# دراسة الاهتراءات الحاصلة في أنابيب المراجل البخارية والمبادلات الحرارية في الشركة العربية المتحدة للغزل والنسيج (شركة الدبس)

**م. علاء أبوحرب***

**د.م. حسن هدلة**** **أ.د.م. حسين تينة*****

**الملخص**

**عند القيام بزيارة ميدانية إلى الشركة العربية المتحدة للغزل والنسيج وجدنا كثيراً من المشكلات في وحدات التغذية بالبخار، وكان من أبرز هذه المشكلات حدوث اهتراءات في أنابيب المراجل البخارية، وانهيار كامل في المبادل الحراري الخاص بمصبغة الخيط (انهيار البدن والأنابيب)، لذلك قمنا بأخذ مجموعة من العينات وذلك في الأماكن التي تعاني من انهيارات بغرض تحديد الخواص الميكانيكية والكيميائية وإجراء المقارنة، ووجدنا بالتحليل أن أنابيب المراجل كانت مصنوعة من الفولاذ الكربوني، أمَّا عن أنابيب وجسم المبادل الحراري فكانت مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستينيتي، وقد تبيّن من خلال البحث أن أنابيب المراجل من الفولاذ الكربوني تعاني من انهيارات نتيجة التسخين الزائد، فضلاً عن تدمير هيدروجيني وهجوم أوكسيدي، وكان جسم المبادل الحراري يعاني من حدوث تآكل تصدعي ناجم عن ارتفاع نسبة الكروم فيه التي تصل إلى حدود 17%، ووُضِعَتْ مجموعة من الحلول متمثلة في أن تكون السطوح المعدنية نظيفة ومتجانسة، ويجب أن يكون ماء التغذية خالياً من الأملاح والمواد العالقة والغازات مثل ($O_2$،$CO_2$)، لأن وجود الأملاح والمواد العالقة يؤدي إلى تكون ترسبات سميكة على السطوح المعدنية تسبب الانهيار بالتسخين الزائد نتيجة لتغيّر خواص الانتقال الحراري، وتفاعل معدن الأنبوب مع الماء أو البخار يعطي غازات مثل ($H_2$) تسبب التدمير الهيدروجيني، ويجب أن لا تتجاوز نسبة الـ $O_2$ في ماء التغذية 0.5 $cm^3$/ liter، وأن يكون ماء التغذية قلوياً أي الـ Ph بين (10.5 – 11.5)،**

**الكلمات المفتاحية**: المراجل البخارية - المبادل الحراري - الفولاذ الكربوني – الأوستينيتي - تدمير هيدروجيني.

* أعد هذا البحث في سياق رسالة الماجستير للمهندس علاء أبوحرب بإشراف الدكتور حسن هدلة ومشاركة الأستاذ الدكتور حسين تينة.

** مدرس – قسم هندسة التصميم الميكانيكي – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق.

*** أستاذ - قسم هندسة الميكانيك العام – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق.

**1-1 المقدمة**:

التآكل هو التحول الذي يحدث في الهياكل المعدنية إلى تركيبات كيميائية جديدة للمعادن بسبب عوامل كيميائية أو كهركيميائية الذي يؤدي بدوره إلى انهيار المكون المعدني في البيئات كلّها **[1]**.لذلك يُعدُّ التآكل مشكلة مهمة في التطبيقات الصناعية مثل خطوط الأنابيب والخزانات والمراجل والمبادلات الحرارية لأنه يسبب خسارة في الخدمة و المواد.

ومع أن هناك عدة طرائق لتجنب التآكل مثل الحماية المهبطية والدهانات واستخدام المثبطات...الخ، إلا أنه ومع مرور الزمن تحصل انهيارات تبعاً للبيئة التي يعمل بها العنصر **[2]**.

ونظراً إلى أن صلب دراستنا يتعلق بالمراجل والمبادلات الحرارية فلا بدَّ من التعريف بكل منها:

**فالمرجل** هو مبادل حراري يستخدم في إنتاج البخار (الرطب، المحمص..) وهذا البخار يستخدم بدوره في توليد الطاقة والتدفئة وعمليات التصنيع..الخ.

لذلك كان من المهم أن نفهم سبب تآكل المراجل وأنابيب المراجل من أجل اتخاذ التدابير اللازمة للحماية من التآكل.

إن المشكلات الرئيسة للتآكل التي تحدث في المراجل تتمثل في: التآكل الأوكسجيني، والتدمير الهيدروجيني، والتآكل التصدعي الإجهادي، وتآكل التعب، والتآكل الكيميائي [3].

**أنابيب المراجل** تخضع للتآكل في أثناء مرور الماء أو البخار من داخلها، وارتطام النار بها من الخارج، لذلك يمكن تصنيف فشل أنابيب المراجل البخارية إلى **انهيار داخلي** نتيجة التعرض للماء أو البخار متمثلاً في انهيار التعب، **وانهيار خارجي** نتيجة التعرض للنار متمثلاً بالهجوم الأوكسيدي والتدمير الهيدروجيني والتعرية والتآكل التصدعي الإجهادي **[3]**.

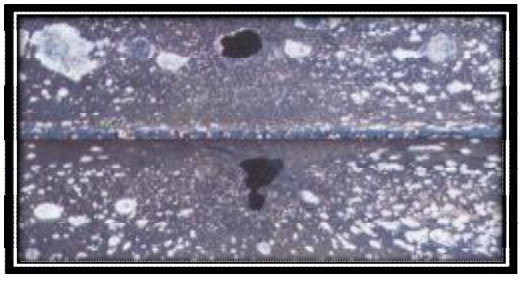
يحدث انهيار الأنابيب في أجزاء مختلفة من المرجل وقد جُمِعَتِ الإحصائيات التالية لحدوث الانهيار من أحد المراجع العلمية:

40% in water wall tubes, 30% in super heater tubes,15% in reheater tubes, 10% in economizers, 5% in cyclones **[4,5]**.

تستخدم **المبادلات الحرارية** في محطات الكهرباء، والمعامل الكيميائية، والبتروكيميائية، ومصافي النفط **[6]**، وتتمثل أفضل طرائق الحماية من التآكل في المبادلات الحرارية في التصميم الجيد للنظام والاختيار الأمثل للمواد[**7**].

تتعرض أنابيب المبادلات الحرارية لتآكل نقري (pitting corrosion) ويحدث التآكل النقري بسبب الفعل الكهركيميائي الناتج عن الاختلافات في تركيز الأوكسجين داخل الحفرة وخارجها، حيث يتصرّف المعدن غير المهاجم كمهبط ويتصرف الجزء الغني بالأوكسجين كمصعد، وإن وجود حفرة صغيرة جداً ووحيدة قد تسبّب انهياراً في المبادلات الحرارية.

