



HAL
open science

Tenue à la corrosion d'un acier inoxydable super-duplex 25-07 produit par fabrication additive

Sébastien Ballésio, Thai Le Hong, Chloé Comas, Matthieu Dhondt, Cédric
Doudard, Fabien Szmytka

► To cite this version:

Sébastien Ballésio, Thai Le Hong, Chloé Comas, Matthieu Dhondt, Cédric Doudard, et al.. Tenue à la corrosion d'un acier inoxydable super-duplex 25-07 produit par fabrication additive. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280043

HAL Id: hal-04280043

<https://hal.science/hal-04280043>

Submitted on 10 Nov 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.

Étude de l'acier inoxydable super-duplex 2507 fabriqué par procédé DED : de la fabricabilité à la caractérisation

**BALLÉSIO Sébastien^{ab}, LE HONG Thai^a, COMAS Chloé^b, DHONDT
Matthieu^b, DOUDARD Cédric^b, SZMYTKA Fabien^a,**

a. IMSIA - UMR EDF/CNRS/CEA/ENSTA 9219, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris
(sebastien.ballesio@ensta-paris.fr)

b. École Nationale Supérieure des Techniques Avancées, ENSTA Bretagne, UMR CNRS 6027, IRDL
F-29200 Brest, France

Résumé :

Cet article présente une caractérisation des propriétés de l'acier inoxydable super-duplex 2507 élaboré par procédé "Directed Energy Deposition" (DED). Nous étudions d'abord la fabricabilité du matériau avec ce procédé de fabrication. Une comparaison entre procédé de fabrication additive DED et le forgeage est ensuite menée. Celle-ci permet de mettre en évidence les différences de microstructures, de propriétés mécaniques (essai de traction) et de tenue à la corrosion.

Abstract :

This paper consist in characterising super-duplex 2507 stainless steel constructed by the "Directed Energy Deposition" (DED) process. First, we investigate the manufacturability of the material with this technique. Then, we compare two materials : as-build DED and forged material. This comparison will highlight the differences of microstructure, mechanical characteristics (tensile tests) and corrosion resistance.

Mots clefs : Fabrication additive, Acier inoxydable super-duplex, Microstructure, Essai de traction, Corrosion

1 Introduction

Les procédés dits "de fabrication additive" permettent aujourd'hui de repenser la conception de nombreuses structures, notamment métalliques [1]. Dans ce cadre, de nombreux travaux s'attachent à mieux comprendre et optimiser ces méthodes d'élaboration. De plus en plus de métaux sont par ailleurs considérés à mesure que des poudres métalliques de qualité deviennent disponibles. Il devient alors nécessaire de caractériser la matière fabriquée, non plus en la considérant comme un métal simple, mais plutôt comme un couple "matériau-procédé" qui, en fonction de la stratégie d'élaboration choisie peut présenter de grandes variations, tant au niveau microscopique que macroscopique.

La caractérisation d'un matériau est définie d'abord par l'étude de sa composition chimique puis de sa microstructure, et enfin par l'évaluation de ses propriétés d'usages : résistances mécaniques et tenue à la corrosion par exemple. La résistance à la corrosion est un élément particulièrement déterminant dans certains domaines d'utilisation, tels que le naval, le nucléaire ou la production d'énergie, qui doivent composer avec un environnement aux conditions sévères. L'acier inoxydable est un des métaux reconnus pour ce type d'usage spécifique, et particulièrement les aciers super-duplex [2].

Cet article s'intéresse ainsi aux propriétés de la nuance super-duplex 2507. Les propriétés de cet acier fabriqué par le procédé conventionnel de laminage/forgeage ont été largement étudiées [3][4][5][6] [7][8]. Cependant, la littérature ne référence que peu d'études en ce qui concerne les propriétés de ce même acier fabriqué par méthode DED [9][10][11].

2 Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux et procédé

L'acier inoxydable super-duplex étudié est la nuance 2507. Les compositions de l'acier forgé et de la poudre utilisée pour la fabrication additive sont résumées dans le tableau 1.

La microstructure de l'acier 2507 forgé est répartie entre environ 60% en volume de ferrite (ou α) et 40% d'austénite (ou γ) [3].

La poudre métallique SAF 2507 fournie par Sandvick est quant à elle utilisée pour imprimer les échantillons possède une granulométrie annoncée par le fournisseur de 45 – 90 μ m.

