------مجلة علوم الرافدين، المجلد 24، العدد 1، ص84-97، 2013------

فحص الكلال للصلب الطري المطلي بالنيكل والألمنيوم

مؤيد عبد محمد **نوال ايشوع متي**

قسم الفيزياء

كلية العلوم

جامعة الموصل

Moayadabdallah2004@yahoo.com Nawalbna@yahoo.com

(تاريخ الاستلام 26/ 2011/9 ؛ تاريخ القبول 30/4/ 2012)

الملخص

تم في هذا البحث دراسة مقاومة الكلال لسبيكة الصلب الطـري (Mild Steel) المطليـة بطـلاءات منفردة هما الألمنيوم (بتقنية السمنتة) مع النيكل بطريقة الترسيب الكهربائي إضافة إلى طلاءات مزدوجة هي النيكل والألمنيوم كلاهما معا. تم مقارنة النتائج البحثية بالسبيكة الأساس قبل وبعد معاملتها حراريا بـشروط الزمن ودرجات الحرارة نفسها وذلك لمعرفة مدى تأثير كلٍّ من درجة الحرارة و نوعية الطلاء علـى عمـر الكلال.

أثبتت نتائج البحث العلمي بالاعتماد على نتائج الأشعة السينية، فحص الكلال، الفحـص ألمجهـري، قياس الصلادة بأن درجة الحرارة تلعب الدور الأهم في تناقص عمر الكلال، كما أثبتت النتـائج العمليـة أن لنوع الطلاء تأثيرا" مهما على عمر الكلال حيث الطلاء الذي ينجز في درجات حرارية عالية مثـل الطـلاء بالألمنيوم (الالمنة) له تأثير سلبي على عمر الكلال، في حين إن الطلاء بالترسيب الكهربائي مثـل الطـلاء بالنيكل يكون له تأثير ايجابي إذ يحسن من حالة سطح السبيكة عن طريق ملء الفجوات أو العيوب الأخـرى المتواجدة على السطح. أما الطلاء المزدوج (نيكل-ألمنيوم) فقد اظهر تحسنا" لمقاومة الكلال مقارنة بالألمنيوم المنفرد بسبب اشتراك الحديد-ألمنيوم ونيكل-ألمنيوم في تكوين طبقة الطلاء.

الكلمات الدالة: الترسيب الكهربائي، السمنتة، المنة الصلب الطري، اختبـار الكـلال، التركيـب ألمجهـري للصلب.

Fatigue Test of Coated Mild Steel with Nickel and Aluminum

Moyad A. Mohammad **Nawal E. Matti**
Department of Physics
Collage of Science
University of Mosul

ABSTRACT

In this research, we try to study the fatigue resistance of coated mild steel 1020 AISI. The alloy was coated with Al in single process using pack cementation technique and Ni using electrodeposition technique. Both processes were also used for coating the same alloy (double layer coating). The fatigue resistance of these coating was compared with the base alloy and with those subjected to a heat treatment at the same conditions of time and temperature. The aim of this study was to understand the effect of the temperature and coating type on the fatigue life.

The results obtained, based on XRD, Fatigue test, optical microstructure and hardness measurement, that the temperature of heat treatment played the major rule of fatigue life reduction. This can be attributed to the phase transformation of α- ferrite steel to pearlite (ferrite + cementite).

The results also showed that the coating types have a very important effect on fatigue life. The coatings performed at high temperature (aluminizing) revealed a negative effect on the fatigue life. This is due to the formation of a new brittle and less ductility of Fe-Al phase on the alloy surface. The electrodeposition of Ni leads to a positive effect which is due to an improvement in surface conditions of the alloys via filling the voids or other defects which are present at the surface. The double layer coating (Ni-Al) applied to some specimens shows some improvement in fatigue resistance, in comparison with a single aluminized specimen. This was attributed to the formation of multiphase layer consisting of Fe-Al and Ni-Al intermetallic compound.

Keywords: Electrodeposited, pack cementation, aluminized mild steel, fatigue test, microstructure of steel.

المقدمة

تتعرض الأجزاء الميكانيكية في مختلف الصناعات تحت ظروف قاسية مثل الحمل العالي، السرعة أو درجة الحرارة والبيئة الكيميائية التآكلية. الصلب الطري (Mild Steel) يملك مجموعة مميزة من الخواص الميكانيكية الجيدة والصلادة إلا أن مقاومته للبلى (wear) والتآكل (corrosion) ضعيفة، لذلك تجرى بعض المعالجات السطحية تحت شروط قياسية محددة لغرض تحسين خواصه الميكانيكية المطلوبة باستخدام تقنيات طلاء متعددة مثل الانودة، الترسيب المشترك، الغرس ألايوني، الرش الحراري بالبلازما والترسيب الفيزيائي بالبخار (Prince *et al.*, 2009). أن فهم آلية الفشل المبكر للسبيكة الأساس تناولتها

العديد من البحوث من خلال تأثير الطلاء على عمر الكلال. الباحث (Ramalho *et al.*, 2000) أشار خـلال مقارنة سلوك الكلال للصلب نوع (ENH320 Mild Steel) للعينات المطلية بالزنك وغير المطلية بأن كمية قليلة من الطلاء لا تحدث اختلافا كبيرا في عمر الكلال في حين أن الطلاءات الصادة يمكن أن تغيـر عمـر الكلال بدرجة أعلى أو اقل، حيث أظهرت العينات المطلية بالزنك مقاومة أفضل عند مقارنتهـا مـع غيـر المطلية. كما أوضح الباحث (Saeid *et al.*, 2005) أن مقاومة الكلال لسبيكة (CK45) المخمـدة والمطبعـة بدرجة 550ºC تقل بعملية ترسيب Ni-Cu-P حتى بسمك 7µm بسبب نشوء شقوق الكلال خـلال عمليـة الترسيب وانتشار العناصر باتجاه السبيكة الأساس في حين أظهرت العينات المعالجة سطحيا بطريقة (Shot Peened) مقاومة أفضل عند مقارنتها مع النماذج غير المعالجة.

يمتاز الصلب الطري بمقاومة شد (Tensile Strength) منخفضة نسبياً ولكنه مطاوع كما أن صـلادة هذا المعدن يمكن أن تزداد خلال عملية الكربنة (carburizing) (Gupta, 2009). أن الاختلاف في الخواص الميكانيكية لصلب معين هو نتيجة الاختلاف في التركيب ألمجهري (microstructure) المتكون خلال عملية التبريد وبهذا تعد الخواص الميكانيكية والتركيب ألمجهري مرتبطين بالمعاملة الحرارية للصلب. فمثلا الصلب AISI 1020 وAISI 52100 الذي تركيبه يتكون من الفيرايت والبيرلايت معروف بوصفه صـلباً جيـداً ذا تطبيقات عديدة في المجالات الصناعية (Machado, 2006).