يحدث التآكل النقري في الغالب عندما يكون النظام مطفاً وعند وجود الرواسب أو عندما يكون سطح المعدن غير نظيف**[8]** .

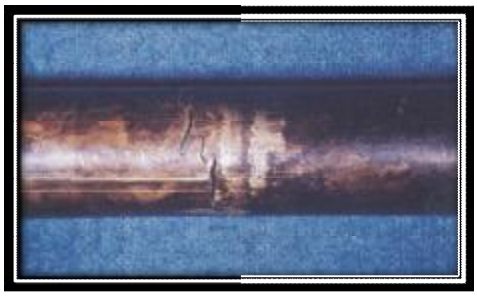


**الشكل (1-1) التآكل النقري في أنابيب المبادلات الحرارية [8]**

تتعرض أنابيب المبادلات الحرارية لتآكل إجهادي تصدعي (Stress corrosion cracking)، بحيث يظهر تأثير هذا النوع من التآكل في حدود الحبيبات

المعدنية عندما يعمل الجزء المعرض للوسط الأكّال تحت الإجهاد.

تحوي المبادلات الحرارية _على الأغلب_ إجهادات متبقية، وتتعرض معظم المعادن لهذا التآكل، والإجهادات التي تسبب شروخاً وشقوقاً في المعدن قد تكون مخزونة في أثناء تشكيله على البارد وفي أثناء عمليات اللحام، أو المعالجات الحرارية، أو نتيجة إجهاد مطبق خارجي في أثناء خدمة المعدن أو السبيكة**[8]**.



**الشكل (1- 2) التآكل التصدعي الإجهادي في أنابيب المبادلات الحرارية [8]**

يمكن أن تتعرض أنابيب المبادلات الحرارية لتآكل تشققي (Crevice corrosion) يتكون خصوصاً حول المناطق المعزولة، يمكن لهذه المناطق أن تكون بين مادة العزل والأنابيب.

ويظهر التآكل التشققي عادةً في البيئات التي تحتوي على**[8]**:

$$AlC_3 - CaC_2 - MgCl_2 - NaCl$$

**1- 2 المشكلة العلمية**:

تعاني شركة الدبس من مشكلات في المبادل الحراري الخاص بمصبغة الخيط، حيث يحدث التآكل في الأنابيب والبدن، ويلاحظ وجود ثقوب دهليزية في بدن هذا المبادل.

فضلاً عن حدوث تآكل في أنابيب المراجل البخارية.

لذلك كان لابدَّ من أخذ هذه المشكلة بالحسبان.

**3-1 الهدف من البحث**:

هَدَفَ هذا البحث إلى دراسة عمليات التآكل الحاصلة في الأنابيب، والسعي لإيجاد الحلول الملائمة (العملية والنظرية)؛ وذلك من خلال دراسة مشكلات التآكل المختلفة التي تتبع لظروف العمل، ووضع الاقتراحات الملائمة والمناسبة بهدف تفادي هذه المشكلات.

فضلاً عن جمع مجموعة من العينات مأخوذة من أنابيب المراجل البخارية وأنابيب المبادلات الحرارية الموجودة في شركة الدبس من أجل إجراء العديد من الاختبارات على هذه العينات في أوساط أكالة عند مدد زمنية مختلفة، ودراسة معدل التآكل في هذه الأنابيب.

**4-1 الدراسة العملية**

**1-4-1 مكان تنفيذ البحث**:

جمعت العينات من الشركة العربية المتحدة لصناعة الغزل والنسيج ( شركة الدبس )، حيث نفذ البحث بمراحله المختلفة في مخابر قسم التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق.

**2-4-1 المراجل في شركة الدبس**:

يوجد في الشركة المذكورة أربعة مراجل ثلاثة منها عامودية (أي مجموعة بواري مياه) والمرجل الرابع أفقي (أي قميص من الماء وبواري من اللهب) ويُغَذَّى كامل المعمل بواسطة هذه المراجل.

**3-4-1 المبادل الحراري**:

هذا المبادل موجود في مصبغة الخيط حيث يمر البخار من المحيط ويُسَخَّنُ الماء في أنابيبه حتى درجة حرارة وقدرها 130°م، هذا المبادل نفذته شركة ألمانية سنة 2004، وبعد سنة من العمل انهار الجسم حيث قامت الشركة المنفذة بإصلاحه وبعد أربع سنوات من الخدمة انهار الجسم مرة أخرى مع الأنابيب**[9]**.

**1-4-4**العينات

اختيرت عينة تخص أنابيب المراجل البخارية (الأفقي والعامودي) فضلاً عن عينة خاصة بأنابيب المبادل الحراري NTM OBERMAIER الخاص بمصبغة الخيط فضلاً عن عينة مأخوذة من جسم المبادل الحراري المذكور، وهي بحسب الآتي:

1 - عينة أنبوب مبادل حراري.

2- عينة مأخوذة من جسم مبادل حراري.

3- عينة أنبوب للمرجل العامودي.

**1-4-5 الاختبارات**:

**1- عينات القساوة**:

حُضِّرَتْ عينات لاختبار القساوة بأبعاد ($2\times2\ cm^2$) من العينات السابقة وأُجْرِيَتْ عمليات انهائية على آلات الجلخ باستخدام أطباق الشحذ بمقاسات (من 400 حتى 1200) من أجل الحصول على سطح نظيف ومستوٍ وملائم لإجراء اختبار القساوة.

**الشكل (1-3) عينات القساوة**

أُجْرِيَ اختبار القساوة على جهاز اختبار القساوة(HRA) عند حمولة قدرها (60 kg.f) والنتائج موضّحة في الجدول (1-1):

**الجدول (1-1)**

| الاختبار / رقم العينة | 1 | 2 | 3 | 4 | المتوسط |
|---|---|---|---|---|---|
| عينة رقم 1 | 59.3 | 60.7 | 59.5 | 58.2 | 59.4 |
| عينة رقم 2 | 54.9 | 55.7 | 55.8 | 56.2 | 55.7 |
| عينة رقم 3 | 47.7 | 48.4 | 48.4 | 47.9 | 48.1 |

**2 - عينات التحليل الكيميائي**:

حُضِّرَتْ عينات بأبعاد ( $2\times2\ cm^2$ ) من العينات السابقة، وأُجْرِيَتْ عمليات إنهائية على آلات الجلخ باستخدام أطباق الجلخ من أجل الحصول على سطح نظيف ومستوٍ وملائم من أجل معرفة التركيب الكيميائي للقطعة.

