تأثير الطلاء الانتشاري بالكروم
في الفولاذ المنتج من مواد المساحيق

الدكتور المهندس عبد الله يوسف مجيد*

الملخص

تعدُّ المعالجة الكيميا -حرارية بالكروم على سطح الفولاذ المنتج من مساحيق المواد إحدى الطرائق الحديثة للمعالجة السطحية المستخدمة في تحسين الخواص الميكانيكية و الترايبولوجية لعناصر الآلات المعرضة للتآكل و الاهتراء. وتتحقق عملية المعالجة في وسط من كلوريد الكروم المتشكل عند ارتفاع درجات الحرارة.

درست سماكة طبقة الانتشار، التركيب الطوري والبنيوي و المسامية عبر عمق منطقة الانتشار، وقد أظهرت التجارب تأثير عملية الكرمنة في أثناء المعالجة والعوامل المختلفة مثل الزمن والمسامية ودرجة الحرارة في نمو الطبقة الانتشارية على سطح الفولاذ قليل وعالي الكربون.

تبين نتائج البحث أن طريقة المعالجة الانتشارية بالكروم لها تأثير كبير ومهم في قدرة عمل عناصر الآلات المعرضة للاحتكاك الجاف، إذْ يزداد العمر الزمني للفولاذ المنتج من المساحيق والمعالج بالكرمنة نحو (3.5 2.5 –) مرة نتيجة لاستقرار طبقة الاحتكاك وتشكيل بنية ثانوية تعمل كمادة تزييت لزوج الاحتكاك، في حين تزداد مقاومة التآكل في أوساط كيميائية مختلفة لنحو (10 - 20) مرة مقارنة بتلك المواد الملبدة حرارياً فقط.

تشير نتائج البحث إلى الإمكانية التكنولوجية لدمج عملية التلبيد الحراري مع عملية الكرومة لتقليل التكلفة وتحسين الخواص الترايبولوجية ومقاومة التآكل لفولاذ المساحيق، وإمكانية استبدال الأجزاء الفولاذية المصنعة بالطرائق التقليدية بأجزاء أخرى مصنعة من مواد المساحيق.

الكلمات المفتاحية:

فولاذ مساحيق، تلبيد، مسامية، كرمنه انتشارية، طبقات طلاء، قساوة مجهرية، بنية، مقاومة تآكل واهتراء، خواص ميكانيكية وترايبولوجية.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة التصميم الميكانيكي ــ كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

1 - المقدمة

تعدُّ عملية المعالجة الكيميا-حرارية Thermo-chemical treatment لمواد المساحيق Powder Materials واحدة" من أكثر الطرائق فعالية" في زيادة عمرها الزمني عند ظروف الاستثمار المختلفة ورفع الجدوى الاقتصادية وزيادة موثوقية Reliability عناصر الآلات والميكانزمات ومن طبيعة المعالجة الكيميا-حرارية تغيّر التركيب الكيميائي والبنية وخواص الطبقات السطحية للمعدن ولاسيَّما تلك الطبقات السطحية العاملة ذات التركيز العالي في الإجهادات مما تؤدي إلى ظهور التشققات وانتشارها وخاصة في أثناء التآكل الكيميائي والاهتراء [1,2]. تعدُّ هذه المعالجة وخاصة عملية الكرمنة Chromizing أي الطلاء الانتشاري Diffusion coating بالكروم ذات أهمية كبيرة لسماحها بدمج عملية التلبيد الحراري Sintering مع عملية المعالجة الكيميا - حرارية Chemical heat treatment للمساحيق المعدنية المتراصة ذات الأساس الحديدي في عملية واحدة، مقتصرين بذلك الزمن والتكلفة، وتكون هذه المنتجات صالحة للاستثمار دون الحاجة لعملية تشغيل أو إنهاء إضافية. كما أنه بغض النظر عن هذه الفكرة المعبر عنها سابقاً [3,4]، إلا أنه فعلياً تحقيق دمج عملية التلبيد الحراري مع عملية الكرمنة إلى حد ما قد يكون نادراً، وذلك لعدم وضوح العلاقات التطبيقية لبعض التساؤلات المهمة:

أولاً - من الضروري معرفة هل تحقق المستوى المطلوب من الخواص الفيزيائية والميكانيكية Physical and Mechanical Properties لهذه المواد بعد عملية المعالجة الكيميا -حرارية .

ثانياً - من الضروري توضيح كيفية تغيّر أبعاد المنتجات المعالجة بهذه الطريقة، وإمكانية تأمين الدقة المطلوبة لها. وفي الواقع إنَّ عملية التلبيد الحراري Sintering تترافق بانكماش في الأبعاد الطولية، في حين تؤدي عملية المعالجة الكيميا - حرارية إلى زيادة هذه الأبعاد وبشكل غير كبير. تلك اللحظة أي التوافق بين زيادة الأبعاد من جهة ونقصانها من جهة أخرى ذات أهمية كبيرة، لأن زيادة أبعاد المنتج بعد عملية المعالجة الكيميا - حرارية على حساب دقة ودرجة التفاوت يكون في منتهى الصعوبة أو غير ممكنٍ ما دامت الطبقات الانتشارية في أغلب الحالات تؤدي إلى زيادة القساوة السطحية، ويمكن أن تؤذي السطح العامل لقالب التشكيل أحياناً.