إنّ الفشل الرئيس بمساعدة التآكل في المكائن والمقاطع المتحركة يطلق عليهـا بكـلال التآكـل إذ يتزامن ذلك بفعل الاجهادات الدورية والكيميائية (Alawode *et al.*, 2008). أن الفولاذ الطري المـستخدم في البحث لا يحتوي تركيبه الداخلي على عنصر الكروم والذي يعمل على زيادة معدل التمدد الحـراري (Thermal Expansion rate) للسبيكة وبذلك فإن السبيكة تكون سريعة التأثر بالأكسدة في درجات الحرارة العالية مما يصاحبها حدوث الأكسدة والتآكل وبعض العيوب السطحية (Kwon *et al.*, 2004). تم اسـتخدام تقنية الطلاء الانتشاري (عملية الالمنة) في هذا البحث، وذلك لسهولة أجرائها كما أنها منخفضة الكلفة. وقـد تطورت طريقة الطلاء بالالمنة (السمنتة) بشكل سريع واستخدمت بصورة واسعة في العديد مـن المجـالات نتيجة خواص الطلاء الفائقة، إذ يمكن أن تزداد الصلادة المجهرية وتتغير مع سمك طبقة طلاء لتـصل إلـى 1000HV بسبب انتشار الألمنيـوم وتكـون طبقـات Fe-Al داخـل الـسبيكة (Yajiang *et al.*, 2002 ; Rajendran *et al.*, 2006). كما شهدت السنوات الأخيرة اهتماما في الطلاءات المركبـة بتقنيـة الترسـيب الكهربائي إذ أشار الباحث (Venkatakrishna *et al*, .2008) بأن مقاومة الـصلب الطـري (Mild Steel) للتآكل تحسنت بعد طلائه بسبيكة Zn-Ni وان مكونات خلية الترسيب وعوامل التشغيل تؤثر علـى سـلوك التآكل منها كثافة التيار، درجة حرارة الخلية، حامضية المحلول pH وسـمك الطـلاء. كمـا أن الباحـث (Rahman *et al.*, 2009) استخدم أيضا الطريقة السابقة لطلاء الصلب الطري لدراسة طبوغرافيـة سـطح الصلب المطلي بسبيكة Zn-Ni واستنتج بأن محتوى النيكل في عملية الترسيب يزداد مع زيادة كثافة التيار،

حيث الحبيبات تكون ناعمة ومع زيادة التيار تصبح طبقة النيكل المترسبة خشنة ذات مسامية. كما أن مقاومة التآكل والصلادة المجهرية تزداد مع زيادة نسبة النيكل في عملية الترسيب.

إن عناصر المكائن المعرضة إلى اجهادات متذبذبة متكررة فـوق قـوة تحملهـا وتحـت مقاومـة خضوعها سوف تفشل في النهاية بسبب الكلال. إن الطبيعة المميزة للكلال هي حدوث الفـشل دون أي تحذير بصري حيث الكسر الناتج من الكلال هو إحصائي في طبيعته لا يمكن التوقع بالضبط بتحديد عمـر الكلال لذلك فقد استنبطت عدة طرائق للتنبؤ بعمر الكلال أهمهـا طريقـة منحنـي S- N (Loewenthal, 1984) والتي استخدمت في هذا البحث لتحديد عمر الكلال للصلب الطري. تم مقارنة النتائج S-N للعينـات المطلية بالنيكل، نيكل_ ألمنيوم وألمنيوم.

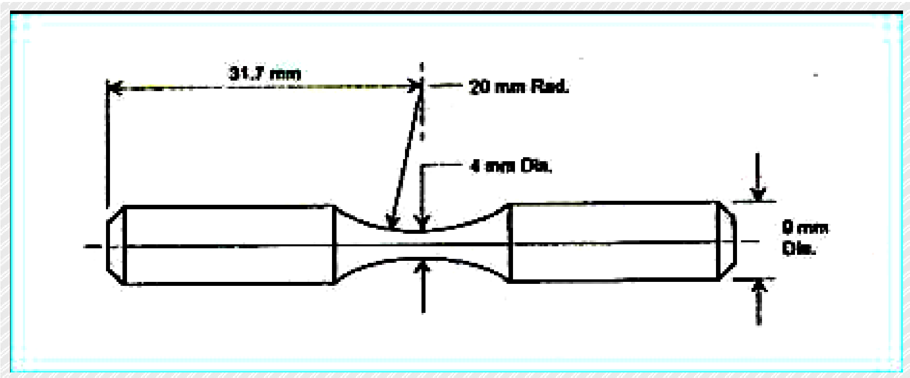
الجانب العملي: Experimental Part

استخدمت سبيكة من الصلب الطري (Mild Steel) (AISI 1020) التي تحتوي على النـسب الوزنيـة المبينة بالجدول 1 ومجهزة من قبل الشركة المصنعة لجهاز فحص الكلال (Hi-TACHI). تم أجراء عمليـة تنظيف العينات باستخدام ورق صقل مصنع من مادة كاربيد السليكون وبدرجات حـرارة سـليزية مختلفـة 2000, 1200, 600, 400, 320 لإزالة الاكاسيد الموجودة على السطح ثم غسلت بمـادة الاسـيتون لإزالـة المواد الدهنية العالقة على السطح بعدها شطفت بالماء المقطر ثم جففت لأجراء عملية الطلاء.

الجدول 1: النسب الوزنية لعناصر الصلب الطري (1020 AISI)

Element	C	Mn	S	P	Fe
Wt%	0.18-0.23%	0.3-0.6%	0.05%	0.04%	Balance

أجريت عملية الطلاء للعينات باستخدام طريقتين، الأولى تضمنت الطلاء بعنصر النيكل بطريقة الترسـيب الكهربائي عند درجة حرارة 45°C وكثافة تيار $2mA/cm^2$ ولفترة زمنية ساعة واحـدة، قيمـة PH(2.42) حيث مكونات حوض الترسيب عبارة عن (كبريتات النيكل $NiSO_4$: 180gm/l، كلوريد الامونيـوم 25gm/l NH_4Cl_2: ، حامض البوريك H_3BO_3 :30gm/l). أما الثانية طلاء العينات المطلية بالنيكل وغيـر المطليـة بعنصر الألمنيوم بطريقة السمنتة وهي أحدى طرائق الطلاء الكيميائي الانتشاري. يتكون خليط الطـلاء مـن (مسحوق الألمنيوم :25%, كلوريد الامونيوم: 5% تعمل بوصفها مادة منشطة على نقل الألمنيوم من الخليط إلى العينة، مسحوق الالومينا Al_2O_3: 70% تمنع تكتل المزيج). يمزج الخليط جيدا ويوضع مع العينات فـي بودقة داخل فرن كهربائي مفرغ من الهواء بدرجة حرارة 900°C ولمدة أربع ساعات ثـم تبـرد العينـات تدريجيا داخل الفرن إلى درجة حرارة الغرفة، كما أجريت لبعض العينات غير المطليـة معاملـة حراريـة بشروط الزمن ودرجة الحرارة نفسها. يوضح الشكل (1) الأنموذج المستخدم في هذا البحث.



