The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, Vol.10, No.3, 2010

دراسة تأثير إضافة البولي استر غير المشبع في السلوك التاكلي للفولاذ واطئ الكاربون في المحاليل التاكلية

شيماء جابر كريم

جامعة بابل/كلية هندسة المواد/قسم هندسة المواد اللامعدنية

الخلاصة:

يتضمن البحث الحالي دراسة تأثير إضافة البولي استر غير المشبع على سلوك التاكلي للفولاذ واطئ الكاربون باستخدام طريقة الغمر البسيط في محاليل تاكلية (حامضية وملحية) في درجة حرارة الغرفة، وقد تم استخدام طريقة التغير في الوزن كمقياس لتأثر الفولاذ الكاربوني بالأوساط التاكلية المختلفة وكذلك استخدم التصوير بالمجهر الضوئي بقوة تكبير (600X) لدراسة سطوح النماذج الفولاذية المتآكلة.

أظهرت النتائج التي تم التوصل إليها إن عند إضافة المثبط العضوي (الهكسامين) بنسبة(0.5M in HCl و0.1M in NaCl) إن معدل التآكل انخفض بشكل كبير وبكفاءة تثبيط تصل إلى (81.5%) و (66.3%) في المحاليل الحامضية والملحية على التوالي، كما أثبتت النتائج إن معدل التآكل انخفض بشكل اكبر وبكفاءة تثبيط وصلت (96.4%) و (93.7%) في المحاليل الحامضية والملحية على التوالي وذلك عند إضافة نسبة (1%) من البولي استر غير المشبع للمحاليل التاكلية المضاف إليها الهكسامين أيضا عند درجة حرارة الغرفة.

الكلمات الدالة:التآكل، الفولاذ الكاربوني، HCl، NaCl، المثبطات، البولي استر،الهكسامين.

Studying the Effect of Addition Unsaturated Polyester on the Corrosion Behavior of the Low Carbon Steel in Corrosion Solutions

Shaima'a J. Kareem

Babylon University/ College of Materials Eng. / Nonmetallic Engineering Dep.

Abstract:

This work included study of the effect of addition the unsaturated polyester on the corrosion behavior of the low carbon steel using the simple immersion method in acid and salt solution at room temperature. The weight loss method used as an indicator to the effect of the solution on the low carbon steel. The microscopic examination with (600 X) is used in this study too.

The results showed when added the Hexamine (0.5M in HCl and 0.1M in NaCl) decreased the rate of corrosion while the inhibition efficiency reached (81.5%), (66.3%) for HCl and NaCl solution respectively, and that result improved the rate of corrosion decreased while the inhibition efficiency reached (96.4%), (93.7%) for HCl and NaCl solution respectively when added (1%) from unsaturated polyester on the corrosion solutions which contained Hexamine at room temperature.

Keywords: Corrosion, Carbon Steel, HCl, NaCl, Inhibitors, Polyester, Hexamine.

المقدمة:

إن فهم عملية التآكل والسيطرة عليها أصبح ضرورة علمية واقتصادية حيث إن أضراره بليغة إلى درجة يطلق عليها صناعة معاكسة نظرا للخسائر الكبيرة التي تسببها وقد تأخذ هذه الخسائر صيغ مختلفة كتبديل الأجهزة المتآكلة واستعمال معادن وسبائك باهظة الثمن ذات مقاومة عالية للتآكل أو غلونة المعادن أو طلائها بمعدن مقاوم للتآكل أو إضافات كيميائية مضادة لحماية المعدن من الضرر (K.J. Solaiman, 1988).

جميع دول العالم وخاصة الصناعية منها والمتقدمة تعاني من مشاكل التآكل ويبلغ مقدار ما يفقده العالم من إجمالي إنتاج المعادن حوالي(10%) وتبلغ التكاليف الناتجة عن هذه الخسائر والمبذولة لغرض التخفيف أو التخلص منها مليارات الدولارات سنويا(قحطان الخزرجي، عبد الجواد محمد.1987).

إن واحدة من أهم التقنيات المستعملة بشكل واسع لتقليل أو منع تآكل المعادن هو استعمال المثبطات Inhibitors وهي مركبات كيميائية تعمل بشكل فاعل على اختزال معدل التآكل للمعدن الذي يتعرض للمحيط المضافة له وعادة تضاف هذه المركبات بتراكيز قليلة نسبيا إلى النظام(I.K .Salih, 2003). وذلك عن طريق تفاعلها مع السطح المعدني أو مع الوسط الذي يتعرض له السطح المعدني وتعطي سطحا معدنيا محميا من التآكل والآلية الأساسية لعمل المثبطات هي آلية الامتزاز Adsorption على السطح المعدني نفسه وتعمل على تكوين غشاء Film على السطح المعدني وهي تعمل على تقليل عملية التآكل عن طريق زيادة سلوك الاستقطاب الكاثودي أو الانودي، اختزال انتشار الايونات على سطح المعدن، زيادة المقاومة الكهربائية للسطح المعدني(E.W. Klechka, 2001). ففي صناعة تكرير النفط Refinery Oil والصناعات التحويلية Processing Industries وأنظمة السوائل المتبخرة Vapour-Liquid System يعتبر استعمال مثبطات التآكل الخط الأول في الطرق لحماية المعدن من التآكل(O.K. Abiola, N.C Oforka, 2002).

