

Perméabilité Incrémentale Magnétique pour l'évaluation non-destructive d'aciers chromés, modélisation et caractérisation.

Bhawaan Gupta^{1,2,3}, Benjamin Ducharne², Tetsuya Uchimoto³, Gael Sebald²

¹Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité – INSA de Lyon
Bât. Gustave FERRIE, 8 rue de la physique, 69621 Villeurbanne cedex, France

²ELyTMAX UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University,
International Joint Unit, Tohoku University, Sendai, JAPAN

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

RESUME – Dans le milieu industriel les techniques de contrôle non-destructif électromagnétique sont de plus en plus utilisées pour l'évaluation de l'état de vieillissement, l'état de fluage et la distribution des contraintes internes résiduelles au sein des matériaux. Ces techniques permettent de comprendre l'évolution des propriétés physiques/mécaniques d'un échantillon à partir de la mesure de l'évolution des grandeurs magnétiques à travers le matériau. Dans cet article, la méthode dite de la perméabilité incrémentale magnétique est appliquée pour tester différents échantillons (acier à fort pourcentage de chrome) qui ont subi des cycles d'usures différents. Un modèle à constante localisée de l'hystérésis magnétique et dont les paramètres dépendent de l'état mécanique du matériau est également proposé pour comprendre les phénomènes observés.

Mots-clés— *Perméabilité incrémentale, matériaux ferromagnétiques, modèle de Jiles-Atherton.*

1. INTRODUCTION

Dans le domaine de l'usinage industriel, toute pièce métallique présente des contraintes résiduelles à la sortie d'une chaîne de production, ce qui impacte leur durée de vie. Les contraintes résiduelles sont fortement corrélées aux mécanismes de défaillances (processus de fatigue par exemple), et ont une influence directe sur les performances mécaniques. La mise au point d'une méthode non-destructive pour l'évaluation de ces micro-contraintes résiduelles locales est fortement attendue [1][2]. L'objectif de cette étude est de développer une méthode nouvelle non destructive couplant résultats expérimentaux et résultats de simulation capable d'évaluer ces micro-contraintes résiduelles locales. Différentes méthodes existent pour évaluer les micro-contraintes résiduelles, parmi ces méthodes, les techniques non destructives électromagnétiques semblent les plus fiables. En revanche, de nombreux verrous technologiques restent à débloquent pour une application généralisée de ces méthodes. L'évaluation électromagnétique non destructive est basée sur la réponse micro-magnétique de l'échantillon testé (fortement dépendante des propriétés mécaniques locales : microstructure, contraintes résiduelles) sous l'effet d'un champ magnétique externe.

Pour des matériaux conducteurs électriquement, la technique des courants de Foucault peut être appliquée, bien que la

résolution (spatiale et latérale) soit limitée et la détermination des contraintes micro-résiduelles quasi impossible. Si l'échantillon est ferromagnétique, les parois des domaines magnétiques distribuées dans la matière interagissent avec la microstructure, ce qui constitue la base de la méthode « bruit de Barkhausen ». Cette méthode est particulièrement efficace pour l'évaluation de la dégradation des propriétés mécaniques des matériaux soumis à des contraintes mécaniques cycliques. Ces deux méthodes sont complémentaires, en revanche, ni l'une ni l'autre n'est réellement efficace pour une évaluation précise des contraintes résiduelles à travers l'échantillon testé.

Dans ce projet, nous souhaitons surmonter cette difficulté en testant une nouvelle méthode micro-magnétique originale appelée « perméabilité incrémentale magnétique ». Parallèlement au développement de cette méthode de caractérisation, un modèle et des simulations numériques seront proposés pour l'évaluation des contraintes micro-résiduelles. Nous souhaitons développer un modèle phénoménologique hystérétique proche de la physique et dont les paramètres dépendent directement de l'état de fatigue et du champ de contraintes résiduelles à travers le matériau simulé.

