جامعة المنارة
كلية الهندسة المدنية
السنة الاولى

مقرر الكيمياء للمهندسين

Dr.-Ing.Nesreen Khallouf

التآكل

THE CORROSION

د.م . نسرين خلوف

العام الدراسي2025 -2026

مقدمة
Introduction

- تعد عملية التآكل، من أهم الصعوبات التي تتعرض لها الصناعة والبناء، بكافة أنواعها،
- وذلك بما تسببه من تكاليف عالية في تبديل وصيانة القطع المعدنية في الجسور وفي الأبنية والأسطح والصالات وغيرها.
- ويعتبر رفع مدة صلاحية مواد البناء من أهم المسائل التكنولوجية والاقتصادية المعاصرة في مجال البناء،
- إذ تؤدي التأثيرات الخارجية على الأبنية البيتونية أو المعدنية إلى انهيار الأسطح أو الجسور بعد تعرضها لحمولات ميكانيكية زائدة أو تعرضها لتخريب كيميائي مباشر مثل الأمطار الحامضية والرطوبة الدائمة إضافة للحرارة المرتفعة والضغوط العالية.

جَامعة المَنارة
MANARA UNIVERSITY

مقدمة
Introduction

ما هو مفهوم التآكل

يعرف : بأنه عملية تخريب المادة (معدنية أو غير معدنية) بدءاً من سطحها وحتى التخريب الكامل لها، وذلك تحت تأثير عوامل خارجية تدعى عوامل التخريب.

مقدمة
Introduction

تقسم عوامل التخريب، حسب الأسباب المؤدية إلى التآكل:

تخريب كيميائي:

ناتج عن تأثير المركبات الكيميائية الفعالة من سائلة وصلبة وغازية على سطح المادة، مثل الحموض والأسس والأملاح وغيرها.

تخريب فيزيائي :

ناتج عن تأثير العوامل الفيزيائية على سطح المادة، مثل الحرارة والرطوبة والضغوط المرتفعة والإجهادات الميكانيكية وغيرها.

تخريب بيولوجي:

ناتج عن تأثير الكائنات الدقيقة على سطح المادة مثل البكتريا والفطور وغيرها.