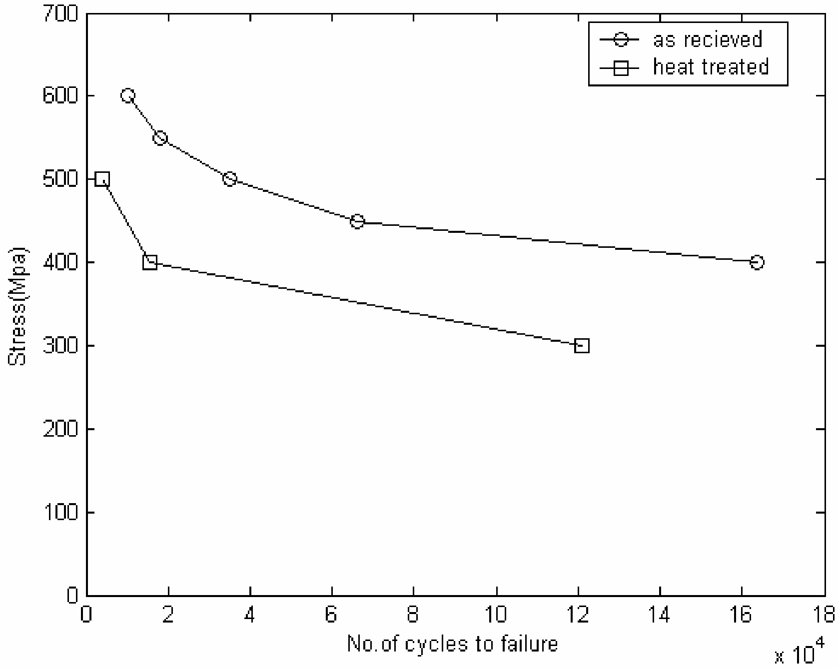
الشكل 1 : العينة القياسية المستخدمة في البحث (Mild Steel) (AISI 1020)

بعد الانتهاء من عملية الطلاء اختبرت جميع العينات في جهاز فحص الكلال نوع (HSM20) بطريقة الانحناء الدوار (Rotating bending) عند نسبة أجهاد R= -1. تم التشغيل بعد التأكد من وضع العينـة فـي موقعها الصحيح، ووضع الأحمال (الأوزان) الملائمة لها. يعمل الجهاز بمبدأ العداد الالكتروني وذلك بقيـاس عدد الدورات لغاية الفشل حيث يتوقف الجهاز أوتوماتيكيا عند كسر العينة ثم قراءة العداد لكل قيمة أجهـاد (Stress) محددة وبالطريقة نفسها. وجدت الاجهادات الأخرى عند الأحمال المقررة مع رسم مخطط الكـلال Stress-Number of cycles (S-N). أما الفحص ألمجهري للعينات المطلية بعد أن أجريت لهـا عمليـات الإسناد (mounting) والتجليخ (grinding) ومن ثم صقل العينات (polishing) بوجود محلـول الالومينـا Al_2O_3 وبدقة 0.6μ، ثم نظفت بالماء والكحول وجففت وصولا للانتقال إلى مرحلة الإظهار. تمـت عمليـة الإظهار باستخدام محلولين، محلول كلير مكون من نيتال (nital) (HNO_3) تركيزه 5%، كحول الاثيل 95% (نقاوة 99%) ومحلول أخر مكون مـن (2% HF, 2% HNO_3, 1% HCl, 1% H_2O_2). بعـدها صـورت العينات بوساطة المجهر الضوئي بقوة تكبير (900X) لمعرفة التركيب الدقيق وسمك طبقة طلاء العينات. أما قياس الصلادة فتم استخدام طريقة فيكرز (Vickers) للمقطع العرضي المعرض إلى الفشل للعينـات حيـث تنزل أداة التغلغل وتضغط تحت تأثير حمل مقداره 200gm والذي يترك أثراً علـى شـكل معـين قطـره (0.036±0.004) وتم قراءة الأثر الناتج عن طريق القدمة المثبتة على الجهاز. وأخيراً تـم أجـراء فحـص الأشعة السينية (XRD) للعينات المطلية لتحديد الأطوار المتكونة من عملية الطلاء بمختبرات وزارة العلـوم والتكنولوجيا بجهاز من نوع (X-Ray Diffructometer 6000) باستخدام هدف من النحاس وتسليط فولتيـة 40Kv وتيار قدره 30mA للحصول على طول موجي 1.54°A. تم المـسح مـن 30-70 درجـة بـسرعة 5,0(deg/min) .

النتائج و المناقشة

اختبار فحص الكلال للسبيكة غير المعاملة والمعاملة حراريا

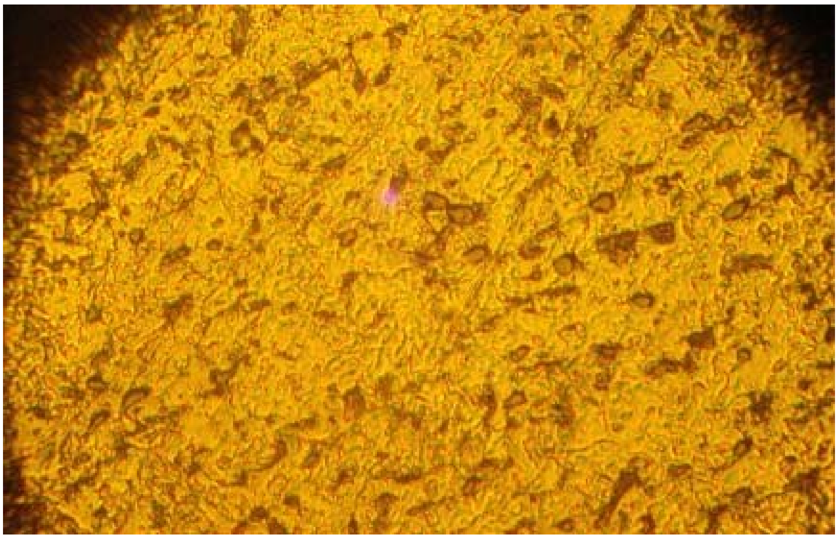
الشكل (2) يوضح منحنيات الكلال (S-N) قبل وبعد المعاملات الحرارية ويلاحظ من الشكل أن عمر الكلال للسبيكة المعاملة حراريا يتناقص بنفس المعدل عند مقارنته مع غير المعاملة عند نفس الجهد. كما أن الصلادة السطحية للسبيكة المعاملة حراريا (181HV±5) انخفضت مقارنة مع السبيكة الأصلية ذات صلادة سطحية (228HV±3).



