



Rotational fatigue behavior of AISI 416 stainless steel coated with different ceramic powders using flame thermal spraying technology

Mohammed Mohsin Qassim

Edrees E. Khadeer

Department of Physics/ College of Science/ University of Mosul

Article Information

Article history:

Received: August 25, 2024

Reviewer: November 19, 2024

Accepted: November 19, 2024

Available online

Keywords:

Learning together strategy - social interaction - special education students

Correspondence:

Mohammed.22scp8@student.uomosul.edu.iq
, dr.adress@uomosul.edu.iq

Abstract

This research aims to study rotating fatigue behavior of stainless-steel alloy (AISI 416) thermally coated with ceramic powders and compare it with uncoated base alloy. To evaluate fatigue life of these alloys, a rotating fatigue device of type (HSM 19) was used to evaluate all tests. Rotational fatigue test was conducted under normal conditions, where generated stresses by applying weights (15, 20, 25, 30 N) were calculated, then number of cycles until failure of each sample was recorded to obtain (S - N) curves. Microstructure and phases of coating were studied using scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD) techniques. Microstructure showed that surface layer of coating many strong precipitates and phases such as (Al_2O_3) and (CoSiO_3) in addition to some secondary precipitates such as (Cr_2O_3) and (Cr_2NiO_4) resultants of interaction between coating components and base alloy at high temperatures during coating and heat treatment. Microscopic examination also showed that most thermal coatings were heterogeneous, free of defects and microscopic cracks with some pores in few parts of coating layer. Results of cyclic fatigue test also showed that number of cycles to failure gradually decreased with increasing stress applied to most samples, as all tested coatings reduced fatigue life of coated alloys except for coated alloy (A_2) which consists of (COCrAlSi 25% w.t + Ni_2O_3 56.25% w.t + Al_2O_3 18.75% w.t), as this alloy showed a significant improvement in fatigue resistance.

سلوك الكلال الدوراني لسبيكة الفولاذ المقاوم للصدأ (AISI 416) المطلية

بمساحيق سيراميكية مختلفة بتقنية الرش الحراري باللهب

محمد محسن قاسم ادريس عيدان غدير

جامعة الموصل كلية العلوم قسم الفيزياء

المستخلص

يهدف هذا البحث الى دراسة سلوك الكلال الدوراني (Rotating Fatigue) لسبيكة الفولاذ المقاوم للصدأ (AISI 416) المطلية حراريا بمساحيق سيراميكية ومقارنتها مع السبيكة الاساس غير المطلية ، ولتقييم عمر التعب لهذه السبائك تم استخدام جهاز الكلال الدوار من النوع (HSM 19) لتقييم جميع الاختبارات ، تم إجراء فحص الكلال الدوراني في الظروف الاعتيادية ، حيث تم حساب الاجهادات المتولدة عن تسليط الاوزان (15 , 20 , 25 , 30 N) ثم سجلت عدد الدورات لغاية فشل كل عينة للحصول على منحنيات (S - N). تم دراسة التركيب الدقيق والاطوار للطلاء باستخدام تقنية المجهر الالكتروني الماسح (SEM) وتقنية حيود الاشعة السينية (XRD) ، أظهر التركيب الدقيق أن الطبقة السطحية للطلاء كانت متكونة من العديد من الترسبات والاطوار القوية مثل (Al₂O₃) و (CoSiO₃) بالإضافة الى بعض الترسبات الثانوية مثل (Cr₂O₃) و (Cr₂NiO₄) وهي ناتجة من التفاعل ما بين مكونات الطلاء والسبيكة الاساس عند درجات الحرارة العالية أثناء الطلاء والمعاملة الحرارية . كما ويظهر الفحص المجهرى أن معظم الطلاءات الحرارية كانت غير متجانسة وخالية من العيوب والتشققات المجهرية مع بعض المسامات في أجزاء قليلة من طبقة الطلاء . كما وأظهرت نتائج اختبار الكلال الدوراني بأن عدد الدورات لغاية الفشل تقل تدريجيا بزيادة الاجهاد المسلط عليها لمعظم العينات ، حيث أن جميع الطلاءات المختبرة قد قللت من عمر الكلال للسبائك المطلية باستثناء السبيكة المطلية (A₂) التي تتكون من (COCrAlSi 25% w.t + Ni₂O₃ 56.25% w.t + Al₂O₃ 8.75% w.t) حيث أبدت هذه السبيكة تحسنا ملحوظا في مقاومة الكلال .

Introduction

1 - المقدمة

تعاني العديد من الأسطح والأجزاء الداخلية لمعدات الريش التوربينية وصناعات الطاقة وتطبيقات الطيران والأنابيب النفطية من تشققات في السطح وتآكلات خارجية نتيجة الضغط الشديد ودرجات الحرارة العالية ما يؤدي إلى فقدانها خصائصها الفيزيائية والميكانيكية . ولتجاوز هذه المشكلات يتم استخدام طلاءات ذات متانة عالية وكلفة واطئة فظهرت الحاجة إلى طلاءات الرش الحراري [1].