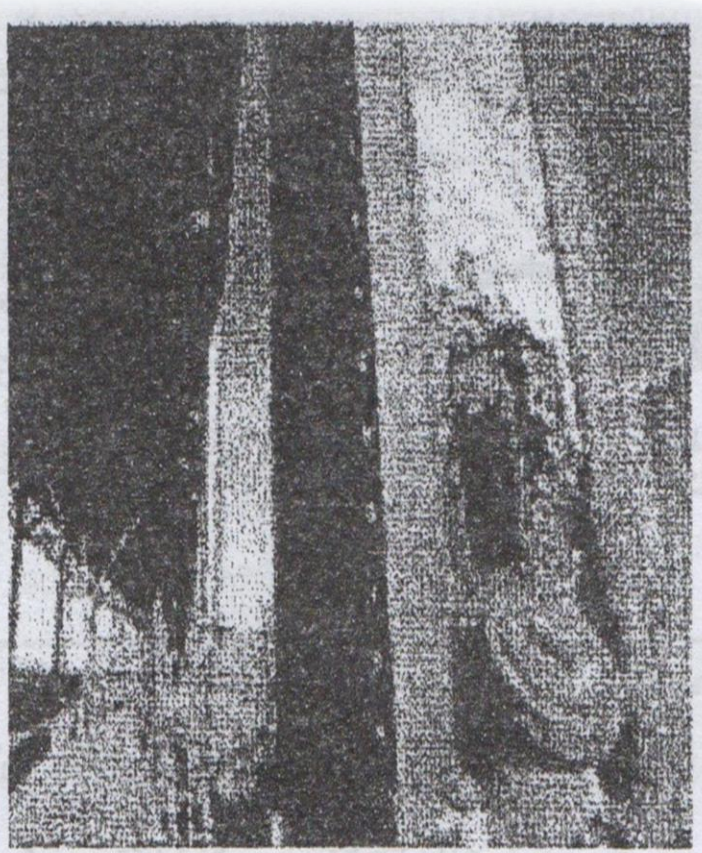
The التآكل المعدني
Metals Corrosion

- انتشر استخدام المعادن في كثير من المجالات الصناعية، نظراً للصفات الجيدة التي تتمتع بها. ولكنه تبين تواجد عيب أساسي في استعمالها، وهو قابليتها للتآكل والصدأ.
- من المعروف، أن المعادن هي أجسام مرجعة نموذجية حيث تنتقل إلى الحالة الشاردة بصورة تلقائية، بفعل تأثير المؤكسدات، ويرافق هذه العملية تشكل مركبات جديدة على سطح المادة، مسببة في تخريبها وتآكلها. تدعى العملية ككل عملية تآكل المعادن.
- يعد تآكل المعادن، **عملية كيميائية** أو **كهر كيميائية**، تؤثر تدريجياً على السطح المعدني، نتيجة للتفاعلات التي تجري بين ذراتها والعوامل الخارجية المؤثرة عليها، مشكلة أجزاء صغيرة جداً على سطوحها ، ومؤدية بذلك إلى انحلال المادة وتخريبها.

التآكل المعدني الكيميائي The Chemical Metals Corrosion

- ينشأ التآكل الكيميائي بفعل الغازات والأبخرة (بدرجة حرارة عالية)،
- ومثال ذلك أكسدة المعدن بأكسجين الهواء في درجة حرارة عالية (التآكل الغازي)، ويكتسي سطح المعدن في هذه الحالة بطبقة من أكسيد المعدن تختلف من حيث الثخانة والتركيب من معدن لآخر.
- **وتحمي هذه الطبقة المعادن** من التخريب الكلي بدرجات متفاوتة حسب نوع الطبقة (مثل Al_2O_3 , ZnO , MnO , NiO , Cr_2O_3)،
- **بينما تساعد البعض الآخر على استمرار التآكل** (مثل أكاسيد الحديد، أكاسيد المعادن القلوية والقلوية الترابية) كما في الشكل (1-11) وحسب التفاعلات الكيميائية التالية له.

The التآكل المعدني الكيميائي
Chemical Metals Corrosion



شكل (1-11): عملية التآكل المعادن في الظروف الغازية وتشكل $Fe_2O_3.H_2O$

$Me \rightarrow Me^{2+} + 2e^-$	MeO

$$Me \rightarrow Me^{++} + 2e^-$$

$$\frac{2e^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow O--}{Me^{++} + O- \rightarrow MeO}$$

التآكل المعدني الكهر كيميائي The Electrochemical Metals Corrosion

- يعتبر التآكل المعدني الكهر كيميائي، الأكثر انتشارا في عمليات التآكل ،
- ويتشكل هذا النوع من التآكل تحت تأثير المحاليل الكهرليتية، وخاصة المحاليل المائية الكهرليتية، التي تولد التيار الكهربائي،
- وتحول سطح المعدن إلى قطب سالب، مؤدية إلى انحلاله وبالتالي إلى تآكله،
- **يجري التأثير المشترك بين سطح المعدن المتأكل والمحلول الكهرليتي المخرب عندما:**

- يغمس المعدن مباشرة في المحلول الكهرليتي.

- تمر على سطح المعدن طبقة رقيقة من الماء. منحلة فيها غازات الهواء، موفرة بذلك الشروط اللازمة لعملية التآكل.

- **يختلف التآكل الكهر كيميائي عن التآكل الكيميائي**، بأن التآكل المعدني الكهر كيميائي، يشكل عدداً كبيراً من الخلايا الكهر كيميائية المحلية بين مختلف المركبات الكيميائية الداخلة في تركيب هذا المعدن أو في بنية الطبقة المعدنية غير المتجانسة بسبب احتوائها على شوائب.

