
**Fabrication additive — Essais
non destructifs — Implantation
intentionnelle de défauts dans les
pièces métalliques**

*Additive manufacturing — Non-destructive testing — Intentionally
seeding flaws in metallic parts*

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO/ASTM TR 52906:2022](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a38ea73a-00e6-493b-a391-622789765aa9/iso-astm-tr-52906-2022)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a38ea73a-00e6-493b-a391-622789765aa9/iso-astm-tr-52906-2022>



Numéro de référence
ISO/ASTM TR 52906:2022(F)

© ISO/ASTM International 2022

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO/ASTM TR 52906:2022](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a38ea73a-00e6-493b-a391-622789765aa9/iso-astm-tr-52906-2022)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a38ea73a-00e6-493b-a391-622789765aa9/iso-astm-tr-52906-2022>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO/ASTM International 2022

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou un intranet, sans autorisation écrite soit de l'ISO à l'adresse ci-après, soit d'un organisme membre de l'ISO dans le pays du demandeur. Aux États-Unis, les demandes doivent être adressées à ASTM International.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11
Fax: +41 22 749 09 47
E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

ASTM International
100 Barr Harbor Drive, PO Box C700
West Conshohocken, PA 19428-2959, USA
Tél.: +610 832 9634
Fax: +610 832 9635
E-mail: khooper@astm.org
Web: www.astm.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
Introduction	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Termes abrégés	3
5 Défauts de FA types	4
6 Procédure de production de répliques	7
7 Approches d'implantation	7
7.1 Généralités	7
7.2 Implantation par CAO	8
7.3 Répliques de manipulation par procédé de FA	10
7.3.1 Généralités	10
7.3.2 Poudre non frittée piégée	11
7.3.3 Insertion manuelle d'inclusions à haute masse volumique	12
7.4 Introduction mécanique des répliques en postproduction	12
7.5 Signification et utilisation pour l'homogénéité	12
8 Manipulation du procédé de FA pour L-PBF et L-DED	14
8.1 Généralités	14
8.2 Manipulation des paramètres de la machine de FA	14
8.3 Approches applicables d'implantation de défauts en fonction du type de défaut souhaité	15
8.3.1 Généralités	15
8.3.2 Porosité ou vides (densité de puissance accrue)	15
8.3.3 Défauts liés à la surface	15
8.4 Approches applicables d'implantation de défauts en fonction du procédé de FA	16
8.5 Approches applicables d'implantation de défauts en fonction du matériau de FA	18
8.5.1 Généralités	18
8.5.2 Inclusions à haute densité	18
9 Approches applicables d'implantation de défauts en fonction de l'usinage post- traitement	18
9.1 Généralités	18
9.2 Usinage mécanique	18
9.3 Répliques d'usinage par électroérosion	19
9.4 Répliques par perçage laser	19
Bibliographie	21

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. En particulier, les différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO peuvent être notés. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/patents).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir le lien suivant: www.iso.org/iso/fr/avant-propos.

Le présent document a été élaboré par l'ISO/TC 261, *Fabrication additive*, en coopération avec le Comité F42 de l'ASTM, *Technologies de fabrication additive*, dans le cadre d'un accord de partenariat entre l'ISO et ASTM International dans le but de créer un ensemble commun de normes ISO/ASTM sur la fabrication additive et en collaboration avec le Comité Européen de Normalisation (CEN), Comité technique CEN/TC 438, *Fabrication additive*, conformément à l'Accord de coopération technique entre l'ISO et le CEN (Accord de Vienne).

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse www.iso.org/fr/members.html.

Introduction

Le présent document fournit des informations pour l'implantation intentionnelle de défauts dans les pièces fabriquées de manière additive, et complète l'ISO/ASTM TR 52905¹⁾.

Les différentes descriptions de fabrication de FA peuvent être trouvées facilement dans les normes publiées (voir l'ISO 17296-2) et les articles scientifiques.

Le jargon couramment utilisé dans la littérature décrivant les défauts du procédé de FA métallique comprend le «balling», les «feux d'artifice», la «fumée» et ils ne sont souvent pas spécifiques à la morphologie du défaut et souvent résultent de mécanismes de formation très différents.