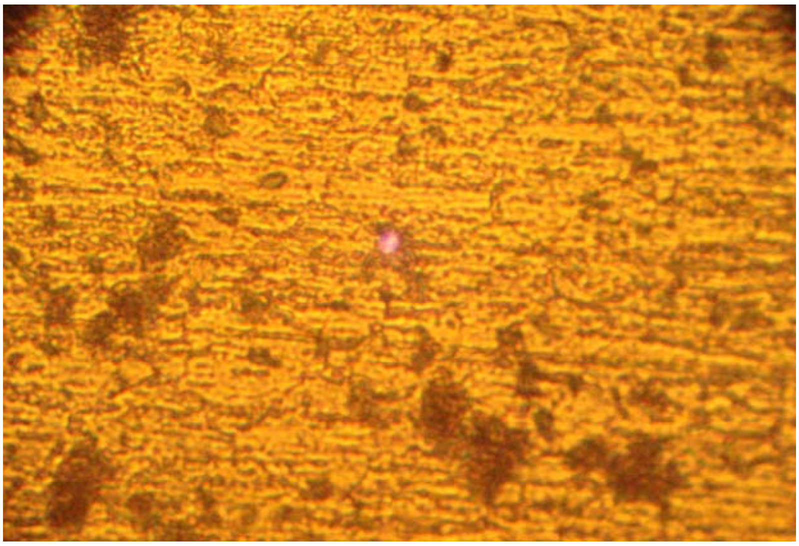
الشكل 2: منحني S-N لسبيكة Mild steel AISI 1020 غير المعاملة والمعاملة حراريا عند درجة حرارة 900 ºC.

ويمكن تفسير هذا التناقص في عمر الكلال للسبيكة المعاملة حراريا من خلال التركيب ألمجهري للسبيكة. إذ نجد أن تركيب ألمجهري للسبيكة الأصلية الشكل (3) مؤلفة من طور فيرايتي (α-ferrite) المناطق الفاتحة والذي يحتوي على جسيمات السمنتايت Fe_3C (ضمن الطور البيرلايتي) والمتمثلة بالمناطق الغامقة وهذا التركيب يتوافق مع هذا النوع من الصلب ومع مخطط التوازن الحراري لنظام الحديد – كربون (Callister, 2003). أما المعاملة الحرارية التي خضعت لها السبيكة للتلدين الكامل (Full annealing)، حيث سخنت السبيكة فيها لحد تكوين الاوستنايت (Austenitized) ثم تبريدها داخل الفرن لساعات عدة (تبريد بطيء) فهي موضحة بالشكل (4). يلاحظ تحول السبيكة إلى الطور البيرلايتي الخشن

(coarse pearlite) حيـث يـزداد الحجـم الحبيبـي للفيرايـت تبعـا لانخفـاض درجـة الحـرارة (Wolańska *et al*., 2007) وهذا ما لوحظ في التركيب ألمجهري الناتج .أن النقصان في الصلادة السطحية للسبيكة المعاملة حراريا يعزى كذلك إلى انخفاض نسبة الكربون على السطح (Decarburization) لتكـوين طبقات متعاقبة من السمنتايت والفيرايت (Pearlite) ساهمت في تناقص درجة التماسك داخل حدود الطورين $\alpha+Fe_3C$ وهذا ماقد يضعف أيضا مقاومتها لحدوث التشوهات اللدنة plastic deformation (الانخلاعـات) التي تمر عبر حدود الأطوار.



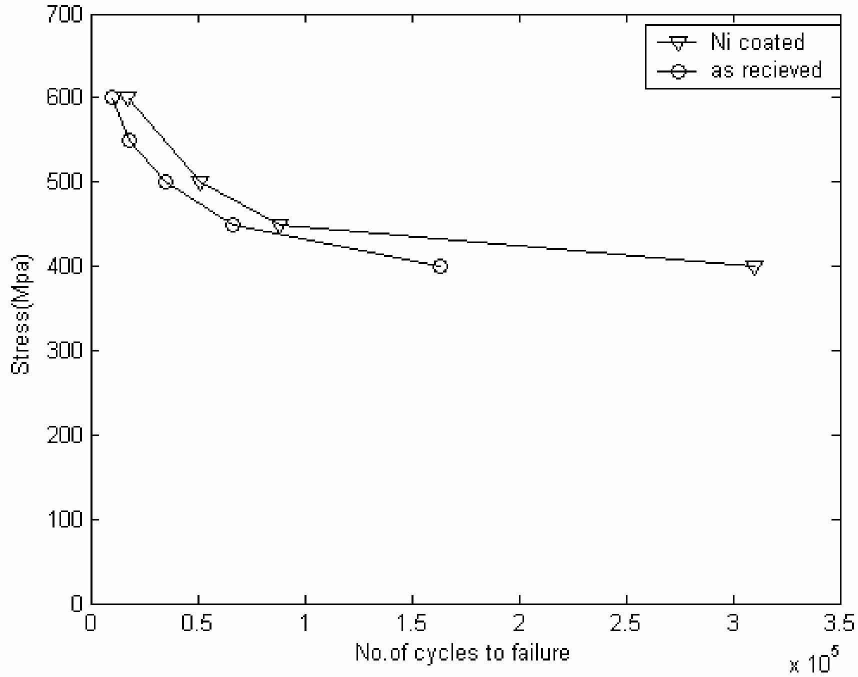
الشكل 3: التركيب ألمجهري للصلب الطري AISI 1020
. 5%nital etch (900X)



الشكل4: التركيب ألمجهري للسبيكة بعد المعاملة الحرارية بدرجة 900 °C
. 5%nital etch(900X)

فحص الكلال للسبيكة المطلية بالنيكل

اظهر منحني (S-N) للكلال والموضح بالشكل (5) بأن عمر الكلال يزداد للسبيكة المطلية بالنيكل مقارنة مع السبيكة الأصلية عند نفس مستوى الإجهاد. يمكن أن يعزى هذا التحسن في عمر الكلال إلى عدة عوامل أهمها تحسين حالة السطح، إذ أن السطح كلما كان أملسا ازدادت مقاومته لحدوث التشققات. أي أن ذرات النيكل المترسبة أدت إلى ملء الفجوات والثغرات الموجودة على السطح مما جعلته أكثر ملاسة .كما اظهر قياس الصلادة للسبيكة المطلية بالنيكل تزايدا (238HV) مقارنة بالسبيكة الأصلية.