اشرح آلية التفاعل الكهر كيميائي موضحا بالمعادلات

تجري آلية التفاعل الكهر كيميائي، المؤدية إلى عملية التآكل، وبالتالي إلى تخريب المعدن، حسب المرحلتين التاليتين:

مرحلة التفاعل المصعدي

تجري تلقائياً.

يتم في هذه المرحلة، انتقال شوارد المعدن (مثلاً Me^{2+}) من سطح المعدن إلى المحلول الكهرليتي، بعد أن يعطي إلكترونين.

ويبقى هذان الإلكترونان على سطح المعدن، وتمثل هذه المرحلة بالتفاعل التالي:

$$Me \rightarrow Me^{2+} + 2e^{-}$$

مرحلة التفاعل المهبطي

تجري تلقائياً.

يتم في هذه المرحلة التقاط للإلكترونين اللذين بقيا على سطح المعدن، من قبل الأوكسجين المنحل في الماء أو الموجود في الوسط المحيط،

وتمثل بالتفاعل التالي:

$$H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow 2OH^-$$

التآكل المعدني الكهر كيميائي The Electrochemical Metals Corrosion

- تنتج الخلية الكهر كيميائية المخرجة، من جميع المرحلتين السابقتين، والتي يعبر عنها بالتفاعل الكلي التالي:

$$Me + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow Me^{2+} + 2OH^-$$

- ❖ **توضح عملية التآكل الكهر كيميائي، بالمثال التالي، الذي يجري بين الحديد والنحاس الموجودين في محلول مائي. تجرى في عملية التآكل تلك، التفاعلات التالية:**
- يتم التفاعل على سطح الحديد، الذي يجري على النحو التالي، **وهو تفاعل أكسدة:**

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

- يتم أيضاً وبنفس الوقت التفاعل التالي على سطح النحاس، **وهو تفاعل إرجاع:**

$$H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow 2OH^-$$

التآكل المعدني الكهر كيميائي The Electrochemical Metals Corrosion

يلاحظ من هذين التفاعلين، أن عملية انحلال الحديد الممثلة في تفاعل أكسدة الحديد، تؤمن الالكترونات اللازمة لحدوث تفاعل الإرجاع الذي يجري على سطح النحاس، إلى أن تذوب قطعة الحديد كلياً وتتآكل.

- **لقد بينت الكثير من التجارب أن الحديد الموجود في شروط جافة بعيداً عن الرطوبة وفي شروط درجة حرارة عادية، لا يتآكل حتى وإن وجد في وسط مائي لا يحتوي على أوكسجين منحل فيه.**
- تحتوي معادن بعض الأجهزة على شوائب معينة، داخلة في تركيبها، عندها تتشكل عملية مشابها لتفاعل الأكسدة والإرجاع،
- وإذا كانت فعالية الشوائب أكبر من فعالية المعدن، فإنها تنحل معطية الالكترونات، وتلعب دور القطب السالب، وعندها سيلعب المعدن دور القطب الموجب.
- بينما إذا كانت هذه الشوائب ذات فعالية أصغر من فعالية المعدن فإن المعدن سينحل وسيعطي الالكترونات وسيلعب عندها دور القطب السالب، وتلعب الشوائب دور القطب الموجب.

عدد أنواع التآكل الكهر كيميائي تبعاً لمظهر السطوح

١. تآكل منتظم:
وهو التآكل الذي تظهر فيه حالة التخريب على السطح الكلي للمعدن وبنفس السماكة.

٢. تآكل موضعي:
وهو التآكل الذي تظهر فيه حالة التخريب على بعض أماكن سطح المعدن فقط.