تعد تقنيات الرش الحراري واحدة من أهم تقنيات الطلاء الغطائي للمواد الهندسية لما تمتلكه هذه التقنية من إمكانيات تكنولوجية على إنتاج طلاءات بسماك ($50 \mu m$) وبأداء عالي لمدى كبير من مواد الطلاء وعلى مختلف الأسطح والتطبيقات الصناعية [2] . حيث يكون من الضروري ضمان درجة عالية من مقاومة الحرارة والتآكل، تستخدم هذه التقنية كبديل لتقنيات طلاء الكروم الصلب والطلاء التراكبي في العديد من التطبيقات الصناعية ، حيث يمكن لهذه التقنية زيادة العمر التشغيلي وتقليل مخاطر الفشل مما يقلل من نفقات الصيانة على المدى الطويل [3] . يمكن استخدام العديد من المواد لإنتاج طلاءات الرش الحراري ، يمكن أن تكون هذه المواد بشكل مسحوق أو أسلاك [4]. إن أداء المكونات التي يتم رشها بهذه التقنية لا يعتمد فقط على اختيار مواد الطلاء وعملية الترسيب ، حيث هناك مجموعة من المعلمات تحدد كفاءة الطلاء ، كزاوية ومسافة الطلاء ، وتهيئة القاعدة للطلاء (Substrate) [5] . أما بالنسبة لسلوك الكلال للمكونات الناتجة عن عملية الرش الحراري فإن هناك القليل من المعلومات المتعلقة بمشكلة نظام معين . فعند الحديث عن اليات التعب للنظام المطلي يمكن القول أن هذا المجال لا يزال محدوداً [6] [7]. حيث أظهرت الأبحاث الحديثة حساسية خصائص التعب في معلمات عملية الطلاء [8] . هناك مجموعة من العوامل لها التأثير الأكبر على سلوك التعب للأجزاء المطلية بتقنية الرش الحراري مثل ظروف الطلاء ، سمك الطلاء وخصائص السبيكة قبل عملية الطلاء بالإضافة إلى الجهود المتبقية الموجود في كل من السبيكة والطلاءات التي يتم رشها حرارياً [9] .

2 - الجزء العملي

Experimental Part

1-2 المواد المستخدمة Materials Used

- تم استعمال سبيكة الفولاذ المقاوم للصدأ (AISI 416) (Stainless Steel)

والمبين النسب الوزنية لمكوناتها في الجدول (1).

الجدول (1) : النسب الوزنية لسبيكة الصلب المقاوم للصدأ (A₀) (Al Si 416)

Chemical formula	Sample code	Chemical composition, wt. %							
		C	Si	S	Mn	P	Cr	Fe	
Fe-C	A ₀	0.15	1	0.15	1.25	0.06	13	Balance	

الجدول (2) يبين النسب الوزنية المثوية لمسحوق الطلاء الرابط .

جدول رقم (2) : النسب الوزنية لمسحوق الطلاء الرابط (A₁)

Powder Name	Chemical formula	Sample code	Chemical composition, wt. %			
			Co	Cr	Al	Si
Bond Coating (BC)	CoCrAlSi	A ₁	16.75	5.5	2.5	0.25

الجدول (3) يبين النسب الوزنية للمساحيق السيراميكية المستخدمة كطلاء حاجز حراري.

الجدول (3) : النسب الوزنية لمسحوق الطلاء بالحاجز الحراري

Powder Name	Chemical Formula	Sample Code	Chemical composition, wt. %		
			A ₁	Ni ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Thermal Barrier Coating (TBC)	A ₁ +(Ni ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃)	A ₂	25	56.25	18.75
		A ₃	25	18.75	56.25
		A ₄	25	37.5	37.5
		A ₅	25	0	75
		A ₆	25	75	0

Sample Preparation

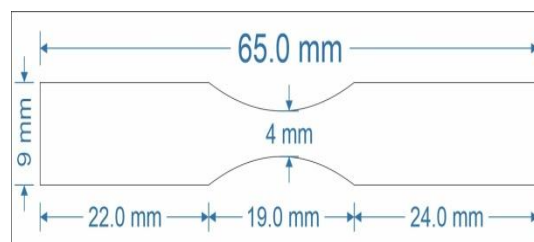
2 – 2 تحضير العينات

صممت عينات اختبار الكلال على شكل اسطوانة ذات تخصر من المنتصف كما موضح في الشكل (1)

(1)



(a)



(b)

الشكل (1) : (a) مقطع طولي للعيينة المستخدمة ، (b) مخطط للعيينة المستخدمة

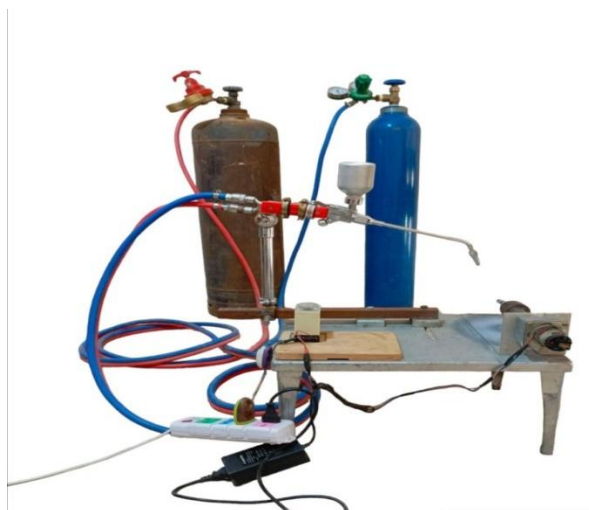
تتضمن هذه العملية مراحل عدة تبدأ بتقطيع العينات يليها عملية تخشين العينات باستخدام ورق تنعيم مصنوع من كاربيد السيليكون ، ثم تغسل بالماء والصابون ، ثم تغمر في سائل الاسيتون لمدة (320 sec) لأزاله ما تبقى من الشوائب ، ثم تغسل بالماء المقطر وتجفف سريعا .