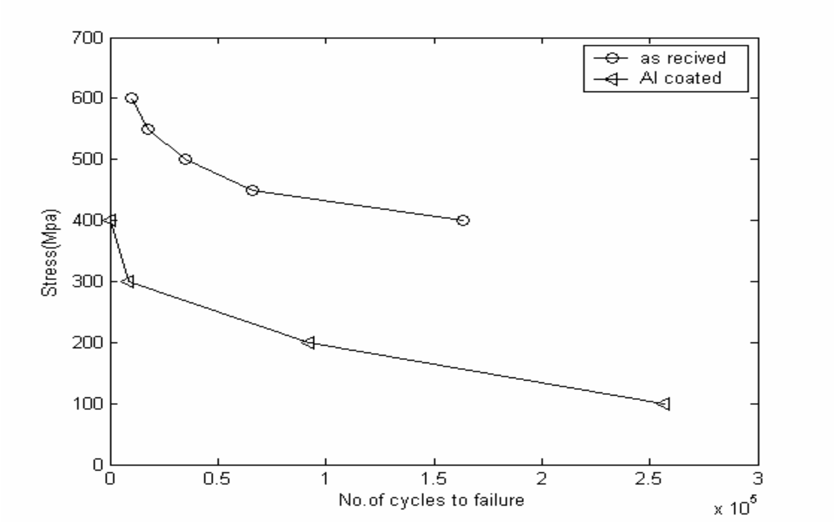


الشكل 5: منحني S-N لسبيكة mild steel (AISI 1020) قبل وبعد إجراء عملية الطلاء بالنيكل

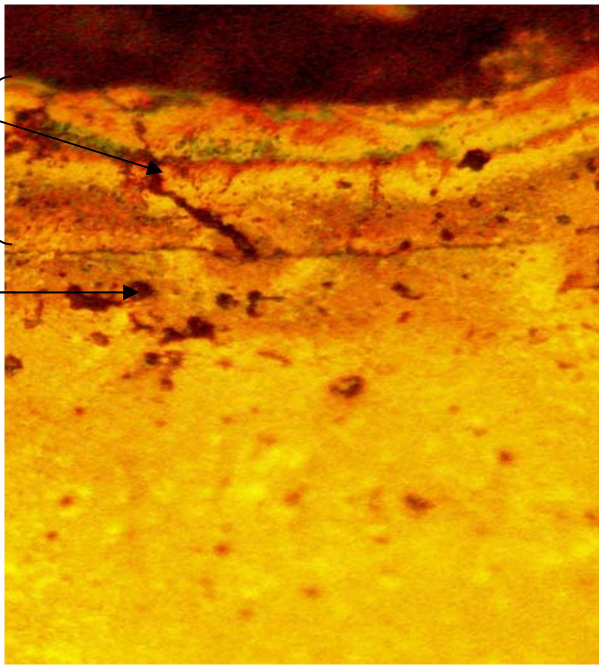
فحص الكلال للسبيكة المطلية بالألمنيوم

يمثل الشكل (6) منحني فحص الكلال للسبيكة المطلية بالألمنيوم، وقد قورنت مع السبيكة الأصلية فاتضح بان السبيكة المطلية بالألمنيوم قد حصل لها انهيار سريع جدا لنفس مستوى الإجهاد بالمقارنة مع السبيكة الأصلية. إن هذا التناقص الكبير في عمر الكلال يعزى إلى ما يأتي:

أولا: إن نشوء طبقة طلائية بسمك (118µm) داخل سطح السبيكة ،الشكل (7)، يؤدي إلى تناقص مساحة المقطع العرضي للسبيكة الذي يسهم بشكل فعال في تحمل الاجهادات المسلطة.



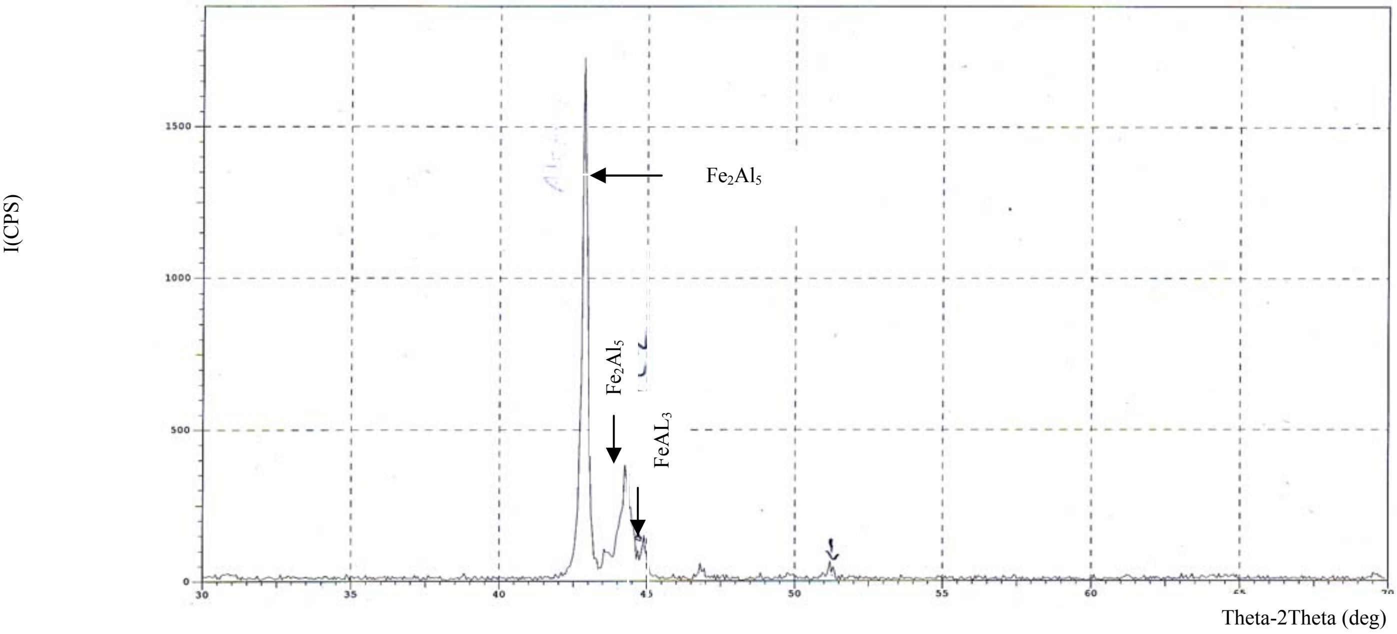
الشكل 6: مقارنة منحني S-N لسبيكة mild steel (AISI 1020) قبل وبعد عملية الطلاء بالألمنيوم بعد معاملتها حراريا عند درجة 900 °C.



