مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (29) العدد (1) 2007
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol. (29) No. (1) 2007

تحسين خواص الفولاذ المنخفض الكربون باستخدام المعالجة المزدوجة (كربنة غازية+كرمنة صلبة)

الدكتور نبيل مقدسي [*]
الدكتور خليل عزيمة[**]
معن معلا[***]

(تاريخ الإيداع 4 / 2 / 2007. قبل للنشر في 2007/3/13)

□ الملخّص □

تعتبر عملية الكرمنة إحدى تقنيات المعالجة السطحية التي يتم بموجبها إنتاج طبقات على سطح الفولاذ تتمتع بالقساوة العالية وبالمقاومة الجيدة للتآكل والاهتراء.

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين الخواص الميكانيكية ورفع مقاومة التآكل والاهتراء لأحد أنواع الفولاذ المنخفض الكربون المحتوي على 0.15%C المستخدم محلياً في تصنيع بعض عناصر الآلات. حيث تم تطبيق الكرمنة الصلبة عند الدرجة $1000C^0$ لمدة (6-4-2) ساعة على الترتيب.

إن عمق الطبقة المتشكلة على سطح الفولاذ يزداد بازدياد زمن المعالجة ونسبة كلوريد الأمونيوم في خليط الكرمنة.

أظهر البحث أهمية نسبة الكربون في العينات المعالجة ، إن زيادة نسبة الكربون على السطح لها دور مهمّ في تحسن الخواص الميكانيكية ومقاومة الفولاذ للتآكل والاهتراء. حيث لوحظ أن المعالجة المزدوجة (الكربنة تليها الكرمنة) أدت إلى تحسين متانة الشد بنسبة 12%، وإلى ازدياد قساوة السطح بمقدار 7 مرات وتحسين مقاومة الفولاذ للتآكل.

كلمات مفتاحية: فولاذ منخفض الكربون ، الكرمنة الصلبة ، عمق الطبقة، الاهتراء ، مقاومة التآكل.

[*] **أستاذ في قسم هندسة التصميم والإنتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**
[**] **أستاذ في قسم هندسة التصميم الميكانيكي – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق – دمشق – سورية.**
[***] **طالب ماجستير في قسم هندسة التصميم والإنتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (29) العدد (1) 2007
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol. (29) No. (1) 2007

Improving the Properties of Low Carbon Steel Using Dual Treatment (Gas Carburizing Plus Pack Chromizing)

Dr. Nabil Makdissi [*]
Dr. Khalil Azimeh [**]
Maan Moualla [***]

(Received 4 / 2 / 2007. Accepted 13/3/2007)

□ ABSTRACT □

The chromizing process is one of the surface treatment technologies that can produce chromium containing surface layers with high hardness, good corrosion, and wear resistance on the steel matrix.

This study aims to improve the mechanical properties and increase corrosion and wear resistance on one of low carbon steel containing 0.15%C locally used in manufacturing some of machine elements. Pack chromizing process was applied at 1000 ^{0}C for 2, 4, and 6 h respectively.

The depth of coated layer on the surface increases by increasing the coating time and the ratio of Ammonium Chloride in the chromizing mixture.

This study showed the importance of carbon content on the treated samples. The increase of carbon content on the surface has an important effect in improving the mechanical properties and increasing corrosion and wear resistance. It was observed that the dual treatment (carburizing followed by chromizing) increased the tensile strength, surface hardness, and corrosion resistance.

Key words: Low carbon steel, Pack chromizing, Case depth, Wear, Corrosion resistance.

[*] **Professor, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
[** *] **Professor, Department of Design engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.**
[***] **Postgraduate Student, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

مقدمة:

إن إطالة عمر القطعة المعدنية وجعلها مقاومة للتآكل والاهتراء ولأطول فترة ممكنة هو أحد الأهداف الرئيسة للمعالجات الحرارية السطحية.

فقد جرت في السنوات الأخيرة العديد من الأبحاث والدراسات في هذا المجال بهدف رفع مقاومة التآكل والاهتراء للفولاذ وتحسين الخواص الميكانيكية. وتعتبر المعالجات الانتشارية (الكيمياحرارية) من الطرق المستخدمة بشكل واسع من أجل هذه الغاية ويعتبر أكثرها شيوعاً (الكربنة–النتردة) والمعالجة بالمعادن (كالكروم والبورون والألمنيوم. ...).

فقد تنوعت طرق المعالجة بالمعادن وتعددت مجالات استخدامها نظرا لظهور المشكلات المتعلقة بانخفاض كفاءة عناصر الآلات (كالمحاور – المسننات – المحامل – الجلب – أجزاء المضخات. ...الخ) نتيجة تعرضها للتآكل والاهتراء وانخفاض قساوة السطح.

