

# من الصدا إلى الصمود: التخفيف الذكي والمبتكر لحالة التآكل



من اليمين: الدكتورة سهريش حبيب، سكيينة أرشد، والدكتور عبد الشكور.

د. عبد الشكور، أستاذ باحث مساعد

د. سهريش حبيب، باحث ما بعد الدكتوراه

سكيينة أرشد، مساعد باحث

مركز المواد المتقدمة - جامعة قطر

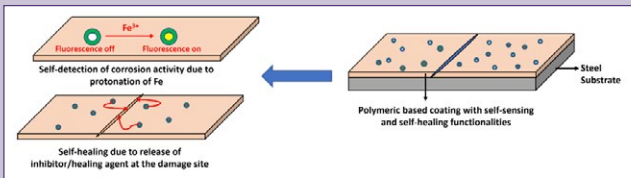
- يصعب تعديلها باستخدام مثبتات التآكل دون المساس بخصائص الحاجر الخاصة بها.
  - غالبًا ما يتطلب الكشف عن التآكل في المرحلة المبكرة في الطبقات البوليمرية السميكة عمليات فحص يدوية.
  - يُمكن أن يؤدي تلف الطلاء إلى تآكل موضعي، مما يؤدي إلى تصعيد المشكلة إذا لم يتم معالجتها على الفور.
- تعالج طلاءات البولي يوريثين الذكية هذه التحديات من خلال دمج الوظائف المتقدمة في تصميم الطلاء.

### العلم وراء الطلاءات الذكية

في صميم هذه الطلاءات توجد علامات جزيئية مصممة للاستجابة لمحفزات بيئية محددة. على سبيل المثال، يُمكن تضمين المركبات الحساسة للأس الهيدروجيني أو كاشفات الأيونات المعدنية داخل مصفوفة البولييمر. تُصدر هذه العلامات تآكلًا فلوريًا عند تعرضها للتغيرات الكيميائية، مثل إطلاق كاتيونات الحديد أثناء التآكل (شكل 2). يُمكن مراقبة هذا التآكل عن بعد عن طريق تغيير اللون في المناطق المتأكلة، مما يتيح إنشاء خرائط احتمالية التآكل. تُقلل القدرة على مراقبة التآكل في الوقت الفعلي بشكل كبير من الاعتماد على عمليات الفحص اليدوي. تسمح طرق الكشف المتقدمة للصناعات بتحديد مناطق المشاكل مبكرًا، مما يمنع المزيد من الضرر. لتعزيز الحماية من التآكل، يتم تحميل الناقلات عالية المسامية بمثبتات التآكل، تعمل هذه الناقلات كخزانات تطلق مثبتات استجابة للتغيرات البيئية، مما يضمن حماية مستدامة. كما تعمل آلية الإطلاق الخاضعة للرقابة هذه على تحسين الكفاءة وإطالة عمر الطلاء.

### آليات الترميم الذاتي

أحد الابتكارات الرئيسية في طلاءات البولي يوريثين الذكية هو قدرتها على الترميم الذاتي. عند تلف الطلاء، تُطلق الناقلات المُعدلة المدمجة التي تحتوي على عوامل إصلاح محتوياتها لملء الشقوق أو الفراغات. هذا يمنع الرطوبة والأكسجين والعوامل المسببة للتآكل من الوصول إلى المعدن الأساسي، مما يوقف عملية التآكل بشكلٍ فعّال. تُقلل قدرة الترميم الذاتي هذه من الحاجة إلى الإصلاحات الفورية وتعزز متانة الطلاء في البيئات الصعبة (شكل 2).



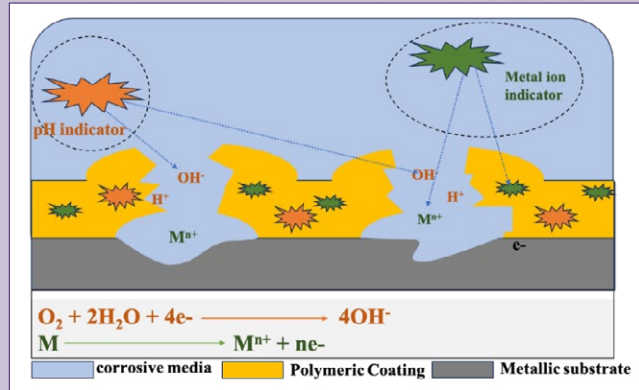
**الشكل [2]:** توضيح للمفهوم العام للترميم الذاتي والاستشعار الذاتي في الطلاءات البوليمرية.