Lors de la définition de termes spécifiques aux défauts de FA métallique, il peut être utile d'examiner certains exemples liés à la technologie du soudage.

Le présent document est destiné à la création de répliques faisant l'objet d'une implantation qui aident l'utilisateur à comprendre non seulement la caractérisation des défauts réels en ce qui concerne la morphologie physique, mais également les matériaux et les mécanismes de formation, l'emplacement et l'orientation. En complément, les principes fondamentaux des procédés de création de la réplique [par exemple, PBF ou DED en ce qui concerne les sources de chaleur, faisceau d'électrons (EB), faisceau laser (LB) ou AP (procédés d'arc) nécessitent également d'être pris en compte]. L'implantation intentionnelle pour produire des répliques présentant des défauts peut correspondre au caractère du défaut réel le plus fidèlement possible.

Les photomicrographies de référence ou les images d'essais non destructifs incluses dans le présent document ne sont en aucun cas à être interprétées comme des spécifications. Ces photomicrographies de référence et ces images d'essais non destructifs sont proposées principalement pour permettre des exemples de «défauts» ou des images reproduites de ceux-ci. Elles peuvent être utilisées pour la comparaison de rapports. L'implantation des défauts sera discutée sans référence à une pièce, un emplacement ou une dimension spécifique. L'alliage du matériau sera fourni tel qu'il est connu. Pour certains défauts, l'alliage du matériau peut ne pas être aussi important, par exemple, un pore peut se trouver dans un nombre quelconque d'alliages. Il peut être noté qu'à l'heure actuelle, aucune méthode éprouvée n'existe pour l'implantation contrôlée et reproductible de décollements intimes (quelquefois connus comme «kissing bond») - lorsque deux surfaces sont en contact intime ou proche, mais avec une adhérence compromise - dans des pièces de FA de sorte que cette caractéristique est, par conséquent, actuellement hors du domaine d'application.

Le présent document n'aborde pas les principes fondamentaux de chaque procédé, mais identifie plutôt les paramètres de chaque procédé qui peuvent conduire à l'implantation intentionnelle de structures de FA.

1) En cours de préparation. Stade au moment de la publication ISO/ASTM DTR 52905:2022.

Fabrication additive — Essais non destructifs — Implantation intentionnelle de défauts dans les pièces métalliques

1 Domaine d'application

Le présent document est destiné à servir de bonne pratique pour l'identification et «l'implantation» de répliques de défauts détectables de manière non destructive par les procédés PBF et DED en alliage métallique. Trois catégories d'implantation sont décrites:

- a) les défauts du procédé par la conception CAO;
- b) la manipulation des paramètres de fabrication;
- c) la fabrication soustractive.

Cela comprend les défauts présents dans les matériaux tels que déposés, dans les matériaux traités par post-traitement thermique ou par HIP, et des défauts rendus détectables par les opérations de post-traitement. Les aspects géométriques ou les mesures ne font pas l'objet du présent document.

ATTENTION — Le présent document n'a pas pour but de traiter tous les problèmes de sécurité, le cas échéant, liés à son application. Il est de la responsabilité de l'utilisateur du présent document d'établir des pratiques de sécurité et d'hygiène appropriées, et de déterminer l'applicabilité des restrictions réglementaires avant utilisation.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO/ASTM 52900, *Fabrication additive — Principes généraux — Fondamentaux et vocabulaire*

ASTM B243, *Standard Terminology of Powder Metallurgy*

ASTM E7, *Standard Terminology Relating to Metallography*

ASTM E1316, *Standard Terminology for Nondestructive Examinations*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO/ASTM 52900, l'ASTM E7, l'ASTM B243, l'ASTM E1316 ainsi que les suivants s'appliquent.