Finalement dans cet article, nous proposons une méthode électromagnétique couplant une technique de mesure originale et des résultats de simulation pour l'évaluation non-destructive des contraintes micro-résiduelles. La méthode devrait être capable de surmonter certaines limitations majeures des systèmes d'évaluation actuels et grandement améliorer la compréhension de l'influence de ces contraintes sur l'état de fatigue d'une pièce mécanique.

2. LA PERMEABILITE INCREMENTALE MAGNETIQUE

La perméabilité incrémentale magnétique est définie comme la mesure de la réponse d'un matériau au champ magnétique appliqué. La densité de flux d'induction magnétique B et l'intensité du champ d'excitation magnétique H sont corrélées, en revanche la forme de la courbe $B(H)$ sera différente pour chaque matériau. Lorsqu'un matériau ferromagnétique est exposé à un champ magnétique stable et statique, la perméabilité réversible mesurée lorsqu'on superpose à ce champ statique un petit champ magnétique alternatif est appelée perméabilité

incrémentale magnétique [3]. Mathématiquement, la perméabilité incrémentale magnétique, peut être définie comme:

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

Avec μ_0 la perméabilité du vide, ΔB la variation du champ d'induction et ΔH celle du champ d'excitation. La perméabilité incrémentale magnétique est donc calculée en mesurant le rapport entre ΔB et ΔH , cette perméabilité incrémentale est observable à partir des cycles d'hystérésis mineurs lorsque l'on trace l'évolution de B comme une fonction de H . La perméabilité incrémentale magnétique intéresse fortement les scientifiques travaillant dans le domaine des essais non destructifs, elle permet notamment de comprendre les processus de dégradation/fluage dans les matériaux, elle donne également beaucoup d'information sur l'état de la microstructure.

3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La figure 1 présente le dispositif expérimental que nous allons utiliser pour mesurer la perméabilité incrémentale magnétique. 12 échantillons qui ont subi différents traitements d'usure en acier chromé 12 Cr-Mo-W-V feront l'objet de notre étude. Les échantillons sont excités magnétiquement à l'aide d'un champ magnétique sinusoïdal. La fréquence de l'excitation quasi-statique choisie pour ces mesures a été fixée à 0,1 Hz après avoir comparé l'effet des différentes fréquences. L'amplitude est quant à elle fixée à 10000 A/m. Le capteur est constitué d'une sonde à effet Hall pour la mesure de l'intensité du champ magnétique tangentiel H et d'une bobine émettrice-réceptrice qui fournit le champ magnétique fiable amplitude alternative, ΔH , superposé au champ magnétique quasi-statique (selon les règles de la perméabilité incrémentale magnétique). La fréquence choisie pour ce champ AC est fixée à 50 kHz. La sortie de la bobine réceptrice est envoyée à l'entrée du « Lock-in Amplifier » Li 5640. Cet appareil fournit une mesure de l'impédance de la bobine linéairement proportionnelle à la perméabilité incrémentale magnétique.

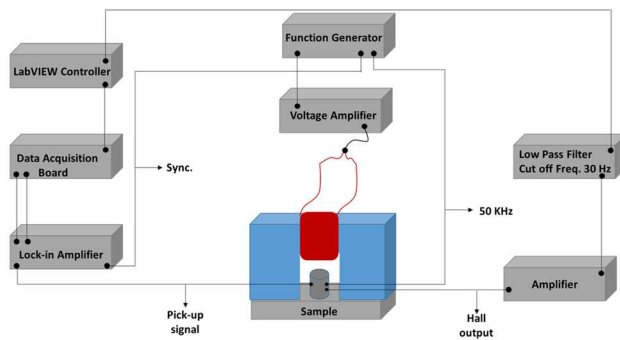


Fig. 1. Dispositif expérimental.

