear failure, the values are between 25 and 80 MPa on average, with the failure taking place at the level of the anchoring feet on the surface of the material.

Mots clefs : Cold Spray ; Assemblage hybride ; Multi-matériaux ; Texturation laser

1 Introduction

Ces dernières décennies, le secteur automobile a été contraint de s'impliquer très largement à la réduction des émissions de CO_2 , notamment sous la pression de nombreuses restrictions européennes et internationales [1]. L'électrification massive des véhicules ou la conservation d'une motorisation thermique sur des véhicules allégés permettraient de faire décroître considérablement ces gaz à effet de serre. Cet allègement est possible grâce à l'utilisation d'assemblages multi-matériaux. Les matériaux possédant des densités faibles mais de bonnes résistances mécaniques sont à privilégier comme l'alliage d'aluminium par exemple afin de remplacer en partie l'acier.

La majorité des assemblages entre acier et aluminium sont réalisés par des procédés mécaniques : vissage, rivetage ou clinchage pour les plus connus. D'autres procédés de type soudage sans passage à l'état liquide, tels que le soudage par friction par exemple, ont permis, en évitant la formation des composés intermétalliques qui fragilisent la liaison, d'obtenir des assemblages de qualité. En effet, l'assemblage de l'acier à l'aluminium avec passage à l'état liquide est problématique en raison des différences de coefficients de conductivité thermique, de températures de fusion, de faibles limites de solubilité et de la présence d'une couche d'alumine à la surface de l'aluminium. La faible solubilité du fer dans l'aluminium, voisine de zéro, entraîne la formation de phases intermétalliques : $FeAl_3$, Fe_2Al_5 , $FeAl_2$ et $FeAl$ qui sont des phases fragiles. Ces phases sont obligatoirement créées lors de l'interaction entre l'acier et l'aluminium, cependant leur présence, en fragilisant la liaison, rend l'assemblage difficile [2].

Dans le cadre de cette étude, le but est de réaliser des assemblages multi-matériaux à l'aide d'un nouveau procédé innovant, LISI μ -MACH-AP® (LISI micro-Mechanical Anchoring Cold Hybrid Assembly Process®), afin de permettre à l'acier et à l'aluminium, deux matériaux disjoints, d'être assemblés sans modifier leur nature métallurgique de base. Ce procédé combine la texturation laser et la projection thermique de type Cold Spray, deux procédés qui seront expliqués plus en détail par la suite.

2 Matériaux et moyens expérimentaux

2.1 Matériaux

L'acier et l'alliage d'aluminium utilisés pour cet assemblage sont couramment employés en industrie automobile. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont donnés dans le tableau 1 :

Tableau 1 – Propriétés mécaniques des alliages [3,4]

Alliage	Acier DC04	Alliage d'aluminium 2017 A
$\sigma_{0.2}$ [MPa]	160	145
σ_m [MPa]	440	225
ε [%]	37	13

La poudre utilisée pour élaborer les cordons d'assemblage est une poudre d'alliage d'aluminium AlSi10Mg, de granulométrie comprise entre 25 et 45 μm . La répartition granulométrique est donnée en figure 1a. C'est une poudre à particules sphériques (figure 1b), atomisée à l'argon, de base aluminium (plus de 80%), contenant environ 10% de silicium et 0.3% de magnésium. Cet alliage d'aluminium possède

d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques et physiques ainsi qu'une faible densité. De ce fait, il est un candidat privilégié pour la projection thermique.

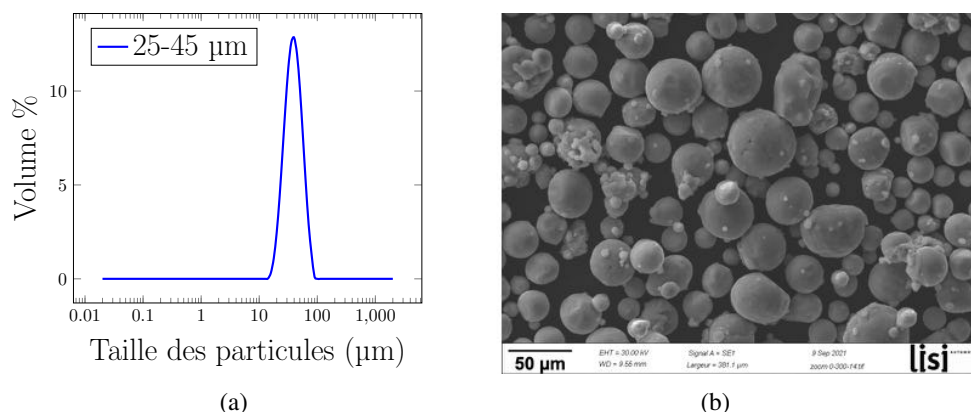


FIGURE 1 – Répartition granulométrique de la poudre (a) et image MEB de la poudre (b)