وفي النهاية من الضروري تحديد أي نظام تكنولوجي Technological regime لعملية المعالجة الكيميا - حرارية الذي يمكن استعماله، وخاصة أوساط التشريب أو الانتشار، التي تسمح باستعمال الأفران الحرارية. وفي بحثنا هذا يطرح نفسه وسط التشريب (الإشباع) الصلب Saturation Medium أو المسحوقي، الذي استخدمناه في تجاربنا العلمية، وذلك نظراً إلى بساطته وشموليته في الاستخدام على نطاق واسع في المصانع والورش التي تعتمد نظام المعالجات الحرارية والسطحية.

إن أوساط التشريب هذه تسمح بإشباع سطوح القطع أو المدمجات، أي تسمح بعملية انتشار عنصر الإشباع إلى داخل سطح المدمّج عند نظام درجات الحرارة Temperature وزمن الصمود الحراري مما يؤدي إلى السماح بتأمين عمليتي المعالجة السطحية بالكروم والتلبيد الحراري معاً.

إن حل مثل هذه التساؤلات المشار إليها أعلاه هو الهدف Purpose من بحثنا هذا، والتي تتطلب بحوثاً تجريبيةPractical Research كثيرة لتوفير المعطيات التي تسمح باختيار النظام المثالي

Optimal system لدمج عملية التلبيد الحراري مع عملية الكرمنة وذلك حسب أنواع المواد المعرضة للمعالجة، وحسب أبعاد المدمّجات المختلفة وحجمها وإمكانية أتمتة العملية Automation عند الإنتاج الكمي Quantitative production. كما أن المعالجة الانتشارية بالكروم Chromizing تعدُّ واحدة من طرائق المعالجة الكيميا - حرارية المستخدمة في زيادة العمر الزمني لعناصر الآلات Machine elements حيث تؤمن طبقة الطلاء الانتشاري بالكروم القساوة الميكروية السطحية العالية Michrohardness، والمقاومة العالية ضد التآكل الكيميائي Corrosion resistance والأكسدة في درجات الحرارة المرتفعة Oxidation والمقاومة الجيدة للاهتراء Wear resistance [5,6]. لذلك سوف نقوم بتسليط الضوء على هذه الطريقة للمعالجة السطحية والتي تعدُّ واحدة من طرائق المعالجة السطحية الحديثة.

2 - الطرائق والمواد:

قمنا في هذا البحث باستخدام نوعين من الفولاذ الإنشائي المصنع بطريقة ميتالورجيا المساحيق، أحدهما فولاذ متوسط الكربون والآخر فولاذ مرتفع الكربون، بحيث يكون التركيب الكيميائي chemical composition لهذين المعدنين حسب الجدول رقم (1):

جدول رقم (1) التركيب الكيميائي لفولاذ المساحيق

نوع الفولاذ	النسبة الوزنية، wt%				
	Fe	C	Mn	Si	P <
Powder medium carbon steel	bal	0.3- 0.5	0.5	0.3	0.03
Powder high carbon steel	bal	0.9- 1.1	0.7	0.5	0.05

وقد تم ضغط Compaction العينات على البارد بواسطة المكبس الهيدروليكي بضغط نوعي يتراوح بين (300, 500 and 700 MPa) لتأمين مسامية porosity وسطية على التوالي تتراوح بين (20-22% , 12-14% and 8-10%) كما استخدم الفولاذ st.1040 المنتج بالطرائق التقليدية وذلك لمقارنة النتائج. ولإجراء اختبارات القساوة الميكروية السطحية والتآكل الكيميائي والاهتراء الميكانيكي استخدمنا عينات أسطوانية الشكل ذات قطر 15mm وارتفاع 10mm، وعينات عيارية لإجراء اختبار الشد واختبار الانحناء. استخدم لعملية التلبيد الحراري فرن كهربائي Furnace ذو وسط محمي من الهواء الخارجي باستخدام غاز الهيدروجين عند درجة حرارة (1140 ± 20 °C) مدة ساعتين [7] وذلك حسب النظام المعياري لعملية التلبيد الحراري بعد عملية التدميج بالكبس على البارد مباشرة" Green compacting. وأجريت عملية المعالجة الكيميا - حرارية بالكروم (الكرمنة) في فرن كهربائي عادي، إذْ تراوحت درجة حرارة التجربة بين (1000 – 1150 °C) وتراوح زمن الثبات الحراري بين (2 – 6 h) وكان وسط الإشباع الانتشاري خليطاً مؤلفاً من مساحيق الفرو كروم وأكسيد الألمنيوم ومواد منشطة، ووضعت العينات مع وسط الإشباع في حاويات محكمة الإغلاق بواسطة طبقة عازلة منصهرة مثل السيليكات [8].

درست القساوة الميكروية Microhardness بواسطة المجهر الضوئي نوع Galileo Durametria والمزود بجهاز لقياس القساوة الميكروية بطريقة فيكرز عند حمولة وقدرها 0.49 N وتكبير X400. وأجري اختبار الشد Tensile test واختبار الانحناء Bending test على آلة الاختبارات العامة Instron.

