



HAL
open science

Investigation par diffraction des neutrons du gradient de contraintes résiduelles dans des aciers élaborés par fusion laser sur lit de poudre

David Gloaguen, Baptiste Girault, Bruno Courant, Pierre-Antoine Dubos, Marie-José Moya, Maxime Limousin, Daniel Marcos, Saurabh Kabra, Winfried Kockelmann, Joana Rebelo- Kornmeier

► To cite this version:

David Gloaguen, Baptiste Girault, Bruno Courant, Pierre-Antoine Dubos, Marie-José Moya, et al.. Investigation par diffraction des neutrons du gradient de contraintes résiduelles dans des aciers élaborés par fusion laser sur lit de poudre. Journées Annuelles de la Société Française de Métallurgie et de Matériaux (JA SF2M 2019), Mar 2019, Paris, France. hal-04295584

HAL Id: hal-04295584

<https://hal.science/hal-04295584>

Submitted on 20 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.

Investigation par diffraction des neutrons du gradient de contraintes résiduelles dans des aciers élaborés par fusion laser sur lit de poudre

David Gloaguen^a, Baptiste Girault^a, Bruno Courant^a, Pierre-Antoine Dubos^a, Marie-José Moya^a, Maxime Limousin^b, Daniel Marcos^c, Saurabh Kabra^d, Winfried Kockelmann^e, Joana Rebelo-Kornmeier^f

^aInstitut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, GeM, Université de Nantes, Saint-Nazaire,

^bLaboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, École Centrale de Lyon, Ecully, ^cCentre des Matériaux, MINES ParisTech, Corbeil-Essonnes, France, ^dENGIN-X, ^eGEM, ISIS, STFC Rutherford Appleton Laboratory, Chilton Didcot, Royaume-Uni, ^fSTRESS-SPEC, Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, Garching, Allemagne

Résumé

La diffraction neutronique est une méthode non destructive pertinente pour l'analyse de l'état de contrainte interne des pièces élaborées par fusion sélective par laser (SLM). Des vitesses de refroidissement élevées et les gradients de températures associés pendant la fabrication entraînent des champs de contraintes résiduelles importants. Celles-ci ont une influence importante sur les performances mécaniques. Dans le cadre de ces travaux, des mesures neutroniques ont été effectuées sur des échantillons en forme de cubes préparés par SLM pour deux aciers (martensite et austénite). La diffraction des neutrons a été utilisée afin de déterminer une cartographie du tenseur complet des contraintes résiduelles sur des points présentant différents environnements et historiques thermiques, où une forte évolution des composantes du tenseur des contraintes, notamment de cisaillement, est observée.

Introduction

La fusion sélective par laser (SLM) présente un fort potentiel industriel car elle permet, à partir de lits de poudres métalliques, de produire une pièce monolithique dense de géométrie complexe. Le gradient de température élevé résultant de l'apport d'énergie laser localement concentré conduit à des champs de température fortement hétérogènes menant à l'établissement de gradients de contraintes résiduelles, la formation de fissures et potentiellement à la déformation irréversible des pièces élaborées. Les contraintes mécaniques induites et les gradients de texture résultent des phénomènes physiques interdépendants (aspects métallurgiques, thermiques, mécaniques et fluidiques) survenant au cours du processus ainsi que des différents environnements et historiques thermiques des positions considérées.

Cette étude se concentre sur les contraintes résiduelles établies dans deux alliages à base de fer préparés par SLM ayant des propriétés mécaniques différentes afin de fournir un ensemble complet de données, nécessaire pour une meilleure compréhension de ces phénomènes. La diffraction des neutrons a été utilisée afin de déterminer,

pour la première fois, une cartographie du tenseur complet des contraintes résiduelles (ENGIN-X, ISIS, Stress-Spec, MLZ) dans deux aciers préparés par procédé SLM, l'un élastiquement isotrope (martensitique) et l'autre présentant une anisotropie élastique (austénitique), et ce, sans a priori sur la forme du tenseur. Plus largement, ce travail se concentre sur les contraintes résiduelles se développant dans les alliages fabriqués par SLM, et notamment leurs évolutions par rapport à la position relative de la pièce i.e. sur des points présentant différents environnements et historiques thermiques, où une forte évolution des composantes du tenseur des contraintes, notamment de cisaillement, est observée. À cette fin, des caractérisations complémentaires de texture (GEM-ISIS) ont été effectuées sur un échantillon austénitique pour une analyse plus complète.