أجريت العديد من الدراسات والبحوث هدفها حماية الفولاذ الكاربوني من التآكل باستخدام المثبطات ومن هذه الدراسات والبحوث: قيام الباحث(N. Shaker, 1987) دراسة تأثير إضافة مادة الهيكسامثيلين تترامين Hexamethylenetetramine والمعروف بالهكسامين Hexamine كمثبط لتآكل الفولاذ الكاربوني في محاليل الحامض HCl وهي من المثبطات العضوية التي تعمل بالامتزاز على سطح المعدن وقد وجد إن زيادة تركيز المثبط تؤدي إلى زيادة كفاءة التثبيط وذلك بسبب زيادة تغطية المثبط لسطح المعدن.

أما الباحثان(Y. Harek & L.Larabi, 2004) استخدما مادة الاوكساليك(Oxalic N-Phenyl h Hydrazide) كمثبط في عملية تأكل الفولاذ المطاوع في محلول حامضي HCl وقد وجدا إن هذه المادة تعيق التآكل بصورة جيدة في($1\ mol/dm^3$) من حامضHCl وان كفاءة التثبيط تزداد مع زيادة تركيز المادة المضافة لتصل إلى93% عند تركيز($5*10^{-4}$ mol/dm^3).

كذلك قام الباحثون (M.Bouklah, A.A. Hayiba, S.Kertit, A.Ramdin & B.Hamouti, 2004) بدراسة تأثير إضافة مادة(Diethyl Purazine-2, 3-Dicarboxylate(P_1)) في محاليل الحامض($0.5M\ H_2SO_4$) على السلوك التاكلي للفولاذ حيث وجدوا إن كفاءة التثبيط تزداد بحيث تصل إلى82%عند زيادة تركيز المادة إلى($10^{-2}M$) وذلك بتكوينها طبقة مترسبة على سطح الفولاذ تعمل كقطب كاثود يمنع تآكل الفولاذ.

أما الباحثون(S. Sathiyanarayanan, C. Marikkamn& N. Palaniswamy, 2005) فقد وجدوا إن تأثير المثبطان العضويان Trihylene Tetramine (TETA) and Hexamine (HMTA) يزيدان من مقاومة التآكل للفولاذ المطاوع في المحاليل الحامضية (1M HCl) بتركيز ($10^{-2} - 10^{-6}$ M) وذلك لان هذه المثبطات العضوية تعمل على زيادة تركيز الأمينات على سطح الفولاذ والتي تعيق استمرار عملية التآكل.

كذلك قام الباحثون (A.M. Alsabagh, M.A. Migahed& Hayam S. Awad, 2005) بدراسة تأثير إضافة البولي استر الاميني أليفاتي Polyester Aliphatic Amine في ماء التكوين على عملية التآكل لسبيكة الفولاذ الكاربوني فقد وجدوا إن زيادة نسبة هذه المادة تعمل على زيادة كفاءة التثبيط حيث تصل إلى (86%-96%) وذلك لأنها تعمل على خفض التوتر السطحي للسبيكة في الوسط التاكلي بسبب امتزاز طبقة من هذه المادة على سطح السبيكة كما إن طول السلسلة الهيدروكاربونية للمادة تعمل على تغطية سطح السبيكة مما يقلل من معدل التآكل.

في حين درس الباحثون(G.Achary, Y.A. Naik, S.V. Kumar, T.V. Venkatesha & B.S. Sherigarr, 2008) السلوك التاكلي للفولاذ المطاوع في محلول حامض H_2SO_4 مضاف إليه نسب مختلفة من خليط بوليمري(Maliec Anhydride & N-Vinyl- 2-Pyrrolidone(VPMA)) حيث إن هذه المادة تكون طبقة رقيقة على سطح الفولاذ تعمل على إعاقة التآكل على سطح الفولاذ وان كفاءة التثبيط تزداد بزيادة تركيز المثبط في المحلول وتقل بزيادة درجة الحرارة وزيادة تركيز المحلول الحامضي.

ومن احدث الدراسات التي تهتم بحماية الفولاذ من التآكل باستخدام المثبطات قام بها الباحثون (F.Shil, X. Wang, X. Liu &J. Yul, 2009) حيث وجدوا إن استخدام مادة((Polyaniline (PANi) للحد من تآكل الفولاذ المطاوع في محلول حامض HCl تعمل على تكوين طبقة ممتزة على سطح الفولاذ بحيث تصل كفاءة التثبيط إلى 90% بزيادة تركيز هذه المادة.

أما البحث الحالي يهدف لدراسة الحد من تآكل الفولاذ منخفض الكاربون في المحاليل الحامضية والملحية باستخدام نسبة ثابتة ومحددة من المثبط العضوي الهكسامينHexamine مضاف إليه نسب مختلفة من البولي استر غير المشبع وذلك للتقليل من كمية المثبط المستخدم من خلال استخدام مادة متوفرة يمكنها تعزيز عمل المثبط المستخدم.