NOTE Les termes relatifs aux défauts de la technologie de FA métallique sont logiquement répartis entre les catégories de procédés PBF et DED.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

3.1

coupon

pièce de matériau à partir de laquelle un échantillon est préparé

3.2

classification du défaut

approche de classification qui fournit un système de haut niveau basé sur une caractéristique primaire ou une combinaison de caractéristiques

Note 1 à l'article: La classification du défaut peut comprendre des types de défauts similaires qui ont été créés différemment.

3.3

inclusion

matériau étranger retenu de mécaniquement

Note 1 à l'article: Les inclusions sont généralement des oxydes, des nitrures, des hydrures, des carbures, ou des combinaisons de ceux-ci, formés en raison de la contamination du gaz de la chambre, ou déjà présents dans la poudre métallique.

3.4

trou de serrure

type de porosité caractérisé par une dépression circulaire formée en raison de l'instabilité de la cavité de vapeur pendant le traitement

3.5

pore

cavité inhérente ou induite à l'intérieur d'une particule de poudre ou à l'intérieur d'un objet non connecté à une surface extérieure

3.6

porosité

présence de petits vides dans une pièce, la rendant moins que totalement dense

3.7

réplique

condition manipulée intentionnellement (défaut) pour servir d'« implant » dans un *coupon* (3.1), représentant un type de défaut connu

3.8

implantation

fait de créer intentionnellement des défauts, par CAO ou manipulation de paramètres de traitement désignés, qui entraîne la mise en place de la *réplique* (3.7) prévue ou le fait de créer intentionnellement une *réplique* (3.7) par l'insertion d'un objet étranger

3.9

frittage

procédé de chauffage d'une poudre métallique compactée pour augmenter la masse volumique et/ou améliorer les propriétés mécaniques par diffusion à l'état solide

3.10

défaut lié à la surface

défaut qui se trouve dans le corps du matériau mais dont les extrémités atteignent la surface du matériau

3.11

non frittée

poudre non affectée, ou affectée mais non entièrement consolidée, pendant le procédé d'impression de fabrication additive

4 Termes abrégés

CAO	Conception assistée par ordinateur
CNC	Commande numérique par ordinateur
DDC (ductility-dip cracking)	Fissuration par chute de ductilité
DED (directed energy deposition)	Dépôt de matière sous énergie concentrée
EB-DED (electron beam directed energy deposition)	Dépôt de matières sous énergie concentrée par faisceau d'électrons
DR (digital radiography (non-film))	Radiographie numérique (non film)
EB-PBF (Electron Beam Powder Bed Fusion)	Fusion sur lit de poudre par faisceau d'électrons
EDM (electrode discharge machining)	Usinage par électroérosion
FA	Fabrication additive
GMA-DED (gas metal arc directed energy deposition)	Dépôt de matière sous énergie concentrée par arc avec électrode fusible
HAZ (Heat Affected Zone)	Zone thermiquement affectée
HIP (hot isostatic pressing)	Compression isostatique à chaud
LC (Liquation Crack)	Fissuration par liquation
L-DED (laser directed energy deposition)	Dépôt de matière sous énergie concentrée par laser
L-PBF (laser beam powder bed fusion)	Fusion sur lit de poudre par faisceau laser
MB (Base Metal)	Métal de base
NDE (non-destructive evaluation)	Évaluation non destructive
NDT (Non-destructive Testing)	Contrôles non destructifs
OEM (original equipment manufacturer)	Fabricant d'origine
PBF (powder bed fusion)	Fusion sur lit de poudre
PSD (particle size distribution)	Distribution granulométrique
RT (radiography testing (film))	Essais radiographiques (film)
RQI (Representative Quality Indicator)	Indicateur représentatif de qualité
SC (Solidification Crack)	Fissure de solidification
T_m (temperature melting point)	Température de fusion
WM (weld metal)	Métal fondu
XCT (X-ray Computed Tomography)	Tomographie par rayons X