٣. تآكل جوي:
وهو التآكل المنتشر بكثرة على سطح المعدن، والذي يساهم فيه أوكسجين الهواء عادة. تتم هذه العمليات في وسط رطب وفي أجواء متناوبة رطبة – جافة، حيث تتجمع المياه في الثقوب، وفي الأمكنة غير المعالجة، مشكلة خلية، تتغذى بالغازات أو بالأملاح المنحلة، لتصبح مخربة.

عدد أنواع التآكل الكهر كيميائي تبعاً لمظهر السطوح

٤. تآكل انتقائي بلوري:
وهو التآكل الناتج عن فروق الفعالية المعدنية في الشبكة البلورية للمعدن.

٥. تآكل تشققي بلوري:
وهو التآكل الناتج عن تكرار العمل الميكانيكي والمعالجات الحرارية على المعدن.

٦. تآكل جوفي :
وهو التآكل الناتج عن غمر السطح المعدني في التربة.

عدد الأوساط التي تؤدي إلى تآكل المعدن

- يتضح مما سبق، أن الوسط يؤثر بصورة مباشرة على عمليات التآكل الكهر كيميائي، مهيئاً سطح المعدن لاستقبال أو لإعطاء الإلكترونات.

- فوجود الأملاح بتراكيز معينة في المحاليل الكهرليتية، وكذلك موانع التآكل ومسرعاته ، وقيم pH المحلول المعبرة عن حموضته أو قلويته، إضافة إلى الهواء والرطوبة والتربة وغيرها لها تأثير واضح ومؤكد على سرعة عمليات التآكل الكهر كيميائي:

عدد الأوساط التي تؤدي إلى تآكل المعدن

الوسط الكهرليتي

- الذي يشمل المحاليل الحاوية على مركبات كهرليتية متشردة، مثل المياه المالحة ومياه البحار بالمحيطات، والمحاليل المائية الحمضية والقلوية وما شابهها.
- **يختلف نوع التآكل، حسب وجود المعدن في الوسط الكهرليتي المسبب لعملية التآكل، والناشئ عن الغمس الكلي أو الغمس الجزئي أو الغمس المتناوب للمعدن في الوسط.**

عدد الأوساط التي تؤدي إلى تآكل المعدن

الوسط الترابي

- الذي يشمل التربة التي تعتبر بأنها كهر ليت مسامي، والمتميزة بسهولة توصيل الأوكسجين إلى سطح المعدن المغمور في هذه التربة، وذلك بسرعات متفاوتة متعلقة بمسامية التربة.
- تبين أيضاً أن الكائنات الدقيقة مثل البكتيريا، أو بالأحرى العمليات المكروبيولوجية التي تحري داخل التربة، تؤثر على عمليات التآكل في الوسط الترابي،
- **وقد حصرت أسباب التآكل في الوسط الترابي كالتالي:**
  - طبيعة التربة المخربة، المتعلقة برطوبة التربة.
  - نوعية المحاليل الكهرليتية، المسببة لرطوبة التربة.
  - تجمعات هوائية معينة ناتجة عن التفاعلات الحيوية المكروبيولوجية.

عدد الأوساط التي تؤدي إلى تآكل المعدن

الوسط الجوي

- الذي يحدد رطوبة معينة مخربة، يساهم الأوكسجين فيها في عمليات التآكل،
- تعود سرعة عمليات التآكل في الوسط الجوي، إلى طبيعة المعدن ومدة وطريقة تعرضه للأجواء الرطبة والجافة وتناويها،
- وإلى سماكة الطبقة المائية الممتصة على سطح المعدن وفي ثقوبه وأماكنه في المعالجة.
- يعتبر أوكسجين الوسط الجوي عاملاً أساسياً في عمليات التآكل ،
- إذ يشكل طبقة سطحية تعمل كمسرى سالب، بينما يشكل المعدن طبقة تعمل كمسرى موجب، مؤدياً بذلك إلى انحلال المعدن.