لا يزال التآكل أحد أكثر القضايا تحديًا وتكلفة التي تواجه الصناعات في جميع أنحاء العالم، من النفط والغاز إلى البنية التحتية. فهو لا يهدد السلامة الهيكلية للأصول الحيوية فحسب، بل يؤدي أيضًا إلى خسائر مالية كبيرة بسبب الإصلاحات والصيانة والتوقف غير المخطط له. على الرغم من فعالية الأساليب الحالية للحماية من التآكل، إلا أنها غالبًا لا تُلبّي متطلبات الكفاءة طويلة الأجل وقدرات المراقبة الذكية. وبالتالي، فإن «الطلاءات البوليمرية الذكية» هي حل مبتكر يمزج بين علوم المواد المتقدمة وتقنيات الاستشعار الحديثة.

### الحماية الذكية من التآكل: حقبة جديدة

تمثل طلاءات البولي يوريثين الذكية ففزة كبيرة إلى الأمام في إدارة التآكل. تجمع هذه الطلاءات وظائف متقدمة مثل الاستشعار الذاتي والإصلاح الذاتي لتوفير مراقبة في الوقت الفعلي ومتانة ممتدة. ويجمع هذا النهج بين ثلاث ميزات متطورة (شكل 1):

1. المواد البوليمرية المتقدمة: طلاء البولي يوريثين عالي الأداء (UP) مصمم لمقاومة ميكانيكية فائقة، والالتصاق القوي بالفولاذ.
2. مراقبة التآكل الذكية: تضمين وظائف الاستشعار الذاتي التي تُصدر إشارات كيميائية استجابة للتغيرات البيئية، مما يتيح الكشف عن التآكل عن بعد.
3. حماية مُحسّنة: تتضمن مثبتات التآكل المخزنة في ناقلات ذات مساحة عالية لضمان حماية فعّالة وطويلة الأمد.



**الشكل [1]:** مخطط آليات الكشف عن التآكل، والكشف عن الأس الهيدروجيني الموضعي، والأيونات المعدنية، أو الأضرار الميكانيكية الناجمة عن الوسائط المسببة للتآكل.

### معالجة محدودية الطلاء التقليدي

تشتهر طلاءات البولي يوريثين الذكية بمقاومتها الميكانيكية الممتازة والالتصاق بالفولاذ وتحمل السطح. ومع ذلك، فإن التركيبات البوليمرية التقليدية لها عيوب ملحوظة:

تُوفر الطلاءات الذكية القائمة على البولي يوريثين مزايا مزدوجة: فهي تُعزز الكفاءة التشغيلية مع المساهمة في الاستدامة البيئية. فمن خلال تقليل وتيرة الصيانة والفحص اليدوي، تُسهّم هذه الطلاءات في خفض انبعاثات الكربون المرتبطة بالنقل والإصلاحات. بالإضافة إلى ذلك، فإن الإطلاق الخاضع للرقابة لمثبطات التآكل يُقلل من أخطار التلوث البيئي. من منظور اقتصادي، فإن المدخرات طويلة الأجل الناتجة من تقليل وقت التوقف عن العمل، وقلّة الإصلاحات، وإطالة عمر الأصول، تفوق تكلفة الاستثمار الأولي في الطلاءات الذكية، وتستفيد الصناعات من زيادة الكفاءة وأرباح أقوى.

### رؤية للمستقبل

تمتد رؤية الطلاءات الذكية القائمة على البولي يوريثين إلى ما هو أبعد من الحماية من التآكل. من خلال إظهار إمكانيات المواد المتقدمة وتقنيات الاستشعار، يُمهّد هذا النهج الطريق لتطبيقات أوسع في المراقبة البيئية وصيانة البنية التحتية والتصنيع المستدام. فعلى سبيل المثال، يمكن تكييف تقنيات الاستشعار المماثلة لتطبيقات مثل الكشف عن نقاط الضعف الهيكلية في المباني أو رصد الملوثات البيئية، كما يضمن تعدد استخدامات هذه الطلاءات أهميتها في مختلف المجالات. ولن تؤدي المخرجات - من التقدم العلمي إلى التطبيقات الصناعية - إلى تعزيز المعرفة فحسب، بل ستخلق فرصاً اقتصادية أيضاً. ومن خلال تعزيز الابتكار، تُساهم هذه الطلاءات في مستقبل أكثر استدامة وازدهاراً. لذا يجب على الحكومات والصناعات التعاون لتسريع اعتمادها لتعظيم فوائدها على الصعيد العالمي.