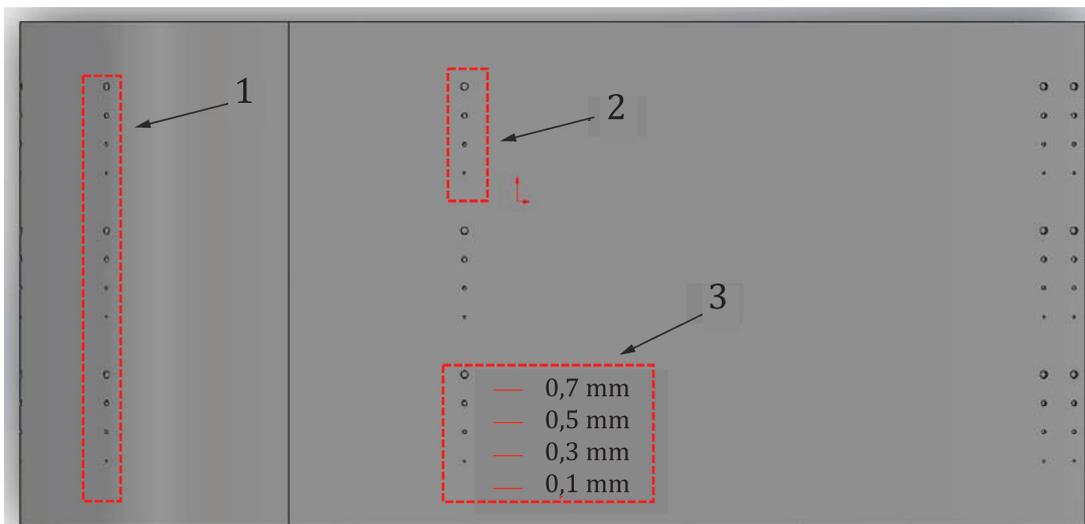
5 Défauts de FA types

En général, les défauts de fabrication additive dans les matériaux fabriqués en utilisant des paramètres optimisés présentent de petits défauts sphériques. Les fabrications avec des paramètres moins développés peuvent présenter un trou de serrure ou des pores angulaires plus grands. Cependant, les composants de grande valeur font souvent l'objet d'un contrôle des défauts à un niveau déterminé par l'analyse des fractures telles que celles décrites ci-dessous. La capacité de créer des répliques pour soutenir la capacité de détection des NDT de structures complexes est unique à la fabrication additive et peut être envisagée lorsque les techniques d'inspection standard ne suffisent pas à assurer la fiabilité de l'inspection.

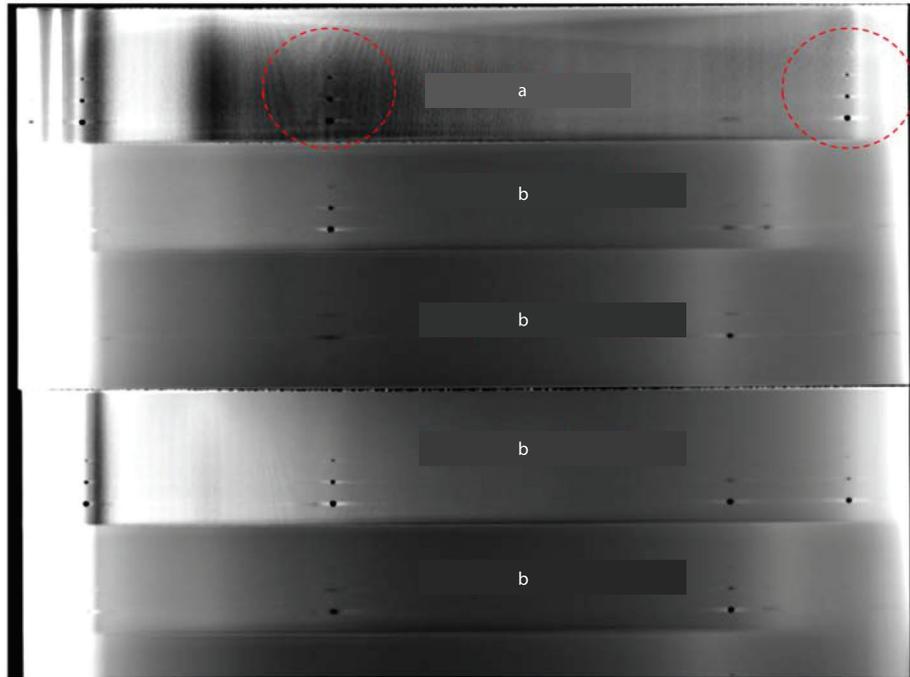
L'apparition de défauts non intentionnels au cours de la fabrication par fabrication additive est une possibilité. La classification des défauts a été établie dans l'ISO/ASTM TR 52905, tant pour la L-PBF que le DED. Ces défauts sont: les défauts de couche (manque horizontal de fusion), les couches croisées (manque vertical de fusion), la poudre non consolidée, la poudre piégée, l'inclusion, le déplacement de couche, la porosité et le vide; par ailleurs la fusion incomplète, le trou et la fissure. Il est important de souligner que certains défauts du DED sont similaires à ceux produits pendant le procédé de soudage, alors que pour la L-PBF, certains défauts sont uniques.