Matériaux et méthodologie

Des échantillons d'acier austénitique (X15TN) et martensitique (42CD4) de forme cubique ($10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$) ont été fabriqués par SLM. Les principaux paramètres du procédé sont résumés dans le tableau I.

Tableau I. Paramètres du procédé SLM

Matériau	Machine	Puissance laser	Vitesse du laser	Stratégie	Direction de lasage
X15TN	EOS M270	195 W	800 mm.s ⁻¹	Aller / retour	rotation de 67° à chaque couche
42CD4	EOS M290	150 W	450 mm.s ⁻¹	Aller / retour	rotation à 90° en XY

Des analyses de contraintes résiduelles par diffraction des neutrons (DN) ont été effectuées sur les 2 types d'échantillons et pour 9 points de mesure représentatifs des cubes (cf. Figure 1). Le tableau II résume les conditions opératoires utilisées pour l'analyse du tenseur complet de contraintes pour chaque acier.

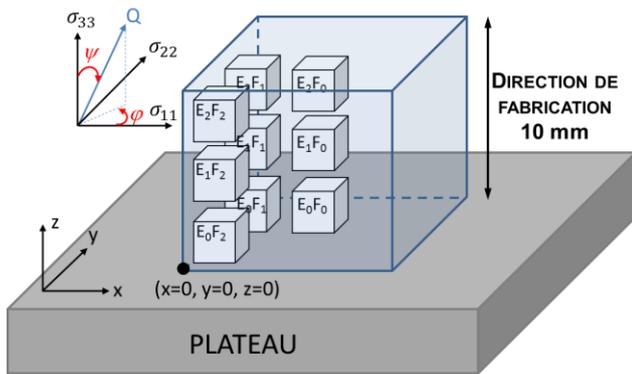


Figure 1. Schéma des échantillons étudiés en diffraction avec les points de mesure associés

Tableau II. Paramètres opératoires utilisés dans l'analyse des contraintes par diffraction

	Acier X15TN ligne ENGIN-X, ISIS	Acier 42CD4 ligne STRESS- SPEC, FRMII
Rayonnement	Temps de vol	1,55 Å
Volume sondé	2×2×2 mm ³	2×2×2 mm ³
Raies de diffraction {hkl}	{111} {200} {220} {311}	{211}
Directions de mesure Q	36 = 4 {hkl}×9 (φ, ψ)	24 = 1 {hkl}×24 (φ, ψ)

La déformation mesurée par DN $\langle \varepsilon(hkl, \varphi, \psi) \rangle_{V_d}$ peut être reliée à l'état de contraintes σ_{ij} dans l'agrégat polycristallin en utilisant [1] :

$$\langle \varepsilon(hkl, \varphi, \psi) \rangle_{V_d} = F_{ij}(hkl, \varphi, \psi) \sigma_{ij}$$

Les F_{ij} sont des coefficients appelés Constantes Elastiques Radiocristallographiques Généralisées. Elles permettent de traduire, en toute rigueur, la dépendance entre les déformations mesurées et l'état de contrainte dans le cas général d'un polycristal texturé morphologiquement et cristallographiquement. Ces constantes ont été déterminées par un modèle autocohérent élastique en tenant compte de l'anisotropie élastique et de la texture [2].