### الخلاصة

تُمثل الطلاءات الذكية القائمة على البولي يوريثين خطوة جريئة إلى الأمام في مكافحة التآكل. ومن خلال الجمع بين تقنيات الاستشعار المتقدمة وآليات الشفاء الذاتي وعلوم المواد المبتكرة، فإنها توفر حلاً شاملاً لمواجهة التحديات الحالية والمستقبلية. كما توفر هذه الطلاءات مزايا لا مثيل لها من حيث المتانة والذكاء والاستدامة البيئية. ونظراً لأن الصناعات في جميع أنحاء العالم تسعى جاهدة للحصول على حلول أكثر ذكاءً، فإن هذه الطلاءات تستعد لقيادة الطريق، وضمان حماية الأصول الحيوية، وتعزيز الكفاءة التشغيلية. كما أن قدرتها على التكيف مع الظروف البيئية المتغيرة وتوفير المراقبة في الوقت الفعلي تميزها كتقنية تحويلية.

### تقدير

تم إنجاز هذا العمل بدعم من مجلس قطر للبحوث والتطوير والابتكار، من خلال منحة البحث الأكاديمي -ARG01-0516-# 230189.

يوفر تكامل وظيفة الاستشعار الذاتي توفيراً كبيراً في التكاليف من خلال تمكين الصيانة التنبؤية. يُمكن للصناعات الآن اكتشاف مشكلات التآكل ومعالجتها قبل تصاعدها، وتجنب الإصلاحات باهظة الثمن ووقت التوقف عن العمل. علاوة على ذلك، فإن استخدام مصفوفات البولي يوريثين المتينة يضمن عمر خدمة أطول، مما يُقلل من تكرار إعادة التطبيق. كما تتيح الصيانة التنبؤية التي تتيحها هذه الطلاءات تخصيص أفضل للموارد. ويمكن لفرق الصيانة التركيز على المناطق عالية الخطورة، وتقليل النفايات وتحسين الكفاءة الإجمالية. هذا النهج مفيد بشكل خاص في صناعات مثل النفط والغاز، حيث تمتد البنية التحتية غالباً عبر المواقع النائية أو التي يتعذر الوصول إليها.

### التطبيقات والتأثير الصناعي

الطلاءات الذكية القائمة على البولي يوريثين لها تطبيقات واسعة عبر الصناعات التي تعتمد على المكونات الفولاذية، بما في ذلك:

- **النفط والغاز:** حماية خطوط الأنابيب وصهاريج التخزين والمنصات البحرية من البيئات القاسية. يُعد التآكل مصدر قلق كبير في هذه القطاعات، حيث يمكن أن تؤدي الأعطال إلى عواقب وخيمة.
- **البنية التحتية:** تعزيز متانة الجسور والمباني وأنظمة النقل. يُعد الحفاظ على السلامة الإنشائية أمراً بالغ الأهمية مع زيادة وتيرة التحضر.
- **الطاقة:** حماية توربينات الرياح وإطارات الألواح الشمسية وغيرها من البنية التحتية للطاقة المتجددة. تضمن الحماية القوية من التآكل موثوقية طويلة الأمد لمصادر الطاقة النظيفة.

من خلال تلبية الحاجة الماسة للحماية الذكية من التآكل، من المقرر أن تصبح هذه الطلاءات لا غنى عنها للصناعات في جميع أنحاء العالم، حيث توفر قدرتها على الجمع بين المتانة والذكاء ميزة كبيرة مقارنةً بالحلول التقليدية.

### التغلب على التحديات

غالباً ما تواجه المشاريع المبتكرة تحديات تقنية، مثل ضمان توافق مثبطات التآكل مع مصفوفة طلاء البولي يوريثين عالي الأداء PU أو تحسين إنتاجية التآلق الفلوري لجزيئات الاستشعار. وتُعد النهج المنهجية التي تشتمل على اختبارات ونمذجة مكثفة، ضرورة لمعالجة هذه العقبات. كما تعد قابلية التوسع اعتباراً رئيسياً آخر، حيث يضمن التعاون مع الشركاء الصناعيين إمكانية التحقق من صحة الطلاء في ظل الظروف الميدانية ومواءمتها مع متطلبات السوق. ويُعد تطوير الطلاءات التي تحافظ على فعاليتها عبر الظروف البيئية المختلفة، من الحرارة الشديدة إلى الرطوبة العالية، مجالاً مهماً آخر.