

Caractérisation de la fatigue sur des aciers à forte teneur en chrome à partir des méthodes de CND électromagnétiques

Bhaawan Gupta^{1,2,3}, Benjamin DUCHARNE¹, Gael SEBALD², Tetsuya Uchimoto³

¹Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité – INSA de Lyon, Villeurbanne, France.

²ELyTMaX UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University, Int. Joint Unit, Tohoku University, Sendai, Japan.

³Institute of Fluid Science, Tohoku University, Sendai, Japan

RESUME – Les méthodes de contrôle non destructives électromagnétiques jouent un rôle majeur dans l'évaluation de l'intégrité structurale des matériaux ferromagnétiques. Il devient extrêmement important de vérifier l'évolution de la dégradation de l'état des matériaux utilisés dans les environnements sensibles tels que les centrales thermiques/nucléaires, où les matériaux sont soumis à des dommages de fluage importants. Jusqu'à présent, aucune technique NDT n'a été établie pour caractériser l'évolution du fluage dans les matériaux ferromagnétiques. Dans cet article, un aperçu et une comparaison de trois différentes techniques d'évaluation non-destructive électromagnétiques appliquées sur des aciers à haute teneur en chrome ont été testés pour comprendre l'évolution de fluage en termes de changements microstructuraux tels que les précipitations, les dislocations et la taille des grains. En outre, pour quantifier les mesures empiriques, une technique de modélisation est proposée pour chaque méthode appliquée. Les paramètres du modèle sont dérivés en fonction de chaque technique et sont ensuite corrélés aux informations microstructurales.

Mots-clés—*Perméabilité incrémentale, hystérésis magnétique, bruit magnétique de Barkhausen, contrôle non-destructif électromagnétique, dégradation, fluage, modèle de Jiles-Atherton.*

1. INTRODUCTION

Dans les centrales thermiques, les matériaux utilisés dans les turbines et les chaudières sont exposés à des températures et des pressions énormes [1]. Cette exposition continue peut entraîner des changements microstructuraux dans les matériaux qui, s'ils ne sont pas surveillés à temps, et provoquer des incidents aux conséquences catastrophiques.

Les méthodes de NDT classiques recherchent des dommages physiques dans les matériaux qui apparaissent en réalité à un stade déjà avancé. Il est légitime de supposer qu'avant l'apparition d'une fissure, les matériaux subissent des changements microstructuraux qui, s'ils sont surveillés en continu, peuvent permettre d'éviter de tragiques incidents. Pour surveiller ces changements microstructuraux, des techniques d'imagerie telles que de la microscopie électronique à balayage (SEM) ou de la diffraction de rétrodiffusion d'électrons peuvent être utilisées [2]. En revanche, l'utilisation de telles techniques, impliquent des échantillons qui doivent avoir une forme et une taille spécifiques, et donc un effort important de préparation des échantillons. L'analyse d'imagerie SEM et EBSD fournit une

information très détaillée, mais nécessite un coût d'équipement important. Ces techniques sont incontournables à l'échelle du laboratoire, mais dès lors qu'il s'agit d'applications in situ, l'utilisation de ces équipements fixes semble inconcevable. Une solution alternative pour les aciers ferromagnétiques vient de l'utilisation de leurs signatures magnétiques et de la corrélation à la microstructure des matériaux.

Le ferromagnétisme dans l'acier provient de sa composante principale: le fer. Les matériaux ferromagnétiques sont caractérisés par une forte interaction entre les atomes voisins. Un équilibre est atteint via la minimisation d'énergies locales (énergie d'échange, énergie d'anisotropie, énergie magnéto-élastique, énergie magnéto- statique ...) [3]. L'une des principales conséquences de ces interactions est l'alignement des moments atomiques magnétiques adjacents. L'organisation du domaine magnétique unique n'est pas la configuration d'énergie optimale. En revanche, cette configuration peut être obtenue à partir d'une organisation constituée de micro volumes homogènes également appelés domaines de Weiss et à travers desquels la magnétisation est constante. Cette micro organisation magnétique est modifiée sous l'influence d'un champ d'excitation externe [4]. Si ce champ reste faible, les domaines magnétiques caractérisés par des moments magnétiques de directions et d'orientations proches du champ magnétique externe grandissent. Un état magnétique unique peut même être atteint pour une excitation de champ magnétique beaucoup plus élevée. La distorsion de la distribution du domaine magnétique sous l'influence d'un champ magnétique externe n'est pas un processus lisse. Les mouvements des murs de domaine sont fortement stochastiques. Ils correspondent à des oscillations et des sauts entre sites d'encrage (limites de grain, interfaces, inclusions, précipités, dislocations...). Les défauts microstructuraux agissent comme des barrières énergétiques locales empêchant une magnétisation facile et créant des retards entre l'excitation magnétique et la réponse de l'échantillon ferromagnétique. Ces retards sont observables en traçant un cycle d'hystérésis magnétique standard, variation de l'état d'induction magnétique B en fonction du champ magnétique externe de surface H.

