الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا و الهندسة – عنابة
National Higher School of Technology and Engineering. Annaba

Department of Mining Engineering, Metallurgy and Materials (G3M)

THESIS

In fulfillment of the requirements for the degree of PhD
Domain: **Science and Technology**
Discipline: **Metallurgy**
Specialization: **Surface Engineering**

Presented By

Meyssoune Meriem

Title

The electrochemical and mechanical behavior of phosphated and industrially drawn high-carbon pearlitic steel wire

Defended On**: 06 / 01 /2026**

Before the jurry composed of:

Mohamed Cherif Benoudia	Professor	President	ENSTI-Annaba
Mosbah Zidani	Professor	Supervisor	University of Batna-02-Batna
Hafida Boutefnouchet	Associate Professor	Co-Supervisor	University of Badji Mokhtar-Annaba
Djamel Miroud	Professor	Examiner	USTHB
Mehdi Belhani	Associate Professor	Examiner	ENSTI-Annaba
Aicha Ziouche	Associate Professor	Invited	CRTI-Algiers
Taher Abid	Associate Professor	Invited	Trefisoud-El-Eulma

Academic year : 2025/2026

Abstract

This research investigates the electrochemical and mechanical behavior of phosphated and industrially drawn high-carbon pearlitic steel wire produced by the national company *Trefisoud El Eulma*, focusing on how progressive drawing deformation influences the steel's structural, mechanical, and electrochemical characteristics as well as the performance of the coated surface at strain levels $\varepsilon = 0$, 0.68, 1.01, and 2.05. A combination of SEM and EBSD analyses revealed continuous pearlite refinement, reduction in interlamellar spacing, and development of a <110> fiber texture, while XRD quantification of dislocations confirmed a significant increase in defect density with deformation. Microhardness, nanoindentation, and wear tests indicated progressive strengthening and enhanced tribological properties, whereas electrochemical analyses (EIS and polarization) performed in simulated concrete pore solutions containing chlorides and sulfates demonstrated that deformation affects passivity, with sulfate ions stabilizing the passive film and chloride ions promoting localized attack. The zinc phosphate coating, characterized by XRD, SEM, scratch adhesion, and electrochemical testing, initially provided effective protection but exhibited decreasing adhesion and corrosion resistance with higher strain levels. Overall, the results establish a direct link between deformation, dislocation density, interlamellar spacing, and coating performance, offering valuable guidance for optimizing wire drawing and surface treatment processes to improve the durability of high-strength steels used in prestressed concrete applications.

Keywords:

High-carbon steel; Pearlitic structure; Interlamellar spacing; Prestressed steel; Wire drawing; EBSD; Dislocation density; Crystallographic texture; Mechanical strength; Wear behavior; Corrosion behavior; Passive film; Electrochemical tests; Electrochemical impedance spectroscopy (EIS); Zinc phosphate coating.