وتطورت عمليات المعالجة بالكروم ومنها:

1. عمليات التلبيس(الطلاء) حيث يتم بهذه الطريقة إنتاج طبقات على سطح المعدن تتميز بمقاومتها الكبيرة للاهتراء [1].
2. عمليات الانتشار: عن طريق انتشار ذرات الكروم وتغلغلها داخل المعدن بهدف رفع مقاومة الاهتراء والتآكل، حيث لا تزال هذه الطريقة تلقى المزيد من الدراسات والأبحاث [1,2,3].

تطبق الكرمنة الانتشارية لواحد أو أكثر من الأهداف التالية [2]:

1. زيادة مدة خدمة service life الأجزاء المصنوعة من سبائك غالية الثمن.
2. زيادة درجة حرارة التشغيل operating temperature للعنصر أو الجزء دون إنقاص مدة خدمته.
3. إنتاج طبقات مقاومة للتآكل على أنواع رخيصة من الفولاذ كالفولاذ الكربوني carbon steels أو المنخفض السبائكية Low alloy steels بدلا من استخدام الفولاذ الغير قابل للصدأstainless steel الغالي الثمن.
4. زيادة قساوة السطح وتحسين الخواص الاحتكاكية.

تم تقسيم الكرمنة الانتشارية إلى طريقتين رئيسيتين هما [3]:

1. الكرمنة الطرية soft chromizing: تطبق هذه الطريقة على الفولاذ منخفض الكربون low carbon steels بغية تحسين خواصه التآكلية.
2. الكرمنة القاسية hard chromizing: تطبق هذه الطريقة على الفولاذ المتوسط والعالي الكربون medium and high carbon steels وبعض أنواع الفولاذ العالي الكروم كالفولاذ AISI D2 بغية تحسين مقاومة التآكل والاهتراء.

الكرمنة الانتشارية الصلبة Pack diffusion chromizing:

تعتبر الكرمنة الانتشارية الصلبة إحدى تقنيات المعالجة السطحية الحديثة للفولاذ. حيث يتم بهذه الطريقة إنتاج طبقات سطحية مقاومة للتآكل والاهتراء [2,3]. فقد لاقت هذه الطريقة اهتماماً زائداً من الباحثين في السنوات الأخيرة نظراً للحاجة المتزايدة للحصول على عناصر آلات تتمتع بخواص تآكلية جيدة تؤدي عملها بالشكل الأمثل [4,5,6].

في هذه الطريقة توضع العينات المعالجة في وعاء مع خليط الكرمنة chromizing mixture المؤلف من:

1. (بودرة الكروم أو فيروكروم).
2. مادة مالئة (أوكسيد الألمنيوم).
3. NH4Cl.

وتسخن في فرن عند درجات حرارة تتراوح بين (950-1150) درجة مئوية لمدة تتراوح بين 16-1ساعة حسب العمق المراد الحصول عليه حيث تحدث التفاعلات التالية [2,6,7]:

$$NH_4Cl \rightarrow NH_3 + HCl.....(1)$$
$$2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2.....(2)$$
$$2HCl + Cr \rightarrow CrCl_2 + H_2.....(3)$$
$$CrCl_2 + Fe \rightarrow FeCl_2 + Cr.....(4)$$
$$CrCl_2 + H_2 \rightarrow 2HCl + Cr.....(5)$$

إن التفاعلات (1) و (2) تحدث في مجال درجات الحرارة بين 400 – 335 درجة مئوية بينما يحدث التفاعلين (5,4) عند درجة حرارة المعالجة [1,7].

ذرات الكروم المتحررة نتيجة التفاعلات السابقة تنتشر داخل الفولاذ وتتحد مع ذرات الكربون لتشكل كربيدات الكروم على سطح الفولاذ.

إن بنية الطبقة الانتشارية تعتمد بشكل رئيس على بنية وتركيب المعدن الأساسي خاصّةً عنصر الكربون. ففي المرحلة الأولى خلال التسخين إلى درجة الحرارة المطلوبة للمعالجة فإن ذرات الكربون والحديد تنتشر باتجاه السطح ، فبزيادة درجة حرارة المعالجة يزداد معامل انتشار الكربون، وكذلك يزداد معامل انتشار الكروم (عند الدرجة 1100 فإن معامل انتشار الكربون يساوي Dc = 7.06×10-7 cm^2/s ومعامل انتشار الكروم يساوي DCr = 11.2×10-10 (cm^2/s).

