



جامعة محمد الخامس بالرباط
Université Mohammed V de Rabat

École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes
Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur

AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT

Madame Meriem BELHAOU

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat en Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Génie Mécanique

Le Samedi 16 décembre 2023 à 10h00 au Grand Amphi à l'ENSAM de Rabat

Intitulé de la thèse

**ANALYSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS LES CYLINDRES À
PAROI ÉPAISSE AUTOFRETTÉS : CAS DE MATÉRIAUX À GRADIENT
FONCTIONNEL (MGF)**

Président :

Pr. Lahcen AZRAR, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Directeur de thèse :

Pr. Noredine LAGHZALE, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Co-Encadrant :

Hakim BOUZID, Professor, ETS, Université du Québec, Canada

Rapporteurs :

Pr. Hamid MOUNIR, PES, EMI, Université Mohammed V de Rabat

Pr. Mohammed SALLAOU, PES, ENSAM, Université Moulay Ismail, Meknès

Pr. Farah ABDOUN, PH, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Examineurs :

Pr. Lhoucine BOUTAHAR, PH, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Pr. Hamid ZAGHAR, PH, FST, Université sidi Mohamed ben Abdellah, Fès



Résumé: Pour augmenter la résistance, la durée de vie et supporter des pressions en service plus élevées, les équipements à haute pression, appelées également appareils à pression, sont généralement autofrettés. Après le déchargement, des contraintes résiduelles de compression sont créées au niveau de la surface intérieure de l'équipement afin d'améliorer leurs capacités de stockage et augmenter leurs durées de vie.

Le thème principal de ce sujet de recherche est l'autofrettage des cylindres à paroi épaisse. Le matériau utilisé pour ces cylindres est à gradient fonctionnel (MGF). Les MGF sont des matériaux dont les propriétés mécaniques et thermiques varient de manière continue et contrôlée à travers leur épaisseur. Ainsi, l'autofrettage de ces équipements en MGF, vise à exploiter cette variation des propriétés, pour améliorer d'avantage leurs performances, lorsqu'ils sont soumis à des charges élevées.

La première partie de ce document présente une recherche bibliographique sur l'élaboration, la mise en œuvre et l'exploitation des équipements, sous pression, en MGF dans le domaine de l'industrie, comme par exemple le secteur de l'automobile, l'aéronautique, ferroviaire, etc.

La deuxième partie décrit la modélisation et les équations qui régissent l'état des contraintes, de déformations et les déplacements en fonction de la position radiale, d'un cylindre soumis à une pression interne. La loi de comportement du matériau MGF est supposée élastique parfaitement plastique. Les effets des caractéristiques géométriques et mécaniques, sur l'état des contraintes et les déformations, ont été également inclus dans cette partie.

Le modèle élastique parfaitement plastique n'est valide que pour la catégorie des matériaux non écrouissables. Dans l'esprit de la même analyse faite dans la deuxième partie, et pour élargir la recherche vers d'autres matériaux dont la déformation élastoplastique se fait avec écrouissage, la loi de comportement du matériau, dans cette partie, a été exploitée en faisant appel à la loi générale (Loi de Ludwik).

En fin, le dernier chapitre représente la partie essentielle de ce travail de recherche. Il met en évidence l'utilité et l'importance de l'exploitation des matériaux MGF dans

l'autofrettage des équipements à pression. Elle développe un modèle analytique qui combine les deux derniers modèles. En effet, il s'agit d'un modèle exhaustif du processus d'autofrettage. Durant la phase de chargement, l'expansion, la loi de comportement du matériau employée est supposée élastique parfaitement plastique et durant la phase de déchargement, la loi de comportement est supposée générale avec écrouissage non linéaire. L'effet de Bauschinger a été, également, pris en considération. Au cours de la phase de chargement et déchargement avec et sans retour plastique, la distribution des contraintes résiduelles : radiale, tangentielle, longitudinale et équivalente, en fonction de la position radiale, ont été développées, Dans toutes les parties, les résultats de l'état des contraintes et les déformations sont analysés, commentés, comparés et validés par une analyse par éléments finis avec le logiciel ANSYS. Les résultats indiquent une bonne concordance entre l'approche analytique développée dans ce sujet de recherche et l'analyse par éléments finis.

Mots-clés: Matériau à gradient fonctionnel, autofrettage, cylindre à paroi épaisse, solution de plasticité, loi de Ludwik.

Abstract: High-pressure equipment plays a critical role in various industrial sectors, demanding robust designs for prolonged fatigue life and the ability to withstand extreme operating pressures. Autofrettage, a plastic deformation process, is employed to augment the operating pressure and fatigue life of such equipment. It induces residual compressive stresses within the bore of thick-walled cylinders, creating a barrier that subsequent pressure applications must overcome before tensile tensions occur. This results in an extended fatigue life and elevated pressure resistance.

This research focuses on the autofrettage of thick-walled cylinders, utilizing Functionally Graded Materials (FGM). FGMs exhibit controlled variations in mechanical and thermal properties across their thickness, offering an avenue to enhance equipment performance under high loads. The first section of this document presents bibliographical research on the development, implementation and operation of pressure equipment made

of FGM in the industrial sector, such as the automotive, aeronautical and rail sectors, etc. The second section describes the modelling and equations governing the state of stresses, strains and displacements as a function of radial position, of a thick cylinder subjected to internal pressure. The FGM's behavior is assumed to follow an elastic and perfectly plastic model. This section also investigates the impact of geometrical and mechanical parameters on stress and strain distributions.

The perfectly plastic elastic model is only valid for the category of non-hardenable materials. In the spirit of the same analysis carried out in the second part, and in order to extend the research to other materials whose elastoplastic deformation takes place with strain hardening, the law of behaviour of the material, in this part, has been exploited by appealing to the general law (Ludwik's Law).

The concluding chapter represents the core contribution of this research. It introduces an analytical model that integrates the previous two models, providing a comprehensive understanding of the autofrettage process. The model considers perfectly plastic elastic behavior during loading and nonlinear strain hardening during unloading, accounting for the Bauschinger effect. Throughout both loading and unloading phases, the distribution of residual stresses (radial, tangential, longitudinal, and equivalent) as a function of radial position is extensively examined. In each section, the results pertaining to stress and strain profiles are meticulously analyzed, discussed, compared, and validated using finite element analysis through ANSYS software. The findings consistently demonstrate a strong alignment between the analytical approach developed in this study and finite element analysis. This research contributes valuable insights into optimizing pressure equipment by exploiting Functionally Graded Materials within the autofrettage process, offering enhanced performance and safety across diverse industrial applications.

Keywords: Functional gradient material, autofrettage, thick-walled cylinder, plasticity solution, Ludwik's law.