ألمنة الفولاذ الكربوني

د. عبد الله يوسف مجيد*

الملخص

يقدم البحث دراسة آلية انتشار الألمنيوم والبنية المجهرية والتركيب الطوري والخواص المختلفة لطبقة الطلاء الانتشاري بالألمنيوم (الألمنة) في الفولاذ الكربوني.

أظهرت نتائج دراسة المعالجة الانتشارية بالألمنيوم في وسط إشباعي مسحوقي، أنه يؤدي إلى تشكيل طبقة طلاء انتشاري تحتوي على ألومينيد الحديد ومحلول a- الصلب لعنصر الألمنيوم في الهيكل الشبكي للحديد ناتجة عن تشكل الألمنيوم الذري وانتشاره في داخل السطح المعالج.

دُرِسَ تأثير بارامترات عملية الألمنة في سرعة تشكيل طبقة الطلاء الانتشاري، وخاصة تأثير درجة الحرارة والزمن، وقد تبيّن أن زيادة عمق طبقة الألمنة تتعلق بارتفاع درجة الحرارة وزيادة الزمن، ولكن تأثير درجة الحرارة يكون أكبر من تأثير الزمن.

دُرِسَ في هذا البحث تأثير التآكل الكيميائي في أوساط عدائية صناعية مثل حمض الكبريت الممدد بالماء $10\%\ H_2SO_4$ وحمض الآزوت المدد بالماء أيضاً $10\%\ HNO_3$ في طبقة الطلاء الانتشاري بالألمنيوم، وقد أكدت النتائج أن مقاومة التآكل الكيميائي للفولاذ المعالج بالألمنة تزداد بنحو 4.5 - 10 مرات مقارنة بالفولاذ غير المعالج، كما لوحظ أن تأثير حمض الآزوت يكون أكبر من تأثير حمض الكبريت في طبقة الألمنة.

تبيّن نتائج البحث أن طريقة المعالجة الانتشارية بالألمنيوم لها تأثير كبير ومهم في قدرة عمل الأجزاء المعرضة للأكسدة في درجات الحرارة العالية بين 700°C و 900°C، إذْ تزداد مقاومة الأكسدة عند درجات الحرارة العالية للفولاذ المعالج بالألمنة إلى 5– 8 مرات مقارنة بالفولاذ غير المعالج.

تؤكد نتائج البحث إمكانية استخدام الطلاء الانتشاري بالألمنيوم كطلاء واعد في رفع الوثوقية ومقاومة الأكسدة عند درجات الحرارة العالية ومقاومة التآكل الكيميائي، مما يؤدي إلى زيادة العمر الزمني لعناصر الآلات في محطات توليد الطاقة وريش عنفات الطائرات.

الكلمات المفتاحية: طلاء انتشاري بالألمنيوم، فولاذ كربوني، معالجة سطحية، قساوة ميكروية، بنية مجهرية، أكسدة في درجات الحرارة العالية، تآكل كيميائي.

* أستاذ مساعد في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق

مقدمـــــة:

إن التقدم العلمي السريع في المجالات الصناعية المختلفة، مثل صناعة الطيران وصناعة محطات توليد الطاقة، أدَّى إلى البحث دائماً في كيفية رفع الوثوقية Reliability وزيادة العمر الزمني لعناصر الآلات والميكانزمات Mechanisms. ويتعلق حل مثل هذه الأسئلة برفع متانة Toughness الطبقات السطحية وزيادة العمر الزمني عند تطبيق الحمولات المختلفة، أو عند ارتفاع درجة الحرارة، أو عند زيادة عدائية وسط التشغيل التي تعمل فيها هذه الأجزاء [1,2].

تسمح عملية المعالجة الكيميا- حرارية Chemical heat treatment بالحصول على طبقات سطحية Surface Layers للمعدن المعرض لعملية الإشباع الانتشاري السطحي، ذات تركيب كيميائي جديد يختلف عن التركيب الكيميائي للأرضية المعدنية للسبيكة Matrix، وذلك بهدف تحسين الخواص الفيزيا- كيميائية والخواص الميكانيكية، ومن ثمَّ رفع الجدوى الاقتصادية لها وزيادة العمر الزمني، ويتم ذلك عن طريق انتشار عنصر الإشباع في الحالة الذرية في سطح المعدن عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً، وخلافاً للمعالجة الحرارية فإن المعالجة الكيميا- حرارية لا تغيّر البنية Structure البلورية للسطح فحسب، بل والتركيب الكيميائي Chemical composition للطبقات السطحية في الوقت نفسه، الأمر الذي يسمح بتغيّر في الخواص Properties المختلفة لهذه الطبقات [3].

تعدُّ المواد ذات الاتحادات الكيميائية المختلفة مثل الكربيدات Carbides أو النتريدات Nitrides أو البوريدات Borides أو السيليكات Silicates أو الألومينات Aluminates أو الأكسيدات Oxides أو الكبريتات Sulfides وغيرها من المواد ذات الآفاق المستقبلية، غير أن استخدامها في تصنيع أجزاء الآلات يكون صعباً جداً نظراً إلى قصافتها Brittleness العالية، فلذلك غالباً ما يستعاض عنها بطلائها على شكل طلاء انتشاري Diffusion Coating أو مايسمى بعملية الإشباع السطحي، وذلك من أجل تأمين الخواص الميكانيكية والفيزيا- كيميائية المطلوبة والوصول إلى القساوة السطحية surface hardness العالية بالنسبة إلى السطح وقساوة منخفضة بالنسبة إلى الأرضية المعدنية matrix، أمَّا المطيلية Ductility فتكون منخفضة نسبياً [4].