وفي المرحلة الثانية لعملية الكرمنة فإن ذرات الكروم تترسب على سطح الفولاذ و تنتشر داخل الفولاذ وتتحد مع ذرات الكربون لتشكيل طبقة رقيقة من كربيدات الكروم.

وفي المرحلة الثالثة يزداد انتشار الكروم داخل الفولاذ وبذلك تزداد سماكة طبقة الكربيدات [2,6].

إن وجود الهواء في جو الفرن له تأثير سلبي على عملية المعالجة، إذ إنّ الأوكسجين الموجود يؤكسد سطح الفولاذ ويمنع عملية الانتشار من الحدوث، كذلك فإن الأوكسجين يتحد مع ذرات الكروم المتحررة ويشكل أوكسيد الكروم Cr_2O_3وهذا يقلل من فاعلية المعالجة بشكل كبير [5,6].

فقد جرت جهود كبيرة لإزالة الأوكسجين من جو فرن المعالجة، وذلك عن طريق إدخال غازات خاملة إلى جو الفرن (كالأرغون والآزوت) وأثبتت هذه الطريقة فاعليتها بشكل كبير [4,6].

هدف البحث وأهميته:

تؤدي إضافة الكروم إلى الفولاذ بالإشابة أو السبك إلى زيادة صلابته وقوة تحمله ومقاومته للصدمات والاحتكاك بالإضافة إلى التقليل من ناقليته للحرارة والكهرباء، ومن ناحية أخرى يُكسب الكروم الفولاذ مقاومة كبيرة للتآكل والتخريش

والذوبان في الحموض. غير أن استعمالات الفولاذ الكرومي في الصناعة القليلة الأهمية أمرا غير مرغوب فيه نظرا للتكلفة العالية لهذا النوع من الفولاذ.

سيتم في هذا البحث تطبيق الكرمنة الانتشارية الصلبة pack diffusion chromizing على أحد أنواع الفولاذ الكربوني التجاري الرخيص الثمن المستخدم محلياً في تصنيع بعض عناصر الآلات، بهدف رفع مقاومته للتآكل والاهتراء وتحسين خواصه الميكانيكية.

مواد وطرق البحث:

أجري البحث على عينات من الفولاذ المنخفض الكربون المستخدم محلياً في تصنيع بعض عناصر الآلات حيث تم أخذ العينات من قضبان طويلة وتم خراطتها إلى القطر 14mm وقصها بالمخرطة إلى الطول 15mm، وبعد ذلك تم تنعيمها بورق صنفرة بدءاً من الدرجة 400 وصولا للدرجة 1200.

ويبين الجدول (1) التركيب الكيميائي للفولاذ المستخدم حيث أجري اختبار التحليل الكيميائي باستخدام جهاز التحليل الطيفي للمعادن في مخبر تحليل المعادن في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين حيث تم أخذ ثلاث قراءات و أُخذ المتوسط للقراءات الثلاث.

الجدول (1) يبين التركيب الكيميائي للفولاذ المستخدم

العنصر	*Fe*	*C*	*Si*	*Mn*	*P*	*S*	*Cr*	*Ni*
النسبة المئوية	97.0	0.148	0.0254	1.49	0.08	0.369	0.076	0.109

إجراء التجارب:

تم تقسيم العينات قبل المعالجة(الكرمنة) إلى مجموعتين:

المجموعة A: عينات غير معالجة.

المجموعة B: عينات أجريت عليها عملية الكربنة الغازية gas carburizing في مؤسسة معامل الدفاع عند الدرجة 910 درجة مئوية لمدة خمس ساعات وكانت نسبة الكربون على السطح بعد الكربنة0.92%.

1. برنامج المعالجة الحرارية Heat treatment program:

تم إجراء عملية المعالجة بالكروم في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا بفرن مزود بغاز خامل نوع lenton فرنسي الصنع حيث يتدفق الغاز الخامل إلى داخل الفرن بمعدل يمكن التحكم به، ويتم التحكم بدرجة حرارة وزمن المعالجة الكترونيا، ويتم التسخين بواسطة وشائع كهربائية.