**الشكل (1-4) عينات التحليل الكيميائي**

ونتائج التحليل لكل عينة مبيّنة فيما يأتي بالترتيب:

**الجدول (1-2)**

| العينات | %Ti | %Ni | %Cr | %S | %P | %Mn | %Si | %C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| عينة (1) أنبوب مبادل حراري مستخدم | 0.248 | 9.28 | 16.88 | 0.0067 | 0.039 | 0.93 | 0.499 | 0.039 |
| عينة (2) عينة مأخوذة من جسم المبادل الحراري | | 9.16 | 17.7 | 0.0065 | 0.045 | 1.88 | 0.52 | 0.033 |
| عينة (3) أنبوب مستخدم للمرجل العمودي | | | | 0.0085 | 0.0086 | 0.375 | 0.107 | 0.081 |

**3- عينات الشد:**

حُضِّرَتْ عينات شد نظامية من العينات السابقة بحسب الجداول النظامية، والعينات موضّحة في الشكل (1-5) مجتمعة، إذْ حُضِّرَتْ ثلاث عينات شد لكل عينة من أجل المقارنة.

**الشكل (1-5) عينات الشد**

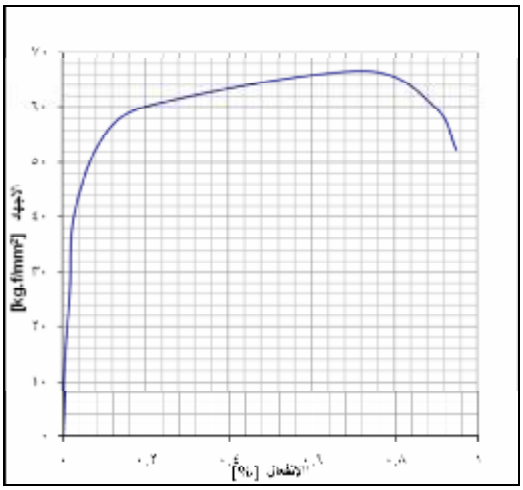
أُجْرِيَ الاختبار على آلة الشد في مخبر المعادن في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق، وبنتيجة شد العينات الثلاث السابقة حصلنا على مخطط (الإجهاد – التشوه) فضلاً عن حد الخضوع للفولاذ وقُورِنَ بالقيم النورمية لإيجاد نوع الفولاذ المستخدم.

يبيّن الجدول (1– 3) نتائج اختبار الشد، والأشكال (1-6) و(1-7) و(1-8) توضّح مخططات الإجهاد والتشوه للعينات من أجل مقارنة الخواص الميكانيكية للعينات بالقيم النورمية لإيجاد نوع الفولاذ المستخدم.

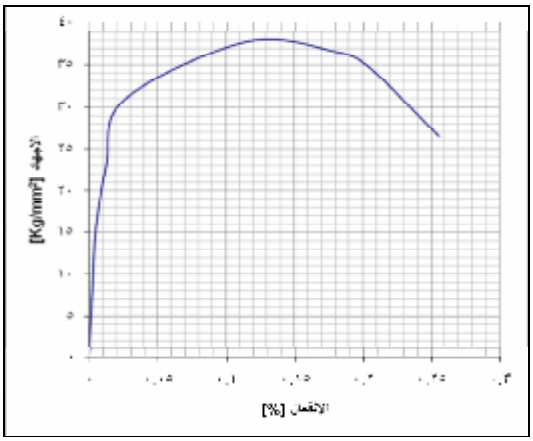
يبين الجدول (1-4) مقارنة خواص الشد للعينات المستخدمة والعينات النورمية /الخصائص الميكانيكية للفولاذ / وذلك من أجل تحديد نوع الفولاذ المستخدم:

**الجدول (1-3)**

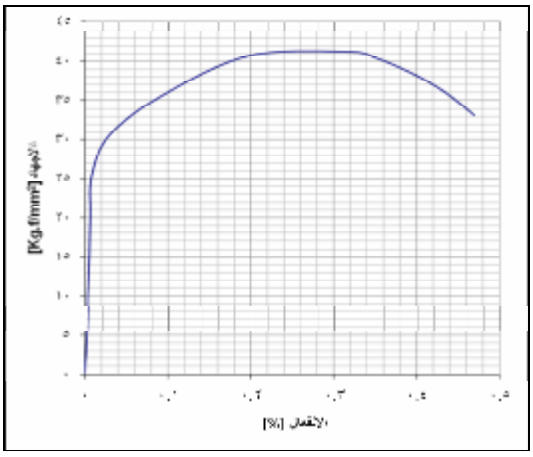
| العينة | | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|
| السماكة (a) | [mm] | 1.53 | 5.29 | 4 |
| العرض (b) | [mm] | 10 | 10 | 10 |
| مساحة المقطع الأولي | [mm²] ($A_0$) | 15.3 | 52.9 | 40 |
| طول العينة الأصلي | $L_O$ [mm] | 21 | 39 | 34 |
| طول العينة بعد التحميل | $L_I$ [mm] | 27.58 | 42.39 | 41.23 |
| الانفعال | ε [%] | 31.33 | 8.69 | 21.26 |
| حد المتانة | [Mpa] | 640 | 370 | 404 |
| حد الخضوع | [Mpa] | 509 | 304 | 294 |




**الشكل (1-6) مخطط الشد للعينة رقم 1**




**الشكل (1-7) مخطط الشد للعينة رقم 2**




**الشكل (1-8) مخطط الشد للعينة رقم 3**

**الجدول (1-4)**

| العينات | حد المتانة Tensile strength | | حد الانسياب Yield strength | |
|---|---|---|---|---|
| | Mpa | $Kgf/mm^2$ | Mpa | $Kgf/mm^2$ |
| 1 | 640 | 65.36 | | |
| S3210 | 620 | 63.2 | 310 | 31.6 |
| **** | **** | **** | **** | **** |
| 2 | 370 | 37.8 | | |
| S30403 | 450 | 45.9 | 170 | 17.3 |
| **** | **** | **** | **** | **** |
| 3 | 404 | 41.3 | | |
| G10100 | 370 | 38 | 300 | 31 |

**4- عينات تقدير معدل تآكل الأنابيب:**

حُضِّرَتْ أيضاً عينات من أجل تعريضها لأوساط تآكل مختلفة، ومن ثم حُسِبَ معدل التآكل السنوي لكل عينة على حدة، ومن خلال الجداول اِسْتُخْدِمَتِ المواد الآتية (NaCl- $H_2O_2$ ، NaOH) المتوافرة في مخبر الكيمياء في قسم العلوم الأساسية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق ونُفِّذَتِ التجارب في المخبر المذكور:

وأُجْرِيَتْ تجربة فقدان الوزن (weight loss) من خلال إجراء الخطوات الآتية:

1- أُخِذَتِ القطع المعدنية المحضرة ونُظِّفَتْ من الشحوم من خلال غسلها بالأسيتون لإزالة كل ما علق بها من مواد صلبة، ثم جُفِّفَتْ جيداً وقمنا بوزنها بواسطة ميزان حساس بدقة 0.001g، وذلك من أجل تحديد الوزن الابتدائي $W_0$.