2.2 Texturation laser

Le procédé de texturation laser consiste en l'utilisation d'un faisceau d'énergie concentré en spot très fin qui permet de modifier la surface d'un matériau par un processus d'ablation de matière afin de lui donner un aspect de surface spécifique [5]. Ce processus résulte en la création de motifs micro ou macro géométriques, plus ou moins réguliers avec une répartition ordonnée qui permet d'adapter la surface cible aux particules projetées et aux sollicitations futures vues par le revêtement au niveau de l'interface [6]. Ce procédé crée des trous de diamètre précis, suivant un modèle préétabli sur toute la surface. La précision de la texturation est obtenue en contrôlant les paramètres du laser et du scanner qui influencent la qualité de la surface à revêtir ultérieurement par projection thermique. Le scanner contrôle le mouvement du laser et permet la production d'une grille parfaite [7]. Cette nouvelle technique produit une modification physico-chimique et mécanique de la surface, résultant d'une augmentation significative de la surface de contact entre le revêtement et le substrat [8]. La texturation laser offre beaucoup de possibilités : une grande majorité de matériaux peut être traitée, la zone affectée par la chaleur est réduite et il y a de faibles déformations des substrats minces [9].

Le laser utilisé est un laser nanoseconde, impulsif, de longueur d'onde 1064 nm, à fibre optique avec une répartition gaussienne de l'énergie.

Par un jeu de paramètres impliquant la puissance et la fréquence du laser ainsi que le nombre d'impulsions (ou d'impacts), il est possible de créer des cavités plus ou moins profondes, permettant d'accueillir les particules projetées.

Les deux matériaux ont été texturés en matrice de trous comme le montre la figure 2.

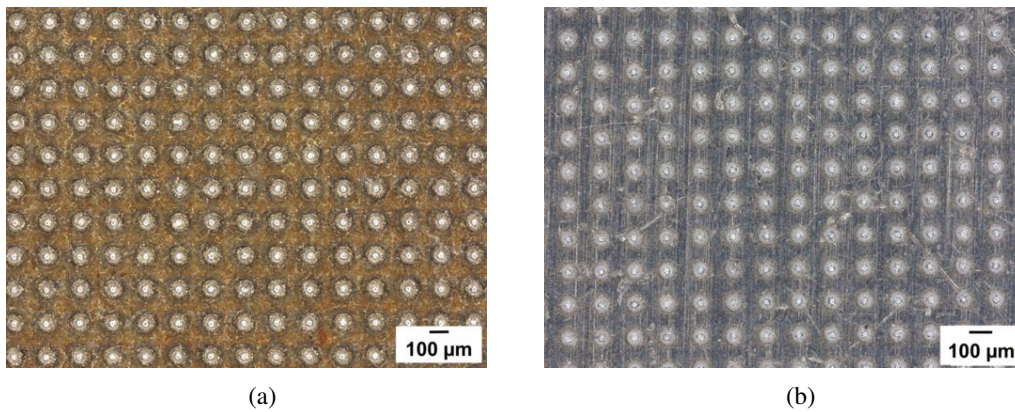


FIGURE 2 – Texturation laser en matrice de trous sur l’acier (a) et sur l’alliage d’aluminium (b)

D’autres motifs sont réalisables tels que des lignes, des hachures, des cercles concentriques ou encore des chevrons (la liste n’étant pas exhaustive). Selon les paramètres du laser ainsi que de la distance du laser (distance focale), les profondeurs et diamètres des cavités réalisées varient en fonction du matériau. Il convient d’optimiser ces paramètres pour chaque matériau afin de comprendre la réponse de ce dernier lorsqu’il est soumis à un impact laser. Pour l’acier et l’alliage d’aluminium, la plage des diamètres obtenus est comprise entre 30 et 100 μm. Concernant les profondeurs, celles-ci varient de 5 à 200 μm pour l’acier et de 5 à 720 μm pour l’alliage d’aluminium. Les comportements de l’acier et de l’alliage d’aluminium sont différents à paramètres égaux. En effet, les propriétés thermiques n’étant pas similaires, la propagation de la chaleur est plus importante pour l’aluminium que pour l’acier, entraînant des cavités plus profondes. L’étude complète de ces deux matériaux permet de prédire leur comportement selon les sollicitations du laser.