	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	C	Cu	P	S	Fe
Forgé	24.68	6.54	2.84	0.79	0.62	0.17	0.024	0.07	0.021	<0.003	Balance
Poudre	24.9	7.2	3.82	0.9	0.4	0.29	0.02	0.01	0.006	0.006	Balance

TABLE 1 – Composition chimique du matériau forgé [3] et de la poudre (en % pds)

La machine de fabrication est une BeAM Mobile-004. Elle permet la fabrication de pièces de dimensions maximales de 400 × 250 × 200mm³ et dispose d'un laser délivrant une puissance maximale de 500W. La poudre est amenée jusqu'à la buse à l'aide d'un flux de gaz d'argon puis projeté vers le substrat. La poudre est alors fondue par le laser coaxial, créant un bain de fusion à l'intersection avec la dernière couche imprimée ou le substrat dans le cas de la première couche.

2.2 Préparation, analyse et caractérisation des échantillons

Préparation des échantillons : Les échantillons réalisés pour l'analyse de la microstructure et de la tenue à la corrosion sont des cubes de 10mm de côté. Les éprouvettes utilisées pour les essais de traction sont de type cylindrique, de longueur 65mm et de diamètre 8mm avec une zone utile de longueur 24mm et de diamètre 4mm.

Lors des études microstructurales, les échantillons sont enrobés à chaud dans une résine conductrice. Ils sont ensuite polis au papier SiC et à la pâte diamantée jusqu'à 1/4 μ m. Lors des études microstructurales, les échantillons sont ensuite polis à l'OPS.

Dans le cas des études électrochimiques, les échantillons sont enrobés à chaud dans une résine époxy. Une tige est ensuite soudée à l'échantillon. L'ensemble tige-soudure est protégé de l'environnement à

l'aide d'un vernis de blocage (figure 1). Les échantillons sont ensuite polis jusqu'à la pâte diamanté $1/4\mu\text{m}$ et laissés à l'air libre 24 heures avant essai afin de permettre la formation de la couche d'oxyde.

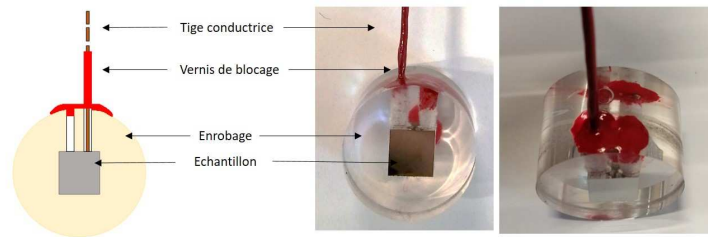


FIGURE 1 – Schéma et photos d'un échantillon d'acier 2507 après préparation pour des essais de caractérisation du comportement en corrosion en milieu NaCl

Observations et analyse des échantillons : Les observations optiques ont été réalisées à l'aide du microscope optique Keyence VHX-5000. Pour l'analyse de la microstructure des échantillons, un détecteur EBSD Oxford est installé sur un Microscope Électronique à Balayage (MEB) JEOL JSM-IT300LV.

Méthode d'étude de la porosité : Les analyses de la porosité de volumes fabriquées en DED ont été réalisées à partir des coupes métallographiques, s'appuyant sur le logiciel Fiji et le processus suivant :

- Acquisition d'images 2D au microscope optique en niveau de gris (figure 2(a), avec les valeurs de chaque pixel variant entre 0 (noir) et 255 (blanc) ;
- Seuillage des images à partir de l'histogramme de niveau de gris. Les images ne contiennent plus alors que deux valeurs, 0 et 255. Les pores se présentent sous forme d'amas de pixels noirs comme sur la figure 2(b) ;
- Segmentation et analyse des particules. Cette étape consiste à détecter automatiquement les particules (pores), en balayant tous les pixels d'une même valeur de 0, dans la matrice (matériau) avec une certaine précision dépendant de l'étape de seuillage (figures 2(c) et (d)) ;