اختبرت الخواص التريبولوجية Tribological Properties على آلة الاحتكاك عند سرعة انزلاق ثابت (v = 1m/sec) وضغط نوعي 1) (MPa، بحيث يكون الجسم الثابت هو العينات المعرضة لعملية الطلاء الانتشاري بالكروم، أمَّا

الجسم الدوّار فهو عبارة عن قرص من الفولاذ السبائكي المقسّى، الذي تصل قساوته إلى 60 HRC – 58، وكانت شروط التجربة هي اهتراء جاف أي إنَّ (الوسط - هواء)، بحيث تم قياس قطر فتحة الاهتراء بواسطة ميكرومتر رقمي. كما درست مقاومة التآكل الكيميائي Corrosion resistance باستخدام أوساط أكالة مشابهة للظروف الطبيعية والصناعية مثل ماء البحر Sea water ومحلول حمض الكبريت الممدد بالماء بنسبة 10% H_2SO_4 و شروط التجربة هي درجة حرارة الغرفة (25 °C) والضغط الجوي (1atm) أمَّا زمن التجربة فيتراوح بين 24 (120 h – وقد تم قياس شدة التآكل بالطريقة الوزنية، بحيث وزنت العينة قبل التجربة و بعد التجربة ثم قسّم فارق الوزنين على السطح الكلي للعينة.

3 - النتائج والمناقشة:

أجريت عملية الكرمنة عند درجات حرارة تراوحت بين 1000-1150°C وزمن ثبات حراري يتراوح بين 6 h – 2، إذْ تزداد سماكة الطبقة الانتشارية بزيادة درجة الحرارة و الزمن، أمَّا عملية الانتشار فتتم بتحويل الكروم الصلب إلى كروم ذري [Cr] حر يتشكل عند درجات الحرارة العالية وفق التفاعلات الكيميائية الآتية [1,5,8]:

$$NH_4Cl \rightarrow NH_3 + HCl \quad (1)$$

$$(Fe,Cr) + 4HCl \rightarrow FeCl_2 + CrCl_2 + 2H_2 \quad (2)$$

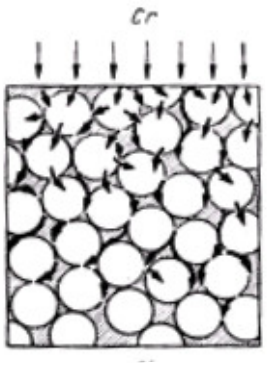
$$CrCl_2 + Fe_{(Specimen)} \rightarrow [Cr]_{atom} + FeCl_2 \quad (3)$$

$$2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2 \quad (4)$$

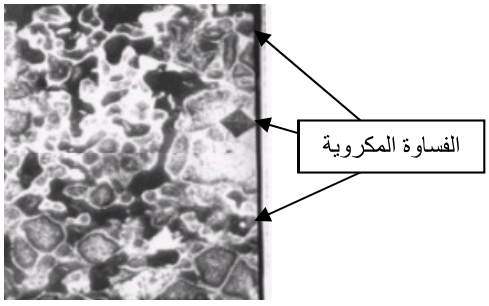
ويمكن اختزال الهيدروجين وفق التفاعل الآتي:

$$CrCl_2 + H_2 \rightarrow [Cr]_{atom} + 2HCl \quad \text{(Reduction reaction)} \quad (5)$$

يبدأ التفاعل (1) و (4) في أثناء عملية تسخين خليط الإشباع عند درجة حرارة $T_{work} > 400°C$ أمَّا بقية التفاعلات فتحدث عند درجة حرارة $T > 700°C$ وبالنتيجة يتشكل كلوريد الكروم وغاز النشادر والهيدروجين الذي يحترق داخل حجرة الفرن أمَّا الكروم الذري $[Cr]_{atom}$ فإنه ينتشر ويتغلغل إلى داخل العينة عبر السطح Surface diffusion وعبر الحجم Bulk diffusion كما هو مبين في الشكل (1a&b). ويلاحظ من الشكل (1,a) رسم توضيحي لعملية انتشار الكروم في الجسم المسحوقي، إذْ يبيّن الشكل أن الانتشار عبر السطح وعبر الحجم يكون أسهل وسماكة الطبقة المكرومة تكون أكبر لوجود المسامات (الفراغات) بين الجزيئات مما هو عليه عند الفولاذ التقليدي، أمَّا الشكل (1,b) فيظهر البنية المجهرية لطبقة الطلاء مع عملية تغلغل وانتشار الكروم وقياس القساوة الميكروية.



(1,a)



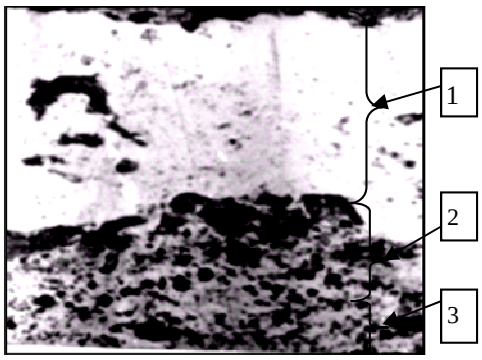
(1,b)

الشكل (1a&b) رسم تخطيطي لعملية انتشار الكروم في الفولاذ المنتج من المساحيق (1,a) والبنية الميكروية (1,b) مع قياس القساوة الميكروية X400

ويسمى هذا التفاعل بالتفاعل التبادلي (الإحلالي) Substitutional reaction أي تحل ذرة الكروم