يعدُّ الطلاء الانتشاري بالألمنيوم (الألمنة) Aluminizing واحدة من عمليات الانتشار الإشباعي لسطوح المعادن أو السبائك المعدنية بعنصر الألمنيوم بهدف رفع مقاومة الأكسدة Oxidation Resistance في درجات الحرارة العالية، ومقاومة التآكل الكيميائي Chemical Corrosion Resistance ومقاومة الاهتراء الحتي Erosion Resistance [5]. تجري عملية الألمنة في الوقت الحاضر على معظم أنواع الفولاذ وحديد الزهر وعلى المعادن الملونة. وعادةً تجري عملية الإشباع Saturate بالألمنيوم مع الزنك [6]، أو من دونه في أحواض ذات أوساط منصهرة من الألمنيوم، حيث يتكون المخطط التكنولوجي لهذه العملية من تنظيف سطوح أجزاء الآلات المراد طلاؤها بالألمنيوم من الأكاسيد والأوساخ، ثم تُغمَرُ الأجزاء الجاري إغنائها بالألمنيوم في حوض يحتوي على الألمنيوم المنصهر مع إضافة عنصر الحديد بنسبة 6 – 8% Fe وذلك كي نستطيع رفع درجة حرارة ذوبان وسط الإشباع، ويجري الإشباع عادةً عند درجة حرارة تراوح بين 750 – 670 °C، وزمن ثبات حراري Isotherm يراوح بين 80 min – 30، ثم تشحن هذه الأجزاء في فرن كهربائي عند درجة حرارة 1000 °C مدة زمنية تراوح بين 3 إلى 5 ساعات. كما يمكن أن تجري عملية الإشباع بالألمنيوم في وسط كهرولتي أو في وسط غازي. أمَّا عملية الطلاء الانتشاري diffusion

Coating بالألمنيوم في وسط مسحوقي فهي قليلة الاستخدام وسهلة التحقيق وتعطي نتائج جيدة، ولكن لم تلقَ اهتماماً كبيراً، ولم تدرس بشكل كاف مع الإشارة إلى بعض البحوث [7]. و لذلك سوف نسلط الضوء في هذا البحث على دراسة آلية الطلاء الانتشاري بالألمنيوم في وسط مسحوقي ودراسة سلوك عملية الإشباع السطحي بالألمنيوم وتأثير درجة الحرارة والزمن في سماكة طبقة الألمنة، ودراسة الخواص المختلفة لطبقات الانتشار السطحية.

الطرائق والمواد:

أجري البحث على عينات أسطوانية الشكل قطرها ϕ=14mm وارتفاعها h= 12mm مصنعة من الفولاذ الكربوني، وذات التركيب الكيميائي Chemical composition المبيّن في الجدول رقم (1) .

الجدول (1)

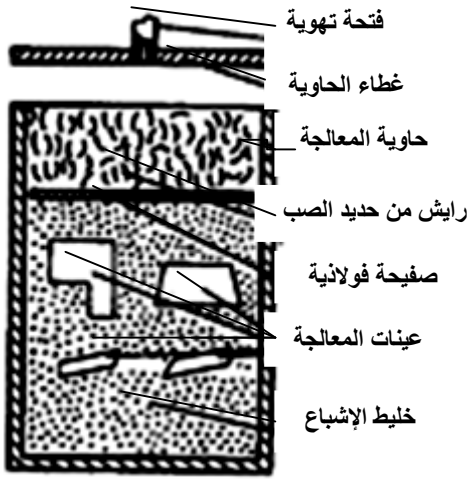
wt% Fe	wt% C	wt%, Mn	wt%, P	wt%, S
bal	0.4	0.75	≤ 0.02	≤0.005

أجرينا عملية الطلاء الانتشاري بالألمنيوم في فرن كهربائي عادي عند درجة حرارة تراوح بين 800 – 1050 °C، وزمن الاحتفاظ الحراري يراوح بين 2 – 6 h، وقد استخدمنا خليطاً مؤلفاً من مسحوق الألمنيوم بنسبة 49% Al، وأكسيد الألمنيوم (الألو مينا) بنسبة 49% Al_2O_3 كمادة خاملة تضاف لمنع تلبيد الحبيبات والتصاقها مع بعضها بعضاً، فضلاً عن كلور الأمونيوم بنسبة 2% NH_4Cl كمادة منشطة للتفاعل Activator. وقد قمنا بتسخين أكسيد الألمنيوم إلى درجة حرارة 500 °C مدة ساعة للتخلص من الرطوبة، وبعد تبريده في الهواء يضاف إليه مسحوق المادة المنشطة ومسحوق الألمنيوم ويمزج الخليط مع بعضه بعضاً مزجاً جيداً، ومن ثم تُنظَّفُ العينات المراد معالجتها من الزيوت والأوساخ بواسطة الكحول الإيتيلي وتُجفَّفُ تجفيفاً جيداً في الهواء الساخن، ثم شحنت هذه العينات في حاوية من الفولاذ المقاوم للصدأ مع الخليط وتُغلَقُ بإحكام بواسطة الغطاء الفولاذي وبطبقة عازلة من السيليكا، كما هو مبيّن في الشكل (1). وقمنا بتقسيم العينات إلى قسمين: خصص القسم الأول لدراسة البنية المجهرية والقساوة الميكروية واختبار الأكسدة عند درجات الحرارة العالية واختبار التآكل الكيميائي، ووصل عددها إلى 20 عينة عُولجت بالألمنة عند نظام إشباع انتشاري (950°C, 4h). أمَّا القسم الثاني فكان عددها 21 عينة خصص لدراسة تأثير درجة الحرارة والزمن في سماكة طبقة الألمنة عند نظامي إشباع: يعتمد النظام الأول: (9 عينات) على تغيّر الزمن من 2 إلى 6 ساعات بفارق قدره ساعتان وثبات درجة الحرارة:

$$T= const = (850 – 950 -1000)°C$$

بينما يعتمد النظام الثاني: (12 عينة) على تغيّر درجة الحرارة من 850°C إلى 1000°C بفارق قدره 50°C عند ثبات الزمن:

$$\tau = const = (2 – 4 – 6)h$$

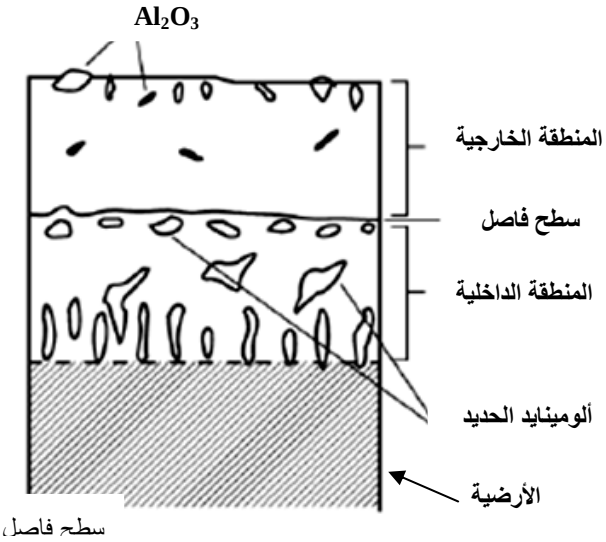


الشكل (1): رسم تخطيطي لتوضع العينات المراد معالجتها بالألمنة.

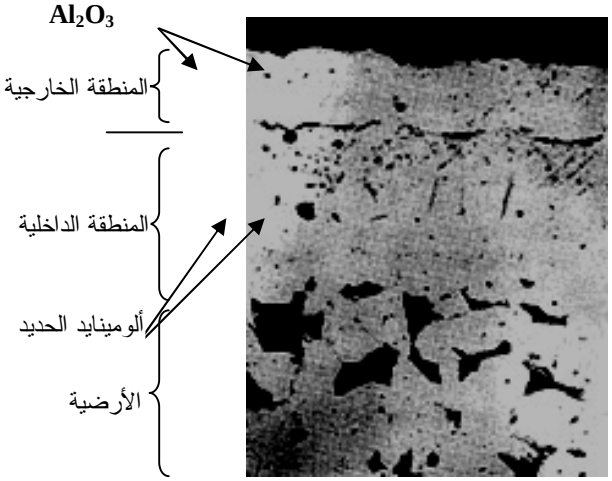
دُرِسَ كل من البنية المجهرية Microstructure والتركيب الطوري Phase structure بواسطة المجهر الضوئي، وقد قمنا بتصوير البنية المجهرية بواسطة آلة تصوير رقمية عند تكبير X250، وذلك بعد تحضير سطح العينة بشكل جيد بالطرق الميتالوغرافية التقليدية من عملية شحذ وتلميع جيد للسطح بواسطة قرص دوار مغطى بقطعة من اللباد ويضاف محلول أكسيد الألمنيوم بالماء إلى سطح العينة لمنع حدوث الخدش، ثم ينظف سطح العينة بالماء ويجفف بالهواء الساخن بواسطة مجفف، وبعدها يُخرَّشُ سطح العينة المدروس بواسطة حمض الآزوت الممدد بالكحول بنسبة HNO_3 5%، أمَّا القساوة Microhardness فقد قيست بواسطة جهاز قياس القساوة الميكروية ماركة Galileo Durametria والمزود بمجهر ضوئي، وذلك حسب طريقة فيكرز لقياس القساوة الميكروية عند حمولة P = 0.49 N مطبقة على رأس اختراق indenter ألماسي هرمي الشكل زاوية رأسه 120° وبتكبير X400، بحيث قيس قطرا طبعة الاختراق ثم أخذ القطر المتوسط d, µm. وحُسبت القساوة بواسطة العلاقة ($H = (1,8544\ P/d^2)$)، وقد أُخذَتْ ثلاثة قياسات للقساوة ثم حسبت القيمة المتوسطة. كما اختبرت مقاومة الأكسدة Oxidation Resistance عند درجات الحرارة العالية في الفرن الكهربائي (الوسط - هواء)، وحددت شدة الأكسدة بالطريقة الوزنية لعينات معالجة بالألمنة ولعينات أخرى غير خاضعة لأية معالجة، وذلك بقياس فارق الوزن قبل الاختبار وبعده ثم يقسم الناتج على المساحة الكلية، وقد أجري الاختبار عند درجات حرارة راوح بين 700 °C و900 °C وراوح زمن الاختبار بين h (72 - 3) وقورنت النتائج بعينات غير معالجة بالألمنة، وقد تكررت التجربة على ثلاث عينات مع أخذ القيمة الوسطى. كما دُرست مقاومة التآكل الكيميائي Corrosion resistance بالطريقة الوزنية أيضاً، وذلك بقياس فارق الوزن قبل الاختبار وبعده للعينة الخاضعة لأوساط عدائية مثل حمض الكبريت الممدد بالماء بنسبة H_2SO_4 10%، أو حمض الآزوت الممدد بالماء HNO_3 10%، وقد راوح زمن الاختبار بين h(24-120) وقورنت النتائج بعينات غير معالجة بالألمنة، وتكررت التجربة على ثلاث عينات أيضاً، وأخذت القيمة المتوسطة.