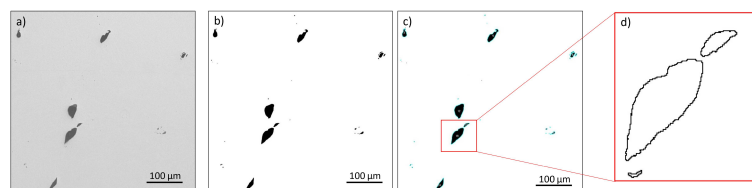


FIGURE 2 – Schéma du processus de traitement d'images utilisé pour les analyses de la porosité : a) acquisition d'images 2D, b) seuillage de l'image, c) segmentation des particules, d) visualisation de particules à plus forts grossissements

Caractérisation des échantillons par un essai de traction : Les essais de traction sont réalisés sur un banc de traction électromécanique Instron à une vitesse de déformation de 10^{-3}s^{-1} . Les éprouvettes issues du procédé DED sont élaborées afin que l'axe de sollicitation soit identique à l'axe de fabrication. De la même façon, les éprouvettes forgées sont extraites de sorte que l'axe de sollicitation soit identique à l'axe de forgeage. Trois essais de traction ont été faits pour chaque procédé d'élaboration d'éprouvettes.

Caractérisation électrochimique des échantillons : Les essais électrochimiques sont réalisés dans une solution de 1M de NaCl, pH 6,5 à température ambiante. Les échantillons sont laissés 24 heures en solution avant polarisation afin de permettre la stabilisation de l'interface métal/solution. Les échantillons sont ensuite polarisés du potentiel de corrosion E_{corr} - 150 mV/ECS jusqu'à 1 mA/cm². Les mesures électrochimiques sont menées à l'aide d'un potentiostat-galvanostat Origaflex de Orignalys et d'un montage à trois électrodes comportant une électrode de référence ECS et une contre-électrode en platine.

3 Fabricabilité du super-duplex 2507 par procédé DED

La fabricabilité se définit ici comme la capacité à produire des pièces répondant à des critères stricts sur la géométrie, sur le niveau de porosité (et donc de la présence ou pas de manques de fusion ou de bulles de gaz emprisonnées), et sur l'état de surface de la pièce, caractérisé par la présence d'infondus (figure 3(c)). Le matériau est alors considéré comme utilisable en DED lorsque l'ensemble des critères sont atteints (tolérance géométrique acceptable, pas ou peu de porosité, état de surface avec le minimum d'infondus)

Pour garantir la fabricabilité, il est de coutume de faire varier les paramètres de la machine d'impression et particulièrement la puissance du laser, la vitesse de lasage et le débit de poudre. Dans cette étude, nous nous concentrons uniquement sur les deux premiers. Pour définir les paramètres de procédé pour l'acier inoxydable super-duplex 2507, leur influence est d'abord mesurée sur des cordons, puis des murs et enfin des volumes.

3.1 Mono-cordons

Dix-huit mono-cordons sont d'abord fabriqués (figure 3(a)), en utilisant des jeux de paramètres différents (cf. tableau 2). Après dépôt de matière, les caractéristiques des mono-cordons sont étudiées afin de sélectionner les valeurs de paramètres permettant d'obtenir : une forme régulière et continue, une hauteur stable tout au long du cordon, une dilution $D = \frac{d}{h+d}$ (voir figure 3(b)) comprise entre 10 et 30% [12], et le moins d'éjectas possible. Ces derniers sont issus de la poudre infondue comme sur la figure 3(c).

Puissance de laser (W)	225, 250, 275, 300, 325 et 350
Vitesse de lasage (mm/min)	1800, 2000, 2200
Débit de poudre (g/min)	7,1

TABLE 2 – Paramètres de fabrication des mono-cordons

3.2 Murs

Après observation des mono-cordons et une première convergence des jeux de paramètres (cf. tableau 3), les murs sont réalisés avec une stratégie d'impression en aller-retour sans temps de latence. Les valeurs de paramètres pour lesquelles les murs s'effondrent, pour lesquelles la hauteur et l'épaisseur des murs n'est pas homogène, ou pour lesquelles la liaison mur-substrat n'est pas acceptable sont alors mis de côté. Dans ce but, une coupe transversale de chaque mur est ainsi réalisée comme présenté sur figure 4. Sur cet exemple, les cordons du mur sont irréguliers et induisent une inclinaison globale. Ils conduisent à un risque fort d'échec lors de l'impression de volume : le jeu de paramètre associé est donc abandonné.