تم تحضير ووزن خليط الكرمنة على ميزان حساس وتم تقسيم الخليط إلى مجموعتين وفقاً لنسبة كلوريد الأمونيوم وفق الجدول (2)

الجدول (2) يبين النسبة المئوية للمواد المستخدمة في المعالجة

المادة	**أوكسيد ألمنيوم** Al_2O_3	**فيروكروم** **Fe-Cr**	**كلوريد الأمونيوم** NH_4Cl	**المجموعة**
النسبة المئوية للوزن	67%	30%	3%	I
	64%	30%	6%	II
الشركة الصانعة	Himedia الهندية	Tien Tai Welding Corp التايوانية	Himedia الهندية	

ويبين الجدول (3) التركيب الكيميائي لمادة الفيروكروم

الجدول (3) التركيب الكيميائي لمادة الفيروكروم

العنصر	Cr	Fe	Si	C	P	S
النسبة المئوية	71.0	Base	0.12	0.03	0.02	0.004

تم وضع العينات وخليط الكرمنة في بوتقة سيراميكة مقاومة للحرارة في فرن المعالجة ، وجرى التسخين بمعدل $20C^0/min$ حتى الوصول إلى درجة حرارة المعالجة البالغة 1000 درجة مئوية ،وتم ضخ غاز الآزوت نظراً لرخص ثمنه مقارنة بغاز الأرغون إلي داخل الفرن بمعدل 3 L/min.

تم التسخين إلى درجة حرارة 1000 درجة مئوية لمدة (6 – 4 – 2) ساعة على الترتيب وبعد الانتهاء من التسخين عند الزمن المطلوب تم التبريد ببطئ مع الفرن.

اختبار البنية المجهرية والقساوة Hardness and microstructure testing

أجري اختبار القساوة والبنية المجهرية في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا على جهاز نوع Leica ألماني الصنع. تصل قوة تكبير المجهر الضوئي فيه إلى 1000X.

تعطى قساوة فيكرز وفق العلاقة التالية [8]:

$$HV = 1.8544\frac{p}{d^2}\left[kg/mm^2\right]$$

P: الحمل المطبق [Kg].

d: متوسط قطر الأثر الذي يتركه الهرم [mm].

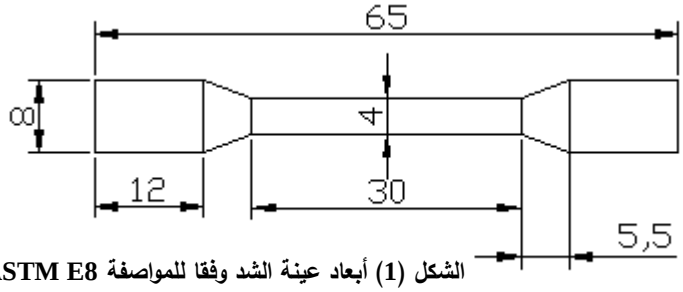
الحمل المطبق يساوي 400 gr.

كانت عينات الاختبار اسطوانية بقطر 13mm وبطول15mm حيث تم تنعيمها بورق الصنفرة وبنعومات متدرجة وصلت حتى الدرجة 1200، خضعت العينات المعالجة إلى عمليات ميكانيكية (جلخ وصقل)، ولعمليات كيميائية (تخريش في محلول حمض الآزوت بتركيز 4%).

اختبار الشد Tensile test

تم إجراء اختبار الشد في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق على آلة نوع Inestron بريطانية الصنع مزودة براسم بياني الكتروني لمنحني الشد.

تم تحضير عينات الشد وفقا للمواصفة الأمريكية(ASTM E8) ، حيث تم خراطة العينات إلى الأبعاد المبينة بالشكل (1) ،وبعد الخراطة تم تنعيم العينات بواسطة ورق صنفرة بنعومة600.



الشكل (1) أبعاد عينة الشد وفقا للمواصفة ASTM E8 الأبعاد بالـ mm

اختبار التآكل Corrosion test:

أجري اختبار التآكل الكيميائي بطريقة الفقد الوزني في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، تم استخدام حمضي الآزوت والكبريت بعيار (2N) كوسطين أكالين. تم حساب وزن كل عينة قبل وضعها في المحلول بواسطة ميزان الكتروني حساس بدقة 0.001g نوع (Sartorius (LA1200S ألماني الصنع.

كانت عينات الاختبار اسطوانية بقطر 10mm وبسماكة 3mm حيث تم تنعيمها بورق الصنفرة وبنعومات متدرجة وصلت حتى الدرجة 1200. بعد وضع العينات في كل من المحلولين لمدة 24 ساعة بدرجة حرارة الغرفة أخذت العينات ،وتم حساب وزن كل عينة بعد تنظيفها بشكل جيد.

يعطى معدل تغلغل التآكل corrosion penetration rate وفقا للعلاقة [8]:

$$CPR = \frac{87.6 \times W}{A \times d \times t}[mm/y]$$

حيث:

CPR : معدل التآكل ميليمتر بالسنة (mm/y).