2- بعد ذلك عُرِّضَ المعدن للوسط الذي نريد قياس التآكل عنده في المختبر؛ وذلك مدة زمنية محددة (96 ساعة لكل عينة).

3- بعد مضي المدة الزمنية للتعريض قمنا بغسل القطع بالماء وفَرْكِها بشكل جيد حتى تزول آثار التآكل ثم جُفِّفَ ووُزِنَ من جديد لتحديد الوزن بعد الاختبار $W_1$.

4- أُعِيدَتِ الخطوة رقم 2 مرتين وذلك باستعمال العينة نفسها وباستخدام محلول جديد وقياس الأوزان الجديدة $W_2$. , $W_3$

ثم حُسِبَ معدل التآكل السنوي بالمعادلة الآتية:

$$R = \frac{87.6 \times W}{D \times A \times T} \quad [10,11]$$

إذْ:

R هو سرعة التآكل محسوبة بـ mm/year

W هو الوزن المفقود بـ mg (الوزن قبل الغمس في الوسط - الوزن بعد الغمس)

D هي الكثافة وتكون مقيسة بـ $g/cm^3$

A هي المساحة المعرضة للتآكل محسوبة بـ $(cm^2)$

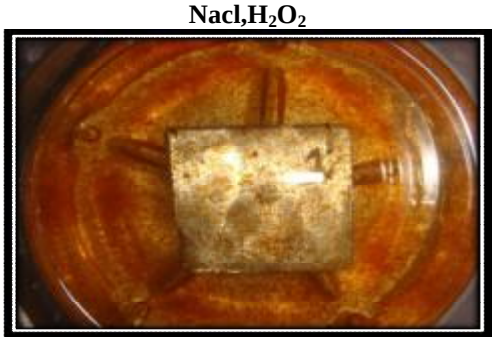
T هو الزمن بـ hour

وبعد حساب معدل التآكل (R) يمكن تحديد نوع التآكل كالآتي:

إذا كان معدل التآكل

- أقل من (0.02) mm/year فإن المعدن يكون لا يتأثر بالتآكل في ذلك الوسط.
- (0.1 - 0.02) mm/year المعدن مقاوم ممتاز للتآكل.
- (0.5 - 0.1) mm/year المعدن مقاوم جيد للتآكل.
- (1 – 0.5) mm/year المعدن متوسط المقاومة للتآكل.
- (5 – 1) mm/year المعدن ضعيف المقاومة للتآكل.
- (5) mm/year فما فوق المعدن لا يصلح البتة في ذلك الوسط [10,11]

**الشكل (1-9) العينة رقم (3) بعد التعرض لوسط التآكل $Nacl,H_2O_2$**



**الشكل (1-10) العينة رقم (1) بعد التعرض لوسط التآكل $Nacl,H_2O_2$**

ويبيّن الجدول (1-5) النتائج التي حصلنا عليها بعد الاختبار لكامل العينات:

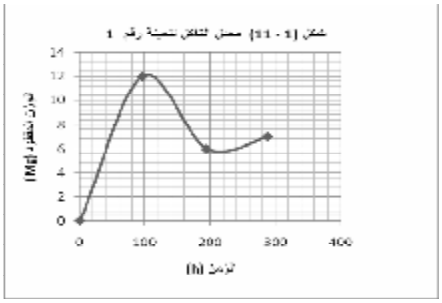
| نوعية التآكل | سرعة التآكل | المساحة المعرضة للتآكل | كثافة المعدن | الوزن المفقود |
|---|---|---|---|---|
| | (R) mm/year | (A) $cm^2$ | (D)$g/cm^3$ | (W) Mg |
| ممتاز | 0.044 | 31.0636 | 8 | 12 |
| ممتاز | 0.022 | 31.0636 | 8 | 6 |
| ممتاز | 0.025 | 31.0636 | 8 | 7 |
| جيد | 0.180 | 40.5446 | 8 | 64 |
| جيد | 0.191 | 40.5446 | 8 | 68 |
| جيد | 0.115 | 40.5446 | 8 | 41 |
| ممتاز | 0.051 | 29.1256 | 7.84 | 13 |
| ممتاز | 0.031 | 29.1256 | 7.84 | 8 |
| لا يتأثر | 0 | 29.1256 | 7.84 | 0 |

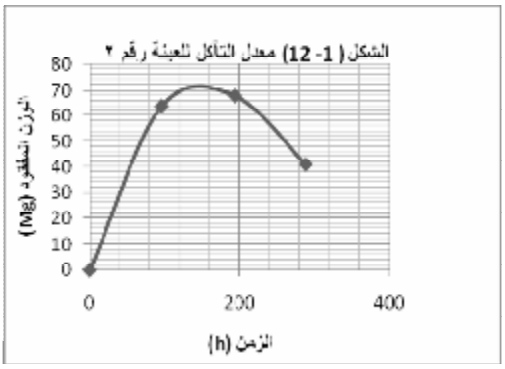
**الجدول (1-5)**

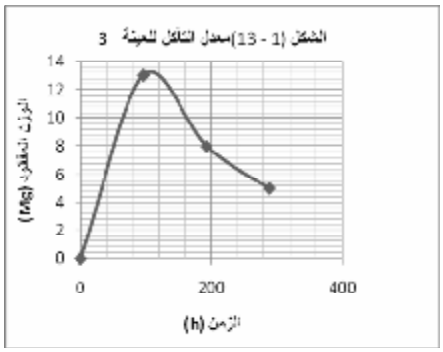
| رقم العينة | المحلول | زمن التعرض للمحلول | الوزن الابتدائي للعينة | الوزن بعد التعرض للمحلول |
|---|---|---|---|---|
| | | (T)hour | $(W_0)$ g | (W1) g |
| 1 | 15%NACL, 15%H2O2 | 96 | 14.787 | 14.775 |
| 1 | 15%NACL, 15%H2O2 | 96 | 14.768 | 14.762 |
| 1 | 15%NACL, 15%H2O2 | 96 | 14.752 | 14.745 |
| 2 | 10%NACL, 10%H2O2 | 96 | 52.986 | 52.922 |
| 2 | 10%NACL, 10%H2O2 | 96 | 52.922 | 52.854 |
| 2 | 10%NACL, 10%H2O2 | 96 | 52.854 | 52.813 |
| 3 | 20% NAOH | 96 | 32.787 | 32.774 |
| 3 | 20% NAOH | 96 | 32.774 | 32.766 |
| 3 | 20% NAOH | 96 | 32.766 | 32.766 |

وقمنا أيضاً برسم العلاقة البيانية التي تربط بين الـــوزن المفقود $\Delta w$ والزمن T إذْ لاحظنا نقصان الوزن المفقود مع مرور الزمن للعينات الثلاث.