الملخص

يبحث هذا البحث في السلوك الكهروكيميائي والميكانيكي لأسلاك الفولاذ البيرليتي عالي الكربون المُعالجة بالفوسفات والمُسحبة صناعيًا، والتي تنتجها شركة تريفيسود العلمة الوطنية. ويركز البحث على كيفية تأثير عملية السحب التدريجي = ε على الخصائص البنيوية والميكانيكية والكهروكيميائية للفولاذ، بالإضافة إلى أداء السطح المُغطى عند مستويات إجهاد وتحليل حيود الإلكترونات المشتتة (SEM) ، 0.68، 1.01، و2.05. وقد كشفت تحليلات المجهر الإلكتروني الماسح0 عن تكرير مستمر للبيرلايت، وانخفاض في المسافة بين الصفائح، وتطور نسيج ليفي <110>، بينما أكد (EBSD) عكسيًا زيادة ملحوظة في كثافة العيوب مع زيادة التشوه. أشارت (XRD) التحديد الكمي للعيوب باستخدام حيود الأشعة السينية اختبارات الصلادة المجهرية، والصلادة النانوية، والتآكل إلى تقوية تدريجية وتحسين الخصائص الاحتكاكية، بينما أظهرت التحليلات الكهروكيميائية (مطيافية المعاوقة الكهروكيميائية والاستقطاب) التي أُجريت في محاليل مسامية خرسانية مُحاكاة تحتوي على الكلوريدات والكبريتات أن التشوه يؤثر على الخمول، حيث تعمل أيونات الكبريتات على تثبيت طبقة الخمول، بينما تُعزز أيونات الكلوريد التآكل الموضعي. وقد وفر طلاء فوسفات الزنك، الذي تم توصيفه بواسطة حيود الأشعة السينية، والمجهر الإلكتروني الماسح، واختبار الخدش، والاختبارات الكهروكيميائية، حماية فعالة في البداية، ولكنه أظهر انخفاضًا في الالتصاق ومقاومة التآكل مع ارتفاع مستويات الإجهاد. وبشكل عام، تُثبت النتائج وجود صلة مباشرة بين التشوه، وكثافة الانخلاعات، والمسافة بين الصفائح، وأداء الطلاء، مما يوفر إرشادات قيّمة لتحسين عمليات سحب الأسلاك ومعالجة الأسطح لتعزيز متانة الفولاذ عالي القوة المستخدم في تطبيقات الخرسانة مسبقة الإجهاد.

الكلمات المفتاحية:

فولاذ عالي الكربون؛ بنية بيرليتية؛ المسافة البينية بين الصفائح؛ فولاذ مسبق الإجهاد؛ سحب الأسلاك؛ حيود الإلكترونات ؛ كثافة الانخلاعات؛ النسيج البلوري؛ الخصائص الميكانيكية؛ السلوك التريبولوجي؛ مقاومة التآكل؛ الطبقة (EBSD) المرتدة ؛ طلاء الفوسفات الزنكي(EIS) السلبية؛ التحاليل الكهروكيميائية؛ مطيافية الممانعة الكهروكيميائية.

Résumé

Cette recherche examine le comportement électrochimique et mécanique d'un fil d'acier perlitique à haute teneur en carbone phosphaté et tréfilé industriellement, produit par la société nationale *Trefisoud El Eulma*, en mettant l'accent sur l'influence de la déformation progressive par tréfilage sur les caractéristiques structurelles, mécaniques et électrochimiques de l'acier ainsi que sur la performance de la surface revêtue pour des niveaux de déformation $\varepsilon = 0$, 0,68, 1,01 et 2,05. Les analyses MEB et EBSD ont révélé un affinage progressif de la perlite, une réduction de l'espacement interlamellaire et le développement d'une texture <110>, tandis que la quantification des dislocations par DRX a mis en évidence une augmentation significative de la densité de défauts avec la déformation. Les essais de microdureté, de nanoindentation et d'usure ont montré un renforcement progressif et une amélioration des propriétés tribologiques, alors que les analyses électrochimiques (EIS et polarisation) réalisées dans des solutions simulant les pores du béton contenant des ions chlorure et sulfate ont démontré que la déformation influence la passivation, les sulfates stabilisant le film passif et les chlorures favorisant la corrosion localisée. Le revêtement de phosphate de zinc, caractérisé par DRX, MEB, test d'adhérence et essais électrochimiques, assure une protection initiale mais perd en adhérence et en résistance à la corrosion avec l'augmentation de la déformation. Dans l'ensemble, les résultats établissent un lien direct entre la déformation, la densité de dislocations, l'espacement interlamellaire et la performance du revêtement, fournissant des orientations utiles pour l'optimisation des procédés de tréfilage et de traitement de surface afin d'améliorer la durabilité des aciers à haute résistance utilisés dans les applications de béton précontraint.

Mots-clés :

Acier à haute teneur en carbone; Structure perlitique; Espacement interlamellaire; Acier précontraint; Tréfilage; EBSD; Densité de dislocations; Texture cristallographique; Résistance mécanique; Comportement à l'usure; Comportement à la corrosion; Film passif; Essais électrochimiques; Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS); Revêtement au phosphate de zinc.