الشكل 7: التركيب ألمجهري لطبقة طلاء الألمنيوم (900X).

(.2% HF,2%HNO_3,1%H_2O_2,1%HCl.etch.)

ثانيا: اختلاف التركيب ألمجهري لطبقة الطلاء المتكونة من مركبات وسطية للحديد – ألمنيوم وخاصـة فـي المنطقة الخارجية من الطلاء والتي أظهرت من خلال الأشعة السينية الشكل (8) بأنه مكون من مـزيج مـن الأطوار الغنية بالألمنيوم مثل $FeAl_3$ وFe_2Al_5 وهذه الأطوار تتميز بصلادتها وهـشاشتها وتختلـف فـي خواصها الميكانيكية عن الطور الفيرايتي (α- iron).



الشكل 8: حيود الأشعة السينية (XRD) للعينات المطلية بألمنيوم منفرد.

ثالثا: أظهرت نتائج فحص الصلادة الدقيقة بأن طبقة الطلاء هي أكثر صلادة (HV 274 ± 3.4) من السبيكة الأصلية (HV 228 ± 3) وأكثر هشاشة.

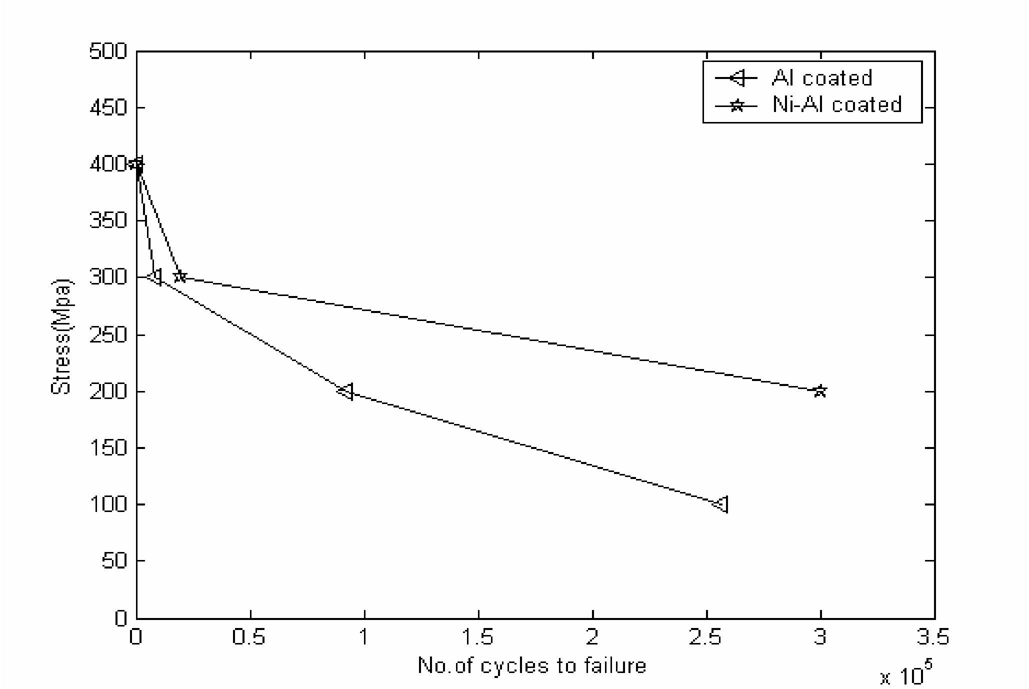
رابعا: أظهرت الفحوصات المجهرية حدوث تشققات خلال طبقة الطلاء راجع الشكل(7) وهذه تشكل مواقع لتركيز الاجهادات والتي تؤثر سلبا على عمر الكلال لأن نشوء التشققات تبدأ من السطح بصورة عمودية.

خامسا: خلال عملية الطلاء تعرضت السبيكة نفسها إلى درجات حرارة عالية، هذه الحرارة حتما تسببت في نمو الحجم الحبيبي لطور الفيرايت الذي هو الطور الأساس للسبيكة، هذا النمو تسبب أيضا في إحداث تشوهات لدنة (plastic deformation) وربما حدوث انخلاعات (dislocation) ويحدث ذلك نتيجة الاجهادات الحرارية (thermal stresses) التي ترافق عملية الطلاء وهذا أدى إلى ضعف التماسك بين حبيبات السبيكة.