Coating Processes

3 – 2 عملية الطلاء

تم تصميم وتجميع منظومة الرش باللهب (Flame Spray System) من السوق المحلية كما موضح في الشكل (2) . تم تثبيت العينات على محرك كهربائي يدور بسرعة ثابتة لضمان توزيع الطلاء على الجزء المراد طلاءه بالتساوي ، ويبعد عن فوهة مسدس الرش بمسافة (16 cm) . يستعمل المسدس الحراري لرش المسحوق وذلك بالضغط على منظمات مثبتة في بدن المسدس الحراري ينتج شعلة حرارية نتيجة لحرق غاز الاوكسجين وغاز الاستيلين في تيار يضم خليط من الغازين ، ويحمل هذا التيار الغازي مسحوق الطلاء المخزون في مستودع (قنينة) في أعلى مسدس الرش لينصهر ويتدفق بشكل انسيابي ويلتصق الطلاء المنصهر على سطح العينات. للحصول على معدل ثابت لخليط الغاز والمسحوق المنصهر، يجب ألا يزيد ضغط غاز الاوكسجين عن (4 bar) وضغط غاز الاستيلين عن

(0.7 bar) . كما أن عملية الرش تبدأ بتسخين العينة لمدة (20 sec) بواسطة الشعلة الاوكس الاستيلينية, كما أن عملية الطلاء لسطح العينة تستغرق (20 sec) ، تم تترك النماذج لتبرد في الهواء. والشكل (2) يوضح منظومة الرش المستخدمة .



الشكل (2) : منظومة الرش

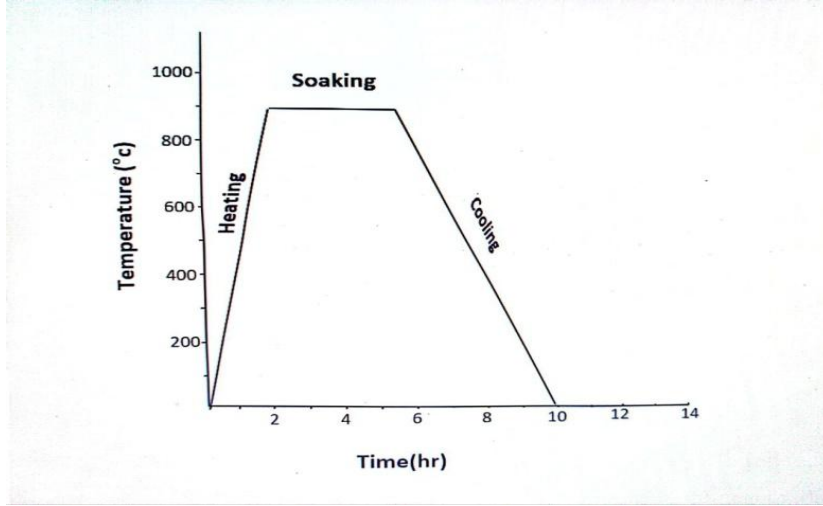
2 - 4 المعاملة الحرارية Heat Treatment

أجريت المعاملة الحرارية للعينات المطلوبة وذلك بوضع العينات داخل أنبوبة محكمة الاغلاق من أحد طرفيها أما الطرف الاخر يتم إيصاله بجهاز تفريغ كهربائي (Rotary Pump) لتفريغ الانبوبة من الهواء ، والشكل (3) يوضح منظومة المعاملة الحرارية .



الشكل (3) : منظومة المعاملة الحرارية

رفعت درجة حرارة الفرن الكهربائي الى درجة حرارة (900°C) وبعد الوصول الى هذه الدرجة يتم تثبيت الدرجة الحرارية نفسها لفترة زمنية مدتها (4 hr) ثم تترك العينات لتبرد داخل الفرن الى درجة حرارة الغرفة مع استمرار عملية التفريغ للهواء . والشكل (4) يبين مراحل المعاملة الحرارية للعينات المطلوبة .



الشكل (4) : مخطط المعاملة الحرارية للعينات المطلوبة

2 - 5 اختبار الكلال الدوراني Rotating Fatigue Test

أجري هذا الاختبار لجميع العينات المطلوبة وغير المطلوبة، باستخدام جهاز اختبار الكلال الدوراني

(Rotating Fatigue Machine) المصنع من قبل شركة (Hi - Tech) الانكليزية ، ذي النوع

(HSM19) ، والموضح في الشكل (5) .