Toutes ces interactions locales donnent aux matériaux ferromagnétiques, une signature magnétique qui dépend fortement de la composition et de la distribution de la

microstructure. Elles donnent aux mesures magnétiques une sensibilité énorme quant à son évolution temporelle et en font un outil particulièrement sensible pour les tests non destructifs de la dégradation du type fluage. Les aciers ferritiques à haute teneur en chrome (12 %) sont couramment utilisés pour les cuves des centrales électriques hautes températures ainsi que pour les pales du rotor de turbine à vapeur et les pales de compresseur de turbine à gaz [5]. Le chrome permet notamment d'augmenter la résistance à la corrosion. Dans cette étude, dix échantillons d'aciers ferritiques à haute teneur en chrome, provenant du même lot, ont été vieillies dans des conditions incrémentales de température et de stress.

Sample number	Stress [MPa]	Temp [°C]	Test time [h]
0	0	0	0.0
1	343	550	281.8
2	343	550	785.6
3	343	550	2205.7
4	201	600	255.6
5	201	600	763.9
6	201	600	1725.9
7	98	650	256.3
8	98	650	789.6
9	98	650	1736.8

Tab. 1 – Liste des 10 échantillons fatigués.

L'idée derrière ce processus de vieillissement spécifique est de reproduire les conditions de travail et d'observer les variations micro-structurelles pour différents niveaux de dégradation. Avant les tests magnétiques, ces dix échantillons ont été soumis à une analyse micro structurelle fine. De l'imagerie par microscopie électronique à balayage (SEM) ainsi que par diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD) a été réalisées sur la surface transversale de tous les échantillons [6]-[8]. A partir de ces images, un ensemble de quatre paramètres a été collecté: le coefficient de désorientation moyenne (KAM), la dureté, la taille des grains et le nombre de précipitations. Les principaux résultats de cette analyse microstructurale sont représentés dans la version étendue de cet article. Ces résultats seront utilisés comme référence microstructurale pour établir le lien avec les propriétés magnétiques.

2. CARACTERISATION MAGNETIQUE

Dans cette étude, trois signatures expérimentales magnétiques différentes ont été explorées pour tester le plus grand nombre possible d'indicateurs magnétiques et découvrir lesquels sont les plus sensibles au fluage. Même si l'utilisation de bobines encerclantes est dans la plupart des cas incompatible avec l'exploitation industrielle, le besoin de résultats expérimentaux fiables et standardisés implique de commencer cette série de mesure par les cycles d'hystérésis classiques B(H). Nous avons testé ensuite des mesures locales de perméabilité incrémentale et finalement de bruit de Barkhausen. Une fois l'ensemble de ces mesures effectuées, une corrélation fine a été établie entre les indicateurs magnétiques et les observations micro-structurelles, ces corrélations seront présentées dans la version étendue de l'article.

3. MODELISATION MAGNETIQUE

L'utilisation industrielle actuelle de l'évaluation électromagnétique repose principalement sur l'exploitation de données empiriques obtenues sur des échantillons d'étalonnage connus et dans des conditions de mesure bien maîtrisées (pression, température). Les seuils d'acceptation / rejet, les valeurs cibles et les bases de données de reconnaissance de formes sont basés sur ces informations. À l'heure actuelle, aucun outil de modélisation n'est disponible pour décrire complètement la relation entre les paramètres mesurés et les propriétés du matériau cible. L'effort d'étalonnage et la compréhension des

