

THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 596

Matière, Molécules, Matériaux et Géosciences

Spécialité : « *(Sciences des matériaux)* »

Par

« Esteban GUTIÉRREZ »

« Development of a Smart Multi-sensor System for Corrosion Monitoring in Reinforced Concrete Components of Offshore Wind Turbines »

« SYSCORR »

Thèse présentée et soutenue à « Nantes », le « 29/11/2023 »

Unité de recherche : UMR C 6502 Institut des matériaux Jean Rouxel

Rapporteurs avant soutenance :

Johann Osma Associate Professor – Universidad de los Andes
Mohammed Belmahi Professeur des universités – Université de Lorraine

Composition du Jury :

Président :	Prénom Nom	Fonction et établissement d'exercice (8)(à préciser après la soutenance)
Examineurs :	Malick Diakhate	Maître de conférences – Université Bretagne Occidentale
	Christine Thobie	Maître de conférences – Université de Nantes

Dir. de thèse :	Abdou Djouadi	Professeur des universités – Université de Nantes
Co-dir. de thèse :	Emilio Bastidas	Professeur des universités – Université La Rochelle

Invité(s)

Mohammed Boujtita	Maître de conférences – Université de Nantes
Magda Torres	Ingénieur de recherche – Capacités
Bertrand Garnier	Chargé de recherche – Polytech Nantes

Titre : Développement d'un système multi capteur intelligent pour la surveillance de la corrosion dans les composants en béton armé des éoliennes offshore

Mots clés : Capteurs de corrosion, dépôt de matériaux, Propriété 3-Oméga, électrochimie.

Résumé : Ce document présente le développement de deux capteurs de corrosion qui reposent sur les principes de l'électrochimie et des propriétés thermiques 3-Omega. Tout d'abord, une analyse bibliographique a été menée pour identifier le phénomène de corrosion dans les structures civiles, en particulier dans les zones côtières. Cette recherche a porté sur les technologies actuellement utilisées pour prévenir les dommages structurels causés par la corrosion, mettant en évidence leurs avantages et inconvénients. En se basant sur la littérature consultée, la sélection des technologies les plus originales a été réalisée afin d'obtenir un résultat significatif pour l'industrie civile, pour la fabrication de ce capteur, la technique de dépôt

de matériaux par pulvérisation magnétron DC a été choisie pour appliquer la couche d'acier. Cette étape présente une complexité accrue en raison des propriétés magnétiques du matériau. Cependant, en suivant rigoureusement les directives établies dans la littérature, il est possible de déposer le matériau qui servira ultimement d'électrode de travail dans les capteurs. Pour le capteur électrochimique, une technique spécifique a été élaborée afin de mesurer la présence d'ions chlorure. Quant au capteur 3-Omega, il repose sur la mesure de la tension 3ω et de la résistance. Ces paramètres varient en fonction du processus de passivation sur la surface du fer, permettant ainsi de reconnaître le phénomène de corrosion.

Title : Development of a Smart Multi-Sensor System for Corrosion Monitoring in Reinforced Concrete Components of Offshore Wind Turbines

Keywords : Corrosion sensors, deposit of materials, 3-Omega property, electrochemistry.

Abstract : This document presents the development of two corrosion sensors based on the principles of electrochemistry and 3-Omega thermal properties. Firstly, a bibliographic analysis was conducted to identify the corrosion phenomenon in civil structures, particularly in coastal areas. This research is focused on current technologies used to prevent structural damage caused by corrosion, highlighting their advantages and disadvantages. Based on the reviewed literature, the selection of the most innovative technologies was carried out to achieve a significant result for the civil industry. For the fabrication of this sensor, the material deposition technique using DC magnetron sputtering was chosen to apply the steel layer.

This step presents increased complexity due to the magnetic properties of the material. However, by strictly following the guidelines established in the literature, it is possible to deposit the material that will ultimately serve as a working electrode in the sensors. For the electrochemical sensor, a specific technique was developed to measure the presence of chloride ions. As for the 3-Omega sensor, it relies on the measurement of the 3ω voltage and resistance. These parameters vary depending on the passivation process on the iron surface, thereby enabling the recognition of the corrosion phenomenon.