المناقشة والنتائج:

دُرِسَتْ في هذا البحث البنية المجهرية Microstructure المبيّنة في الشكل/2 a & b/، والتركيب الطوري لطبقة الطلاء الانتشاري بالألمنيوم Aluminizing على الفولاذ الكربوني، وذلك بطريقة الألمنة الانتشارية في وسط من خليط من مسحوق الألمنيوم وأكسيد الألمنيوم والمادة المنشطة، وكما هو موضح في الشكل /2 a & b/ أن البنية المجهرية لطبقة الطلاء الانتشاري بالألمنيوم تتألف من منطقتين: منطقة خارجية رقيقة فقيرة بعنصر الحديد، وهي تتألف من ألومينايد الحديد وجزيئات من أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 فضلاً عن المحلول الصلب α الذي هو عبارة عن انحلال لعنصر الألمنيوم في الهيكل الشبكي للحديد. و من المحتمل بأن تشكل أكسيد الألمنيوم في الطبقة السطحية للفولاذ يتعلق بوجود بعض الأكاسيد الموجودة في خليط الإشباع. أمَّا المنطقة الثانية فهي تقع تحت المنطقة الأولى، و تكون غنية بعنصر الحديد وتحتوي على ألومينايد الحديد ومحلول صلب α لعنصر الألمنيوم في الهيكل الشبكي للحديد، وهي عبارة عن بنية حبيبية، ويفصل بين المنطقتين الأولى والثانية سطح فاصل.



الشكل (2 a): رسم تخطيطي لطبقة الألمنة



الشكل (2 b): البنية المجهرية لطبقة الألمنة عند (950°C, 4 h، X250.

أمَّا سرعة انتشار الألمنيوم على السطح الفولاذي وتشكيل ألومينايد الحديد مختلف التراكيب فهي بطيئة عبر الحديد عند شروط التجربة نفسها، وهذا ما يتفق مع كثير من البحوث [8,9] في أن تشكيل هذه المركبات الكيميائية على الحدود الفاصلة بين الألمنيوم والحديد يؤدي إلى كبح نمو طبقة الألمنة.

تتحقق آلية انتشار الألمنيوم على سطح الفولاذ المدروس في وسط إشباعي يحتوي على مسحوق الألمنيوم فضلاً عن المساحيق الأخرى والهالوجينات عند ارتفاع درجة الحرارة في حلقة دائرية مغلقة، وذلك بسبب تفكك كلور الأمونيوم إلى غاز النشادر وغاز كلور الهيدروجين، حيث يتفاعل غاز كلور الهيدروجين مع الألمنيوم مشكلاً كلوريد الألمنيوم الذي يتفكك بدوره إلى ألمنيوم الذري $[Al]_{atom}\downarrow$ وكلور الألمنيوم، كما هو مبيّن في المعادلات الآتية:

$$NH_4Cl_{(s)} \rightarrow NH_{3(g)} + HCl_{(g)} \quad (1)$$

$$6HCl_{(g)} + 2Al_{(Pack)} \rightarrow 2AlCl_{3(g)} + 3H_{2(g)} \quad (2)$$

$$AlCl_{3(g)} + 2Al_{(Pack)} \rightarrow 3AlCl_{(g)} \quad (3)$$

$$\textbf{Or: } 2AlCl_{3(g)} + Al_{(Pack)} \rightarrow 3AlCl_{2(g)} \quad (4)$$

$$\Rightarrow \mathbf{3AlCl_{(g)} \rightarrow 2[Al]^{-}_{atom} + AlCl_{3(g)}} \quad (5)$$

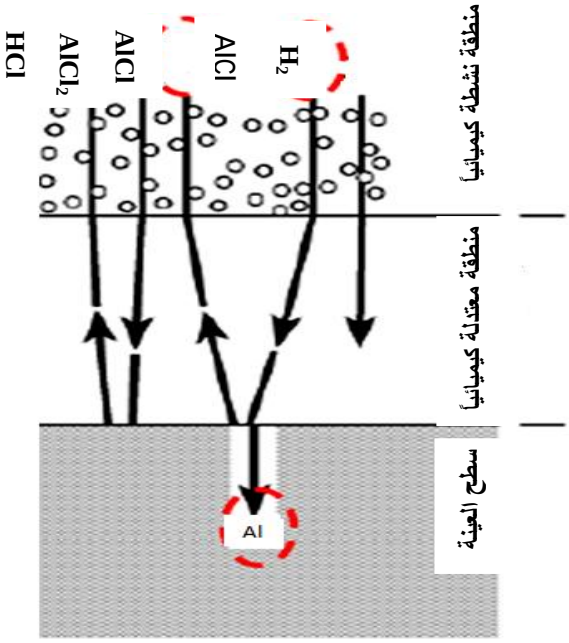
$$\text{Or: } \mathbf{3AlCl_{2(g)} \rightarrow [Al]^{-}_{atom} + 2AlCl_{3(g)}}$$