Les deux matériaux choisis possèdent des propriétés thermiques très différentes qui sont données dans le tableau 2 :

Tableau 2 – Caractéristiques thermiques de l’acier et de l’alliage d’aluminium [3,4]

Propriétés thermiques	Alliage d’aluminium 2017 A	Acier DC04
Masse volumique ρ [g.cm ⁻³]	2.79	7.86
Température de fusion T_{fus} [°C]	645	1350-1600
Conductivité thermique k [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	134	46
Capacité thermique massique C_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	873	460
Coefficient de dilatation thermique a [μm.(mK) ⁻¹]	22.9	12

La quantité d’énergie nécessaire afin d’atteindre le point de fusion de l’acier est un peu plus de trois fois et demi celle de l’alliage d’aluminium ($Q_{fus}^{acier} = 5514 \text{ J.cm}^{-3}$ et $Q_{fus}^{al.d'alu} = 1510 \text{ J.cm}^{-3}$).

La conductivité thermique de l’alliage d’aluminium étant plus grande que celle de l’acier, elle induit une propagation plus rapide de l’énergie thermique dans le volume de matière.

Pour l’acier, la conductivité thermique est si faible et ne permet pas à l’énergie thermique de se propager rapidement dans le volume de matière. L’énergie thermique ne se diffuse pas suffisamment dans le matériau et se trouve alors confinée dans un volume réduit. Dans cette zone, la température croît rapidement, ce qui conduit à une évaporation massive sur un volume faible avec éjection de matière.

De ce fait, les trous pour l’acier sont beaucoup moins profonds que pour l’alliage d’aluminium avec un

jeu de paramètres donné.

Les cavités texturées sont analysées en surface et en coupe au microscope numérique et optique afin de permettre de déterminer les profondeurs et les diamètres des trous. Généralement, ces trous sont dimensionnés afin de pouvoir accueillir les particules de poudre incidentes.

2.3 Projection à froid pour l'assemblage

Le procédé Cold Spray consiste en la création d'un dépôt sur une surface (substrat) avec une grande diversité de matériaux (métaux, céramiques, cermets, polymères, etc.). La poudre précurseur, ici d'alliage d'aluminium AlSi10Mg, est injectée dans une chambre sous pression (entre 10 à 60 Bars) et préchauffée (20 à 1100°C) en amont d'une buse convergente/divergente, dite De Laval, orientée perpendiculairement à la surface [10]. Ces particules chauffées sont accélérées à des vitesses allant jusqu'à environ 700 m.s⁻¹ (figure 3). La vitesse des particules de poudre de granulométrie 25-45 µm a été mesurée par CPS (Cold Particle Sensor de la société ©Tecnar).

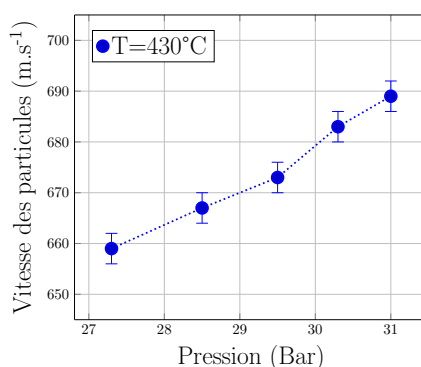


FIGURE 3 – Vitesse des particules de poudre AlSi10Mg en fonction de la pression du gaz (azote)

Les particules ainsi chauffées et accélérées s'étalent sur la surface à une distance comprise entre 20 et 25 mm. Au fur et à mesure que les particules impactent la surface, elles se déforment les unes sur les autres et forment un dépôt dense comme le montre la figure 4, micrographie en coupe transverse d'un revêtement d'AlSi10Mg déposé sur de l'acier.