أي إنَّ معدل التآكل ينقص بزيادة الـــزمن والمخططـــات البيانية للعينات الثلاث موضّحة في الأشكال الآتية:






**1 – 5 مناقشة النتائج**:

من خلال الجداول النظامية نلاحظ أن العينات (1 ، 2) هي عينات من نوع الفولاذ المقاوم للصدأ الاوستنيتي (Austenitic type)، وبنيتها البللورية تكون مكونة من مكعبات متمركزة وجهياً يدخل فيها بعض عناصر الخلط الأوستنيتية مثل (النيكل، المنغنيز، النتروجين..)، ولها خصائص جيدة عند درجات الحرارة العالية إذْ يتراوح الكروم بين (16--- 20%) ويصل النيكل إلى 35%، وهناك بعض العناصر يمكن أن تضاف إليها بقصد تحسين بعض الخواص مثل: المولبيديوم والنحاس والسيلكون والألمنيوم والتيتانيوم ... من أجل منح الخليطة بعض الخصائص مثل مقاومة التآكل النقري ومقاومة التأكسد.

يمكن أن يضاف إليها أيضاً الـ selenium, sulfur من أجل تحسين عمليات التشغيل.

العينة رقم (3) هي عينة أنبوب خاص بالمراجل من الفولاذ الكربوني.

**في الواقع** وبحسب الدراسة المرجعية تتعرض أنابيب المراجل المصنوعة من الفولاذ الكربوني (عينة رقم 3) إلى انهيارات بسبب التسخين الزائد في مدى دقائق معدودة أو يمكن حدوثها بعد عدة سنوات، وهذا الانهيار يحدث في جزء طولي من الأنبوب مع حدوث تشويه غير مرن ملحوظ قبل الكسر، ويسمى هذا الكسر كسر الزحف.

الزحف هو الانهيار الحاصل الذي يؤدي إلى تغيّر في الشكل والأبعاد للمعدن تدريجياً وببطء بسبب التعرض لدرجات حرارة عالية؛ مما يؤدي إلى استطالة المعدن ونقصان في المقطع العرضي له ويؤدي ذلك في النهاية إلى كسر المعدن.

وتعود أسباب زيادة درجة الحرارة إلى:

1 – تكون الصدأ الداخلي، ويتكون الصدأ الداخلي نتيجة ما يأتي:

- خلال عملية التشغيل في الأنظمة المغلقة، حيث يكون الضغط الداخلي أقل من الضغط الجوي.
- عند الإصلاح أو التنظيف.
- نتيجة لتحلل جزيء الماء، وهذا التحلل يؤدي إلى تفاعل الأوكسجين مع الحديد مشكلاً أكاسيد الحديد أو هيدروكسيد الحديد.

2 – قلة جريان البخار في منطقة ما.

3 – الجريان غير المنتظم للبخار.

4 – عدم التحكم في الموارد المحترقة.

5 – انسداد الأنبوب (حدوث تكثيف مفاجئ للبخار).

6 – ارتطام اللهب بالأنبوب.

نظراً إلى أن انتقال الحرارة في المراجل من خلال الأنابيب له ثلاث مراحل وهي:

1 – انتقال الحرارة من الغازات المحترقة بالحمل والإشعاع إلى الأنابيب.

2 – انتقال الحرارة بالتوصيل من خلال الأنابيب حيث تنتقل الحرارة إلى السائل المحيطي.

3 – انتقال الحرارة بالحمل من سطح السائل (المحيطي) إلى السائل الداخلي.

يؤدي وجود طبقة الصدأ الداخلي إلى حدوث انهيار الزحف (لأن الصدأ له توصيل حراري منخفض) ومن ثَمَّ يؤدي ذلك إلى حدوث الانهيار.

- تتعرض أنابيب المبادلات الحرارية وهي من نوع الفولاذ الاوستنيتي المقاوم للصدأ (321H) (عينة رقم 1) والبدن المصنوع من الفولاذ الاوستنيتي المقاوم للصدأ (304L) (عينة رقم 2) إلى تآكل تصدعي تشققي، وذلك لأن نسبة الكروم في هذه الأنواع من الفولاذ عالية (أي بحدود 16 – 19 %)، إذْ إنَّ الكروم يخفض معدل التآكل ولكن لا يحمي الفولاذ من حدوث التصدعات عند درجات الحرارة العالية (أي إنَّ التصدعات تزداد بازدياد نسبة الكروم)، ووجود الكروم وبنسبة عالية يزيد من نمو البللورات المعدنية ومن ثَمَّ حدوث الهشاشية والانهيار عند درجات الحرارة العالية[12].

- تتعرض أيضاً أنابيب المراجل المصنوعة من الفولاذ الكربوني إلى ما يسمى بالتدمير الهدروجيني (انهيار التقصف أو الغرفتة) ويتميّز هذا الانهيار بأنه يحدث ككسر على الحدود الحبيبية حيث يكون مصحوباً بنزع الهيدروجين.

علماً أن الهيدروجين هو من نواتج التفاعل الأساسي للتآكل بين الحديد والماء إذْ إنَّ هذا الهيدروجين الذري يتفاعل مع ذرة أخرى مشكلاً جزيء الهيدروجين الذي يمر إلى المعدن كذرات عالية النشاط وهذا ما يسبب هذه الظاهرة، ويصاحب ذلك أيضاً ترسبات سميكة؛ لذلك فإن المعدن يتآكل في ظروف حامضية أو قلوية، وبوجود الترسبات ترتفع درجة الحرارة وينتشر الهدروجين في الفولاذ ويتفاعل مع كربيد الحديد مشكلاً الفريت والميتان، والميتان جزيء كبير لا يستطيع الانتشار خارج الصلب، لذلك يتجمع على حدود حبيبات الفريت، وعندما يكون الضغط كافياً ترحل هذه الجزيئات مشكلة فراغاتٍ وشقوقاً خلفها مما يؤدي إلى الانهيار.

- إن المشكلة الأساسية التي يجب أن تنال قسطاً كبيراً من الاهتمام هي خصائص الماء المستخدم في تغذية المراجل، لما له من أثر كبير في عملية التآكل وحدوث الانهيارات إذْ إنَّ الماء غير المعالج يحتوي على أملاح ذائبة (الكربونات، وكلوردات الكالسيوم أو الصوديوم أو الماغنزيوم، وبعض أملاح الحديد والألمنيوم) وغازات (الأكسجين و ثاني أكسيد الكربون) وبعض المواد العالقة عضوية وغير عضوية (الألومينا والسيليكات) وكلها تؤدي إلى تكوين ترسبات وحدوث الصدأ والتآكل الذي ينتهي بالانهيار و الخروج عن العمل.