الشكل (5) : جهاز فحص الكلال الدوراني

حيث يمكن بواسطة هذا الجهاز تحديد مقدار حد التعب الذي يمكن ان تصل اليه عينات الاختبار قبل حصول الفشل النهائي . توضع العينة في مكانها الصحيح بين طرفي الجهاز بحيث يتصل الطرف الاول من العينة بماسك فولاذي والذي يتصل بدوره بعدد الكتروني يعطي عدد الدورات التي يمكن ان يتحملها النموذج لغاية الفشل ، حيث يتوقف الجهاز تلقائيا عن الدوران عند كسر النموذج نتيجة لوجود مفتاح مايكرووي (Micro switch) حساس . يثبت هذا المفتاح في الطرف الاخر من بدن الجهاز والذي يتصل بدوره مع الطرف الاخر للعينة ، ويكون مربوط بخيط وقاعدة حديدية لوضع احمال الاختبار المختلفة (15 ، 20 ، 25 ، 30 N) . بعد وضع العينة في مكانها الصحيح يبدأ الجهاز في العمل ليبدأ العداد الالكتروني في احتساب عدد الدورات التي تتحملها العينة لغاية الفشل ويتوقف العداد تلقائيا عند حصول الفشل أو كسر العينة، ويمكن قراءة العداد لكل قيمة أجهاد محددة، وبالطريقة نفسها يمكن أيجاد الاجهادات الاخرى عند الاحمال المقررة ورسم مخطط الكلال (S - N) باستخدام المعادلة التالية [10] .

$$\sigma = \frac{125.7 P \cdot 32}{\pi \cdot 4^3} = 20 P \left(\frac{N}{mm^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

حيث (4^3) : يمثل قطر التخصر في العينة بوحدة (mm) .

P : يمثل مقدار الحمل المسلط بوحدة (N) .

2 - 6 الفحوصات التركيبية Structure Tests

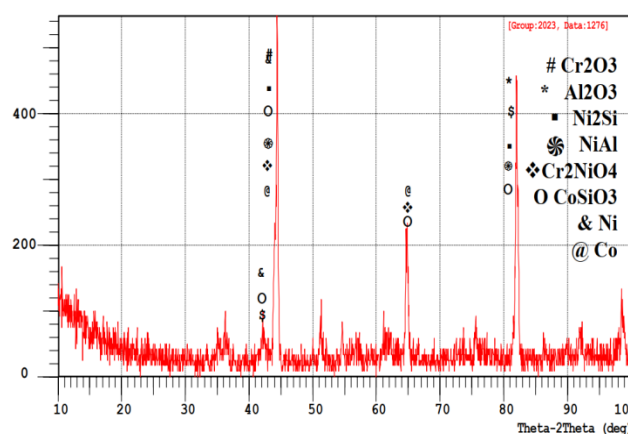
يتضمن هذا البند مجموع الفحوصات التي تم الاستعانة بها لفحص التراكيب البنيوية للعينات المطلوبة وتشمل الفحص بالمجهر الضوئي (OM) ، وتقنية الفحص بحيود الأشعة السينية (XRD) ، والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) ، ومقياس طيف أشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX) .

3 - النتائج والمناقشة Results and Discussion

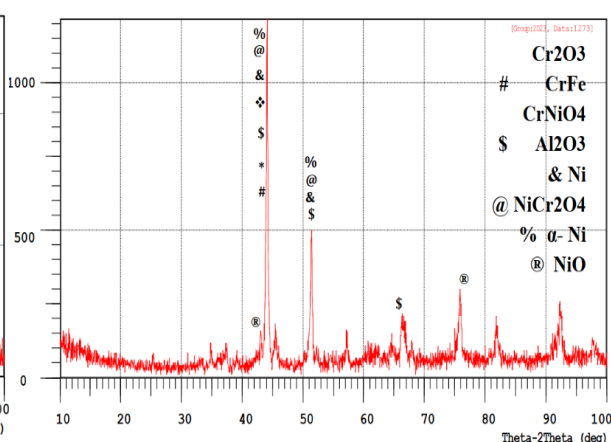
3 - 1 نتائج اختبار حيود أشعة السينية X – Ray Diffraction (XRD) Test

Results

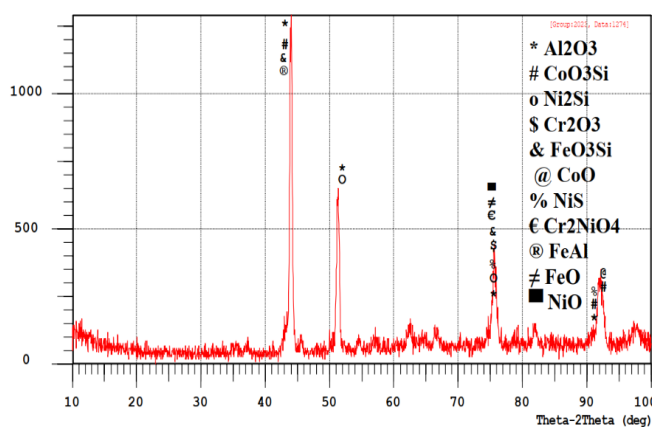
أظهرت بيانات حيود الأشعة السينية (XRD) لجميع العينات ، وجود قمم قوية تعود إلى الأطوار (Al_2O_3) و ($CoSiO_3$) كطورين رئيسيين مع العديد من الأطوار والترسبات الثانوية مثل (Cr_2O_3) و (Cr_2NiO_4) وهي ناتجة من التفاعل ما بين السبائك الأساس ومكونات الطلاء عند درجات الحرارة العالية أثناء عملية الرش والمعاملة الحرارية ، وإيضاً العديد من الأطوار الثانوية الأخرى باعتبارها رواسب للعديد من المراحل الثانوية .