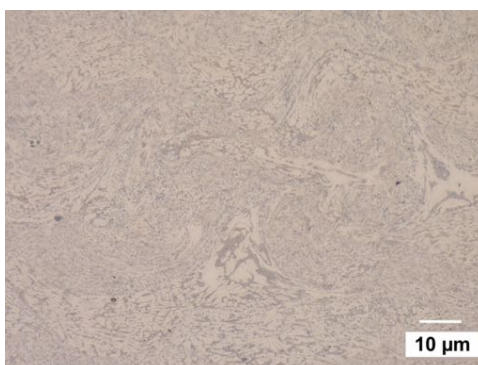


FIGURE 4 – Microstructure des particules déformées formant un revêtement par projection à froid

Pour une même poudre, il convient d'optimiser les paramètres de projection afin d'obtenir des dépôts de

qualité. Les paramètres de projection sont donnés dans le tableau 3 :

Tableau 3 – Paramètres de projection de la poudre AlSi10Mg

Gaz principal	Azote
Gaz porteur	Argon
Pression [Bar]	30 - 32
Température [°C]	440 - 450

Concernant les conditions de fabrication de l'assemblage, un montage spécifique permettant de tenir les plaques entre elles a été réalisé (figure 5).

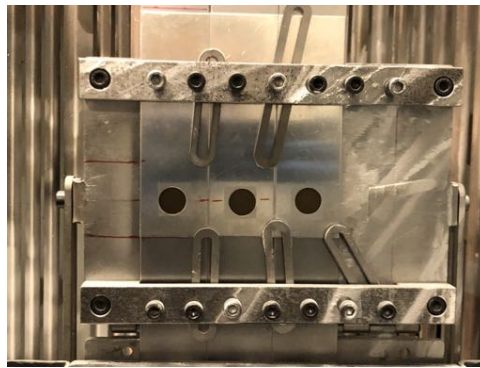


FIGURE 5 – Montage permettant les assemblages multi-matériaux

L'épaisseur des plaques d'acier et d'alliage d'aluminium à assembler est de 2 mm. Elles sont texturées simultanément avec les paramètres optimisés pour la texturation laser de la surface en acier, à travers le perçage de la plaque en alliage d'aluminium. Le cordon ou point d'assemblage est réalisé à la suite de la texturation par fabrication additive in situ. Le robot permettant de créer l'assemblage se déplace à une vitesse de 50 mm.s^{-1} et suit une trajectoire définie préalablement pour correctement combler le perçage préexistant dans la plaque en alliage d'aluminium placée en recouvrement partiel de la plaque en acier.

3 Résultats et discussion

3.1 Propriétés des dépôts

3.1.1 Propriétés métallurgiques

Les propriétés métallurgiques des dépôts ont été déterminés au microscope numérique. Les cordons AlSi10Mg obtenus par projection à froid possèdent une porosité inférieure à $1 \pm 0.5 \%$. En effet, comme indiqué précédemment, les particules déformées sont écrouies et les porosités sont faibles. L'angle d'impact des particules est primordial et doit s'approcher de 90° pour optimiser la densité du revêtement et le rendement d'utilisation de la poudre. Concernant la rugosité de surface après projection, elle est généralement faible, inférieure à $10 \pm 2 \mu\text{m}$. La figure 6 montre le dépôt obtenu à la suite de l'optimisation des paramètres de projection.



FIGURE 6 – Dépôt d'alliage d'aluminium obtenu par projection à froid sur substrat en acier

3.1.2 Propriétés mécaniques

Après projection du revêtement sur les surfaces texturées en matrice de trous, les micrographies des cavités vides et remplies sont observables en figure 7 pour une texturation sur l'acier et sur l'alliage d'aluminium.

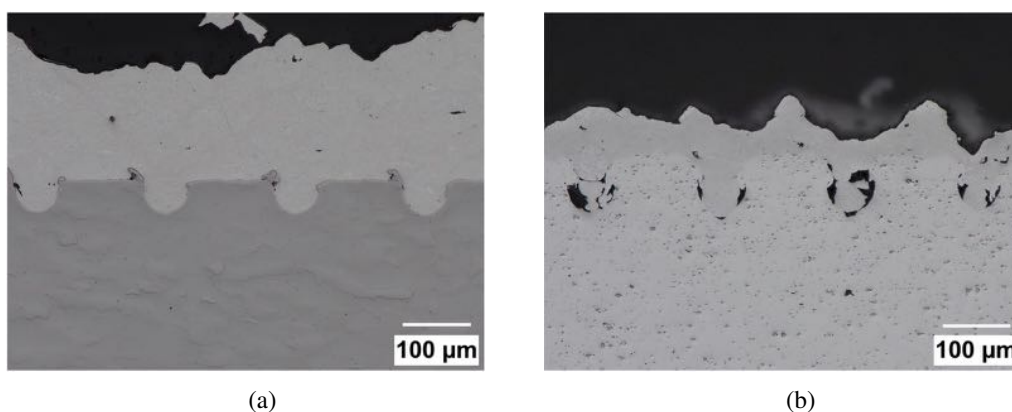


FIGURE 7 – Micrographies des cavités remplies par projection à froid de poudre d'aluminium AlSi10Mg sur un substrat en acier (a) et en alliage d'aluminium (b)