عدد الأوساط التي تؤدي إلى تآكل المعدن

الوسط الميكانيكي

- الذي ينتج عن الاحتكاك والجهود الميكانيكية للمنشآت المعدنية الموجودة في أوساط مختلفة كهرليتية أم ترابية أم جوية.
- تعتبر الجهود الميكانيكية، متزامنة مع عمليات التآكل، وعندها يكون العامل المؤدي إلى تخريب المعدن هو الطريقة التي طبقت بها الجهود الميكانيكية، يعد الأخذ بالاعتبار زمن التآكل.

عدد الأوساط التي تؤدي إلى تآكل المعدن

الوسط الميكانيكي

تؤدي هذه العوامل إلى:

- **تآكل تام**، ناتج عن التواترات الداخلية، بوجود وسط مخرب.
- **تشققات**، ناتجة عن الجهود الميكانيكية السكونية والعامل المخرب، مسببة نشوء شقوق في بنية المعدن البلوري. تتم هذه العملية على مرحلتين هما مرحلة التحريض ومرحلة الانتشار.

عدد الأوساط التي تؤدي إلى تآكل المعدن

الوسط الميكانيكي

تعب التآكلي، ناتج عن التأثيرات المتزامنة للجهود الميكانيكية والوسط المخرب، مسببة تشققات واضحة في بنية المعدن البلورية.

تآكل الاحتكاك، ناتج عن الاحتكاك الميكانيكي، الذي يظهر عند الحركة بين سطحين، بوجود وسط مخرب.

نخور تآكلي، ناتج عن فعل الطاقة الميكانيكية للوسط المخرب على سطح المعدن، مسبب نشوء نخور عميقة في الجهاز المعدني. يظهر هذا الشكل بصورة خاصة في الصناعات الذرية.

تآكل البيتون
Corrosion of Beton

- اعتبر البيتون ولمدة طويلة، مادة ذات ديمومة عالية، ونظراً لحفاظه على شكله.
- ولكن تبدلت هذه الفكرة بظهور حالة فرضها الواقع، دعيت تآكل البيتون.
- وأصبحت من الدراسات الأساسية حول عملية التخريب هذه المادة، والبحث عن العوامل المؤدية لهذا التآكل.
- يعتمد السلوك الجيد للبيتون على استعمال حصويات نظيفة، وخلطات بيتونية صلبة وروابط ذات فترة تجمد طويلة.
- ولكن يوجد عوامل مخربة تحد من عمر البيتون مثل الثقل الزائد عن الحمولة المصممة، والتغير الكبير للرطوبة والحرارة العالية وعوامل الحت الطبيعية، وعوامل التآكل الكيميائية.
- تتشكل عملية تآكل البيتون، نتيجة لتفاعلات الانحلال التي تتم بشكل تبادل ثنائي بين الوسط المخرب والبيتون،
- وعندما يتأثر حجر الاسمنت (مجبول أسمني متصلب) بالمواد الكيميائية المخربة، تتم عمليات تخضع لسيطرة الحوادث السطحية وحوادث الانتشار.

أنواع تآكل البيتون Kinds of Beton Corrosion

❖يُعَبَر عن آلية عملية تآكل البيتون على النحو التالي:

❑ينحل الحجر الاسمنتي تحت تأثير المواد الكيميائية المخربة، لتحوله إلى طبقة هلامية ومن بعدها إلى حالة سائلة، مسببة انزياحه من وسط البناء، وذلك عندما تتم عملية تبادل الشوارد.