$$2AlCl + H_2 + \quad (6)$$

$$2Fe_{(Substrate)} \rightarrow 2FeAl_{(Alloy)} + 2HCl \quad (7)$$

حيث يترسب الألمنيوم الذري $[Al]_{atom}$ ويتغلغل في عمق إلى داخل سطح العينة مشكلاً ألومينايد الحديد، ويتحدد التركيب الطوري لطبقات الانتشار بالاعتماد على درجات الحرارة، فيتشكل محلول صلب للألمنيوم في الهيكل الشبكي للحديد α عند درجات حرارة قريبة من 900°C، في حين يتشكل ألومينايد الحديد من النوع $FeAl_3$ عند درجات حرارة أعلى من 950°C، أمَّا ألومينايد الحديد FeAl وغيرها من ألومينايد الحديد الأخرى فتتشكل عند درجات حرارة أدنى من [10] 950°C. ويمكن تمثيل عملية انتشار الألمنيوم وتغلغله في داخل سطح العينة برسم تخطيطي كما هو مبيّن في الشكل /3/، حيث يتفكك كلوريد الألمنيوم الثنائي $AlCl_2$ وكلوريد الألمنيوم الأحادي AlCl إلى الألمنيوم الذري $[Al]_{atom}$ و كلوريد الألمنيوم الثلاثي $AlCl_3$. ويتغلغل الألمنيوم الذري $[Al]_{atom}$ في داخل سطح العينة ويبقى

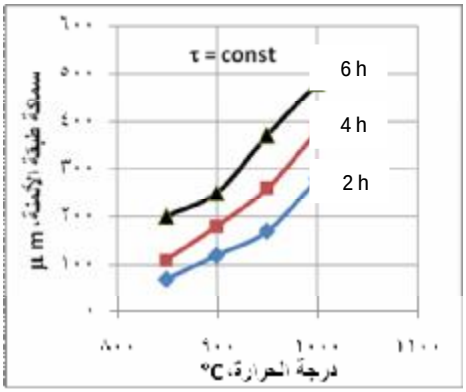
$AlCl_3$ على سطح العينة ليبدأ دورة جديدة، حيث يتفاعل مرة أخرى مع مسحوق الألمنيوم الخامل $Al_{(Pack)}$، وتتكرر عملية التفاعل ضمن حلقة مغلقة.



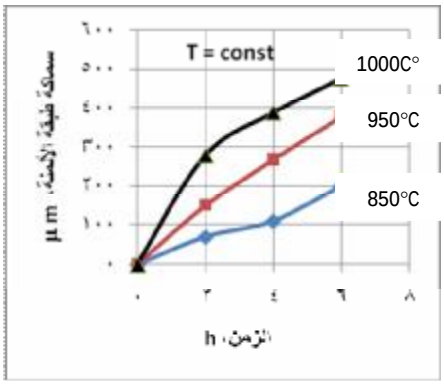
الشكل (3): رسم تخطيطي لعملية انتشار عنصر الألمنيوم الذري وتغلغله إلى داخل سطح العينة

يوضح الشكل (4) تأثير نظام الإشباع الانتشاري بالألمنيوم Aluminizing على سماكة الطبقة الانتشارية thickness للفولاذ الكربوني، وقد أُجريَ الاختبار في نظامين:النظام الأول للإشباع يتم عند ثبات الزمن τ=const ودرجة حرارة متغيّرة تراوح بين°C(-800 1000) =T. أمَّا النظام الثاني للإشباع فكان عند ثبات درجة الحرارة T=const وزمن احتفاظ متغيّر يراوح بين τ = (2 - 6) h. نلاحظ من الشكل أن ازدياد عمق طبقة الطلاء الانتشاري بالألمنيوم يتعلق بارتفاع درجة الحرارة Temperature وزيادة زمن التسخين. ويلاحظ من (الشكل 4,a) أن تأثير درجة الحرارة يقترب من شكل الدالة الأسية Exponential، في حين يقترب تأثير الزمن من شكل دالة القطع المكافئ Parabola كما هو مبيّن في الشكل /4,B/، ويلاحظ أيضاً أن تأثير درجة الحرارة يكون أكبر من تأثير الزمن.

تؤثر نسبة العناصر السبائكية في الفولاذ مثل Si, Mn, Cr, Ni, Mo, W تأثيراً كبيراً في سماكة طبقة الطلاء، وزيادة محتواها يؤدي إلى نقصان سماكة طبقة الألمنة [11]. كما أن زيادة نسبة الكربون في الفولاذ المعرض للطلاء الانتشاري بالألمنيوم يؤدي أيضاً إلى نقصان سماكة طبقة الألمنة. بحيث إنَّ زيادة سماكة طبقة الألمنة يؤدي إلى دفع عنصر الكربون نحو الداخل باتجاه العمق، مما يسمح بتشكيل بنية برليتية Pearlite غنية بالكربون تحت طبقة الألمنة مباشرة.