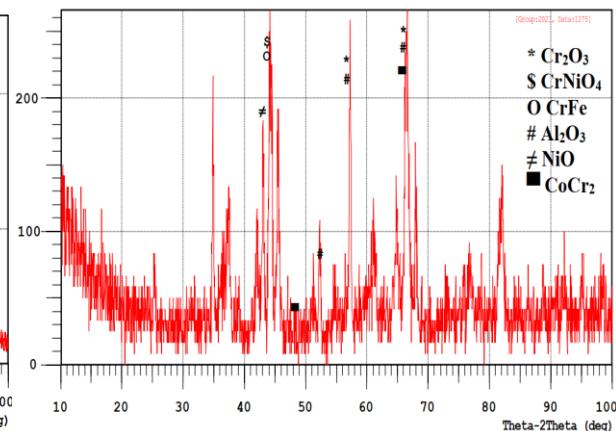
A1



A2



A3



A4

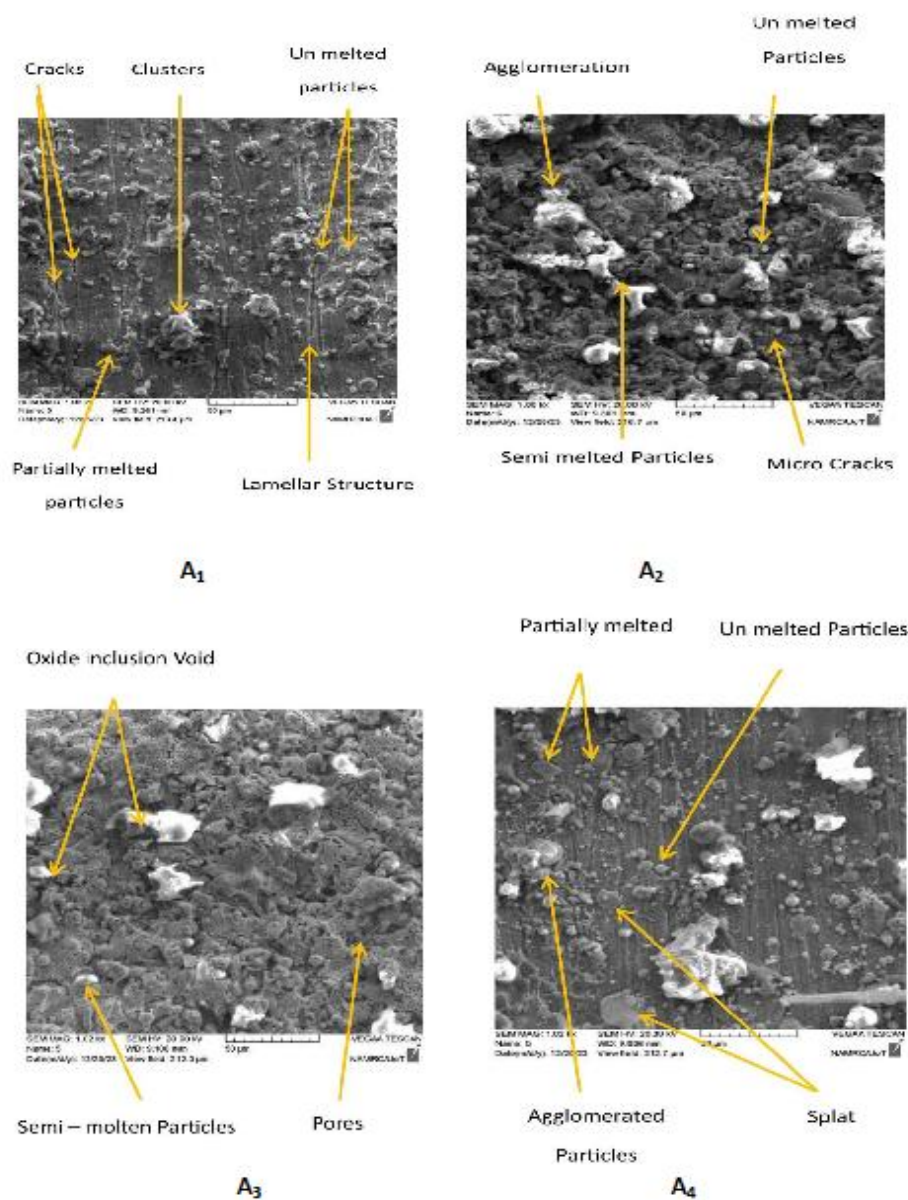
الشكل (6) : حيود الاشعة السينية لطبقات العينات المطلية

3 - 2 فحص المجهر الالكتروني الماسح (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM)

Examination

باستخدام المجهر الالكتروني الماسح (SEM) تم فحص شكل المقطع السطحي لسبائك الفولاذ المقاوم للصدأ (AISI 416) المطلية حرارياً بطبقة الطلاء الرابط (A₁) والمعالجة حرارياً، كما موضح في الشكل (7) .