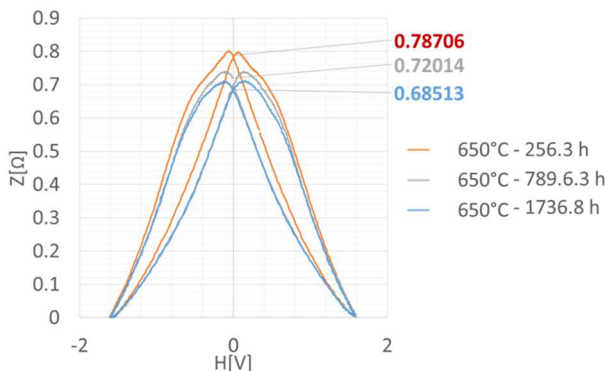


Fig. 2. Premier résultats de mesure.

Figure n°2 donne l'évolution de la courbe de perméabilité en fonction du champ H quasi-statique sur trois échantillons.

4. MODELISATION

Pour reproduire numériquement le comportement magnétique observé par le système de caractérisation « perméabilité incrémentale magnétique », il faut tenir compte simultanément du champ d'excitation DC forte amplitude et du champ AC haute fréquence faible amplitude. Les différences d'amplitude sont telles que même si ces deux excitations vectorielles ne sont pas colinéaires, une modélisation 1 dimension dans la direction du champ DC est suffisante pour fournir des résultats de simulation cohérents. Même si les différences de fréquence sont énormes, 1 Hz pour la composante quasi-statique et plusieurs KHz pour la composante alternative, en raison de la très faible amplitude du champ AC, les pentes dH/dt issues des deux types d'excitation sont très proches et l'utilisation d'une modélisation quasi-statique scalaire permet d'obtenir des résultats satisfaisants. Le modèle de Jiles-Atherton a été utilisé pour cette simulation [4]. Pour cette modélisation, nous n'allons pas chercher à reproduire des cycles mineurs bien fermés. En revanche, la pente de ces cycles est fondamentale pour le calcul de la perméabilité incrémentale, du coup la méthode dite de recul sera utilisée. La méthode de recul consiste à balayer le signal basse fréquence (forte amplitude), et à chaque fois, reculer d'un signal haute fréquence afin de rebrousser autour d'un point de fonctionnement B-H. L'amplitude du signal haute fréquence étant très faible par rapport à l'amplitude basse fréquence, le cycle mineur asymétrique se réduit à un trait (l'aller et le retour sont confondus).

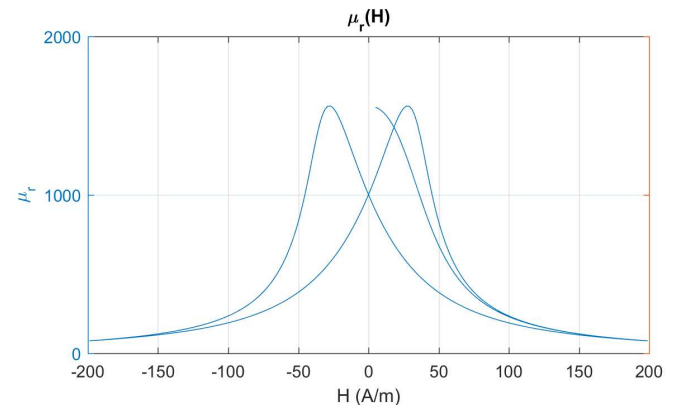


Fig. 1. Premier résultats de simulation.

5. CONCLUSION

Dans la version étendue de l'article nous expliquerons en détail comment le dispositif développé permet de vérifier l'influence de la fatigue sur les échantillons testés, nous expliquerons également comment nous avons tenu compte de cette fatigue dans notre outil de modélisation.

6. REFERENCES

- [1] 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.
- [2] D.C. Jiles, D.L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis". J. App. Pjys. 55, pp. 2115, 1984.
- [3] T. Matsumoto, T. Uchimoto, T. Takagi, V. Gabor, Evaluation of chill structure in ductile cast iron by incremental permeability method, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 52 (2016) 1599–1605, 2016.