الجزء العملي:

1- تحضير النماذج:

تمت هذه الدراسة باستخدام نماذج من سبيكة الفولاذ واطئ الكاربون وضح تركيبها بالجدول (1) حيث تم إجراء التحليل في مختبرات شركة ابن سينا العامة باستخدام تقنية (Atomic Absorption). قطعت هذه النماذج على شكل أقراص ذات إبعاد (Φ=16mm, t= 2.5 mm)، وقطر الثقب (d= 2mm) وقد أجريت عمليات تحضير للنماذج لغرض إجراء اختبارات التآكل شملت التنعيم Grinding بأوراق السنفرة وبالتدرج الآتي(200, 400, 800) باستخدام جهاز التنعيم نوع (England)Buehler-Ltb)) بعد انتهاء كل مرحلة تغسل النماذج بالماء المقطر والكحول وتجفف ثم تصقل Polishing باستخدام جهاز الصقل العام (China, Hergon-mp200V) وبعد الغسل بالماء المقطر والكحول والتجفيف بتيار من الهواء الساخن يتم وزن العينات باستخدام ميزان حساس (German) Sartorius)) ذي دقة تبلغ (±0.0001) وبعد تسجيل أوزان النماذج تم وضعها بحافظة زجاجية تحتوي على مادة Silica Gel لحمايتها من الظروف الجوية.

2- اختبارات التآكل:

2-1 اختبار الغمر البسيط:

من اجل دراسة السلوك التاكلي لهذه السبيكة تم استخدام طريقة الغمر البسيط حيث تعتمد هذه الطريقة على تعريض نموذج الاختبار إلى المحاليل الالكتروليتية مختلفة، وذلك بغمر النماذج في محاليل متعددة شملت المحلول الحامضي HCl المخفف بتركيز 10%، والمحلول الملحي NaCl المخفف بتركيز 3% وأخرى مضافا إليها نسبة ثابتة من المثبط العضوي الهكسامين Hexamine وضح خصائصه بالجدول (2) بتركيز (0.5 M) للمحلول الحامضي

و (0.1 M) للمحلول الملحي وأخرى مضافا إليه نسب مختلفة (1% ,3% ,5%) من البولي استر غير المشبع وضحت مواصفاته بالجدول (3) للخليط المكون من محاليل الالكتروليتية المضاف إليها نسبة ثابتة من المثبط العضوي.

ولقد تم إجراء هذا الاختبار بدرجة حرارة الغرفة وتم قياس أوزان النماذج بواسطة الميزان الحساس وحساب المساحة السطحية قبل غمرها في تلك المحاليل وبعد أزمنة غمر محددة جرى إخراج النماذج من المحاليل وتنظيفها بالماء والكحول وتجفف ثم توزن ويتم حساب التغير في الوزن لوحدة المساحة ($\Delta W/A$) ومن ثم رسم النتائج بالعلاقة البيانية بين التغير في الوزن لوحدة المساحة مع زمن التعرض للمحاليل الالكتروليتية.

2-2 اختبار الفحص المجهري:

اجري اختبار الفحص المجهري لدراسة سطوح النماذج المغمورة في المحاليل المختلفة المستخدمة وذلك باستخدام المجهر الضوئي نوع(Union ME-3154) المجهز بكاميرا رقمية مرتبطة بالكومبيوتر أمكن من خلالها التقاط صور للسطح بقوة تكبير (600 X) بعد مشاهدتها على شاشة العرض الخاصة بالكومبيوتر.

3- حساب كفاءة التثبيط Inhibitor Efficiency:

تم حساب نسبة أو كفاءة التثبيط (IE%) للمثبط المستخدم سواء بإضافة أو عدم إضافة البوليستر غير المشبع في هذا البحث ولفترات زمنية محددة من المعادلة التالية (H.H. Rehan, N.A. Al-Mobarak, H.A. Al-Rafai; 2002):

$$IE\% = ((CR_\circ - CR) / CR_\circ)*100\ \%$$

حيث إن:

$CR_\circ$: معدل التآكل في النظام الخالي من المثبط.

CR: معدل التآكل في النظام الحاوي على المثبط.

النتائج والمناقشة:

الشكل (2) يوضح العلاقة بين الوزن المفقود لوحدة المساحة والزمن لنماذج من الفولاذ واطئ الكاربون مغمورة في المحاليل الحامضية (HCl) فقط وأخرى مضاف إليها نسبة ثابتة من الهكسامين (0.5M) والمحاليل الأخرى مضاف إليها بالإضافة لهذه النسبة من الهكسامين نسب مختلفة من البولي استر غير المشبع (1% ,3% ,5%). الشكل (3) يوضح العلاقة بين الوزن المفقود لوحدة المساحة والزمن لنماذج من الفولاذ واطئ الكاربون مغمورة في المحاليل الملحية (NaCl) فقط وأخرى مضاف إليها نسبة ثابتة من الهكسامين(0.1M) والمحاليل

الأخرى مضاف إليها بالإضافة لهذه النسبة من الهكسامين نسب مختلفة من البولي استر غير المشبع (5%, 3%, 1%).

تبين هذه الأشكال إن معدل التآكل يزداد للنماذج المغمورة في المحلول الحامضي فقط أو المحلول الملحي فقط بصورة كبيرة أما النماذج المغمورة في المحاليل التاكلية الحاوية على الهكسامين فإنها تقاوم التآكل حيث نلاحظ إن التآكل يحصل في البداية ثم ينخفض ويستقر بعد ذلك لكون سطح الفولاذ معرض مباشرة للوسط التاكلي وبمرور الزمن وترسب نواتج التآكل على سطح الفولاذ بشكل طبقة ممتزة على شكل غشاء رقيق فعاليته تعتمد على التركيب الكيميائي للمثبط يمنع استمرار نزول الايونات وبالتالي تقلل من معدل التآكل.(Putilova S.A. & Barannik V.P.,1970).