الشكل (7) : المقطع السطحي للسبائك المطلية

يتكون سطح السبائك المطلية (A_1) من هياكل صفائحية تتشكل عن طريق تبريد جزيئات المسحوق. وهي غير متجانسة مع جزيئات منصهرة غير منتظمة ذات شقوق. لوحظت جزيئات أو مجموعات متكتلة في بعض المناطق. يُعتقد أن بعض الجزيئات المذابة جزئياً هي أكسيد الكروم (Cr_2O_3) ، والتي لم تذوب تماماً بسبب سرعة تدفق المسحوق العالية أثناء عملية الطلاء [11][12]. بينما أظهر سطح السبائك المطلية (A_2) سطحاً خشناً مع انتشار عشوائي للمكونات المذابة جزئياً وغير القابلة للذوبان، مما يشير إلى التأثير المباشر لدرجة الحرارة على تماسك الحبيبات وتكوين التكتل. كما احتوى الطلاء أيضاً على جزيئات مذابة جزئياً وشقوق مجهرية ، ربما بسبب الغازات المحاصرة قبل التصلب (Carmona , 2014). كانت البنية الدقيقة للطبقة المطلية (A_3) خشنة وغير متجانسة، مع شقوق مجهرية ومسامات وشوائب حيث لوحظ مستويات رقائقية من الجسيمات المنصهرة وشبه المنصهرة [13][14]. بالإضافة إلى ذلك، تُظهر الصور المجهرية للطبقة المطلية على السطح (A_4) بنية رقائقية غير متجانسة مع جزيئات مطلية غير منصهرة وخالية من العيوب والشقوق. توجد بعض المسامات وتراكم لجزيئات الطلاء بسبب الرواسب الثانوية وسرعة المسحوق العالية أثناء عملية الرش والمعالجة الحرارية [15].

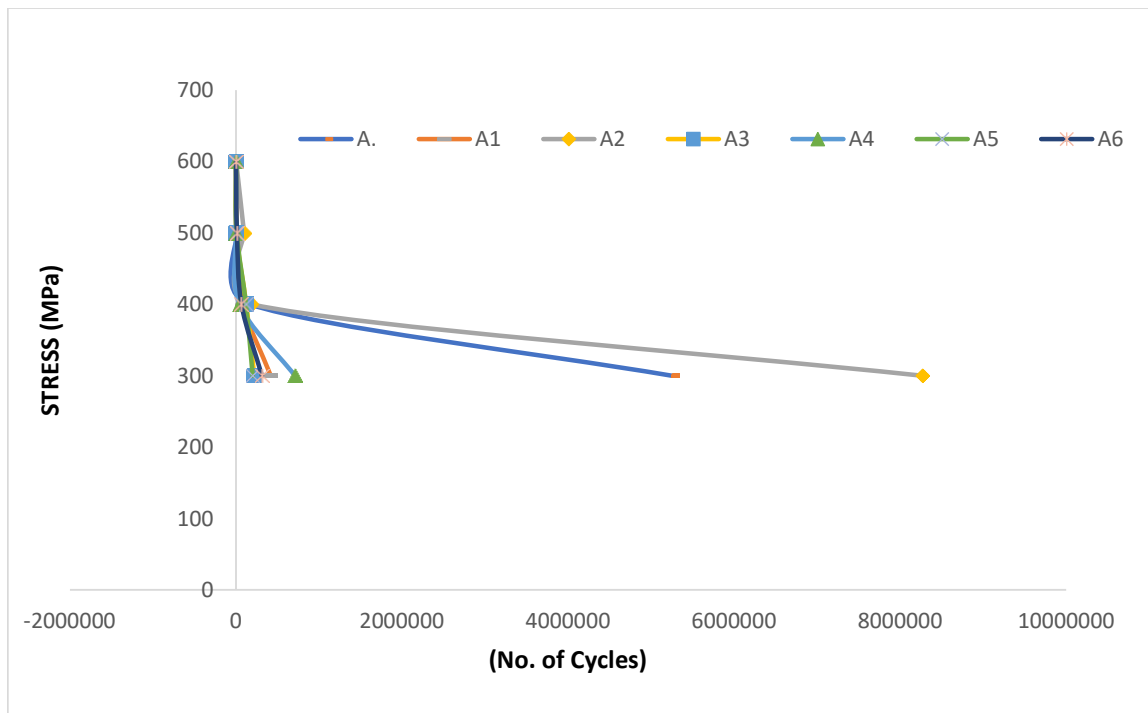
3 – 3 فحص الكلال الدوراني Rotating Fatigue Examination

تم إجراء فحص الكلال الدوراني لسبائك الفولاذ المقاوم للصدأ (AISI 416) غير المطلية بالإضافة الى تلك المطلية في الظروف الاعتيادية ، تم حساب الاجهادات المتولدة عن الاوزان (15 , 20 , 25 , 30 N) ، وسجل عدد الدورات لغاية فشل العينة .

الجدول (4) : قيم الاجهادات وعدد الدورات لغاية الفشل للسبيكة الأساس غير المطلية (A_0)

Weight (N)	Applied Stress (MPa)	Average No. of Cycles to Failure	Fatigue Limit (MPa)
15	300	5252831	300
20	400	167099	
25	500	12565	
30	600	2108	

يبين الجدول (4) ان عدد الدورات لغاية الفشل للسبيكة الأساس غير المطلية يقل تدريجيا مع زيادة الجهد المسلط عليها عند نسبة إجهاد ($R = -1$) ، وان عمر الكلال (Fatigue Life) لهذه السبيكة يقل بمقدار كبير عند تغيير قيمة الاجهادات المسلطة عليها ضمن المدى (300 – 600 MPa) ، وأن حد الكلال (Fatigue Life) أو حد التحمل (Endurance Limit) لهذه السبيكة (300 MPa) حيث لا تعاني السبيكة من الانهيار عند هذه القيمة من الاجهاد وهو من المعلمات المهمة (Important Parameter) التي تفيد المصممين للتعرف على قيمة الاجهاد الذي يمكن أن تتعرض له السبيكة دون حدوث فشل الكلال [16] .