محل ذرة الحديد، ومن ثم ينتشر الكروم على شكل محلول صلب للكروم في الهيكل الشبكي للحديد α-Fe، ويعدُّ الكروم شرهاً للكربون الموجود في الحديد ولاسيَّما عند الفولاذ الكربوني لأن زيادة نسبة الكربون في الفولاذ تؤدي إلى تشكيل كربيدات الكروم والحديد من نوع $(Cr,Fe)_6C_{23}$ و$(Cr,Fe)_3C_7$ التي تتوضع على حدود الحبيبات، كما أن وجود النيتروجين قد يؤدي إلى الانتشار داخل الحديد مشكلاً كربونتريد الحديد والكروم Carbonitrides $(Cr,Fe)_2(C,N)$ [9]. أمَّا في حال عملية الطلاء الانتشاري بالكروم للفولاذ قليل ومتوسط الكربون، فإن الطبقة السطحية تحتوي على محلول صلب للكروم في الهيكل الشبكي للحديد α-Fe ولا وجود لكربيدات الكروم، و تكون سرعة انتشار الكروم في الفولاذ العالي الكربون أقل بكثير من سرعة انتشاره في الفولاذ قليل الكربون، لذلك تتناقص سرعة انتشار الكروم مع ازدياد محتوى الكربون في الفولاذ كما هو موضح في الشكل (2a&b). وتزداد سماكة الطبقة الانتشارية بالكروم بارتفاع درجة الحرارة وزيادة الزمن، والتي تحدد بواسطة المجهر الضوئي إذْ تتصف علاقة درجة الحرارة بسماكة طبقة الانتشار بصفة الدالة الأسية Exponential Function، أمَّا علاقة الزمن بسماكة الطبقة الانتشارية فتحمل صفة دالة القطع المكافئ Parabola Function كما في الشكل(3a&b) وهذا ما يجيب عن التصور العام المتعارف عليه لحركة الانتشار الإشباعي في المواد المعدنية.

PM/ high carbon steel (2,a)



(2,b) PM/ medium carbon steel

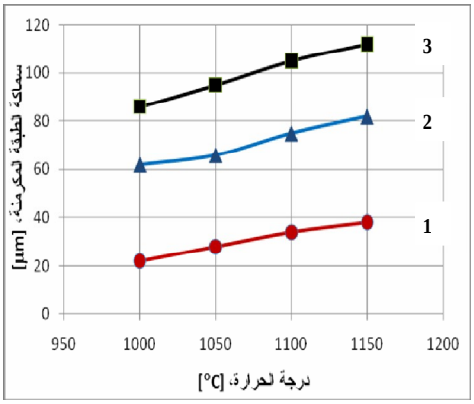
الشكل (2a&b) البنية الميكروية X400 لطبقة الانتشار بالكروم للفولاذ المنتج من المساحيق (T=1050°C, 4h)

1 - سماكة طبقة الانتشار بالكروم، 2 - المنطقة البينية الفريتية، 3 - المنطقة الداخلية (اللب)

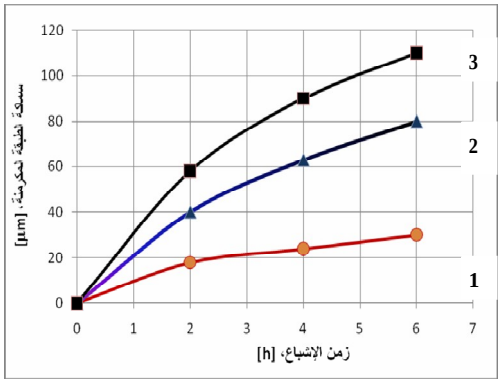
وقد تبين لنا في هذا البحث أن سماكة طبقة الانتشار بالكروم أكبر بنحو 30% في النماذج المحضرة بالضغط Compaction والخضراء Green Compact، أي التي لم تتعرض لعملية تلبيد حراري مسبق Sintering ثم تعرضت لعملية الكرمنة Chromizing مباشرة (دمج عمليتي المعالجة بعملية واحدة)، من سماكة الطبقة الانتشارية بالكروم عند النماذج المعرضة لعمليتي معالجة على التوالي: التلبيد الحراري من جهة وفق النظام المعياري (T=1140 ±20°C, τ=2h) ثم أتبعت بعملية الكرمنة من جهة أخرى.

يبيّن الشكل (3, a) علاقة تغير الزمن بسماكة الطبقة السطحية المشبعة بالكروم عند درجة حرارة ثابتة أي T =const، حيث أظهرت النتائج ازدياد سماكة طبقة الإشباع بالكروم مع زيادة الزمن، أمَّا الشكل (3, b) فيبيّن علاقة تغير درجة الحرارة بسماكة طبقة الانتشار بالكروم وذلك عند زمن ثابت τ = const. إن تأثير الحرارة وزمن التشريب saturation في سماكة الطبقة السطحية المشبعة بالكروم يتعلق بشكل مباشر بالتركيب الكيميائي للسبيكة، فكلما ازداد محتوى الكربون

C% نقصت سماكة الطبقة المشبعة بالكروم، وذلك بسبب تشكيل كربيدات الكروم والحديد، مما يؤدي إلى تراص طبقة الانتشار و تسوية الطبقة السطحية فتصبح أكثر نعومة.



الشكل (3,a)



الشكل (3,b)

الشكل (3a&b) تأثير زمن الكرمنة ودرجة الحرارة على سماكة طبقة الانتشار

a) عند ثبات درجة الحرارة T=const = 1100°C

b) عند ثبات الزمن τ = const = 4 h

1- traditional st.1040 (◊), 2- PM/ High carb. Steel (Δ), 3- PM/ medium carb. Steel (□)