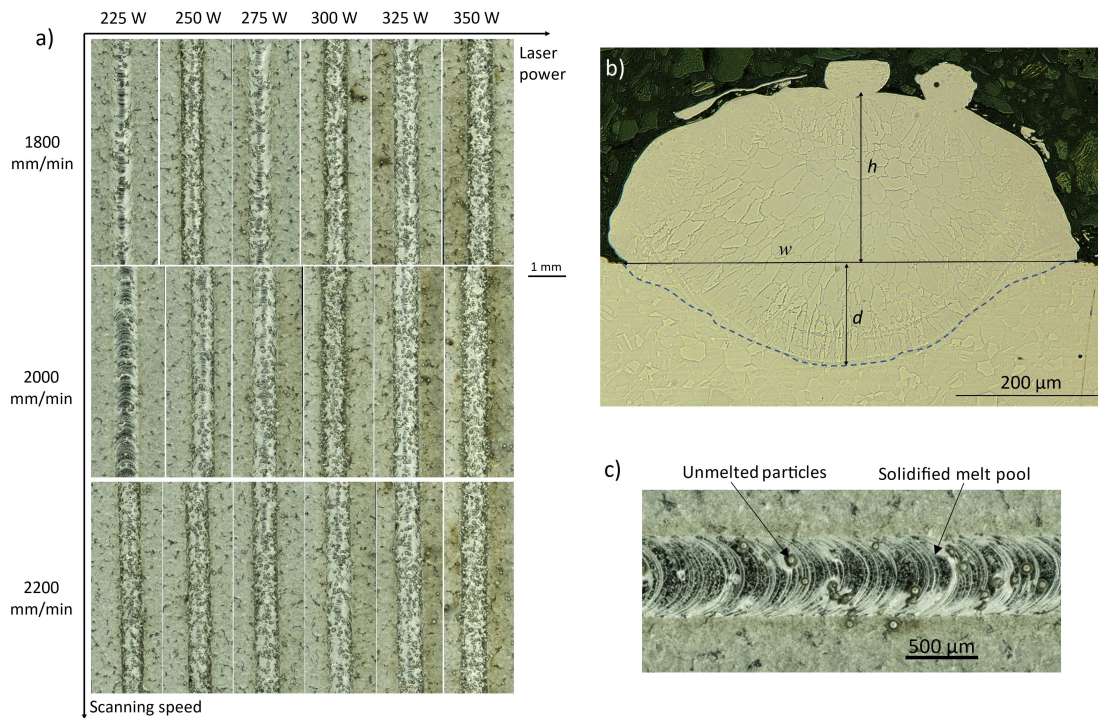


FIGURE 3 – (a) Morphologie des cordons dans la partie centrale en fonction de la vitesse de lasage et de la puissance du laser, (b) Coupe transverse d'un cordon et (c) Mise en évidence d'éjectas en surface de cordon

Puissance de laser (W)	200, 225, 250 et 275
Vitesse de lasage (mm/min)	1800 et 2000
Débit de poudre (g/min)	7,1
Incrément en hauteur Δh (mm)	0,15

TABLE 3 – Paramètres de fabrication pour les murs

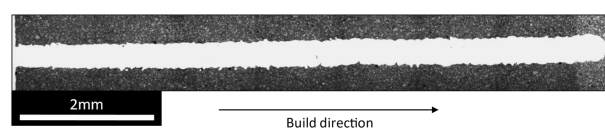


FIGURE 4 – Coupe transverse du mur observée au microscope optique et post-traité sur ImageJ (275W - 2000mm/min)

3.3 Volumes

Les jeux de paramètres finalement retenus sont présentés dans le tableau 4. La stratégie utilisée pour l'impression, bi-directionnelle, est quant à elle schématisée sur la figure 5. Le principe consiste à effectuer des allers-retours pour chaque couche avec une rotation de 90° pour la direction d'impression lorsque l'on change de couche à imprimer. Les valeurs de paramètres utilisées permettent un excellent maintien du volume dans l'ensemble des directions.

Le choix du jeu de paramètres optimal repose sur des observations liées à la régularité du dépôt et l'absence d'effondrement. À ce stade, seul 4 jeux de paramètres subsistent, sans différences notables.