الشكل (8) : (منحنى الاجهاد – عدد الدورات) للسبائك المطلية بمساحيق مختلفة

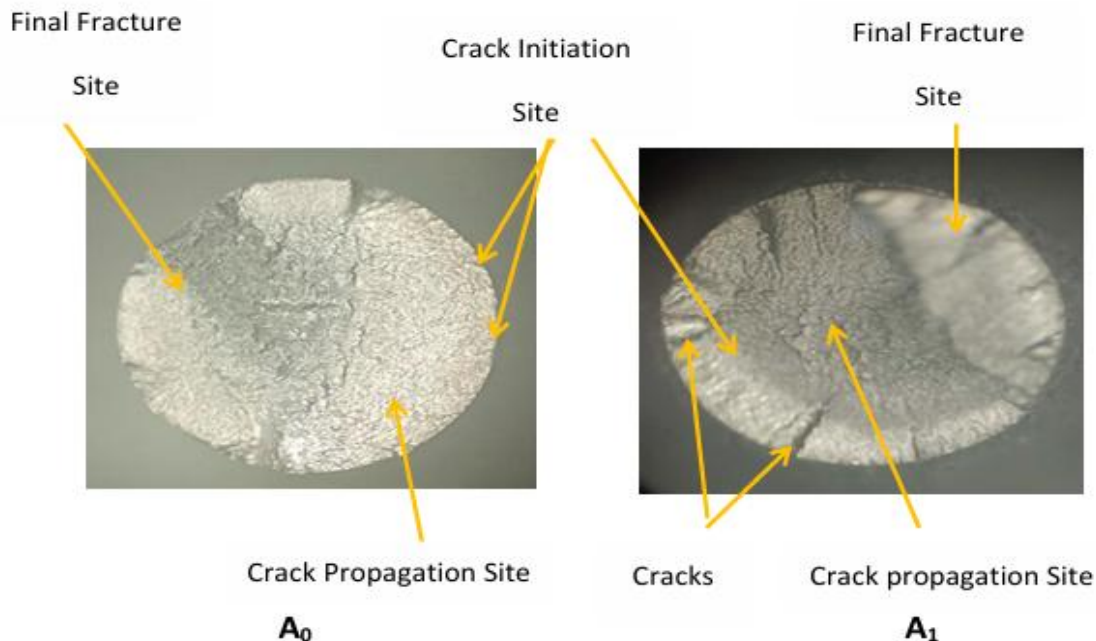
يوضح الشكل (8) منحنى (الاجهاد – عدد الدورات) مقاومة الكلال الدوراني (Cyclic Fatigue Resistance) لتلك السبائك . أظهرت نتائج فحص الكلال ، بأن عدد الدورات لغاية الفشل تقل تدريجيا مع زيادة الاجهادات المسلط عليها لمعظم العينات نتيجة التكون السريع للشقوق في هذه السبائك عند تعرضها لإجهادات دورية أثناء الاختبار . نلاحظ من خلال الشكل أن الطلاء قد قلل من عمر الكلال مقارنة مع السبيكة الأساس غير المطلية ، عدا النموذج (A₂) الموضح في الجدول (5) ، حيث كانت