كما تبين المنحنيات في الشكل(2) للنماذج التي غمرت في المحاليل التاكلية الحاوية على HCl المخفف المضاف له النسبة الثابتة من الهكسامين مع النسب المختلفة من البولي استر غير المشبع إن هناك مقاومة عالية للتآكل وذلك عند النسب (5%, 3%, 1%) حيث بلغت كفاءة التثبيط (66.3%,92.3%, 96.4%) على التوالي، وذلك لأن الغرض من إضافة البوليمر هو توفير مجموعة قطبية قوية تعزز المجموعة القطبية التي توفرها مادة الهكسامين والتي هي الأمينات والتي تمتز على سطح الفولاذ لإعاقة التآكل (S. Sathiyanarayanan, C. Marikkamn& N. Palaniswamy, 2005) بينما البولي استر فيعطي مجموعة الهيدروكسيد إذ تعمل هذه المجاميع على الالتصاق بجزء المعدن الذي يعمل كقطب سالب، كما إن السلسلة الهيدروكاربونية للبولي استر تعمل على تغطية سطح السبيكة مما يعيق عمليه التآكل(A.M. Alsabagh, M.A. Migahed& Hayam S. Awad, 2005) والشكل (1) الذي يوضح التركيب الداخلي للبولي استر غير المشبع.

أما في الشكل(3) للنماذج التي غمرت في المحاليل التاكلية الحاوية على NaCl المخفف المضاف له النسبة الثابتة من الهكسامين مع النسب المختلفة من البولي استر غير المشبع حيث تبين المنحنيات عند النسب العالية من البولي استر غير المشبع (5%, 3%) إن هناك زيادة بالوزن المترسب على سطح الفولاذ بنسبة كبيرة ثم تبدأ جزيئات البولي استر بالنزول والترسب أسفل المحلول ساحبة معها نواتج التآكل كما مبين بالشكل (4) الذي يوضح صور للبولي استر المترسب أسفل المحلول التآكلي مع نواتج التفاعل. أما عند نسبة(1%) من البولي استر غير المشبع نلاحظ حصول تحسن عالي بمقاومة التآكل حتى إن كفاءة التثبيط (93.7%) في المحلول الملحي وذلك للأسباب المذكورة أعلاه ويمكن تعتبر هذه النسبة هي الحد الحرج للإضافة من البولي استر غير المشبع.

الشكل (5) والشكل (6) يوضحان سطوح النماذج الفولاذية في المحاليل التاكلية المختلفة حيث إن الصور (a,b,c,d,e) في الشكلين تبين نواتج التآكل المترسبة على سطح النماذج وتظهر الصور(c,d,e) بقع لامعة تمثل ترسب جزيئات البولي استر على سطح النماذج والتي تكبر كلما كانت نسبة البولي استر أعلى وتكون البقع في الصور للنماذج المغمورة في المحاليل الملحية اكبر أي إن ترسب جزيئات البولي استر يكون اكبر وهذا يتفق مع النتائج الحاصلة والمبينة بالشكل(2) والشكل(3).

الاستنتاجات:

1- أثبتت النتائج في اختبار الغمر البسيط للفولاذ واطئ الكاربون في المحاليل الحامضية والملحية المستخدمة في هذا البحث انه يمكن إعاقة التآكل على سطح الفولاذ بإضافة نسبة من البولي استر غير المشبع.

2- أثبتت نتائج اختبارات التآكل للفولاذ واطئ الكاربون في المحاليل الحامضية والملحية المستخدمة في هذا البحث انه يمكن تحسين عمل المثبط العضوي الهكسامين Hexamine المضاف بنسبة ثابتة(0.5M في HCl) بإضافة 1% من البولي استر غير المشبع حيث قلل الوزن المفقود لوحدة المساحة بنسبة 82% بعد مرور(8hr.) وإما عند إضافته بنسبة ثابتة (0.1M في NaCl) ثم إضافة 1% من البولي استر غير المشبع نلاحظ إن الوزن المفقود لوحدة المساحة انخفض بنسبة 80% وذلك بعد مرور(7days) عما إذا استخدم الهكسامين لوحده وبنفس النسبة بسبب تعزيز مجموعة الأمينات التي يملكها الهكسامين والتي تعيق التآكل على سطح الفولاذ بواسطة مجموعة قطبية (OH^-) التي يوفرها البولي استر غير المشبع.

المصادر:

- A.M. Alsabagh, M.A. Migahed& Hayam S. Awad;" Reactivity of Polyester Aliphatic Amine Surfactants as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Formation Water (Deep Well Water)" 2005; www.sciencedirect.com
- E.W. Klechka; "Use of Corrosion Inhibitors on The Trans Alaska Pipeline"; Supplement to Materials Performance; January 2001; www.costec.VIC.com
- Fuhua Shil, Xiutong Wang, Xueqing Liu & Jianqiang Yul;" Corrosion Inhibition of Polyaniline for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution"; 2009; www.ecsmeet7.peerx-press.org
- Ganesha Achary, Y.Arthoba Naik, S.Vijay Kumar, T.V. Venkatesha & B.S. Sherigarr;"An Electroctive Co- Polymer as Corrosion