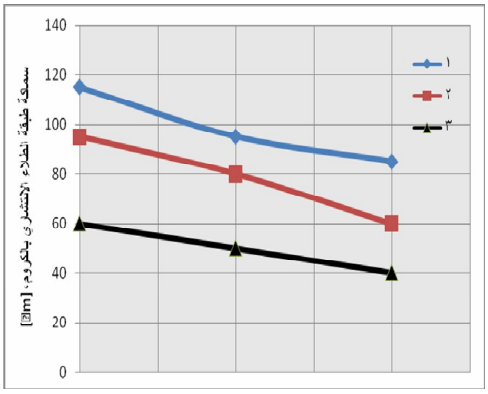
كما تزداد القساوة السطحية المجهرية لتصل إلى 13000 -15000 MPa عند الفولاذ العالي الكربون وتتناقص القساوة السطحية هذه عبر العمق لانخفاض نسبة الكربون في المنطقة الانتقالية أمّا عند الفولاذ المتوسط الكربون فإن سماكة الطبقة السطحية C= (0.3 – 0.5)% تزداد بسبب زيادة سرعة انتشار الكروم على شكل محلول جامد للكروم في الهيكل الشبكي للحديد α-Fe وتصل القساوة السطحية للطبقة المكرمنة هنا إلى 8000 – 10000 MPa. ويمكن ملاحظة أن انتشار الكروم يكون سريعاًبين حبيبات العينة المشكلة بطريقة ميتالورجيا المساحيق وعبر سطح الحبيبة وذلك بسبب وجود الفراغات الكثيرة (المسامات) بين الحبيبات مقارنة بالفولاذ المصنع بالطرائق التقليدية الذي يكون مصمتاً أي دون مسامات أي إنّه كلما كانت الكثافة النسبية أكبر (المسامية أقل) كانت سماكة الطبقة المشبعة بالكروم أقل كما هو موضح في الشكل(4).

تتشكل عند عملية المعالجة بالكروم Chromizing للمواد الحديدية الكربونية ثلاث مناطق:

1 - المنطقة الأولى: وهي طبقة الكربيدات $(Cr,Fe)_6C_{23}$ و $(Cr,Fe)_3C_7$ التي تتشكل على السطح المعالج مباشرة.

2 - المنطقة الثانية: وهي المنطقة الانتقالية Interface zone تكون فقيرة بعنصر الكربون C، والتي هي عبارة عن منطقة فريتية Ferrite ذات سماكة أكبر بنحو مرتين إلى ثلاث مرات من سماكة الطبقة السطحية Surface layer وهي عبارة عن محلول الكروم الصلب Solid solution في الهياكل الشبكية للحديد α.

3 - المنطقة الثالثة: وهي المنطقة الداخلية وتسمى بمنطقة الأرضية Matrix ذات البنية الفريتية - البرليتية كما هو مبيّن في الشكل (2a&b).



(20 - 22)% (12 - 14)% (8 - 10)%

الشكل (4) علاقة سماكة الطبقة المكرمنة بالمسامية و بدرجة الحرارة عندما $\tau = 6\ h$

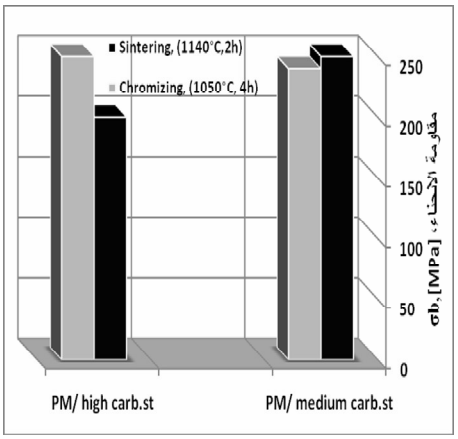
(Δ) 1000°C - 3 (□) 1050°C - 2 (◊) 1100°C - 1

تشير نتائج البحث إلى أن التغير في الأبعاد الهندسية، مثل الارتفاع والقطر للنماذج المختبرة تتعلق بالمسامية Porosity وبنظام المعالجة الكيميا-حرارية بالكروم Chromizing. إن هذه التغيرات في الأبعاد لا تحمل دائماً خواصاً متشابهة لأن عملية التلبيد الحراري وعملية الإشباع الانتشاري تؤثر في تغير الأبعاد في اتجاهات مختلفة، ومن الصعب سابقاً التنبؤ بالتأثيرات كلّها، وتشير دلائل قياس الأبعاد إلى تغير في الارتفاع باتجاه الزيادة أو النقصان بسبب الانكماش الحاصل بينما يزداد القطر بسبب زيادة سماكة الطبقة السطحية المكرمنة، ويكون المعدل النسبي في الزيادة أو النقصان للأبعاد بحدود ±(2 – 3)% لجميع المواد المعالجة بالكرمنة. حيث يتناسب هذا التغير والتفاوت المسموح به Tolerance مع المرتبة الثانية أو الثالثة من دون أي عملية تشغيل إضافية مثل الجلخ أو الصقل ...الخ، كما نلاحظ تناقصاً في المسامية أي زيادة في الكثافة النسبية كما هو مبين في الجدول (2) بسبب تشكل الرقاب Necks بين الحبيبات عند نقاط التلامس، وهذه الرقاب تأخذ في الكبر بصورة متزايدة. ونتيجة لذلك فإن الزوايا الحادة بين الحبيبات تأخذ في الاستدارة وفي النهاية فإن الفراغات البينية تصبح على هيئة مسام كروية.