من أهم الأملاح التي يمكن أن تؤثر في أنابيب المراجل والمبادلات وتكون طبقات ترسيب هي بيكربونات الكالسيوم والمغنزيوم وتوصف بأنها قلوية، إذْ تتحلل هذه الأملاح نتيجة لارتفاع درجات الحرارة والضغط إلى كربونات الكالسيوم و الماغنزيوم وفقاً للمعادلات الآتية:

$$Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O + CO$$

$$Mg(HCO_3)_2 \longrightarrow MgCO_3 + H_2O + CO_2$$

وتترسب أملاح كربونات الكالسيوم والمغنزيوم على الأنابيب، يطلق على البيكربونات عسر قلوي (مؤقت) أمَّا الأملاح الأخرى مثل السلفات فتسمى عسر غير قلوي ( دائم ).

وهذه الرواسب تنتج عند ارتفاع نسبة الأملاح في الماء

عن حد الذوبان.

- تعاني الأنابيب من التآكل نتيجة لتحول المعدن إلى أكسيد الحديد، ويكون خطراً جداً إذا حدث في أنابيب المراجل لأنها تقع تحت ضغط وتحوي على كميات كبيرة من المياه في حالة تحوله إلى بخار، وهذا التآكل يحدث نتيجة لوجود الأكسجين وأكسيد الكربون أو كلوردات الماء (لكن المؤثر الأساسي هو الأكسجين الذائب) إِذْ إنَّ هذا الأكسجين يمكن أن يتسرب في الدوائر المغلقة من خلال مياه التعويض، والخزانات المفتوحة .... ، ويبدأ التآكل في مناطق صغيرة (حفرة صغيرة) مغطاة بأوكسيد الحديد، ومن ثم تكوّن هذه الحفر يتبعه شروخ سريعة تنتهي بانهيار الأنبوب، ويشتد تأثير الأوكسجين في معدن الأنابيب بعد ضغط 10 bar.

- نلاحظ أن جسم المبادل الحراري تعرض لعملية تآكل نقري، وهذا عائد إلى التصميم الخطأ الذي أدى بالنهاية إلى تكون إجهادات داخلية أي عيوب داخل البنية تحررت في أثناء العمل مشكلة هذا التآكل، إِذْ لاحظنا وجود ثقوب دهليزية في المعدن كانت واسعة في بعض المناطق وضيقة في مناطق أخرى وكانت منفردة وكأنها سطح خشن، لذلك وجود هذا العيب في المعدن أدى إلى انحلال المعدن وأصبحت هذه المنطقة مصعداً بالنسبة إلى المساحة المهبطية الكبيرة ومن ثَمَّ أدى ذلك إلى زيادة الشوارد الموجبة في المنطقة السطحية ونتج تآكل نقري عن عدم تجانس المنطقة في المعدن أي عدم نظافة سطح المبادل المعرض للبخار ودرجات الحرارة العالية، ووجود الكروم بنسبة عالية فيه يؤدي دوراً أساسياً في الحماية من التآكل ولكنه يؤدي إلى زيادة نمو البللورات المعدنية التي تؤدي إلى هشاشية بالمعدن ومن ثَمَّ يصبح معدن الجسم أكثر عرضة لحصول تصدعات بدرجات الحرارة العالية.

- لذلك اقترحنا بعض الحلول العملية للأنابيب الموجودة لدينا بالعودة لسلسلة (ASTM) وتوصيات الباحثين في هذا المجال إِذْ يمكن استخدام أنواع أخرى من الأنابيب أيضاً تتمتع بخصائص معينة وفيما يأتي شرح لها:

الفولاذ (ASTM – A192) من النوع منخفض الكربون الفولاذ (ASTM – A210) هو من نوع الفولاذ المتوسط الكربوني مستخدم في أنابيب المراجل، وكلا النوعين السابقين مصنفان من نوع الأنابيب الفولاذية الكربونية المتحملة للضغوط( carbon steel pressure tubes).

الفولاذ (ASTM – A692) مستخدم في أنابيب المراجل والمبادلات الحرارية وهو من الفولاذ السبائكي المنخفض الكربوني المولبيديني، وهو مصنف من نوع الأنابيب الفولاذية السبائكية المتحملة للضغوط (alloys steel pressure tubes)، نلاحظ أن وجود المولوبيدينيوم فيه يحسن من مقاومة الزحف في هذا النوع من الفولاذ.

- إن إجراء استبدال للأنابيب من دون أن تكون هناك معالجة للماء تكون عملية غير مجدية، لذلك يجب أن تتمتع المياه التي تؤمن للمراجل بمواصفات خاصة لتلافي ترسيب الأملاح على المواسير المستخدمة في كلا المرجلين الأفقي والعامودي، من أجل أن تنتقل الحرارة عن طريق الأنابيب إلى المياه من دون وجود طبقات ترسيب الأملاح؛ لأن وجود هذه الطبقات يؤدي إلى:

- زيادة الحرارة داخل الأنابيب (المرجل الأفقي) أو خارج الأنابيب (المرجل العامودي).
- تقليل كفاءة المرجل وزيادة استهلاك الوقود.

- سرعة تآكل معدن الأنابيب بسبب تحلل الأملاح إلى أحماض تتفاعل مع المعدن.

لذلك لابدَّ من عملية معالجة المياه من الأملاح عن طريق وحدة معالجة تضمن أن تكون مياه التغذية للمراجل خالية من الشوائب والعوالق العضوية وغير العضوية، وأن تكون خالية من الغازات الذائبة مثل

($O_2$, $CO_2$)، وأن تكون خالية من الأملاح والمركبات الكيميائية.

إذْ تتوافر عدة طرائق لمعالجة المياه وهي كالآتي:

1 - المعالجة الداخلية: وذلك عن طريق إضافة كيماويات تحول الأملاح إلى مكونات أخرى لا تذوب وتُزَالُ من المرجل عن طريق عملية التفوير، ولكن هذه الطريقة مجدية فقط في المراجل ذات الضغوط الصغيرة أي أقل من 10 bar، لذلك تكون غير مجدية في دراستنا هذه لأن الضغوط الدنيا للمراجل في الشركة تصل إلى 31 bar، فضلاً عن أنها تكوّن رواسب تؤدي إلى عدم نظافة أنابيب المرجل، حيث تُستَخْدَمُ كربونات الصوديوم التي تحول أملاح الكالسيوم إلى كربونات الكالسيوم التي تبقى معلقة في الماء.