Résultats expérimentaux

Les distributions des composantes des contraintes normales σ_{ii} et de cisaillement σ_{ij} sont présentées, respectivement, dans les Figures 2 et 3 pour la colonne centrale F_0 (Fig. 1) dans le cas de l'acier X15TN. Les valeurs les plus importantes se trouvent proche de l'interface avec le support (E_0F_0) avec des valeurs variant de $\sigma_{33} = -690$ MPa à $\sigma_{11} = -220$ MPa. Une homogénéisation et une minimisation des valeurs des composantes en proche surface est constatée (E_3F_0) avec des valeurs variant alors de +96 MPa à +161 MPa. Un comportement similaire est observé pour les composantes de cisaillement (Fig. 3). Les contraintes σ_{ij} sont élevées à l'interface avec le support avec $\sigma_{23} = +449$ MPa. On constate une réduction de l'amplitude du gradient de contrainte accompagnée d'une homogénéisation et d'une minimisation des valeurs des composantes avec le nombre de face à l'air. Ceci est particulièrement visible dans la colonne F_2 . σ_{33} varie de -73 MPa (E_0F_2) à +272 MPa (E_2F_2) alors que la composante de cisaillement σ_{23} évolue de -59 à -8 MPa.

Le développement de contraintes résiduelles dans les pièces SLM est principalement causé par des vitesses de refroidissement élevées et un gradient de température élevé, propre au procédé. L'apparition des contraintes résiduelles est donc la conséquence des mécanismes du gradient thermique (TGM : Temperature Gradient Mechanism) et du refroidissement des couches supérieures fondues [3]. Les surfaces externes des pièces SLM ont tendance à être en tension ou en faible compression alors que le volume interne est en compression. Les contraintes résiduelles dans la pièce SLM peuvent être réduites et homogénéisées par une optimisation des paramètres du procédé (préchauffage, stratégie de balayage). Une cartographie pertinente des valeurs de contraintes à travers toute la profondeur doit prendre en compte le tenseur de contraintes complet composé de 6 composantes de contraintes, sinon les valeurs de contraintes déterminées pourraient être faussées en faisant une erreur entre l'état de compression et de tension.

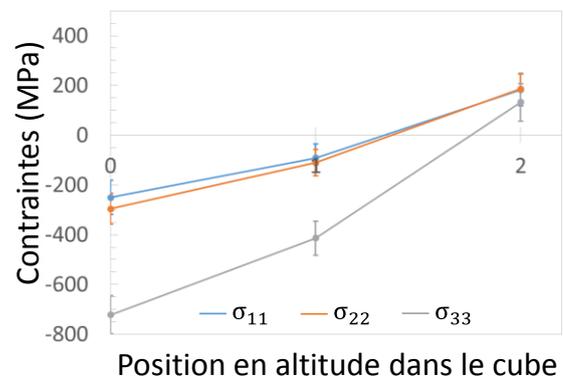


Figure 2. Evolution des contraintes normales obtenues en diffraction des neutrons pour la colonne F_0 en fonction de la position suivant z

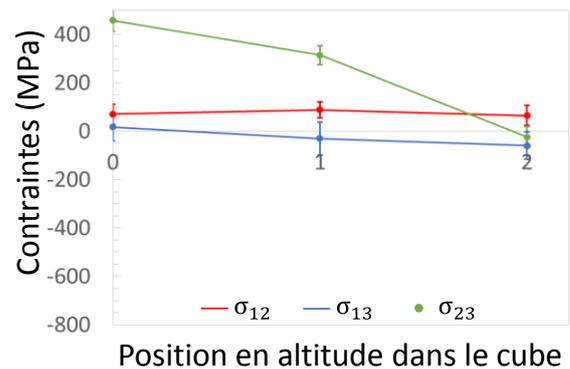


Figure 3. Evolution des contraintes de cisaillement obtenues en diffraction des neutrons pour la colonne F_0 en fonction de la position suivant z

Références

- [1] V. Hauk, Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods, Elsevier, Amsterdam, 1997.
- [2] D. Gloaguen, T. Berchi, E. Girard, R. Guillén: J. Nucl. Mater., 2008, vol. 374, 138-146.
- [3] P. Mercelis, J.-P. Kruth: Rapid Prototyping J., 2006, vol. 12, 254-265.