En complément des défauts créés pour reproduire des anomalies d'origine naturelle, des répliques peuvent être générées pour servir de cibles qui peuvent être utilisées pour comprendre les rayons X, les ultrasons ou d'autres capacités de NDT (voir la [Figure 1](#)). Il est important que le fabricant de ces répliques comprenne la physique de la méthode de NDT pour laquelle les défauts seront utilisés. Les démonstrations de capacités comprennent la détection dans une géométrie complexe spécifique telle qu'un indicateur représentatif de la qualité (RQI, Representative Quality Indicator) conformément à l'ASTM E1817^[5], ou la détection dans une orientation spécifique par rapport au faisceau de rayonnement. Cette réplique fait l'objet d'une «implantation» intentionnelle en fonction des besoins des démonstrations. La détection par ultrasons peut trouver une application grâce à l'approche technique de l'ASTM E127^[3]. En complément, certaines de ces méthodes d'implantation sont mises en œuvre et les capacités de détection de sept méthodes de NDT sont évaluées dans l'ISO/ASTM TR 52905.

Il a été constaté que la taille, l'orientation et l'emplacement des répliques peuvent être conçus dans le modèle de fabrication pour créer des formes (sphères, cubes et prismes rectangulaires), des tailles (longueurs et diamètres) et des profondeurs. Un exemple est illustré à la [Figure 1](#) où des défauts intégrés ont été conçus dans la cale gradins à l'aide d'un logiciel de CAO et comme ils sont intégrés sans évent d'évacuation de la poudre, ils sont remplis avec de la poudre non fondue (poudre non consolidée/poudre piégée).



a) Modèle CAO montrant l'ensemble des amas et les dimensions des trous dans le profil aérodynamique



b) Balayage XCT montrant la visibilité des répliques implantées à différents endroits et celles qui ne sont pas visibles

Légende

1 ensembles de trous comportant 3 amas

2 nombre de trous par amas

3 dimensions des trous par amas

a Les 4 sont visibles.

b \varnothing 0,1 mm non visible.

Figure 1 — Exemple d'un RQI de profil aérodynamique générique fabriqué sur Ti-6Al-4V

Grâce à des ajustements des paramètres de fabrication optimaux, les répliques peuvent fournir un paramètre de fabrication hors-norme souhaité. La forme de la réplique peut être plane, elliptique, arrondie ou présenter une autre configuration modélisée. Deux de ces paramètres de fabrication hors-normes pour l'implantation de répliques sont la réduction de la puissance du laser et l'augmentation de la largeur du tracé au-delà de la valeur optimale.

Ces deux types de répliques peuvent être utilisés pour montrer les potentiels de détection des différentes méthodes de NDT. Par exemple, les balayages de tomographie informatisée des répliques d'implantation ont donné lieu à des changements de masse volumique du matériau différents mais détectables, créés par chaque ajustement du paramètre de fabrication. Le niveau de détail et les différentes vues possibles par tomographie informatisée sont illustrés dans la [Figure 2](#) et la [Figure 3](#). Les images de ces deux figures ne sont pas comparatives, car elles illustrent uniquement les différences de détails quand différents grossissements et méthodes sont utilisés.