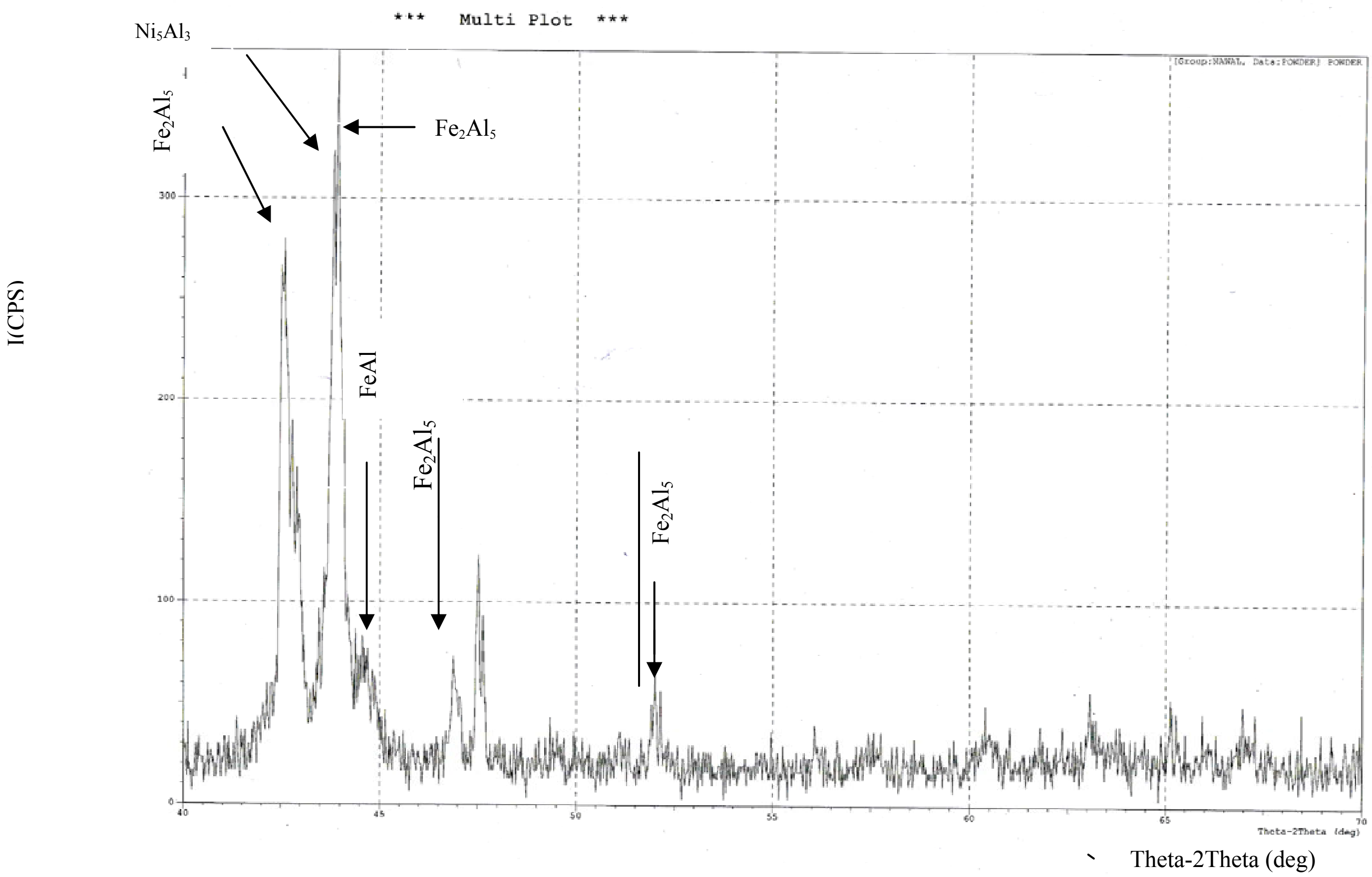
سادسا: وجود طبقة ضيقة جدا في المنطقة البينية (interface) (سبيكة/طلاء) من المركبات الكاربيدية (السمنتايت) والتي تتميز بالهشاشة قد ساهمت بشكل كبير في تناقص متانة التماسك بين الطبقة الطلائية والسبيكة من جهة (سهولة انفصال طبقة الطلاء عن الأساس) ومن جهة أخرى فإنُها تكون ممرا سهلا لنشوء وانتشار الشق داخل السبيكة نفسها وبالتالي أدت إلى نقصان عمر الكلال.

فحص الكلال للسبيكة المطلية بالنيكل وألالمنيوم

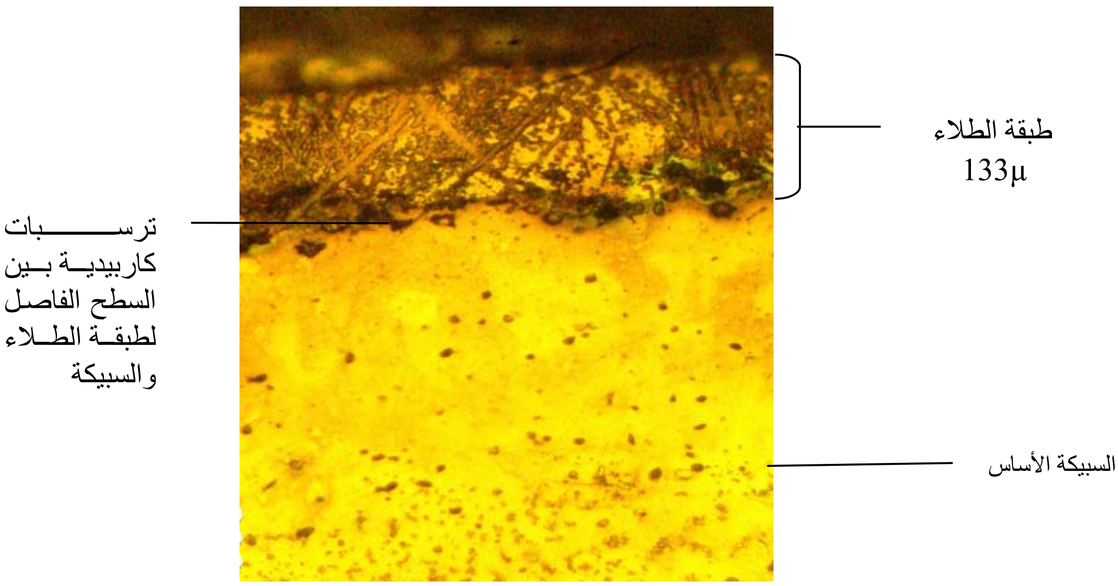
اثبت نتائج فحص الكلال للسبيكة المطلية بالنيكل والألمنيوم (طلاء مزدوج) وكمـا فـي منحنـي S-N الشكل (9) لهذه السبيكة بأن هناك تحسنا ملحوظاً في عمر الكلال مقارنة بالسبيكة المطلية بالألمنيوم المنفـرد وعند نفس مستوى الاجهادات المسلطة. علما بان كلا العينتين قد تعرضتا إلى الظروف المعاملـة الحراريـة لطلاء الألمنيوم نفسها لذلك فإن هذا التحسن يمكن أن يعزى إلى وجود مركبات النيكل الأكثر صلادة ضـمن مركبات الحديد – ألمنيوم التي أكدتها نتائج الأشعة السينية كما في الشكل (10) حيث يلاحظ وجود عدد من الأطوار الغنية بالألمنيوم كالطور Fe_2Al_5 والغنية بالنيكل Ni_5Al_3 والطور المتوازن FeAl، كمـا ظهـرت ذروات عديدة أخرى في مخطط الأشعة السينية لم نتمكن من التعرف عليها وهـذا يتفـق مـع ماأظهرتـه الفحوصات المجهرية من تعقيد لطبقة الطلاء الناتجة الموضحة في الشكل (11).



الشكل 9: منحني S-N لسبيكة مطلية بنيكل-ألمنيوم وألمنيوم منفرد بدرجة 900ºC .



الشكل 10: حيود الأشعة السينية (XRD) للعينات المطلية بنيكل-ألمنيوم.



الشكل 11: التركيب ألمجهري لطبقة طلاء نيكل – ألمنيوم (900X).