W: النقص بالوزن ويساوي الوزن الأولي . الوزن النهائي (mmg).

A: مساحة السطح المعرض للوسط (cm^2).

t: زمن الاختبار (ساعة).

d: كثافة المعدن (للفولاذ الكربوني $7.86\ g/cm^2$).

النتائج والمناقشة:

1. اختبار البنية والقساوة:

بعد إجراء عملية الكرمنة تم قياس عمق الطبقة المتشكلة عن طريق إجراء مقطع عرضي ووضعت العينات تحت المجهر وقيس العمق بواسطة الميكرومتر المدرج على عدسة المجهر، حيث كانت النتائج كما هو موضح بالجدول (4):

الجدول (4) سماكة الطبقة عند الدرجة 1000 تبعا لزمن المعالجة ولنسبة كلوريد الأمونيوم المستخدمة

العينات	الخليط	زمن المعالجة [ساعة]		
		2	4	6
		سماكة الطبقة المتشكلة[ميكرون]		
A	I	2	8	12
	II	5	10	16
B	I	9	18	29
	II	12	23	36

من الجدول (4) يتضح أن سماكة الطبقة المتشكلة على سطح الفولاذ تزداد بازدياد زمن المعالجة ،حيث وجد [4,5] أن سماكة الطبقة المتشكلة تزداد بازدياد زمن ودرجة حرارة المعالجة. والشكل (3) البنية المجهرية للفولاذ المستخدم قبل وبعد المعالجة.

إن قيم القساوة السطحية التي تم الحصول عليها مبينة في الجدول (5) حيث قيست القساوة عند زمن (6 – 4) ساعة. (قساوة الفولاذ بدون معالجة 196 HV) ويبين الشكل (2) التخطيط البياني لقيم القساوة السطحية.

الجدول (5) قيم القساوة السطحية للعينات بعد المعالجة عند زمن 4,6 ساعة

العينات	الخليط	زمن المعالجة [ساعة]	
		4	6
		القساوة HV	
A	I	874	906
	II	894	935
B	I	1238	1284
	II	1320	1378

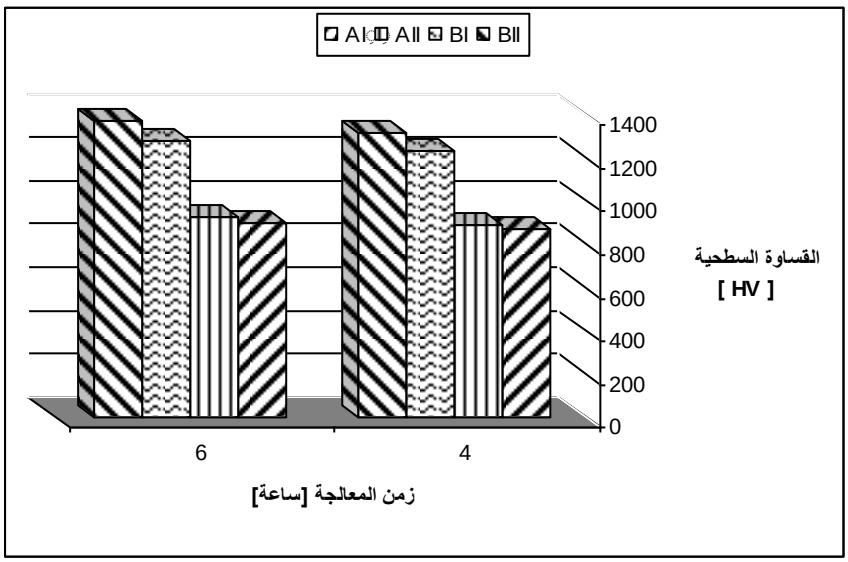
إن الزيادة في نسبة كلوريد الأمونيوم NH_4Cl عند النسبة نفسها لمادة الفيروكروم تؤدي إلى زيادة قساوة وسماكة الطبقة المتشكلة عند شروط المعالجة نفسها (ثبات الزمن والحرارة) ، وتعزى هذه الزيادة في عمق الطبقة وفقاً لـ [6] إلى زيادة نسبة $CrCl2$ عند درجة حرارة المعالجة الذي يتفكك حسب المعادلات (4 – 5). حيث إنّ النسب القليلة لـ NH_4Cl دون 2% تؤدي إلى الحصول على طبقة ذات سماكة غير متجانسة. يبين الشكلين (4,5) المنحي البياني للعلاقة بين سماكة الطبقة المتشكلة وزمن المعالجة عند قيم مختلفة لـ NH_4Cl .