❑تقسم عملية تآكل البيتون إلى ثلاثة أنواع هي:

أنواع تآكل البيتون Kinds of Beton Corrosion

النوع الأول

- ناتج عن **عمليات الانحلال لحجر الاسمنت** التي يرافقها إزالة لشوارد الكالسيوم من الاسمنت المتصلب وتحويله إلى مزيج هلامي وترسيبه على شكل مركبات صعبة الانحلال.
- يعبر عن عملية انحلال شوارد الكالسيوم الصلبة بواسطة التفاعل التالي:

$$Ca(OH)_2 \leftrightarrow Ca(OH)_2 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$$

حالة صلبة محلول هلامي محلول شاردي

- تزداد سرعة عملية التآكل هذه بوجود مواد مساعدة تزيد من عملية انحلال شوارد الكالسيوم في الماء، غاز ثاني أكسيد الكربون المنحل في الماء، والماء اليسر وغيرها.
- تعتبر محاليل أملاح النشادر ومحاليل الأحماض العضوية والمعدنية من العوامل المخربة المؤدية لعملية تآكل البيتون من هذا النوع.

أنواع تآكل البيتون Kinds of Beton Corrosion

النوع الثاني

- ناتج عن وجود أملاح المغنيزيوم في الماء، التي تتفاعل مع شوارد الكالسيوم الموجودة في حجر الاسمنت، وتحوله إلى حالة مشابهة للحالة الهلامية ومن بعدها إلى حالة سائلة، مؤدية إلى تآكل البيتون.
- يعبر عن عملية انحلال شوارد الكالسيوم في هذا النوع، بواسطة التفاعل التالي:

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 \rightleftharpoons CaSO_4 + Mg(OH)_2$$

- تعتبر محاليل الشحوم و السكر من العوامل المخربة المؤدية الى عملية تآكل البيتون من هذا النوع .

جَامعة المَنارة
MANARA UNIVERSITY

أنواع تآكل البيتون Kinds of Beton Corrosion

النوع الثالث

- ناتج عن تأثير محاليل الكبريتات على حجر البيتون ،مشكلة مركبات مثل كبريتات الكالسيوم ، التي تتبلور مع الماء لتعطي معقداً يحتوي على ٣٢ جزيئة ماء هو($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) و يدعى الومينات الكالسيوم الثلاثية الكبريتاتية أو ملح كانديلو ،
- و يزداد حجمها مسببة ضغطاً بلورياً ، مؤدياً إلى حدوث توترات داخلية في شكل البيتون يتشقق بنتيجتها البيتون و يخرب تماسكه .
- تعتبر محاليل ماء البحر و المحاليل المركزة لملح كلوريد الكالسيوم من العوامل المخربة المؤدية لعملية تآكل البيتون من هذا النوع .

جَامعة المَنارة
MANARA UNIVERSITY

العوامل المؤثرة على تآكل البيتون
The Effecting Agents of The Beton Corrosion

❖ **تعتمد عملية التخريب في البيتون ، على عوامل عديدة مختلفة ،**

- ❑ متعلقة بطبيعة العامل المخرب
- ❑ وبتركيزه
- ❑ وبالتفاعل الذي يمكن أن يجري بينه و بين مادة البناء ،
- ❑ وبالتأثيرات الخارجية مثل درجة الحرارة ، و الحمولة الكبيرة .
- ❑ و بطبيعة الروابط الموجودة في مادة البناء .

تؤثر العوامل المخربة في تآكل البيتون بواسطة

١- التركيب الكيميائي : تتجلى ظاهرة التآكل في حجر الاسمنت بوصفها تخريباً كيميائياً **بوجود الأوساط التالية :**

- المحاليل القلوية المركزة و بدرجات حرارة مختلفة .
- أملاح الكبريتات و النترات و الكرومات و الكلورات (القلوية منها) و غيرها .ولكنه تبين ، أن بعض الأملاح مثل الكربونات و الفلورات و السيليكات ، ليس لها أي تأثير مخرب على البيتون .
- الشحوم و الزيوت الحيوانية و النباتية وذلك نتيجة لتفككها في شروط وجود الهواء و الضوء لتعطي حموضاً دسمة ، تتفاعل بدورها مع شوارد الكالسيوم في البيتون ، مشكلة مركبات منحلة .