Les taux de remplissage des cavités ont été déterminés au microscope numérique, de la même manière que cela a été réalisé pour la porosité. Les espaces non remplis sont considérés comme des porosités. Selon le motif de texturation, ici en matrice de trous, les taux de remplissage sont différents d'un matériau à l'autre pour un même nombre d'impulsions (ou impacts). En effet, le taux de remplissage de l'acier pour 50 µm de profondeur et 80 µm de diamètre (avant projection) est de 100%. Cependant, contrairement à l'acier, l'alliage d'aluminium possède un remplissage de 70 % pour une profondeur de 90 µm et un diamètre de 85 µm en moyenne en entrée de trou (avant projection).

L'écart de remplissage s'explique par une différence de dureté entre le substrat (acier ou alliage d'aluminium) et la poudre. En effet, des mesures de dureté ont été réalisées et celle de la poudre est d'environ 120 $HV_{0.02}$, celle de l'acier est de 150 $HV_{0.02}$ et celle de l'alliage d'aluminium est de 85 $HV_{0.02}$. Ainsi, l'interface avant et après projection est la même pour l'acier mais est totalement différente pour l'alliage d'aluminium puisque l'impact des particules dures sur un substrat ductile déforme davantage

l'interface. Cette dernière se déforme de manière relativement importante et la matière éjectée referme le trou lorsque la particule impacte la surface.

Des tests de traction adhérence selon la norme ASTM C633 [11] ont été effectués sur des substrats d'acier et d'alliage d'aluminium bruts, sablés et texturés avec le même nombre d'impulsions. Ces résultats sont visibles en figures 8a pour l'acier et 8b pour l'alliage d'aluminium :

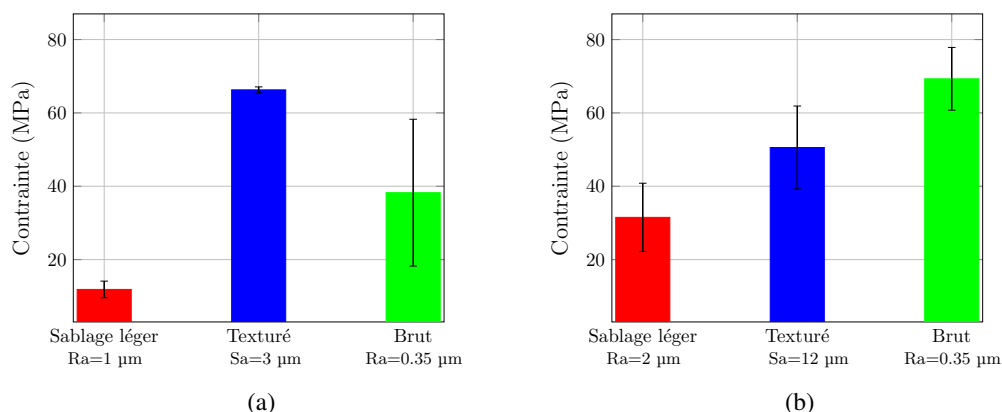


FIGURE 8 – Valeurs des tests de traction adhérence réalisés sur substrats en acier (a) et sur substrats en alliage d'aluminium (b)

Pour un substrat en acier, la valeur de la contrainte en traction adhérence pour une surface texturée atteint environ 70 MPa et correspond à une rupture adhésive (entre le dépôt et la colle du contre-pion), la colle ayant une limite proche de 70 MPa. Ainsi, la surface texturée avec un taux de remplissage de 100 % possède une bonne résistance mécanique. Comme le montre la figure 9, le dépôt adhère de manière importante au substrat en acier texturé car la colle est restée uniquement sur le contre pion (pion à gauche) et il y en a très peu sur le dépôt (pion à droite).