Inhibitor for Steel in Sulphuric Acid Medium"; Applied Surface Science, Vol.254, Issue 17; 2008. www.sciencedirect.com
- H.H. Rehan, N.A. Al-Mobarak, H.A. Al-Rafai; "Evaluation of Chromates Dezincification Inhibitors for α- Brass (Cu/Zn: 64/36) in 3% Chloride Buffer Solution"; Portugaliae Electrochimiea Acta 21, pp99-116; 2002.
- Issam Kamil Salih; "Inhibitor Effect of Benzoytriazok on The Corrosion of Mild Steel in Sulfuric Acid Solution"; Engineering & Technology,Vol.22, No.6; 2003.
- Kasim Jaber Solaiman; "Corrosion Principles and Economics"; Joueanal of Iraqi Society Engineering, No.75; 1988.
- M.Bouklah, A.A. Hayiba, S.Kertit, A.Ramdin & B.Hamouti; "A Pyrazine Derivative as Corrosion Inhibition for Steel in Sulphuric Acid Solution"; 2004; www.cat.inist.fr.com
- Nidhal Shaker Fahad, MSc. Thesis, University of Technology; 1987.
- O.K. Abiola, N.C. Oforka; "Corrosion Science & Engineering"; 2002; www.umist.au.uk/corrosion.
- Putilova S.A. & Barannik V.P.;" Metallic Corrosion Inhibitors"; Pergaman Press, New York; 1970.
- S. Sathiyanarayanan, C. Marikkamn& N. Palaniswamy;" Corrosion Inhibition Effect of Tetramines for Mild Steel in 1MHCl"; Applied Science, Vol.241, Issue 3-4; 2005. www.sciencedirect.com
- Y. Harek & L. Larabi; " Corrosion Inhibition of Mild Steel in (HCl) by Oxalic"; University of Tlemcen; 2004. E-mail: y.harek@mail.univ.telmcen.dz.
- د.قحطان خلف الخزرجي، عبد الجواد محمد احمد،"التآكل- أسبابه- أنواعه- طرق الحماية منه" جامعة بغداد، 1987.

الجدول (1) التركيب الكيميائي للسبيكة المستخدمة

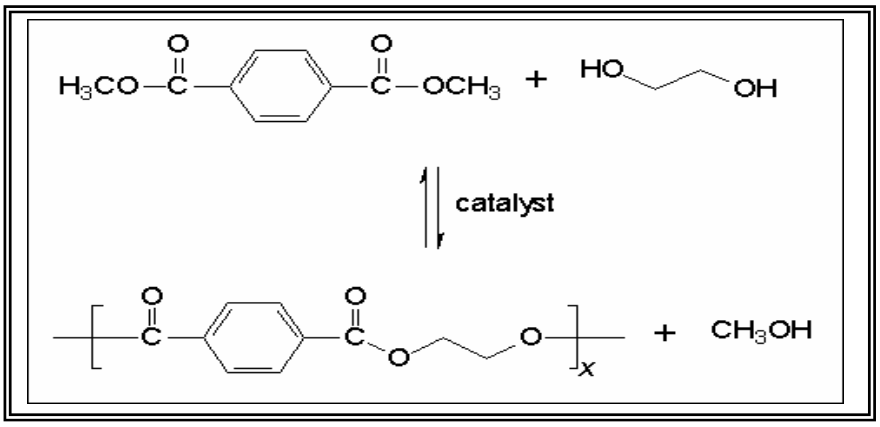
التركيب / السبيكة	C %	Mn %	Si %	Al %	Sr %	Fe %
فولاذ الكاربوني	0.14	0.45	0.02	0.08	0.03	Rem.

الجدول (2) الموصفات للمثبط العضوي الهكسامين Hexamethylenetetramine

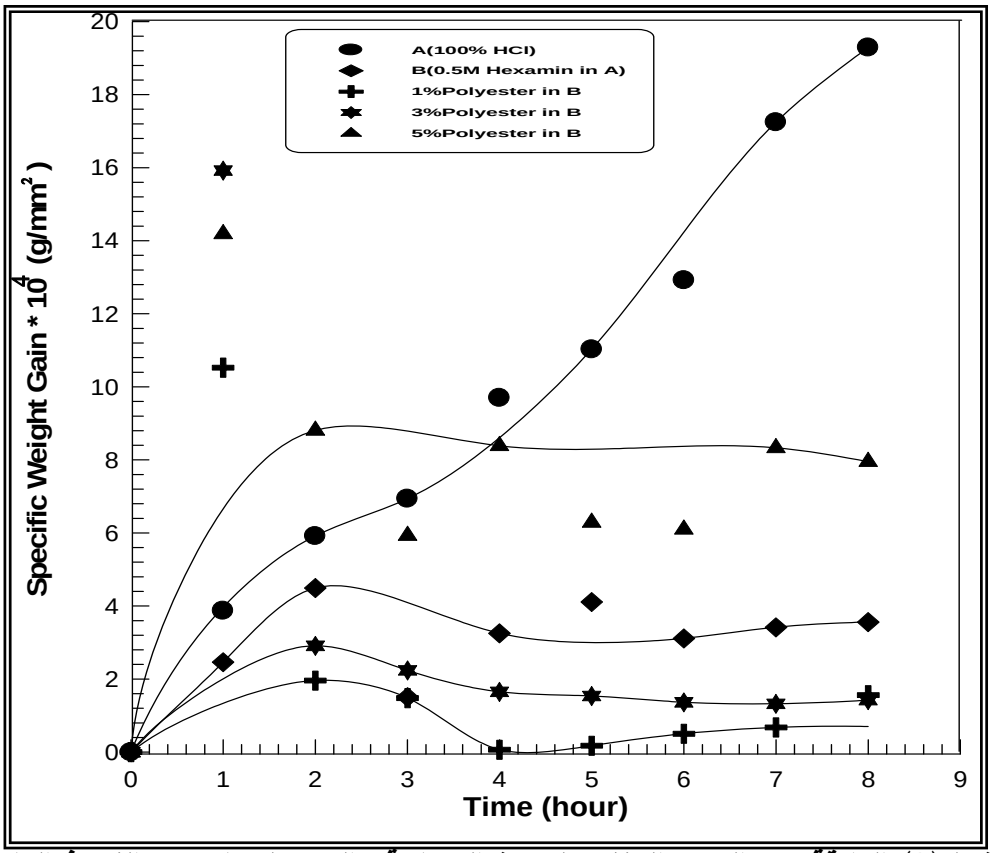
التركيب / الرمز	Zareni Ostatak %	Amoijak (NH_3)%	Hloridi (Cl)%	Sulfati (SO_4)%	Teskimetali (Pb)%
$C_6H_{12}N_4$	0.03	0.001	0.005	0.005	0.001