(2% HF, 2% HNO_3, 1% H_2O_2, 1% HCl.etch).

أخيرا يمكن القول واعتمادا على الفحوصات المجهرية والأشعة السينية إن أساس طبقة الطلاء تتألف من مزيج من هذه الأطوار، حيث تتواجد تلك التي تكون غنية بالألمنيوم Fe_2Al_5 في أعلى طبقة الطلاء بسبب التركيز العالي للألمنيوم ويقل تركيزه كلما اتجهنا نحو السبيكة ليكون مع الحديد أطوار متوازنة مثل FeAl. ولكون سرعة انتشار النيكل اقل من سرعة انتشار الألمنيوم، لذا فإن انتشار عنصر النيكل كان مقتصرا إلى عمق محدود داخل السبيكة، وبوجود الألمنيوم يكون المركب الوسطي Ni_5Al_3 الذي ظهرت بعض ذرواته عند سطح الطلاء، علما أن مركبات الحديد-ألمنيوم يتطابقان في الكثير من ذروا تهم. على أية حال فإن نسبة ذوبان الكربون في هذه المركبات (Fe_2Al_5 وNi_5Al_3) هي في الواقع اقل بكثير من نسبة ذوبانه في الحديد، لذا فإن الفائض من الكربون يترسب على شكل كاربيدات الحديد خاصة Fe_3C بكثافة عالية وأشكال متعددة لأن الكربون قليل الألفة مع كل من الألمنيوم والنيكل. مما يلاحظ أن الفحص ألمجهري لمقطع الطلاء لم يظهر أية تشققات خلال طبقة الطلاء كالتي لوحظت عند الطلاء المنفرد بالألمنيوم وهذا ما قد يعزز مقاومته لفحص الكلال.

الاستنتاجات

1- تؤثر المعاملة الحرارية على عمر الكلال بسبب التغيرات الطورية الحاصلة لأساس السبيكة ويعتمد تكوين هذه الأطوار على درجة الحرارة وطريقة تبريد السبيكة وكل طور من الأطوار له خواص ميكانيكية تختلف عن الأخر وحسب الصلادة والمطيلية ....الخ.

2- يتناقص عمر الكلال بشكل ملحوظ عند طلاء السبيكة بالألمنيوم بطريقة السمنتة كونها تنفذ بدرجات حرارة مرتفعة تعمل على تلدين السبيكة من جهة وتكوين أطوار سطحية تختلف مواصفاتها الميكانيكية عن السبيكة الأصلية.

3- تؤثر نوعية الأطوار المكونة للطلاء على عمر الكلال ,ففي الوقت الذي أظهرت مركبات الألمنيوم– حديد تراجعا في مقاومة الكلال، أظهرت وجود مركبات النيكل-ألمنيوم بعض التحسن في مقاومة الكلال.

4- يتحسن عمر الكلال عند ترسيب طبقة سطحية بالنيكل، كونه يحسن حالة السطح عن طريق ملء الفجوات والعيوب إذا ما وجدت على السطح. كما يساهم في تحسين عمر الكلال عند استخدامه كطلاء أولي قبل طلاء الألمنيوم كونه يساعد على تكوين طبقة طلائية متجانسة خالية من الشقوق السطحية.

5- تنخفض مقاومة الكلال إذا ازدادت كثافة الكاربيدات على السطح كونها من الأطوار الهشة التي يمكن أن تعتبر ممرات سهلة لنشوء وانتشار الشقوق.

المصادر

Alawode, A. J.; Akomolede, M.O. ; Agbanigo, A. O. (2008). Effects of tempering temperatures and corrosion on the fatigue behaviours of AISI 410 stainless steel rods . *J. and Sci*. **3(**5**)**, 390-395

Callister, W. D. (2003). " Material Science and Engineering: An Introduction", John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 274-248.

Gupta, J. (2009). Mechanical and wear properties of carburized mild steel samples. *N.I. Tech.* Rourkela **.** (**207**)ME 207,1.

Kwon, S.W.; Kun-Su, S.; Jae-Hong Y.; Bong-Gyu, P.; Keesam, S.; Jin-sung A.; Hyun-Soo K. (2004). "Effect of Aluminizing- Chromate Multi-Diffusion Coating on Microstructures and High Temperature Oxidation Behavior of Incoloy Alloy 909 for Gas Turbine Engine Components". Changwon, *ISRS* Chennai, India. pp. 641-773

Loewenthal, S. H. (1984). Factors that affect the fatigue strength of power transmission shafting and their impact on design . *NASA Tech.* Memorandum 83608 Ohio.

Machado, I. F. (2006). Technological advanced in steel heat treatment. *J. Mat. Pro. Tech*. (172), 169-173

Prince, M.; Gopalakrishnan, P.; Duraisevam, M.; More, S. D.; Naveen.; Natarajan, S. (2009). Study of dry sliding wear of plasma sprayed Mo-Ni/Cr-Ti-6AL-4V tribo pair . *E. J. S. R* .ISSN **37**(1),pp.41-48

Rahman, M. J.; Sen, S. R.; Moniruzzaman, M.; Shorowordi, K.M. (2009). Morphology and properties of electrodeposited Zn-Ni alloy coating on mild steel. *J. Mech. Eng*. **40** (1).

Rajendran, R.; Venkataswamy, S.; Jaikrishna, U.; Gowrishankar; N.; Rajadurai, A. F. (2006). "$SC1_3$. Effect of Process Parameters in Hot Dip Aluminizing of Medium Carbon Steel ". Chennai 600 044, India. pp. 3-7

Ramalho, A.; Correia, L.M.; Costa, J.D. (2000). Fretting fatigue of zinc coated low carbon steel EN H320 M . *Tribology International* . **33**, 761-768

Saeid, T.; Yazdani, S.; N. Parvini A. (2005). Shot peening as an alternative to fatigue life improvement of CK45 Steel coated with an electroless Ni- Cu-P International. *J. ISSI*, . **2** (1), 1-6.

Venkatakrishna, K.; Tangaraj, V.; Chitharanjan, A. H. (2008). Effect of bath composition and operating parameters on deposit character and corrosion behaviour of Zn-Ni alloy. *J .Chem. Tech* **.15** , 252-258.

Wolańska, N.; Lis, A. K.; Lis, J. (2007). Microstructure investigation of low carbon steel after hot deformation. *J. Ach. Mat. Man. Eng.* **20** *ISSUES*

Yajiang, L.; Wang J.; Zhang Y.; Holly, X. (2002). Fine structures in Fe_3Al alloy layer of a new hot dip aluminized steel. *Bull. Mater. Sci*., **25**(7), 635–639.