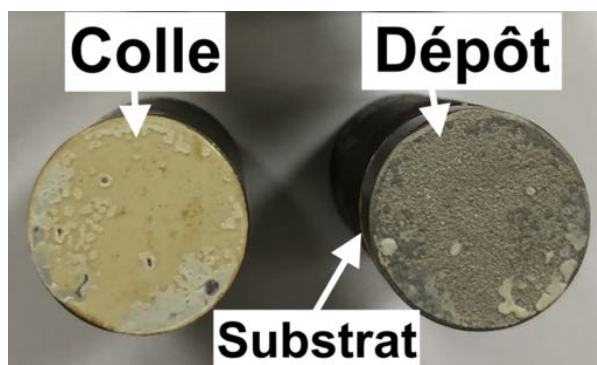


FIGURE 9 – Rupture adhésive du dépôt de poudre d'alliage d'aluminium AlSi10Mg sur substrat texturé en acier

Concernant la surface sablée, la rupture a lieu entre le dépôt et le pion (figure 10), les particules de poudre n'ont pas suffisamment adhéré à la surface sablée. Ainsi, lors de la traction, le dépôt s'est complètement désolidarisé du substrat. Concernant la surface brute, celle-ci possède une limite à rupture de 40 MPa, engendrant le même type de rupture. Cependant, les conditions de collage diffèrent (aléas

lors du positionnement des pions et lors de la polymérisation de la colle) et la disparité des essais est assez grande d'où une incertitude élevée.

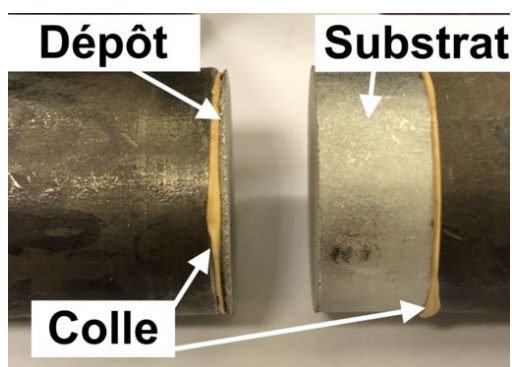


FIGURE 10 – Rupture du dépôt de poudre d'alliage d'aluminium AlSi10Mg sur substrat sablé en alliage d'aluminium

Pour un substrat en alliage d'aluminium, la valeur de la contrainte en traction adhérence pour une surface texturée est de 50 MPa, celle pour une surface brute de 70 MPa et celle pour une surface sablée est 30 MPa. De manière similaire à l'acier, la surface sablée correspond à une rupture entre le dépôt et le pion quand les deux autres substrats texturé et brut sont des ruptures adhésives. La faible valeur du substrat texturé pourrait correspondre au faible remplissage des cavités d'alliage d'aluminium par la poudre.

3.2 Propriétés mécaniques des assemblages

Deux éprouvettes rectangulaires (120x40x2 mm) sont utilisées pour créer un assemblage. Certaines éprouvettes présentent des géométries différentes :

- un chanfrein à 45° dans le sens de la largeur,
- un perçage au diamètre variable de 7.5 mm à 15 mm,
- un épaulement,
- un double chanfrein à 45°, de part et d'autre des deux éprouvettes.

Les valeurs des contraintes à rupture en traction uniaxiale selon différentes stratégies d'assemblage sont données dans le tableau 4 :

Tableau 4 – Valeurs des contraintes à rupture selon la stratégie d'assemblage

Type d'assemblage	Contrainte à rupture [MPa]
Épaulement	25 ± 5
Chanfrein à 45°	35 ± 5
Double chanfrein à 45°	26 ± 5

Les valeurs des contraintes à rupture en cisaillement selon les diamètres des perçages sont données dans le tableau 5 :

Tableau 5 – Valeurs des contraintes à rupture selon le diamètre du perçage

Diamètre du perçage (mm)	Contrainte à rupture [MPa]
7.5	55 ± 5
10	45 ± 5
12.5	35 ± 5
15	25 ± 5

La rupture des assemblages s'effectue au niveau du cordon d'assemblage entre l'acier et l'aluminium dans le cas d'un point de fixation s'apparentant à un "cordon de soudure". Dans le cas d'un point de fixation s'apparentant à un "rivet", la rupture s'effectue systématiquement au niveau des pieds d'ancrage à la surface du matériau dans le cadre de ces essais. La rupture est de nature fragile comme il est possible de l'observer sur la figure 11. En effet, les particules de poudre "entières" sont observables. Elles sont plus ou moins déformées mais cela montre que la rupture est fragile [12].