Puissance de laser (W)	225 et 250
Vitesse de lasage (mm/min)	1800 et 2000
Débit de poudre (g/min)	7,1
Incrément en hauteur Δh (mm)	0,15
Taux de recouvrement (%)	40
Stratégie de fabrication	Aller-retour avec une rotation de 90° (figure 5)

TABLE 4 – Paramètres de fabrication pour les blocs

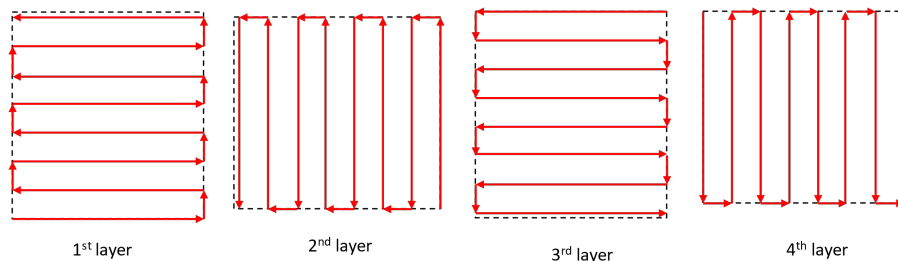


FIGURE 5 – Schéma de la stratégie de fabrication dans le plan de lasage : aller-retour à chaque couche avec une rotation de 90° entre deux couches successives. La flèche rouge représente la trajectoire du laser

3.4 Porosité

Le choix final du jeu de paramètres est réalisé grâce à l'étude du taux de porosité des volumes produits. Le nombre de porosités observées est comptabilisé (cf. figure 6) et ces dernières sont catégorisées en deux classes : les porosités relatives au manque de fusion et les porosités liées à l'emprisonnement de gaz. La distinction entre ces deux classes s'effectue classiquement en fonction de la circularité des pores déterminée telle que : $C = \frac{4\pi \cdot Aire}{Perimetre^2}$. Plus C tend vers 1, plus la surface assimilée au pore est circulaire. Ainsi un seuil est positionné tel que les pores ayant une faible circularité sont identifiés plutôt comme étant liés à des manques de fusion. A contrario, les pores ayant une circularité proche de 1 sont assimilés à l'emprisonnement de gaz lors de la solidification. Lors de cette étude, les observations montrent que quel que soit le jeu de paramètres, la part de pores liés à l'emprisonnement de bulles de gaz représente plus de 75% du total des pores détectés.

La figure 6 présente ainsi une classification des porosités de chacun des volumes analysés. Les résultats soulignent que le choix d'une puissance de 250W pour une vitesse de lasage de 2000mm/min conduit à la porosité la plus faible. En ce sens, il semble que ces paramètres constituent la combinaison optimale, de l'ensemble des jeux de paramètres étudiés, pour la fabrication des échantillons destinés à la caractérisation des propriétés des échantillons fabriqués par méthode DED.

4 Analyse de la microstructure

Les études microstructurales des échantillons d'acier superduplex 2507 sont effectuées dans le plan perpendiculaire à la direction de forgeage et de fabrication respectivement pour l'acier forgé et l'acier produit par procédé DED. Les cartographies des phases (figure 7) mettent en relief les phases ferritique (en bleu) et austénitique (en rouge).

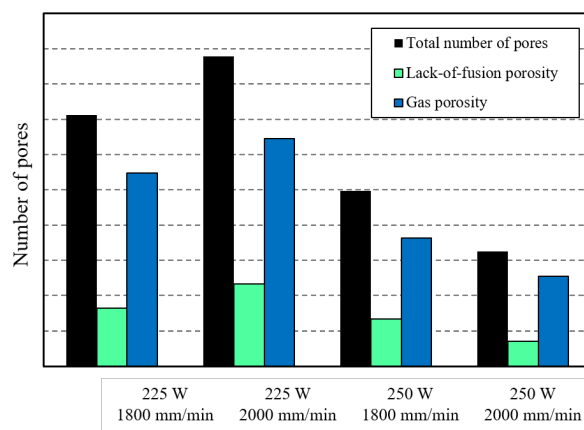


FIGURE 6 – Évolution du nombre de pores et leur répartition (manques de fusion ou pores gazeux)

Dans le cas de l'acier forgé, la carte 7(a) met en relief des grains globalement globulaires. La répartition entre ferrite et austénite est alors homogène avec une proportion de 59,1% de ferrite.