الجدول (3) خواص البوليمر (البولي استر غير المشبع)

Water Absorption	Density Crystalline (Kg/m^3)	Density Amorphous (Kg/m^3)	الخاصية / الصيغة
0.16	1455	1370	$(C_{10}H_8O_4)_n$

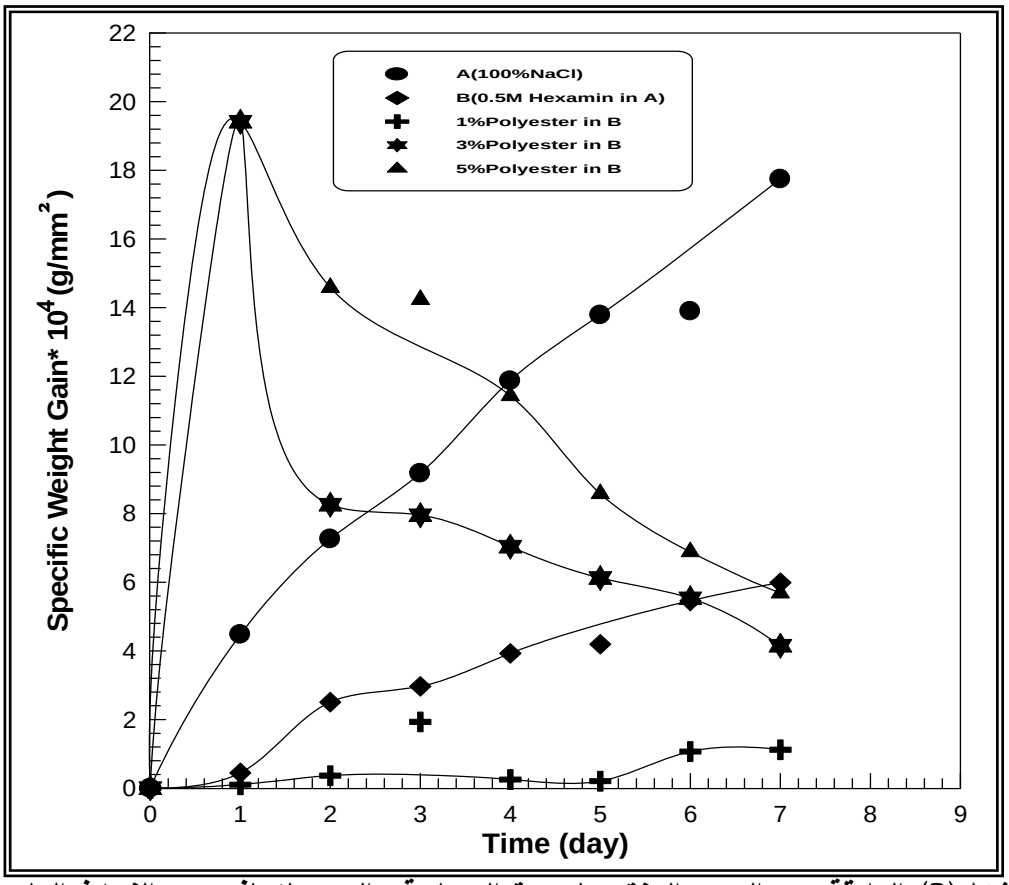


الشكل (1) يوضح تركيب الداخلي للبولي استر غير المشبع

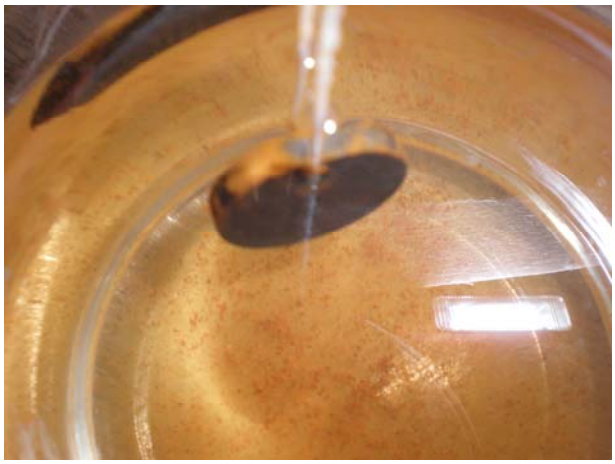


الشكل(2) العلاقة بين الوزن المفقود لوحدة المساحة والزمن لعينات من الفولاذ الكاربوني