Résumé: EN

Offshore wind structures are exposed to an aggressive environment, and factors such as environmental changes, wetting and drying cycles, and tension and compression forces, among others, generate damage such as cracks and loss of permeability in the structure. These damages allow chemical compounds to enter the iron reinforcements. Chloride ions dissolved in seawater are one of the sources of corrosion by damaging the protective layer of iron reinforcements and facilitating oxidation. To measure corrosion, the state of the art is reviewed, current non-destructive methods of corrosion measure have advantages and limitations, discarding different technologies based on the simulations, and the electrochemistry method is chosen.

Steel targets with the same composition as B500 rebars are purchased, to have an active layer as an electrode of the same material used in steel reinforcements. Crystallography is compared between the targets and a reinforced bar, results of X-ray diffraction show a similar peak in the (110) plane with a B500 rebar. The Magnetron DC sputtering method is chosen based on literature as the technique to deposit steel. Due to the magnetic properties of steel target, the reactor arrangement of the magnets does not allow the initiation of the plasma. However, by rigorously following the literature, plasma was obtained. Also, the deposition rate was improved by a factor of 8.9 times using a different magnet configuration to make this deposit more industrially interesting.

To carry out investigative and comparative tests, sapphire and commercial alumina were used as substrates in the electrochemical sensors. Three batches of sensors are created and exposed to electrolyte solutions to verify the electrical response of chloride ions in the electrochemical analysis graphs. A technique based on electrochemical methods is proposed to make repetitive measurements. To measure temperature, the thermal property 3ω and a thermistor are used. Finally, we have seen an opportunity to create a second corrosion sensor by measuring the change in 3ω Voltage.

Résumé: FR

Les structures éoliennes offshore sont exposées à un environnement agressif et des facteurs tels que les changements environnementaux, les cycles de mouillage et de séchage et les forces de tension et de compression, entre autres, génèrent des dommages tels que des fissures et une perte de perméabilité dans la structure. Ces dommages permettent aux composés chimiques de pénétrer dans les renforts en fer. Les ions chlorure dissous dans l'eau de mer sont une des sources de corrosion en endommageant la couche protectrice des renforts en fer et en facilitant l'oxydation. Pour mesurer la corrosion, l'état de l'art est passé en revue, les méthodes non destructives actuelles de mesure de la corrosion présentent des avantages et des limites, rejetant différentes technologies basées sur les simulations, et la méthode électrochimique est choisie.

Des cibles en acier de même composition que les barres d'armature B500 sont achetées, pour avoir une couche active comme électrode du même matériau que celui utilisé dans les renforts en acier. La cristallographie est comparée entre les cibles et une barre renforcée, les résultats de diffraction des rayons X montrent un pic similaire dans le plan (110) avec une barre d'armature B500. La méthode de pulvérisation magnétron DC est choisie sur la base de la littérature comme technique de dépôt de l'acier. En raison des propriétés magnétiques de la cible en acier, la disposition des réacteurs des aimants ne permet pas l'initiation du plasma. Cependant, en suivant rigoureusement la littérature, du plasma a été obtenu. De plus, le taux de dépôt a été amélioré d'un facteur 8,9 en utilisant une configuration d'aimant différente pour rendre ce dépôt plus intéressant sur le plan industriel.

Pour réaliser des tests d'investigation et comparatifs, du saphir et de l'alumine commerciale ont été utilisés comme substrats dans les capteurs électrochimiques. Trois lots de capteurs sont créés et exposés à des solutions électrolytiques pour vérifier la réponse électrique des ions chlorure dans les graphiques d'analyse électrochimique. Une technique basée sur des méthodes électrochimiques est proposée pour réaliser des mesures répétitives. Pour mesurer la température, la propriété thermique 3ω et une thermistance sont utilisées. Enfin, nous avons vu une opportunité de créer un deuxième capteur de corrosion en mesurant le changement de tension 3ω .