الشكل (4,a)



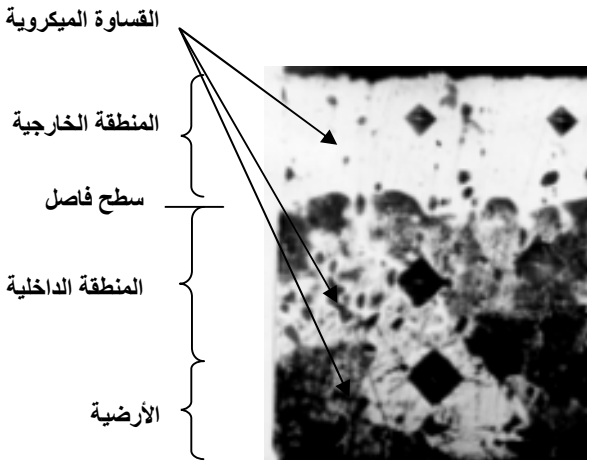
الشكل (4,b)

الشكل (4) تأثير نظام المعالجة بالألمنة في سماكة طبقة الطلاء للفولاذ الكربوني

(4,a) علاقة سماكة طبقة الألمنة بدرجة الحرارة عند ثبات الزمن.

(4,b) علاقة سماكة طبقة الألمنة بالزمن عند ثبات درجة الحرارة.

تتعلق القساوة السطحية Hardness لطبقة الألمنة أيضاً بنظام الإشباع الانتشاري بالألمنيوم وبالتركيب الكيميائي للمادة Material composition، وقد قيستِ القساوة لطبقة الطلاء بالألمنيوم بواسطة جهاز فيكرز لقياس القساوة الميكروية والمزود بمجهر ضوئي، بحيث أُخذَتْ ثلاثة قياسات للقساوة، ثم أخذت القيمة المتوسطة. وكما هو مبيّن في الصورة المجهرية في الشكل /5/ فإن قيمة القساوة لطبقة الطلاء بالألمنيوم تتغيّر بدءاً من 3500 MPa بالقرب من السطح الخارجي أي في المنطقة الأولى لطبقة الطلاء، وتصل إلى 2000 MPa في المنطقة الثانية، أمَّا قساوة الأرضية المعدنية Matrix فكانت نحو 1900 MPa.



الشكل (5): البنية المجهرية والقساوة الميكروية لطبقة الألمنة عند (950°C, 4 h)، X400

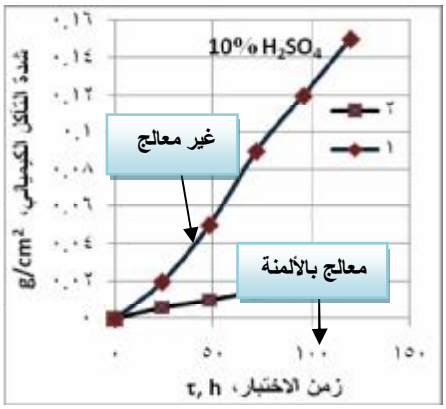
تعتمد مقاومة التآكل الكيميائي اعتماداً أساسياً على وجود العناصر السبائكية ونسبتها في الفولاذ كي تخفف أو تمنع التآكل الكيميائي في أثناء عمليات الاستخدام والتشغيل، وهذا ما يؤكد وجود مجموعة كبيرة من أنواع الفولاذ المقاوم للصدأ أو التآكل Stainless steel [12] الداخل في تركيبه العناصر السبائكية الأساسية: مثل الكروم Cr، النيكل Ni، السيلكون Si، الألمنيوم Al، النحاس Cu، التيتانيوم Ti، أو البورون B.

ونظراً إلى ارتفاع ثمن هذه العناصر وندرة وجودها في الطبيعة، فقد انصب اهتمام الباحثين على كيفية استبدال هذه العناصر، والاستعاضة عنها باستخدام التشريب أو ما يسمى الإشباع السطحي Saturation بأحد هذه العناصر أو أكثر في الأجزاء المعرضة للتآكل و الاهتراء. فلذلك قمنا في هذا البحث باستخدام تقانة الطلاء الانتشاري بالألمنيوم (الألمنة) كواحدة من الطلاءات الواعدة والمقاومة الجيدة للتآكل الكيميائي والأكسدة عند درجات الحرارة العالية.

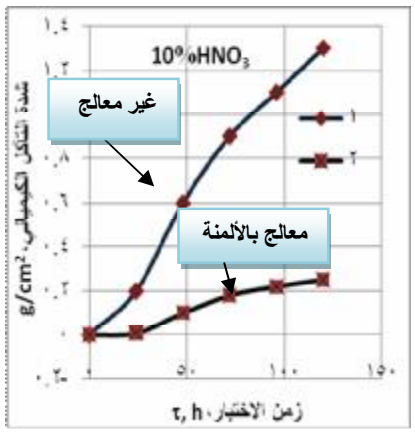
ويبيّن الشكل (6) نتائج دراسة مقاومة طبقة الطلاء للتآكل الكيميائي Corrosion resistance في أوساط عدائية مثل محلول حمض الكبريت الممدد بالماء بنسبة 10% H_2SO_4 ومحلول حمض الآزوت الممدد بالماء أيضاً بنسبة 10% HNO_3، حيث أجري الاختبار في أوعية مكشوفة في درجة حرارة الغرفة 25 °C وضغطاً جوياً 1 atm، أمَّا زمن التجربة فقد راوح بين 24 ساعة و120 ساعة، وقد قيستْ شدة التآكل بوزن العينة قبل الاختبار وبعده، وذلك بعد غسلها جيداً بتيار من الماء وقطعة قماش للتخلص من آثار التآكل، ثم جففت بتيار من الهواء الساخن تجفيفاً جيداً بواسطة مجفف وبتقسيم فارق الوزن على مساحة السطح الكلي، وقورنت النتائج مع عينات غير معرضة لعملية الألمنة، وكُرِّرَتِ التجربة ثلاث مرات. نلاحظ من الشكل (6a&b) أن شدة التآكل الكيميائي للفولاذ غير المعالج بالألمنة تكون أكبر بكثير من شدة التآكل الكيميائي للعينات المعالجة بالألمنة، وتصل مقاومة التآكل الكيميائي إلى 4.5 – 10 أضعاف بالنسبة إلى العينات المعالجة بالألمنة مقارنة بعينات من الفولاذ غير المعرض لعملية الألمنة.