Pour l'acier produit par DED, deux microstructures austéno-ferritiques sont présentes comme le montre la cartographie EBSD présentée en figure 7(b). La première est majoritairement composée de ferrite (87%) avec l'austénite répartie aux joints de grains (partie haute de la figure 7(b)). La seconde (partie basse de la figure 7(b)) consiste en des îlots d'austénite au milieu de grains de ferrite en sus des caractéristiques de la microstructure précédente (2/3 de phase α contre 1/3 de phase γ). La composition globale de l'échantillon indique alors : 77,8% de ferrite et 22,2% de ferrite (cf tableau 5). En revanche, les grains de ferrite et d'austénite sont plus petits que les grains d'un acier forgé : $5,7\mu\text{m}$ contre $25\mu\text{m}$ pour la ferrite et $1,87\mu\text{m}$ contre $16\mu\text{m}$ pour l'austénite.

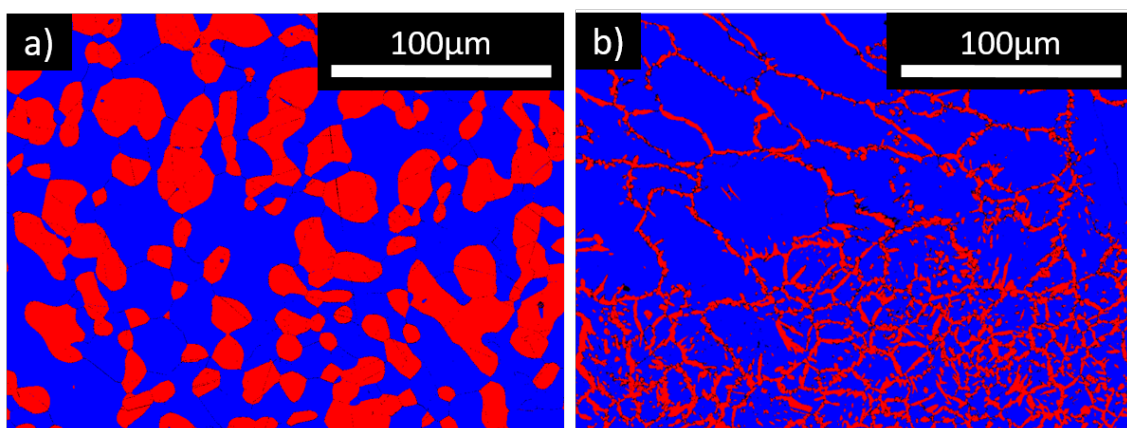


FIGURE 7 – Cartes des phases (ferrite en bleu et austénite en rouge) dans l'acier 2507 produit par (a) forgeage et (b) procédé DED brut de fabrication

5 Comparaison des propriétés mécaniques et électrochimiques de l'acier 2507 forgé et fabriqué par procédé DED

Parmi les propriétés mécaniques classiquement étudiées pour caractériser un matériau, cette étude se concentre uniquement sur les propriétés de traction et de résistance à la corrosion. Les propriétés du

	Proportion de phases (%)		Diamètre moyen des grains (μm)	
	Phase α	Phase γ	Phase α	Phase γ
Forgé	59,1	40,9	19,2	8,19
DED brut de fabrication	77,8	22,2	5,7	1,87

TABLE 5 – Tableau récapitulatif comportant les proportions de phases et le diamètre moyen des grains par chacune d'elle en fonction du procédé d'élaboration

métal forgé et brut de fabrication par procédé DED sont alors comparées.

Essai de traction :

La figure 8(a) récapitule l'ensemble des résultats obtenus. Il convient dans un premier temps de noter que les différents jeux de paramètres utilisés dans la section 3.3 donnent une faible dispersion des résultats lors des essais de traction. Lorsqu'on compare les deux procédés de fabrication, les résultats montrent que le module d'Young varie peu en fonction du procédé. En revanche, les éprouvettes fabriquées par procédé DED affichent des limites d'élasticité et des limites à la rupture bien supérieures aux éprouvettes usinées dans une barre d'acier forgée. À l'inverse, l'allongement à rupture est plus important pour les éprouvettes issues de la barre forgée que les éprouvettes réalisées par impression DED. Ces résultats restent assez classiques par rapport aux connaissances de la littérature pour la production d'acier par DED. Les variations fortes de microstructure ainsi que l'histoire du procédé de fabrication peuvent être de premières piste quant à l'explication de ces résultats.