مغمورة في المحاليل الحامضية(HCl)



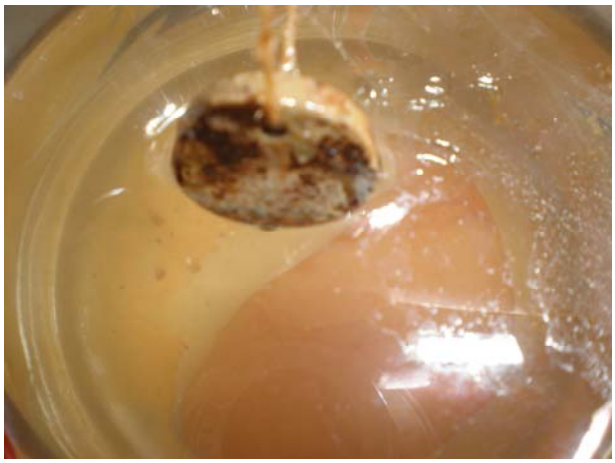
الشكل(3) العلاقة بين الوزن المفقود لوحدة المساحة والزمن لنماذج من الفولاذ الكاربوني مغمورة في المحاليل الملحية(NaCl)



−a−

−b−

−c−



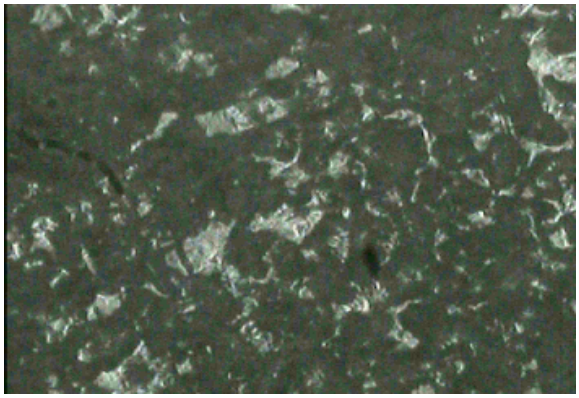
−d−

− e −

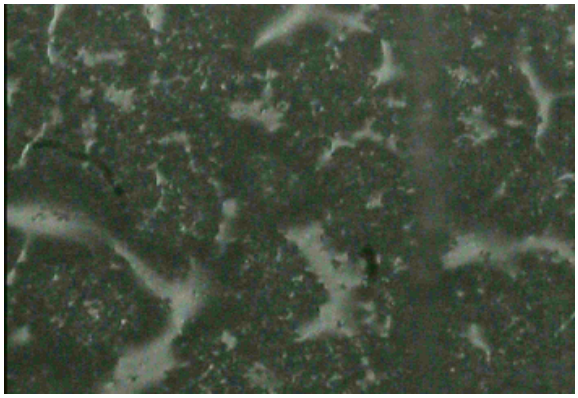
الشكل (4) صور للبولستر المترسب أسفل حوض التآكل في المحاليل الملحية:

A− 100% NaCl b− 0.1 M+100% NaCl (هسكامين) c− 0.1 M+100% NaCl (هسكامين) +1% من البولي استر

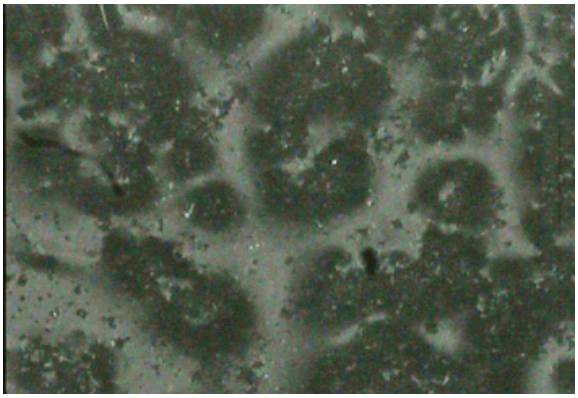
d− 0.1 M+100% NaCl (هسكامين) +3% من البولي استر e− 0.1 M+100% NaCl (هسكامين) +5% من البولي استر