يمتلك الطلاء الانتشاري بالألمنيوم اهتماماً علمياً كبيراً، نظراً إلى مقاومته الكبيرة للأكسدة Oxidation Resistance في درجات الحرارة العالية [13]. وقد أثبتت نتائج البحث أن الطلاء الانتشاري بالألمنيوم يمتلك قدرة عالية على العمل في درجات الحرارة العالية، حيث وقد دُرِسَ اختبار الأكسدة في درجات الحرارة العالية لعينات من الفولاذ الكربوني المعالجة بالألمنة وقورنت النتائج بعينات غير معالجة بالألمنة، وذلك في درجتي حرارة 700°C و900°C مع تغيّر الزمن، أمَّا وسط الأكسدة فكان الهواء، وقد قيست شدة التأكسد بوزن العينة قبل الاختبار وبعده وذلك بعد إخراج العينة من الفرن وغسلها جيداً بتيار من الماء وقطعة قماش للتخلص من آثار الأكسدة، ثم جففت بتيار من الهواء الساخن تجفيفاً جيداً بواسطة مجفف، وبتقسيم فارق الوزن على مساحة السطح الكلي، وقورنت النتائج بعينات غير معرضة لعملية الألمنة. لوحظ انهيار عينات الفولاذ غير المعالجة بعد 15 ساعة من الاختبار عند درجة الحرارة 700°C نظراً إلى تشوه شكلها بشكل كبير وتشكيل قشور من الأكاسيد سريعة الانفصال، واحتفظت العينات المعالجة بالألمنة بشكلها بعد أكثر من 72 ساعة من زمن الاختبار، ولم يلاحظ عليها تقشر أو انفصال لطبقة الطلاء. أمَّا عند ارتفاع درجة الحرارة إلى 900°C فإن العينات غير المعرضة للألمنة أي (غير المعالجة) قد انهارت وتحطمت بعد أقل من 10 ساعات نظراً إلى تشوه شكلها وتقشر وانفصال سريع لطبقة الأكاسيد، في حين ازدادت سرعة الأكسدة للعينات المعرضة للألمنة وصمدت عند درجة الحرارة تلك أكثر من 60 ساعة من الاختبار. ويبيّن الشكل (71) منحنى مقاومة الأكسدة عند درجات الحرارة المختلفة لعينات من الفولاذ الكربوني المعالج بالألمنة ولعينات أخرى غير معالجة، حيث يظهر من المنحنى أن سرعة الأكسدة للطبقة السطحية للعينات المعرضة لعملية الألمنة تكون كبيرة في بداية الاختبار ثم تتباطأ بشكل كبير وملحوظ، أمَّا سرعة الأكسدة للعينات غير المعالجة بالألمنة فتكون على العكس بطيئة في البداية حتى 6 ساعات من الاختبار، ثم تتسارع تسارعاً كبيراً لتصل إلى الانهيار.

وبالنتيجة تزداد مقاومة الأكسدة في درجات الحرارة العالية ازدياداً كبيراً يصل إلى 5 - 8 مرات لعينات من الفولاذ الكربوني المعالجة بالألمنة مقارنة بعينات من الفولاذ الكربوني غير المعرضة لعملية المعالجة بالألمنة.



الشكل (6,a)



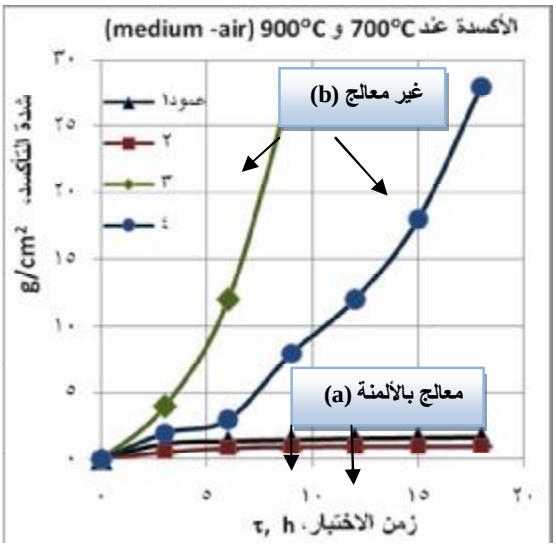
الشكل (6,b)

الشكل (6a&b) مقاومة التآكل الكيميائي للفولاذ الكربوني في:

(a) - 10 % H_2SO_4، (b) - 10%HNO_3

1 - ♦ فولاذ غير معرض لعملية المعالجة،

2 - ■ فولاذ معالج بالألمنة (950°C, 4 h)



الشكل (7): مقاومة الأكسدة عند درجات الحرارة العالية للفولاذ الكربوني (الوسط - هواء)

a) المعالج بالألمنة (950°C, 4 h) ،

b) غير المعالج.

1- أكسدة عند 900°C للفولاذ المعالج ▲،

2- أكسدة عند 700°C للفولاذ المعالج ■،

3- أكسدة عند 900°C للفولاذ غير المعالج ♦ 4- أكسدة عند 700°C للفولاذ غير المعالج●.