Résistance à la corrosion :

La figure 8(b) présente les courbes de polarisation, d'un échantillon d'acier duplex 2507 forgé ainsi que celles d'un échantillon d'acier duplex 2507 fabriqué par méthode DED dont le jeu de paramètre a été optimisé (225W-2000mm/min). La démarche utilisée afin d'obtenir ces courbes est décrite dans la section 2.2).

Les résultats montrent que les deux matériaux adoptent un comportement passif caractérisé par l'absence d'un pic d'activité et le passage direct vers un plateau de passivation [7][13][14]. Autour de 1000 mV/ECS, une augmentation du courant est constatée sur les deux courbes. Elle est due l'oxydation de l'eau et au dégagement de dioxygène selon l'équation : $H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$ [15]. En comparant la valeur du courant au plateau de passivation, on peut en déduire que l'échantillon d'acier super-duplex 2507 forgé de référence adopte un meilleur comportement passif que l'échantillon imprimé DED ($I_p = 700\text{nA}$ pour le forgé contre $10\mu\text{A}$ via le procédé DED).

Ces résultats semblent montrer une influence de la méthode de fabrication et donc une influence de l'architecture microstructurale et de la composition chimique des phases sur le comportement électrochimique du matériau.

6 Conclusion générale

En imprimant avec la machine BeAM Mobile-004, les paramètres optimaux, en fixant un débit de poudre à 7,1g/min, sont obtenus pour des puissances de laser de 225 et 250W et des vitesses de lasage de 1800 et 2000mm/min. Avec ces configurations de fabrication, la porosité est majoritairement issue des pores gazeux (plus de 75%).

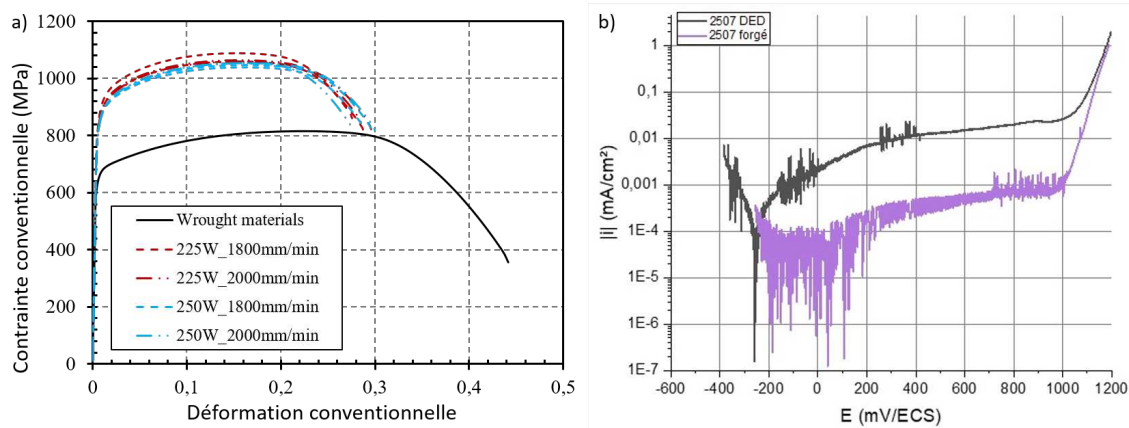


FIGURE 8 – (a) Essais de traction et (b) Courbes de polarisation réalisés sur des échantillons d’acier 2507 forgé et fabriqué par procédé DED (brut de fabrication)

Au niveau de la microstructure, les échantillons DED bruts de fabrication sont majoritairement ferritiques (environ 80%) et comportent une histoire de lasage directement visible aux grains.

En ce qui concerne les caractéristiques mécaniques, la limite d’élasticité et de rupture sont supérieures par procédé DED brut de fabrication que par forgeage, à l’inverse de l’allongement qui est en faveur de l’acier forgé. Le module d’Young reste lui le même quel que soit le procédé en jeu.

La tenue à la corrosion est elle bien meilleure pour les échantillons en acier forgé que réalisé par procédé DED brut de fabrication.