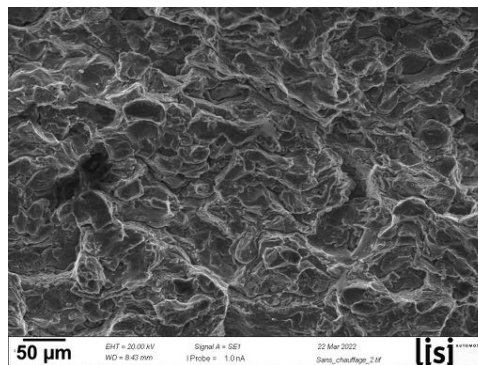


FIGURE 11 – Microstructure des particules déformées lors de la projection à froid

Les courbes de traction et cisaillement associées confirment le mode de rupture décrit précédemment. En effet, il est possible d'observer sur le graphe donné en figure 12 qu'il n'y a pas de plasticité, seulement une partie élastique.

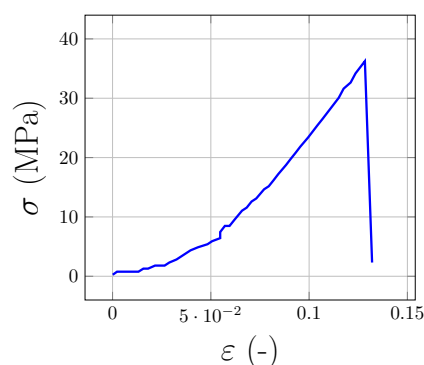


FIGURE 12 – Courbe de traction dans le cas d'un assemblage avec chanfrein à 45°

Comme il a été montré plus haut, les contraintes à rupture des assemblages varient de 30 à 50 MPa pour diverses stratégies d'assemblage. Ces disparités sont dues premièrement aux différentes stratégies d'as-

semblage engendrant des surfaces des interfaces plus ou moins grandes. Par exemple, pour un perçage de diamètre 10 mm, la surface est de 78.5 mm². Pour une jonction type "cordon de soudure", la surface en contact entre les deux éprouvettes est d'environ 120 mm². De plus, les faibles valeurs de contraintes peuvent être dues au mauvais remplissage des jonctions lors d'un assemblage avec perçage (figure 13) ou d'un mauvais alignement des éprouvettes lors de l'assemblage avec chanfrein par exemple. Les défauts sont présents généralement au niveau des parois droites sur les bords du perçage.



FIGURE 13 – Section transverse d'un point d'assemblage avec perçage de diamètre 10 mm

De la même manière qu'il convient de bien assembler ces éprouvettes, il faut également prendre en compte le fait qu'il existe des aléas lors de la réalisation de l'assemblage, engendrant une légère rotation de ce dernier lors de la traction uniaxiale ou le cisaillement.

Un autre élément qui pourrait avoir un impact sur les propriétés mécaniques des assemblages est la porosité du dépôt. En effet, lors de la projection, lorsque la pression est trop faible malgré une température élevée, la vitesse des particules diminue et les particules ne sont pas suffisamment déformées pour former un dépôt dense. Ainsi, la rupture peut intervenir dans le cordon notamment dans le cas d'assemblage avec chanfrein. C'est pourquoi il est important de toujours rester à une pression relativement haute de l'ordre de 32 bars.

Outre le fait qu'il est important de bien assembler les éprouvettes, il convient également d'améliorer la ductilité des cordons afin d'obtenir une résistance mécanique plus élevée. De ce fait, il est possible de donner de la ductilité au dépôt ainsi obtenu en effectuant un traitement thermique post-projection. Lors d'une stratégie d'assemblage avec un perçage par exemple, un traitement thermique post-projection de 3h à 295°C a été appliqué. La figure 14 montre la courbe de cisaillement avant et après traitement thermique :

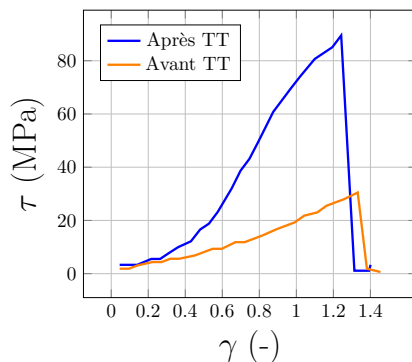


FIGURE 14 – Courbe de cisaillement dans le cas d'un assemblage avec perçage de diamètre 15 mm

Il est à noter qu'il y a un début de plasticité lors du cisaillement de l'assemblage après traitement thermique comparativement à un assemblage brut de projection. De plus, la résistance mécanique est nettement améliorée, passant de 30 à 90 MPa.