فقد وجد [4,5,9] أن الزيادة في قيم القساوة السطحية تعود إلى تشكل أنواع معقدة من الكربيدات ($(Cr,Fe)_{23}C_6$ ، $(Cr.Fe)_7C_3$)على السطح حيث يعتبر الكروم من العناصر شديدة الألفة لتشكيل الكربيدات.

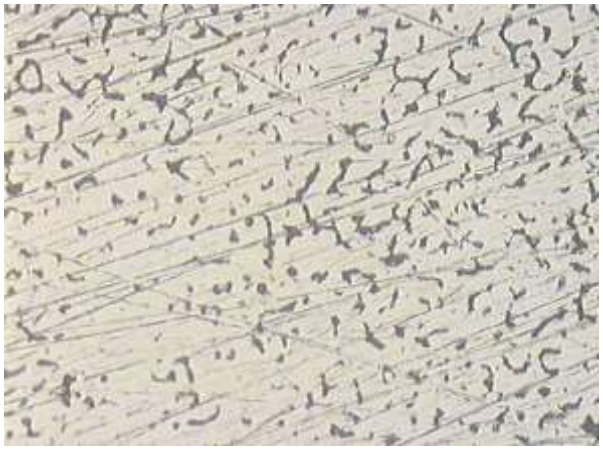
إن ازدياد نسبة الكربون على السطح بعد عملية الكربنة أدت إلى زيادة عمق الطبقة المتشكلة ازدياد قيم القساوة السطحية بسبب تشكل الكربيدات ذات القساوة العالية على السطح.

فقد وجد [6] أن زيادة قساوة السطح بسبب تشكل الكربيدات تؤدي إلى تحسين مقاومة سطح الفولاذ للخدش والاهتراء الالتصاقي adhesion wear والاهتراء الانزلاقي sliding wear.

إن استخدام كميات زائدة من الفيروكروم لا تؤدي إلى زيادة سماكة الطبقة المتشكلة وإن النسبة الاقتصادية للاستخدام تتراوح بين % (35- 30) [4,6].