phénomènes pourraient être considérablement réduits si de tels modèles étaient connus et développés. Dans cette étude, un outil de simulation a été développé pour simuler les situations de caractérisation magnétique introduites dans la partie précédente. L'objectif est de proposer un outil de simulation basé sur un nombre limité de paramètres, présentant une signification physique et étant suffisamment flexible pour donner des résultats de simulation cohérents dans les trois situations expérimentales testées dans cette étude. De nombreux modèles ferromagnétiques existent dans la littérature, la plupart d'entre eux ont été développés pour prendre en compte l'hystérésis ferromagnétique dans le processus de dimensionnement des appareils électromagnétiques (moteurs électriques, mémoires ferromagnétiques...) [9]. La plupart de ces modèles ne sont clairement pas adaptés à l'ensemble des situations expérimentales que nous souhaitons simuler. Certains comme le modèle de Preisach reposent sur des fonctions de distribution quasiment impossibles à interpréter physiquement [10]. D'autres comme le modèle Mel'gui se limitent à l'enveloppe d'hystérésis majeure. Après plusieurs investigations, il est devenu clair que compte tenu des fortes restrictions de simulation imposées par les trois situations expérimentales, la seule option possible que nous avions était de travailler avec le modèle de Jiles-Atherton et de l'adapter si nécessaire [11]. Dans la version finale de cet article, les paramètres de modélisation seront corrélés aux paramètres magnétiques et aux paramètres micro-structuraux.

4. REFERENCES

- [1] G. Sposito, "A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels", NDT&E Int. (2010).
- [2] K.W.J. Treadaway, "Studies of steel fracture by transmission and scanning electron microscopy, Building Research Station, Ministry of Public Building and Works", Garston, Watford, Herts, Journal of Microscopy, Vol. 89, Pt 2, April 1969, pp. 283-286.
- [3] E. Du Trémolet de Lacheisserie, "Magnetism—Fundamentals, Materials and Applications", Springer, Berlin, 2002.
- [4] B. Ducharme, M.Q. Le, G. Sebald, P.J. Cottinet, D. Guyomar, Y. Hebrard, "Characterization and modeling of magnetic domain wall dynamics using reconstituted hysteresis loops from Barkhausen noise", J. of Mag. And Mag. Mat., pp. 231-238, 2017.
- [5] Y. Mutoh, M. Helmi Attia, Waterhouse RB, editors. "Improving fretting fatigue strength at elevated temperatures by shot peening in steam turbine steel, standardization of fretting fatigue test methods and equipment", ASTM STP 1159. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, pp. 119–209, 1992.
- [6] B. Gupta, T. Uchimoto, B. Ducharme, G. Sebald, T. Miyazaki, T. Takagi, "Magnetic incremental permeability non-destructive evaluation of 12 Cr-Mo-W-V Steel creep test samples with varied ageing levels and thermal treatments", NDT & E Int., vol. 104, pp. 42-50, 2019.
- [7] B. Gupta, B. Ducharme, T. Uchimoto, G. Sebald, T. Miyazaki, T. Takagi, "Non-destructive testing on creep degraded 12% Cr-Mo-W-V ferritic test samples using Barkhausen noise", J. of Mag. And Mag. Mat., vol. 498, pp. 166102, 2020.
- [8] B. Gupta, B. Ducharme, T. Uchimoto, G. Sebald, T. Miyazaki, T. Takagi, "Physical Interpretation of the Microstructure for aged 12 Cr-Mo-W-V Steel Creep Test Samples based on Simulation of Magnetic Incremental Permeability", J. of Mag. and Mag. Mat., vol. 486, 2019.
- [9] M. A. Raulet, B. Ducharme, J.P. Masson, and G. Bayada, "The magnetic field diffusion equation including dynamic hysteresis: a linear formulation of the problem", IEEE Trans. on Mag., vol. 40, n° 2, pp. 872 – 875, 2004.
- [10] B. Zhang, B. Gupta, B. Ducharme, G. Sebald, T. Uchimoto, "Preisach's model extended with dynamic fractional derivation contribution", IEEE Trans. on Mag., vol. 54, iss. 3, 2017.
- [11] B. Zhang, B. Gupta, B. Ducharme, G. Sebald, T. Uchimoto, "Dynamic magnetic scalar hysteresis lump model, based on Jiles-Atherton quasi-static hysteresis model extended with dynamic fractional derivative contribution", IEEE Trans. on Mag, iss. 99, pp. 1-5, 2018.