Comparativement à d'autres procédés d'assemblage multi-matériaux tels que le Friction Stir Spot Welding, les valeurs obtenues en cisaillement grâce à l'association de la texturation laser et du Cold Spray d'un alliage d'aluminium sont similaires en termes de contrainte à rupture (70 MPa pour le procédé Friction Stir Spot Welding [13]). Par analogie aux méthodes d'assemblages linéaires comme le Laser Welding ou le Friction Stir Welding et aux valeurs associées (190 MPa et 230 MPa respectivement [14]), les valeurs obtenues en traction uniaxiale dans le cas du procédé LISI μ -MACH AP[®] sont nettement inférieures (50 MPa) mais peuvent être expliquées par la nature du cordon d'assemblage qui est en alliage d'aluminium. La réalisation d'un cordon d'assemblage avec un acier faiblement allié par exemple permettrait de résoudre ce problème.

4 Conclusion

Les premiers résultats obtenus pour les différentes stratégies de conception montrent la faisabilité de l'assemblage acier/alliage d'aluminium à l'aide d'un cordon d'assemblage également en alliage d'aluminium. En effet, ce nouveau procédé d'assemblage, sous certaines conditions, permet d'obtenir des résistances mécaniques voisines de celles obtenues par assemblage mécanique.

Ces résultats en termes de rupture en traction et en cisaillement permettent de conforter l'idée que ce procédé est tout à fait compétitif et pourrait, à terme, venir en complément ou en remplacement des procédés d'assemblage conventionnels. Des essais mécaniques tels que l'étude en fatigue, le vieillissement prématuré et le bain salant permettront de compléter ceux déjà étudiés.

Cependant, ce nouveau procédé est novateur, créant une rupture technologique, et permet donc de réaliser des assemblages multi-matériaux, robustes, qui à terme, pourraient remplacer les procédés conventionnels. L'utilisation d'autres matériaux métalliques mais également des matériaux composites ou thermoplastiques est envisagée pour des assemblages de ce type.

Références

- [1] Les matériaux pour l'allègement des véhicules, Filière Automobile et Mobilités, Conseil national de l'industrie, 16 pages, juin 2018.

- [2] G. Sierra, F. Deschaux-Beaume, P. Peyre, D. Stuart, G. Fras, Assemblage hétérogène acier/aluminium par soudage TIG, 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, 6 pages, septembre 2005.
- [3] Assemblages soudés et brasés pour constructions aérospatiales - Soudabilité et brasabilité des matériaux, NF EN 4632-002, Agence française de normalisation, novembre 2008.
- [4] Sélection des matériaux métalliques, NF L 22-031, Agence française de normalisation, septembre 2003.
- [5] J.-M. Jouvard, A. Soveja, L. Lavis, Traitement de surface métallique induit par faisceau laser Nd :YAG q-switch de marquage : modélisation d'un impact laser, pp. 1-5, août 2007.
- [6] R. Kromer, Effects on adhesion mechanisms of prior-surface treatments before thermal spraying : Thermal barrier coating, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2016.
- [7] S. Costil, H. Liao, A. Gammoudi, C. Coddet, Influence of surface laser cleaning combined with substrate preheating on the splat morphology, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 14, no 1, pp. 31-38, mars 2005.
- [8] A. Lamraoui, Traitement de surface par texturation laser : une alternative "propre" de préparation de surface pour la projection thermique, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2011.
- [9] D. H. James, A review of experimental findings in surface preparation for thermal spraying, Journal of Mechanical Working Technology, vol. 10, no 2, pp. 221-232, juillet 1984.
- [10] M. Jeandin, M. Ducos, Projection dynamique par gaz froid (ou cold spray), Traitements Des Métaux, Techniques de l'ingénieur, 2020.
- [11] Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings, ASTM C633-13, American Society for Testing and Materials, 2021.
- [12] D. Giraud, Étude des composantes mécanique et métallurgique dans la liaison revêtement-substrat obtenue par projection dynamique par gaz froid pour les systèmes «Aluminium/Polyamide6,6» et «Titane/TA6V», Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014.
- [13] A. Gullino, P. Matteis, F. D. Aiuto, Review of aluminum-to-steel welding technologies for car-body applications, Metals, vol 9, no 315, 28 pages, mars 2019.
- [14] G. Meschut, V. Janzen, T. Olferman, Innovative and highly productive joining technologies for multimaterial lightweight car body structures, Journal of Materials Engineering and Performance, vol 23, no 5, pp. 1515-1523, mai 2014.