L’étude s’est concentrée autour des effets du procédé utilisé sur des propriétés standards comme les résistances à la traction et à la corrosion. Les résultats obtenus soulignent un positionnement du matériau DED semblable à ce qui est connu dans la littérature pour d’autre nuance. Les traitements thermiques ont tendance à modifier la microstructure du matériau brut, ce qui amène des variations sur ses caractéristiques mécaniques et de tenue à la corrosion [6][7][11][16]. En réalisant une série de traitement thermique, aux températures et durées de maintien différentes, on pourrait obtenir des microstructures et des caractéristiques potentiellement plus proches de l’acier forgé.

Une étude sur la dureté et la fatigue pourrait être en plus effectuée pour enrichir les données sur le comportement mécanique de la nuance d’acier inoxydable 2507. De la même manière, du côté de la résistance à la corrosion, une étude du comportement en corrosion localisée de type caverne et de type piquûre dans milieu semblable à celui d’étude serait fort utile pour améliorer la connaissance du matériau. Certaines modifications, notamment au niveau de la température du milieu corrosif, pourraient révéler de nouvelles informations.

7 Remerciements

Nous remercions l’Agence Innovation Défense (AID) pour le financement du projet QUADS (Qualification d’un alliage métallique multi-phase élaboré par fabrication additive pour usage en environnement sévère), dans le cadre duquel les études précédentes ont pu être réalisées.

Références

- [1] T. DebRoy & al., Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Prog. Mat. Sci.*, 92 (2018) 112–224.
- [2] N. R. Baddoo, Stainless steel in construction : A review of research, applications, challenges and opportunities, *Journal of Constructional Steel Research*, 64-11 (2008) 1199-1206.
- [3] A. El Bartali, Apport des mesures de champs cinématiques à l'étude des micromécanismes d'endommagement en fatigue plastique d'un acier inoxydable duplex. Thèse, École Centrale de Lille, 2007.
- [4] V. Aubin, Plasticité cyclique d'un acier inoxydable austéno-ferritique sous chargement biaxial non-proportionnel. Thèse, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I; Ecole Centrale de Lille, 2001
- [5] R. M. Davidson & J. D. Redmond, A guide to using duplex stainless steels, *Materials & Design*, 12-4 (1991) 187-192.
- [6] H. Tan & al., Effect of annealing temperature on the pitting corrosion resistance of super duplex stainless steel UNS S32750, *Materials Characterization*, 60-9 (2009) 1049-1054.
- [7] E. Bettini & al., Study of Corrosion Behavior of a 2507 Super Duplex Stainless Steel : Influence of Quenched-in and Isothermal Nitrides, *Materials Characterization*, 9 (2014) 61-80.
- [8] M. Laleh & al., Enhancing the repassivation ability and localised corrosion resistance of an additively manufactured duplex stainless steel by post-processing heat treatment, *Corrosion Science*, 198 (2022) 110106.
- [9] A. D. Iams & al., Formation of Austenite in Additively Manufactured and Post-Processed Duplex Stainless Steel Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51-2 (2020) 982-999.
- [10] M. Brázda & al., Influence of laser power in direct laser deposition on the proportion of ferrite and austenite in duplex steel SAF2507, 29th International Conference on Metallurgy and Materials (2020)
- [11] M. Brázda & al., Effect of heat treatment on mechanical properties of duplex steel SAF 2507 manufactured by DED IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, 1178 (2021).
- [12] D-G. Ahn, Directed Energy Deposition (DED) Process : State of the Art International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 8-2 (2021) 703-742.
- [13] Z. Cui & al., Passivation behavior and surface chemistry of 2507 super duplex stainless steel in artificial seawater : Influence of dissolved oxygen and pH, *Corrosion Science*, 150 (2019) 218-234.
- [14] Z. Cui & al., Passivation Behavior and Surface Chemistry of 2507 Super Duplex Stainless Steel in Acidified Artificial Seawater Containing Thiosulfate, *Journal of The Electrochemical Society*, 164-13 (2017) C856.
- [15] H. Nahali, Effect of phosphate based inhibitor on the threshold chloride to initiate steel corrosion in saturated hydroxide solution, *Construction and Building Materials*, 50 (2014) 87-94.
- [16] Y. Yang & al., Effect of a brief post-weld heat treatment on the microstructure evolution and pitting corrosion of laser beam welded UNS S31803 duplex stainless steel, *Corrosion Science*, 65 (2012) 472-480.