الشكل (2) التخطيط البياني لقيم القساوة السطحية

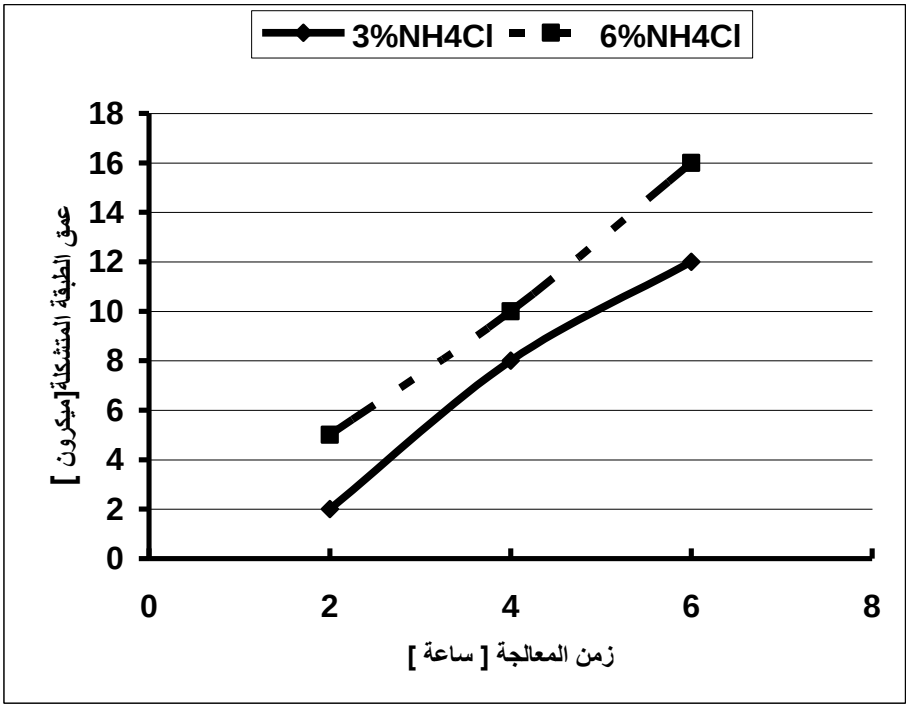


a: البنية المجهرية للفولاذ

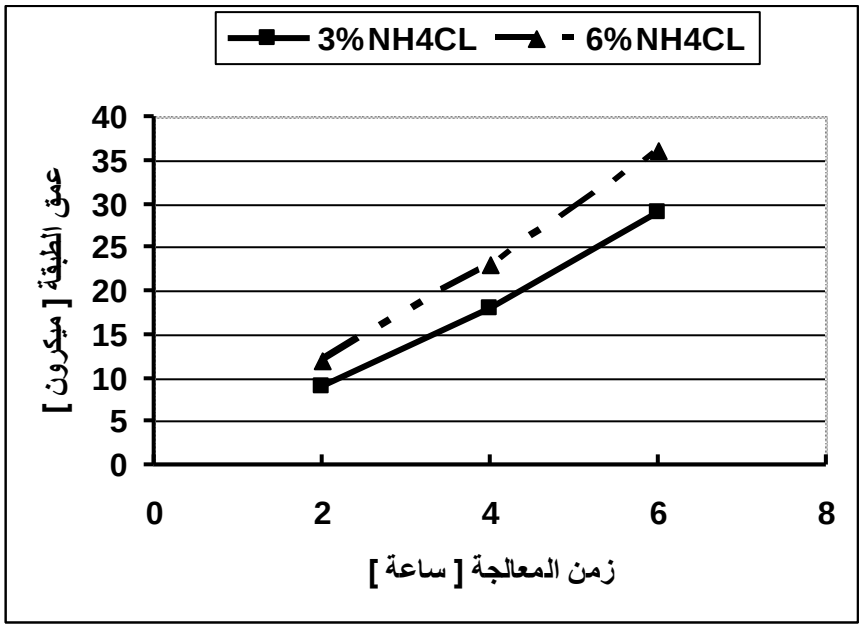
B طبقة الكرمنة على الفولاذ

C: طبقة الكرمنة بعد الكربنة

الشكل (3) يبين الطبقة المتشكلة على سطح الفولاذ عند الدرجة 1000 وزمن 6 ساعة



الشكل (4) العلاقة بين عمق الطبقة المتشكلة وزمن المعالجة للعينات A



الشكل (5) العلاقة بين عمق الطبقة المتشكلة وزمن المعالجة للعينات B

2. اختبار الشد:

يبين الجدول (6) الخواص الميكانيكية للفولاذ المستخدم:

الجدول(6) الخواص الميكانيكية للفولاذ المستخدم

متانة الشد kg/mm^2	متانة الخضوع kg/mm^2	الاستطالة %
67	45	18.2

يبين الجدول(7) الخواص الميكانيكية للفولاذ المستخدم بعد إجراء عملية الكرمنة لمدة 6 ساعات

الجدول(7) الخواص الميكانيكية للفولاذ المستخدم بعد إجراء عملية الكرمنة لمدة 6 ساعات

العينات		نسبة الكربون%	متانة الشد kg/mm^2	متانة الخضوع kg/mm^2	الاستطالة %
A	I	0.15	68.11	45	18.1
	II	0.15	69.29	45.1	18.1
B	I	0.92	75.26	46.17	17.52
	II	0.92	75.45	46.17	17.5

نلاحظ أن الخواص الميكانيكية بالنسبة للعينات A لم تتغيّر عند النسب المستخدمة لـ NH_4Cl .

أما بالنسبة للعينات B المكربنة مسبقا فنلاحظ ازدياد متانة الشد بنسبة 12% وازدياد متانة الخضوع بنسبة 1% وتناقص قيم الاستطالة النسبية بنسبة 2%.

إن ازدياد نسبة الكربون على السطح بعد عملية الكربنة أدت إلى زيادة عمق الطبقة المتشكلة والى تحسين الخواص الميكانيكية

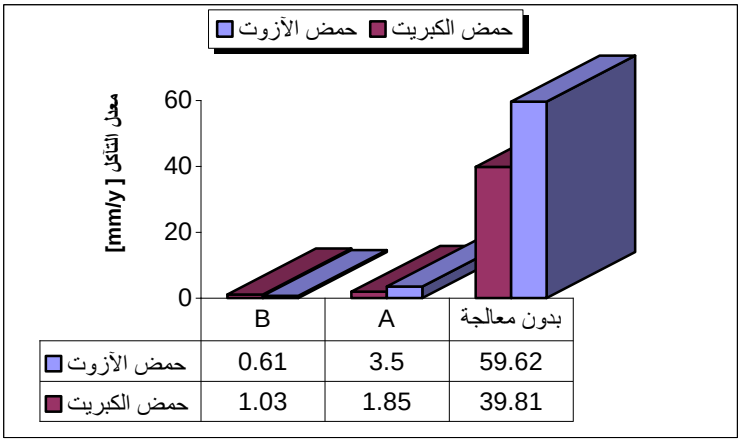
3. اختبار التآكل:

بعد وضع العينات المعالجة وغير المعالجة في حمضي الآزوت والكبريت (2N) لمدة 24 ساعة تم حساب معدل التآكل للعينات المعالجة عند الدرجة 1000 وزمن 6 ساعات (II) ويبين الجدول (8) معدل التآكل للعينات في حمضي الآزوت والكبريت.