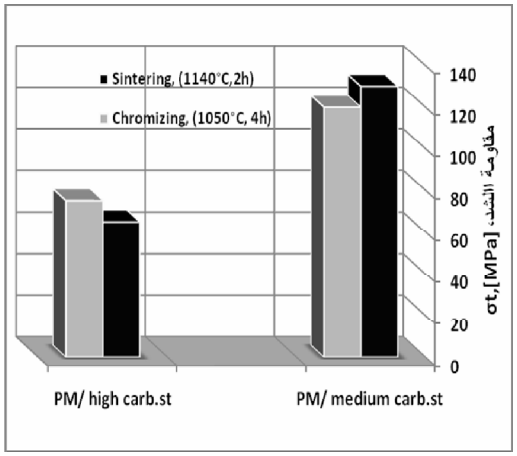
جدول (2) علاقة تغير الأبعاد والكثافة النسبية بعملية الكرمنة عند $T = 1050°C$

No	القطر، mm	الكثافة النسبية	زمن المعالجة، h	القطر، mm	الكثافة النسبية	المسامية، %
1	12.05	0.795	2	12.06	0.796	20- 22
2	12.04	0.785	4	12.07	0.799	
3	12.05	0.795	6	12.14	0.797	
4	12.06	0.876	2	12.06	0.879	12 - 14
5	12.05	0.877	4	12.11	0.881	
6	12.05	0.867	6	12.02	0.879	
7	12.05	0.901	2	12.07	0.911	8 - 10
8	12.05	0.904	4	12.07	0.905	
9	12.06	0.920	6	12.05	0.921	

أمَّا الشكل (5a&b) فيظهر الخواص الميكانيكية للفولاذ متوسط وعالي الكربون، حيث يبيّن الشكل(5,a) علاقة مقاومة الانحناء Bending strength أمَّا الشكل (5,b) فيبيّن علاقة مقاومة الشد Tensile strength للعينات الملبدة حرارياً Sintering وفق النظام المعياري (1140°C, 2h) لعملية تلبيد الخلائط الحديدية في وسط محمي من الهيدروجين، وكذلك لعينات معالجة بالكرمنة Chromizing عند نظام معالجة (1050°C, 4h) بعد عملية تدميجها على البارد مباشرة أي تم دمج عمليتي المعالجة (تلبيد + كرمنة) في عملية واحدة بحيث كانت المسامية (P = 12-14%) وقد لوحظ من الشكل أن مقاومة الشد ومقاومة الانحناء واحدة تقريباً لكلا نظامي المعالجة.



الشكل (5,a) مقاومة الانحناء



الشكل (5,b) مقاومة الشد

الشكل (5 a&b) الخواص الميكانيكية للفولاذ متوسط وعالي الكربون

- الملبد حرارياً(Sintering,(1140°C, 2h قاتم اللون

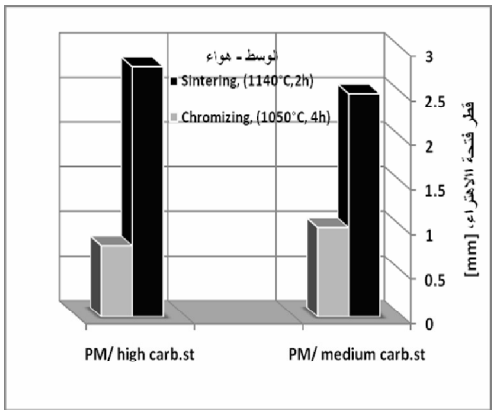
- المعالج بالكرمنة ,Chromizing عند نظام (1050°C,4h) فاتح اللون.

تتعلق مقاومة التآكل الاحتكاكي wear resistance للطبقة السطحية المكرمنة بشكل أساسي بعوامل الاحتكاك المؤثرة في أجزاء الآلات التي تعمل عند الاحتكاك الحتي أو ما يسمى بالاهتراء الحتي abrasive wear، ومن المعروف أن الاهتراء الحتي يؤدي بشكل عام إلى انهيار أجزاء الآلات ذات المراكز الاحتكاكية wear centered وفشلها، لذلك كانت زيادة القساوة السطحية microhardness واحدة من العوامل الأساسية التي تزيد من مقاومة الاهتراء، حيث تصل القساوة السطحية لطبقة الطلاء الكرومي إلى 13000 - 15000 MPa وهي ذات لدونة جيدة plasticity وتماسك كبير مع مادة الأساس Matrix مما تسمح بتأمين مقاومة اهتراء عالية wear resistance. وتؤثر بنية المادة تأثيراً كبيراً في مقاومة الاهتراء للمواد المختلفة، غير أن تأثيرها يكون أقل من تأثير القساوة السطحية [10, 11,12]. وقد أثبت الباحث [13] أن قساوة المادة تتعلق بطاقة الارتباط في البنية البلورية crystalline Structure وتؤثر -إلى حد كبير- في مقاومة الاهتراء الحتي وذلك بشرط أن قساوة المادة الحاكة abrasive material أعلى بكثير من قساوة المادة المتآكلة.

و بالنتيجة تنشأ نواتج البنية الثانوية Secondary Product بشكل سريع، وهي ناتجة عن الاحتكاك بشكل مباشر وعن النشاط الانتشاري ولاسيَّما الذي يظهر في المواد المتباينة الخواص Heterogeneous materials، مما يؤدي إلى تشكيل قفزات موضعية في تغير الطاقة الحرة السطحية.