2- المعالجة الخارجية: ويجري ذلك من خلال وحدات معالجة خارج المرجل إذْ تُستَخْدَمُ أنواع مختلفة مثل:

أ - مزيل الأملاح المعدنية: يستخدم في حالة المراجل ذات الضغوط الكبيرة والحصول على ماء خالٍ تماماً من الأملاح، وكذلك للتخلص من السيليكا التي تترسب على السطوح ويكون لها تأثير كبير لانخفاض معامل توصيلها الحراري، إذْ يستخدم هنا نوعان من الريزين أحداهما يعمل على إزالة الأيونات المعدنية الموجبة

(الكالسيوم والماغنسيوم والصوديوم ....) والآخر يعمل على إزالة الأيونات المعدنية السالبة (السلفات والكلوريدات والسيليكات والبيكربونات .....).

ب- المبخرات: في عملية التبخير يُنْتَجُ ماء خالٍ تماماً من الشوائب والأملاح، حيث يستخدم حالياً طريقة في التبخير بالنظام العكسي (Ro).

ج - إزالة الغازات: يوجد الأوكسجين في ماء التغذية ويهاجم الأكسجين شبكة الخطوط لذا لابدَّ من إزالته، كما يوجد غاز ثاني أوكسيد الكربون في ماء التغذية ويسبب انخفاض الرقم الهيدروجيني؛ مما يتطلب معالجة كيميائية من أجل رفع هذا الرقم، وغاز ثاني أوكسيد الكربون الذي يخرج مع البخار يتحد مع البخار المتكاثف مشكلاً ماءً شديد التعطش للتفاعل مع الأنابيب إذْ يتكون هذا الغاز نتيجة لتحلل البيكربونات عند ارتفاع درجة الحرارة بالتسخين.

تُزَالُ كمية كبيرة من الأوكسجين طبيعياً من خلال عمل سخان داخل خزان التغذية يقوم بتسخين الماء، أو استخدام نظام رجوع المتكاثف إلى خزان التغذية.

وكيميائياً من خلال إضافة بعض الكيماويات مثل الهيدرازين إذْ يستخدم في المراجل ذات الضغوط الكبيرة، وهو غاز يتفاعل مع الأوكسجين مشكلاً الأمونيا والماء، والأمونيا ليست جسماً صلباً حيث يزداد التفاعل بازدياد درجة الحرارة، والأمونيا الناتجة تبطل تفاعل ثنائي أكسيد الكربون وتعطي الحماية لخط التغذية وخط الرجوع، أو إضافة الأمينات إذْ إنَّها تكون طبقة تحمي المعدن من عوامل التآكل وتُضَافُ مباشرة في البخار بمعدل 0.5 -2 جزءاً في المليون، وتجب إضافتها باستمرار حتى تتكون الطبقة التي تحمي السطوح.

**1 - 6 الاستنتاجات**:

**1**- تتعرض أنابيب المراجل البخارية إلى انهيارات بسبب التسخين الزائد نتيجة تكون الصدأ الداخلي (كسبب رئيسي) إذْ إنَّ هذا الصدأ ذو ناقلية حرارية منخفضة.

**2**- تتعرض أنابيب المراجل البخارية إلى انهيارات التقصف أو الغرفتة (التدمير الهيدروجيني) ويتميّز هذا

الانهيار بأنه يحدث على شكل كسر على الحدود الحبيبية ويكون مصحوباً بنزع الهيدروجين.

**3**- تتعرض أنابيب المراجل البخارية إلى انهيارات بسبب حدوث التآكل التصدعي الإجهادي (SCC)، وينتج عن الفعل المشترك لكل من الإجهاد الميكانيكي والوسط الآكل ويؤدي في ظروف الضغط والحرارة إلى تآكل وتشقق المعدن.

**4**- تتعرض أنابيب المبادلات الحرارية إلى انهيارات بسبب تحول المعدن إلى أكسيد إذْ إنَّ هذا التآكل يحدث نتيجة لوجود الغازات الذائبة في الماء مثل (الأوكسجين وثنائي أكسيد الكربون وكلوريدات الماء) التي تتفاعل مع معدن الأنبوب مسببة انحلال هذا المعدن و تشكل الأكاسيد.

**5**- يتعرض جسم المبادل الحراري (العينة رقم 2) إلى عملية تآكل نقري (Pitting)؛ وهذا عائد إلى وجود إجهادات داخلية أي عيوب داخل البنية تحررت في أثناء العمل مشكلة حدوث هذا النوع من التآكل (نتج عنها ثقوب دهليزية كانت واسعة في بعض المناطق)، ووجود هذا العيب أدى إلى انحلال المعدن وأصبحت المناطق المعيبة مصعداً بالنسبة إلى المساحة المهبطية الكبيرة.

**6**- بالنسبة إلى أنابيب المراجل البخارية يمكن استخدام كبديل النوع (ASTM-A192) وهو من نوع الفولاذ المنخفض الكربوني أو النوع (ASTM-A210) وهو من نوع الفولاذ المتوسط الكربوني وكلا النوعين مصنفان ضمن لائحة الأنابيب الفولاذية المتحملة للضغوط (Carbon steel pressure tube).

**7**- يمكن استخدام النوع (ASTM-A692) وهو من الفولاذ السبائكي منخفض الكربون الموليبديني كبديل لأنابيب المبادلات الحرارية وأنابيب المراجل، إذْ إنَّ وجود المولوبيدينيوم يحسن مقاومة الزحف في هذا النوع.

والجدول رقم (1 - 6) يوضح التركيب الكيميائي لأنواع الفولاذ الثلاثة (ASTM-A192) و(ASTM-A210) و(ASTM-A692)

**الجدول (1 – 6 )**

| التركيب الكيميائي للفولاذ البيلي | ASTM- A192 | ASTM- A210 | ASTM–A692 |
|---|---|---|---|
| %Mo | ----- | --- | -0.42 0.68 |
| %S | 0.058 | 0.058 | 0.045 |
| %P | 0.048 | 0.048 | 0.045 |
| %Mn | 0.63-0.27 | 0.93 | 0.94-0.46 |
| %Si | max 0.25 | max 0.1 | 0.37-0.18 |
| %C | 0.18-0.06 | 0.27 | 0.26-0.17 |

**8**- بالنسبة إلى جسم المبادل الحراري فإن الفولاذ المستخدم هو من نوع الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي، وهو جيد الخواص والاستخدام ولكن نظراً إلى التآكل النقري الحاصل فيه ناتج عن عيوب في التصميم أو حدوث تخريب ميكانيكي، فإنه للحد

من حدوث هذا التآكل لابدَّ أن يكون السطح نظيفاً ومتجانساً و مخلصاً من الإجهاد.