تؤثر العوامل المخربة في تآكل البيتون بواسطة

- الشحوم و الزيوت المعدنية ، وذلك من خلال درجة حموضتها واحتوائها مركبات كبريتية أو مركبات الفينول و غيرها .

- المياه، وذلك حسب درجة حموضتها ووجود الأملاح والغازات المنحلة فيها ، إضافة إلى عمليات الحت الناتجة عن سرعة تدفقها و احتكاكها بطبقة البيتون .

تؤثر العوامل المخربة في تآكل البيتون بواسطة

٢- العوامل الخارجية : إن العوامل الخارجية المسببة في تآكل البيتون **هي :**

- درجة الحرارة العالية و الرطوبة ، إذ تبين أن سرعة التآكل تزداد مع ازدياد درجة حرارة العوامل المخربة .
- عوامل الحت الجوية .
- الحمولة الزائدة عن الحمولة التصميمية .

٣- نوعية الكائنات الدقيقة : البكتيريا و الجراثيم و الطفيليات .

تؤثر العوامل المخربة في تآكل البيتون بواسطة

٤- نوعية البيتون : أظهر التجارب ، أن عملية تخريب البيتون تكون صغيرة **عندما :**

- ❑ يستعمل نوع إسمنت ذو خواص فيزيائية و كيميائية معينة .
- ❑ تستعمل حصيات وركام ذات خواص فيزيائية جيدة.
- ❑ يتم تصنيع البيتون بصورة جيدة .
- ❑ يتم تهيئة سطح البيتون لمقاومة عوامل التخريب .

معالجة التآكل

- يؤدي التآكل تدريجياً وحتى التخريب الكامل للمواد المعدنية و البيتونية إلى خسائر اقتصادية (كلفة استبدال) واجتماعية (كوارث وانهيارات)،
- لذلك يجب وضع احتياطات وأخذ تدابير لمكافحة وإعاقة ومنع حدوث التآكل بأشكاله وتبعاً للشروط المحلية المستعملة،
- تتم عملية مكافحة التآكل بواسطة تقنيات مختلفة، **سنذكرها في الفقرات التالية:**

معالجة التآكل

الوقاية المؤدية لعزل المادة المعرضة للتآكل

- تتميز هذه الطريقة بتأثيرها الفعال على ظواهر التآكل، معيقة له أو لاغية لتفاعلاته.
- **وتعتمد على مجموعة من طرائق الوقاية هي :**

١. الحماية بمعالجة العامل المخرب
٢. والحماية بإضافة موانع للتآكل.

معالجة التآكل

الوقاية المؤدية لعزل المادة المعرضة للتآكل

١. الوقاية بمعالجة الوسط المخرب:

تتم طرق الوقاية بالاعتماد على عمليات معالجة الوسط المخرب، بإحدى الوسائل التالية:

- تعديل درجة حموضة الوسط المخرب، بواسطة إزالة الغازات والأوكسجين وثنائي أوكسيد الكربون،
- أو عن طريق إضافة مواد قلوية مثل ماءات الصوديوم وغيرها.
- إزالة العامل المؤكسد، إذ يعتبر الأوكسجين أهم عامل مؤكسد.

معالجة التآكل

الوقاية المؤدية لعزل المادة المعرضة للتآكل

٢. الوقاية بإضافة موانع تآكل (الغلفنة):

- تعتبر هذه الطريقة، وسيلة فعالة للوقاية من عمليات التآكل،
- وهي تعتمد على إضافة مواد كيميائية، لها إمكانية توقيف عملية التآكل،
- بواسطة استقطاب التفاعلات المصعدية والمهبطية.
- كإضافة مواد مثل أملاح الكرومات والنترات والفوسفات،
- التي تشكل مع الشوارد المعدنية الموجودة في المحلول، أملاحاً غير منحلة تتوضع على سطح المعدن مكونة أغشية خارجية واقية (طبقة واقية) .

جَامعة
المَنارة
MANARA UNIVERSITY

شكراً لإصغائكم