الاستنتاجات:

1.تؤدي عملية الطلاء الانتشاري بالألمنيوم (الألمنة) للفولاذ الكربوني إلى تشكيل طبقة طلاء سطحية مكونة من طبقتين يفصل بينهما سطح فاصل:

أ- طبقة خارجية رقيقة فقيرة بعنصر الحديد تتألف من ألومينايد الحديد وجزيئات من أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 فضلاً عن محلول صلب α لعنصر الألمنيوم في الهيكل الشبكي للحديد.

ب- طبقة داخلية حبيبية الشكل تقع تحت الطبقة الأولى، وهي غنية بعنصر الحديد وتحتوي على ألومينايد الحديد والمحلول الصلب α عنصر الألمنيوم في الهيكل الشبكي للحديد.

2. يزداد عمق طبقة الألمنة بزيادة زمن الاحتفاظ عند درجة حرارة معينة وبارتفاع درجة الحرارة، حيث تقترب علاقة درجة الحرارة بعمق طبقة الألمنة من صفة الدالة الأسية،أما علاقة الزمن فهي ذات صفة دالة القطع المكافئ.

3. تتناقص القساوة الميكروية بدءاً من السطح الخارجي أي المنطقة الأولى لطبقة الألمنة التي تكون بحدود 3500 MPa كلما اقتربنا نحو الأرضية Matrix لتصل إلى حدود 1900 MPa.

4. تزداد مقاومة التآكل الكيميائي للفولاذ الكربوني المعالج بالألمنة ازدياداً كبيراً يراوح بين 4.5 إلى 10 أضعاف مقارنة بعينات غير معالجة بالألمنة، وذلك في أوساط حمضية مثل محلول حمضي 10% H_2SO_4 و 10% HNO_3 الممددين بالماء.

5. تكون مقاومة التآكل الكيميائي للفولاذ الكربوني المعالج بالألمنة أفضل في محلول حمض الكبريت مما هو عليه في محلول حمض الآزوت الممدين في الماء.

6. تزداد مقاومة الأكسدة عند درجات الحرارة العالية (الوسط-هواء) لعينات من الفولاذ الكربوني المعالجة بالألمنة ازدياداً كبيراً، بحيث تصل إلى 5 – 8 مرات مقارنة بعينات غير معرضة لعملية الألمنة.

الخلاصة:

تشير نتائج البحث المقدم إلى إمكانية التوصية باستخدام الطلاء الانتشاري بالألمنيوم (الألمنة) في أجزاء محطات توليد الطاقة، وفي أجزاء الآلات العاملة عند درجات الحرارة المرتفعة حتى 800°C. وتعدُّ هذه التقانة من تقانات الطلاء الانتشاري السطحي الواعدة التي تمتلك مقاومة عالية للتآكل الكيميائي ومقاومة جيدة للأكسدة في درجات الحرارة العالية.

المراجع

1. P.I. Melnik," technology of diffusion coating",pp150.–Kiev1978
2. A.Y.Majeed, "Study of microhardness and resistance wear of boride layers on steel', KKU Journal, N1-vol.1, pp11-25.–SA 2004
3. A.P. Epik, A.Y. Majeed," Chemical heat treatment of powder based iron", Powder Metallurgy Journal, N8, pp 42-50.– Kiev1993
4. Hishamuddin Hj. Husain,a Abdul Razak Daud,a and Muhamad Daud , "Diffusion of Aluminum Into Steel Substrates By Means Of Hot Dip Aluminizing", AIP Conf. Proc.January 5, 2010 – Vol. 1202, pp. 146-148.– USA2010 .
5. Xiao Si, Bining Lu and Zhenbo Wang," Aluminizing Low Carbon Steel at Lower Temperatures",J. Mater. Sci. Technol., Vol.25, N4. – China2009 .
6. Kee-Hyun, Kim**,** Van-Daele, Benny, Van-Tendeloo, Gustaaf andJong-Kyu, Yoon," Observations of Intermetallic Compound Formation of Hot Dip Aluminized Steel", Materials Science Forum, Vols. 519-521, pp. 1871-1875.– Switzerland 2006.
7. V.N Ermenko, N.D. Lesnik, and other," Physical chemistry of nonorganic materials", vol.3, pp190. – Kiev 1988.
8. Yuheng Lu, Shangguan Qi and others," A Study on Diffusion in Hot-dip Aluminizing", Advanced Materials Research, Vol. 97-101, pp. 1253 – 1256.– Online available science 2010.
9. Tomohiro Sasaki, a, and Takao Yakou1, a," Features of intermetallic compounds in aluminized steels formed using aluminum foil", Surface and Coatings Technology, Volume 201, pp. 2131-2139.- Elsevier 2006.
10. L.C. Liachovich," chemical heat treatment of metalls and alloys" ,pp 424–Moscow1981
11. Deqing ang and Ziyuan Shi ," Aluminizing and oxidation treatment of 1Cr18Ni9 stainless steel". – Available on line 2004.
12. S. Sharafi, M.R. Farhang," Effect of aluminizing on surface microstructure of an HH309 stainless steel".– Surface & Coatings Technology, Volume 200,pp.5048 – 5051.– Science direct 2006.
13. Wang Deqing," Phase evolution of an aluminized steel by oxidation treatment", Applied Surface Science 254, pp.3026–3032.– Science direct 2008.

.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2010/5/9.