الجدول (8) يوضح معدل التآكل للعينات بحمضي الآزوت والكبريت

الحمض	نوع المعالجة	الفرق بالوزن mmg	مساحة السطح المعرض cm^2	معدل التآكل mm/y
حمض الآزوت HNO_3	بدون معالجة	289	2.251	59.62
	A	17	2.251	3.5
	B	3	2.251	0.61
حمض الكبريت H_2SO_4	بدون معالجة	193	2.251	39.81
	A	9	2.251	1.85
	B	5	2.251	1.03

A:عينات مكرمنة ، B: عينات مكرمنة بعد الكربنة



	B	A	بدون معالجة
حمض الآزوت	0.61	3.5	59.62
حمض الكبريت	1.03	1.85	39.81

الشكل (6) يوضح معدل التآكل للعينات المعالجة عند الدرجة 1000وزمن 6 ساعات

من الجدول (8) والشكل البياني (6) نلاحظ الانخفاض الكبير في معدل التآكل للعينات المعالجة في وسطي حمضي الآزوت والكبريت.

الاستنتاجات والتوصيات:

1. إن زيادة زمن المعالجة ونسبة NH_4Cl في خليط الكرمنة يؤدي إلى ازدياد عمق الطبقة المتشكلة على سطح الفولاذ.
2. إن زيادة نسبة الكربون على سطح الفولاذ تؤدي إلى ازدياد عمق الطبقة المتشكلة.
3. إن الكرمنة للفولاذ المنخفض الكربون لم تؤدِّ إلى تحسين الخواص الميكانيكية، بل أدت لازدياد قيم القساوة السطحية بمقدار 4 أضعاف، وهذا الازدياد بقساوة السطح يؤدي إلى ازدياد مقاومة الفولاذ للاهتراء وأدت لانخفاض معدل التآكل في حمضي الآزوت والكبريت.
4. إن المعالجة المزدوجة (كربنة +كرمنة) تؤدي إلى ازدياد متانة الشد بنسبة 12% وإلى ازدياد القساوة بمقدار 7 أضعاف وهذا الارتفاع الكبير بمقدار القساوة يؤدي إلى الحصول على سطح ذي مقاومة جيدة للاهتراء، وأدت لانخفاض معدل التآكل في حمضي الآزوت والكبريت بشكل كبير.
5. نقترح نقل النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة إلى الواقع العملي، بالتعاون مع جامعات القطر ومراكز الأبحاث وشركات القطاع العام والخاص.
6. إجراء مزيد من الدراسات والأبحاث في هذا المجال على بعض أنواع المعادن كالفولاذ عديم الصدأ بأنواعه.

المراجع:

1- ARAI, T. *Thermoreactive deposition/diffusion process*. *Metals Handbook*, 10th edition, vol.4, ASM, USA, 1991, 448-453.

2- CASTLE, A.R, GABE D.R, *Chromium Diffusion Coatings*, International Material Review, 1999, 37-58.

3- JONGBLOED R.C, *Chromizing*, Materials Science Forum, 1994, 163-165.

4- JYH,W.L, JENQ,G.D, *Evaluation of microstructures and mechanical properties of chromized steels with different carbon contents*. Surface and Coatings Technology,2004, 525–531.

5- JYH,W.L, HIS,C.W, JAI,L.L, CHAO,C.L.*Tribological properties evaluation of AISI 1095 steel chromized at different temperatures*, Surface & Coatings Technology ,2004, 550– 555.

6- CHEN,Y. W, *Wear Resistance Improvement of AISI D2 Tool Steel by Post Treatment of Plasma Nitriding on Chromium Carbide Coating Prepared by TRD*, Tatung University,China,2004,107.

7-FAN,S.C, PEE,Y.L, MING,C.Y, *Thermal reactive deposition coating of chromium carbide on die steel in a fluidized bed furnace*, Material Chemistry Physics, vol.53, 1998, 19-27.

8- غالب، أحمد. *علم المواد المستخدمة في بناء السفن*،منشورات جامعة تشرين، 2004 ،434.

9- هترة، علي. *المعالجات الحرارية للمعادن*، منشورات جامعة تشرين، 2000،331.