**9-** يجب أن تتمتع المياه المرجلية بمواصفات فنية جيدة، أي يجب أن تكون خالية تماماً من الشوائب والعوالق غير عضوية (الألومينا والسيليكات) التي تكون الرواسب و القشور على جسم الأنابيب، ويجب أن تكون خالية من الغازات الذائبة (الأوكسجين وثنائي أكسيد الكربون وكلوريدات الماء) والمؤثر الأساسي هو الأكسجين الذائب إذْ يتفاعل مع معدن الأنبوب مشكلاً الصدأ (أكسيد الحديدوز الأسود $Fe_2O_3$) ومن ثَمَّ حدوث التآكل، ويجب أن تكون خالية من الأملاح والمركبات الكيميائية التي تبدأ بالترسب على الأنابيب مكونة طبقات من القشور، ومن ثَمَّ مسببة الانهيار نتيجة التسخين الزائد للأنابيب، لذلك لابدَّ من مراعاة القواعد الآتية:

- نظراً إلى أنه يشتد تأثير الأكسجين الذائب في معدن الأنابيب بعد ضغط 15 bar فلا بدَّ أن يكون الحد المسموح به لوجود الأوكسجين الذائب في الماء أقل من 0.5 $cm^3$/liter.
- للمحافظة على طبقة التأكسد الأولى وعدم حدوث تغيّرات كيميائية يلزم أن يكون ماء التغذية قلوياً ولابدَّ من المحافظة على PH المحلول بين 10.5 – 11.5.
- يمكن قياس الأملاح الذائبة في الموقع بواسطة جهاز الهيدرومتر (جهاز قياس معامل التوصيل الكهربائي TDS) ونظراً إلى أن الماء الخالي من الأملاح موصل رديء للكهرباء ووجود الأملاح فيه تجعله موصلاً جيداً للكهرباء وبناءً على هذه الخاصية يمكن تحديد كمية الأملاح المذابة في الماء مقارنة بالميكروأوم (1 ميكروأوم = 0.9 جزءاً من المليون أملاح ذائبة في ماء التغذية) أمَّا في المتكاثف (1ميكروأوم = 0.5 جزءاً من المليون) لذلك يجب أن لا تزيد TDS في المراجل التي تعمل عند ضغط 21 bar على 3500 جزء من المليون ويجب أن لا تزيد TDS في المراجل التي تعمل عند ضغط 52 bar على 2000 جزء من المليون.

**10-** في أثناء مدة تعريض العينات الثلاث للوسط الآكل بدأت عملية تآكل سريعة خلال 96 ساعة الأولى (فقدان في الوزن نتيجة الانحلال) ومع مرور الزمن خلال مدد التعريض التالية حدث نقصان في معدل التآكل نتيجة لتكون طبقة التأكسد الأولى التي تكبح عملية التآكل، ولكن عند اجتماع عوامل التآكل من وسط أكّال ودرجة حرارة مناسبة فإن عملية التآكل سوف تستمر الأمر الذي يؤدي في النهاية إلى الانهيار.

**1 - 7 المقترحات والتوصيات:**

**1-** لابدَّ من العمل على زيادة غزارة محطة المعالجة الموجودة في شركة الدبس إذْ إنَّ معدل غزارتها يبلغ 60 $m^3$/hour، وهذه الغزارة غير كافية لتغطية المعمل ككل لأنَّ بعض الآلات المستخدمة في هذه الشركة مثل مصبغة الخيط تحتاج إلى $m^3$/hour 40 والحاجة الكلية للمعمل تفوق 120 $m^3$/hour.

**2-** استكمال دراسة التآكل في الشركة من خلال أخذ عينات تخص جسم المراجل وتحليلها وإجراء اختبارات لا إتلافية عليها وتحديد أنواع التآكل التي تتعرض له والعمل على وضع الحلول المناسبة.

**3-** ضرورة مراعاة قواعد السلامة وإجراء الصيانة اللازمة لما له الأثر الكبير في استمرارية العمل، ودرء مخاطر الأعطال الطارئة في القطاع الصناعي.

4- نظراً إلى أن موضوع التآكل من الموضوعات المهمة التي تعاني منها القطاعات الصناعية في بلدنا الخاصة والعامة، فلابدَّ من ربط هذه القطاعات الصناعية بالبحث العلمي من خلال البحوث التي يجري العمل بها في جامعاتنا، وأنوه إلى ضرورة وجود تواصل بين القطاع الصناعي والجامعة علنا نتعاون من أجل درء مخاطر التآكل والاهتراء في معامل هذا البلد.

5- استكمال دراسة الحماية من التآكل من خلال استخدام طريقة التلبيس ذات المواد عالية الكفاءة التي تتمتع بخصائص ميكانيكية ممتازة (المقاومة العالية للحرارة والقساوة العالية) مثل المواد السيراميكية، أو أي مواد أخرى تحقق الغرض المطلوب منها.

**المراجع**:


**[1]** Talbot, D., and Talbot, J. (1998) "Corrosion Science and Technology", Materials Science and Technology, CRC Pres.

**[2]** Davis, G.D., Dacres, C.M., and Shook, M.B. (1998) "Development of an electrochemistry-based corrosion sensor to monitor corrosion of boiler tubes, pipes, and painted structures", Proceedings of SPIE, 3398, pp. 92-101.

**[3]** Ahmad, Z. (2006) "Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control", Boiler Corrosion, Chapter 11, pp.576-608.

**[4]** Jonas, O. (1992) "Boiler Tube Sampling and Inspection Procedures", Recommended Practices, Water Chemistry Control. Jonas, Inc., Wilmington, DE.

**[5]** Mobin, M., Malik, A.U., and Al-Hajri, M. (2008) "Investigations on the Failure of Economizer Tubes in a High-Pressure Boiler", J. Fail. Anal. And Preven., 8, pp. 69-74

**[6]** Golovin V. A., and Kublitskii K. V. (2003) "Corrosion Damage To Heat-Exchanger Pipes and Anticorrosion Repair Methods", Chemical and Petroleum Engineering, 39, No: 7–8.

**[7]** http://www.muhendisforum.net /index.php?topic=698.0.

**[8]** Schwartz, M.P., (1981) "Four Types of Heat Exchanger Failures", Dun-Donnelley Corp.

**[9]** الـشركة العربيــة المتحـدة للغـزل والنــسيج (شــركة الدبس) – سورية – دمشق– 2009

**[10]** Http: // board.arabchemistry.net /showthread.php

**[11]** www.arab-eng.org/vb/t48861-html

**[12]** Y.F. Cheng and F.R. Steward, (2004) "Corrosion of carbon steels in High- temperature water studied by electrochemical techniques ", Centre for Nuclear Energy Research, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada E3B 6C2, vol. Corrosion S cience 46, pp. 2405–2420.


تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2013/12/19