يظهر الشكل (6) نتائج التجارب الحاصلة على مقاومة الاهتراء الجاف wear للعينات specimens المعرضة لعملية التلبيد الحراري وفق النظام المعياري، ولعينات أخرى معالجة بالكرمنة مباشرة بعد عملية التراص على البارد (خضراء Green compact). اختبرت الخواص التريبولوجية للمواد المدروسة على آلة الاهتراء عند سرعة انزلاق ثابتة v=1m/sec وحمولة نوعية P=1 MPa واستخدمت العينات المعالجة بالكرمنة أو بالتلبيد كجسم ثابت في حين القرص الحاك هو من الفولاذ السبائكي المقسى الذي يدور بسرعة منتظمة، ويصل طول طريق الاحتكاك إلى 1 Km. وقد تم قياس قيمة الاهتراء حجمياً

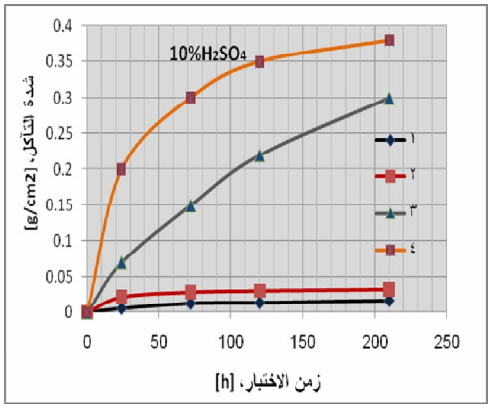
بمساعدة المجهر الضوئي من خلال قياس قطر حفرة التآكل. حيث يدل كبر حفرة التآكل على نقصان مقاومة الاهتراء. وقد أظهرت نتائج البحث أن مقاومة الاهتراء الجاف في جميع شروط المعالجة بالكرمنة تكون أعلى بنحو (2.5– 3.5) مرة من مقاومة الاهتراء للمواد الملبدة حرارياً فقط.



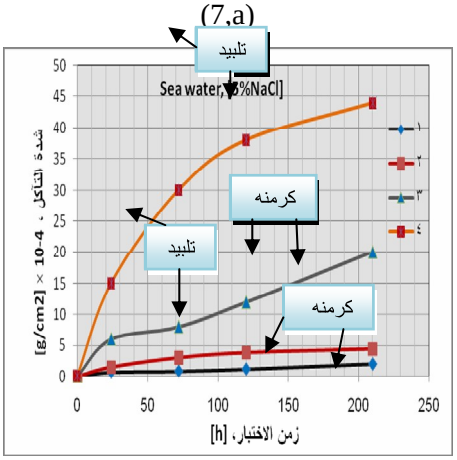
الشكل (6) مقاومة الاهتراء الجاف (الوسط - هواء) للفولاذ متوسط وعالي الكربون (P=12-14%)

- الملبد حرارياً عند (1140°C, 2h) القاتم اللون،
- المعالج بالكرمنة عند(1050°C, 4h) الفاتح اللون.

تتعلق مقاومة التآكل الكيميائي بسماكة الطبقة المكرمنة وبالتركيب الكيميائي والطوري [14,15]، كما تتعلق بمسامية المدمجات وبنظام عملية الإشباع الانتشاري بالكروم. اختبرت مقاومة التآكل الكيميائي Corrosion résistance للعينات الفولاذية المصنعة بأسلوب ميتالورجيا المساحيق specimens المعرضة لعملية التلبيد الحراري وفق النظام المعياري، ولعينات أخرى معالجة بالكرمنة بعد عملية الضغط على البارد (خضراء) مباشرة، حيث حددت شدة التآكل الكيميائي Corrosion intensity بالطريقة الوزنية وذلك بوزن العينات قبل الاختبار وبعده بواسطة ميزان تحليلي بدقة تصل إلى 0,001g، بحيث تغسل العينات بواسطة تيار مائي شديد لإزالة منتجات التآكل الكيميائي عن سطح العينة ثم تُجَفَّفُ بواسطة مجفف هواء. وتحسب شدة التآكل بقياس فارق الوزن قبل الاختبار وبعده، ثم يقسم الناتج على مساحة السطح الكلي. ويبيّن الشكل (7a&b) نتائج الاختبارات الحاصلة، وذلك في أوساط عدائية صناعية منها الأوساط الحمضية مثل حمض الكبريت الممدد بنسبة 10% H_2SO_4 كما هو مبين في الشكل (7,a)، وفي وسط قلوي مثل ماء البحر بتركيز 5% NaCl كما هو مبين في الشكل (7,b). وقد أظهرت نتائج البحث أن مقاومة التآكل الكيميائي للفولاذ في جميع شروط المعالجة بالكرمنة تكون أعلى بنحو (10 - 20) مرة من مقاومة التآكل الكيميائي للعينات المعرضة لعملية التلبيد الحراري فقط.



(7,a)



(7,b)

الشكل (7a&b) شدة التآكل الكيميائي لفولاذ المساحيق (P=12-14%) الملبد حرارياً (1140°C, 2h) وآخر المعالج بالكرمنة (1050°C, 4h) الأوساط : (a - 10% H2SO4 (b - 5%NaCl .

- معالجة بالكرمنة:1 - فولاذ عالي الكربون (◊)
2 - فولاذ متوسط الكربون (□).
- تلبيد الحراري: 3 فولاذ عالي الكربون (Δ)
4 - فولاذ متوسط الكربون (□).