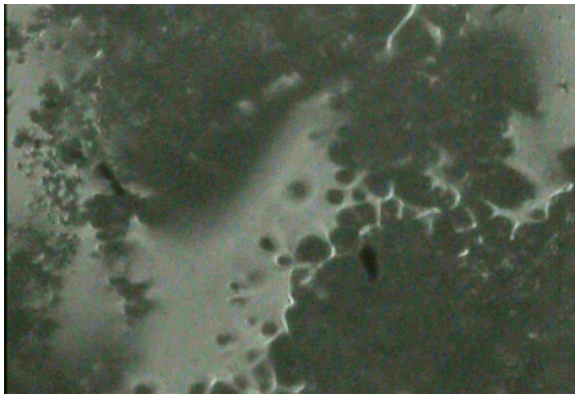
−a−



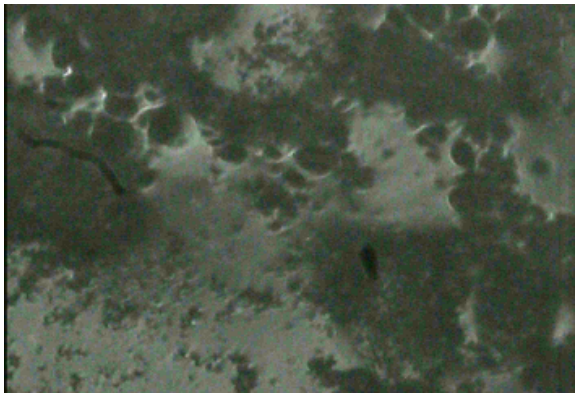
−b−



−c−



−d−

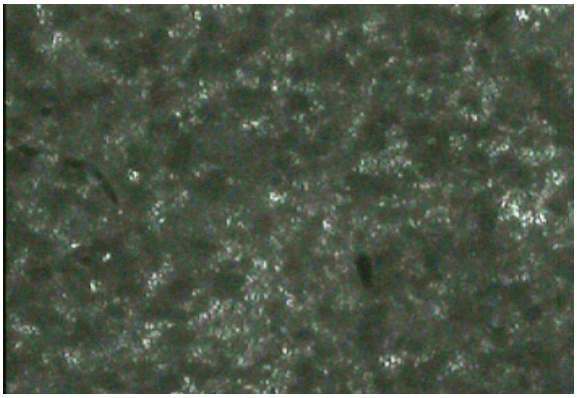


− e −

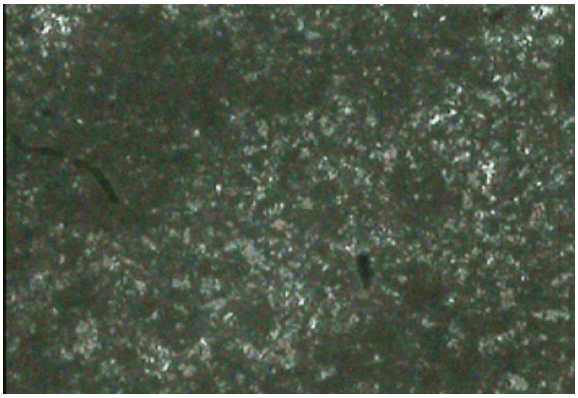
الشكل (5) صور المجهرية لنماذج من الفولاذ الكاربوني في المحاليل الحامضية:

a− 100% HCl b− 0.5 M+100% HCl (هسكامين) c− 0.5 M+100% HCl (هسكامين) +1% من البولي استر

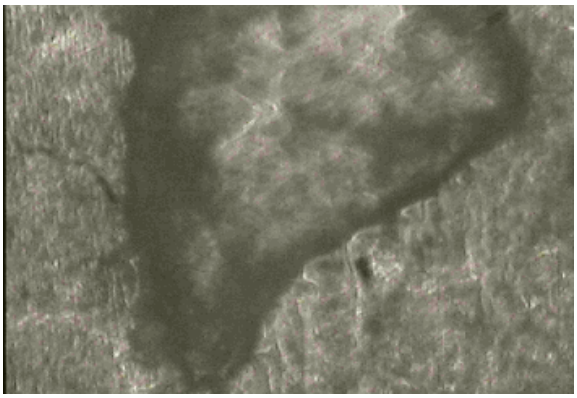
d− 0.5 M+100% HCl (هسكامين) +3% من البولي استر e− 0.5 M+100% HCl (هسكامين) +5% من البولي استر



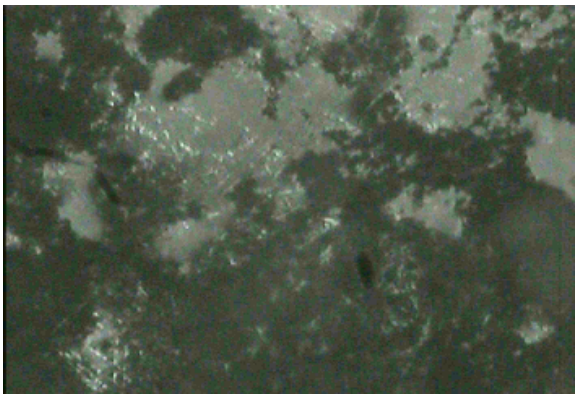
−b−



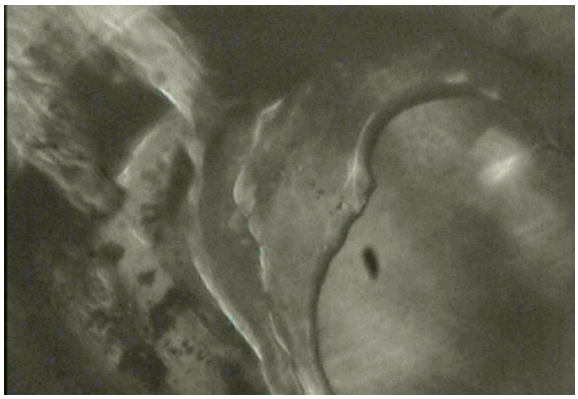
−a−



−d−



−c−



− e −

الشكل (6) صور المجهرية لنماذج من الفولاذ الكاربوني في المحاليل الملحية:

a− 100% NaCl b− 0.1 M+100% NaCl (هسكامين) c− 0.1 M+100% NaCl (هسكامين) +1% من البولي استر

d− 0.1 M+100% NaCl (هسكامين) +3% من البولي استر e− 0.1 M+100% NaCl (هسكامين) +5% من البولي استر