4 الاستنتاجات:

1. إن استخدام عملية الطلاء الانتشاري بالكروم في الفولاذ المنتج من المساحيق يؤدي إلى زيادة القساوة السطحية لطبقة الطلاء إلى نحو 13000 – 15000 MPa.
2. تشير نتائج البحث إلى أن التغير في الأبعاد الهندسية تتعلق بالمسامية Porosity وبنظام المعالجة الكيميا-حرارية بالكروم Chromizing حيث تزداد الأبعاد بحدود 2 % 3– للمواد المعالجة بالكرمنة جميعها وهذا التفاوت المسموح فيه Tolerance يكون من المرتبة الثانية أو الثالثة.
3. تتعلق سماكة الطبقة الانتشارية بالكروم بالمسامية وبدرجة الحرارة وبزمن الإشباع.
4. تؤول علاقة الزمن بسماكة طبقة الانتشار إلى صفة الدالة الأسية، أمَّا علاقة درجة الحرارة بسماكة الطبقة الانتشارية فتحمل صفة دالة القطع المكافئ.
5. تتعلق سماكة الطبقة الانتشارية بالكروم بشكل مباشر بالتركيب الكيميائي للسبيكة، فكلما ازداد محتوى الكربون C% والعناصر السبائكية الأخرى، نقصت سماكة الطبقة المشبعة بالكروم بسبب تشكيل الكربيدات المختلفة.
6. أثبتت نتائج البحث أن مقاومة الشد ومقاومة الانحناء للعينات الملبدة حرارياً وفق النظام المعياري والعينات المعالجة بالكرمنة بعد عملية الضغط على البارد مباشرة هي تقريباً واحدة لكلا نظامي المعالجة.
7. تزداد مقاومة الاهتراء في ظروف الاحتكاك الجاف (الوسط هواء) للمواد المعالجة بالكرمنة بـــ (2.5 – 3.5) مرة مقارنة بالمواد المعرضة لعملية التلبيد فقط.
8. تزداد مقاومة التآكل الكيميائي في أوساط عدائية مختلفة مثل حمض الكبريت الممدد $10\%H_2SO_4$ وماء البحر 5%NaCl للعينات الفولاذية المنتجة من المساحيق والمعرضة لعملية الطلاء الانتشاري بالكروم لنحو (10–20) مرة عن مقاومة التآكل الكيميائي للعينات الملبدة حرارياً وفق النظام المعياري فقط.
9. تشير نتائج البحث إلى إمكانية دمج عملية التلبيد الحراري مع عملية الكرمنة في دورة واحدة.

5 - النتيجة:

يمكن التوصية باستخدام الطلاء الانتشاري بالكروم للفولاذ المنتج من المساحيق كبديل عن الفولاذ المصنع بالطرائق التقليدية المستخدم في عناصر الآلات، لتحسين الخواص الميكانيكية والكيميائية والترايبولوجية المختلفة، كما أنه يعدُّ ذا جدوى اقتصادية كبيرة لسماحه بدمج عملية التلبيد الحراري مع عملية المعالجة الكيميا- حرارية لمدمّجات الفولاذ في عملية واحدة.

المراجع

1. Borisinuk G.F, Vasiliev L.A, Vorshnin L.G. and others, " thermochemical of metals and alloys", pp. 432,- Moscow, (1991). USSR
2. Majeed A.Y., Labunets V.F.," Surface hardening of powder materials". 5th International science and techniques conference AVIA2003, vol.3, pp. 3557- 3560. (2003). Ukraine.
3. " Powder Metal technologies and applications",vol.7 of ASM Handbook, pp. 2762,(1998). USA
4. Suhei Nakahama, Katsuhiro Saitoh and Masamichi Kawasaki," Chromized coating of preventing high – temperature sulfidation corrosion of FCC power recovery turbine" Corrosion 2000, Orlando, (2000). USA
5. Kasprzcka Ewa, Bogdanski Bogdan and others," Chromized layers produced on steel surface by means of CVD", Transactions of materials and heat treatment proceedings of the 14th IFHTSE congress, Vol.25, No.5, (2004). Poland
6. Z.B. Wang, J.Lu, K. Lu, "Chromizing behaviors of a low carbon steel processed by means of surface mechanical attrition treatment". Journal Acta Materialia 53, pp.2081 – 2089. Elsevier science (2005). China 7.Melnik P.I, "Technology of diffusion coating", pp.150.- Kiev, (1978). USSR 8. Udovitski V.I." Porosity of composite coating", pp. 144.- Moscow, (1991). USSR
9. Nikolas Floyd," Performance of chromized and aluminized carbon steel samples in alkaline solution" Virginia polytechnic institute and state university, SURF2007 Fellow, (2007).USA
10. Kasprzcka E., senatorski J. and others," Diffusion layers produced on carbon steel surface by means of vacuum chromizing process". Journal, vol.12,No.6,(2007). Springer New York
11. Ozkan Ozdemir, Saduman Sen and Ugur Sen " Formation of chromium nitride layers on AISI 1010 steel by nitro-chromizing treatment", Esentepe Campus,-Sakarya, (2006) Turkey.
12. R. Chattopadhyay," SURFACE WEAR: Analysis, Treatment and Prevention".- Ohio.ASM International 2001
13. Saduman Sen, Ugur Sen," The effect of boronizing and boro-chromizing on tribological performance of AISI 52100 bearing steels", journal of Industrial Lubrication and Tribology,vol.61, issue 3, pp. 146 – 153, (2009) Emerald Group Publishing Limited.
14. Jyh-Wei Lee, Jenq-Gong Duh and Shu-Yueh Tsai," Corrosion resistance and microstructural evaluation of the chromized coating process in a dual phase Fe---Mn---Al---Cr alloy", Surface and Coatings Technology ,Vol. 153, Issue 1, pp. 59-66, (2002) Taiwan.
15. Vikas R Behrani, "Corrosion Behavior of Aluminized and Chromized Carbon Steel in Fluctuating Oxidizing-Sulfidizing Environments", Georgia Institute of Technology, 2007. NACE International.

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