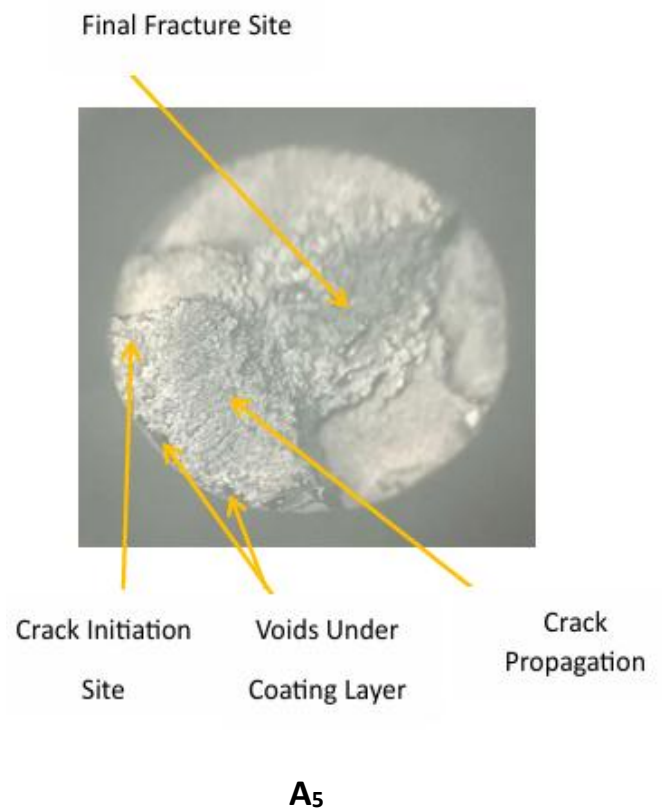
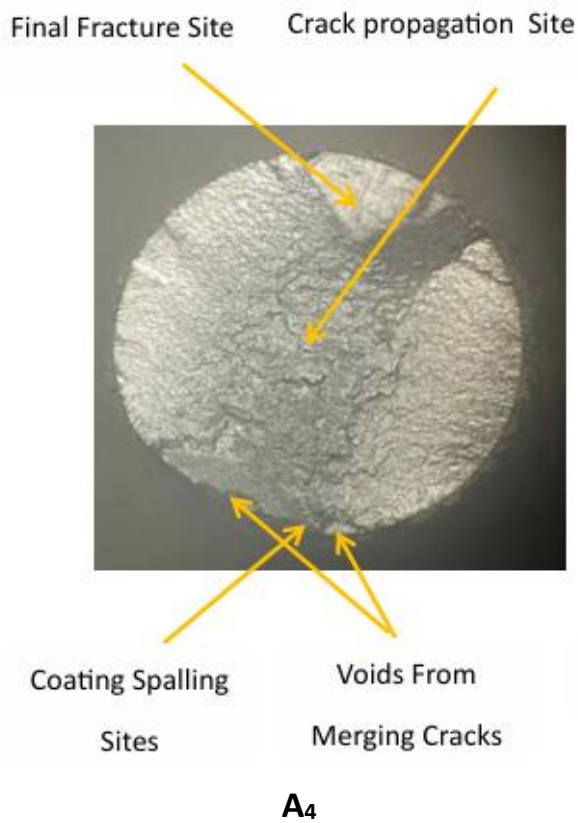
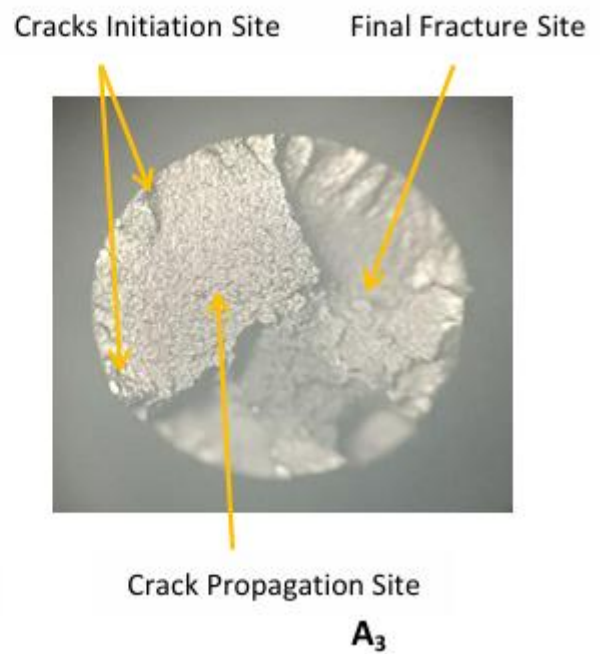
مكونات هذا الطلاء ، (56.25 +18.75 + 25 wt. % $\text{Ni}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CoCrAlSi}$) ، حيث نلاحظ هناك تحسن في عمر الكلال لهذه السبيكة . حيث وجد أن مقدار التحسن في عمر الكلال أزداد بمقدار (11.717 – 57.540 %) عند تغير قيمة الاجهادات المسلطة عليها ضمن المدى (300 – 600 MPa) وان حد الكلال لهذه السبيكة كان عند اجهاد (300 MPa) حيث لم تعاني السبيكة أي انهيار عند هذه القيمة من الاجهاد طيلة فترة الاختبار .

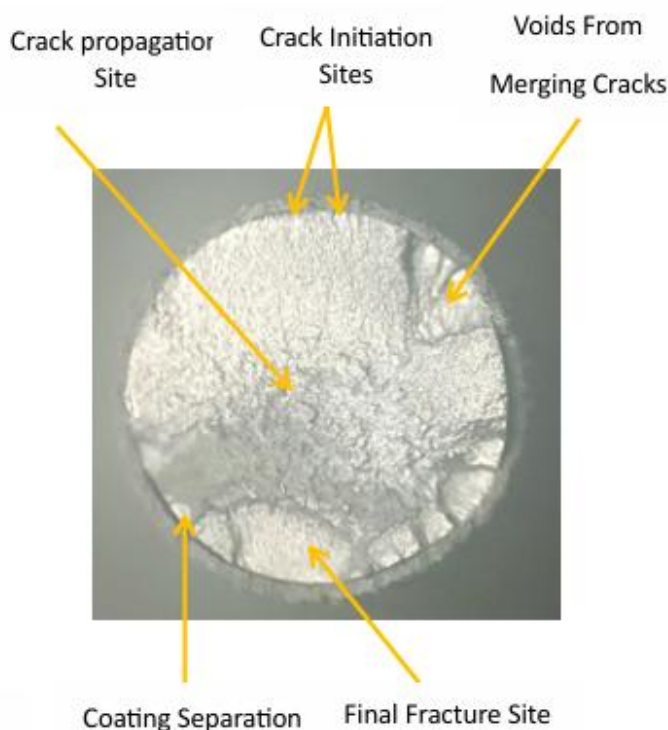
الجدول (5) : التحسن الميكانيكي في عمر السبيكة (A_2) مقارنة مع السبيكة (A_0)

Fatigue Stress (MPa)	No. of Cycle of The Base Alloy	No. of Cycle of Coated Samples (A_2)	Percentages of Improvement (%)
300	5252831	> 8270634	57.450
400	167099	187961	12.484
500	12565	88478	604.162
600	2108	2355	11.717

ولبيان مناطق الكسر والانهار للسبائك ، ولمعرفة أسباب انهيارها المفاجئ ، تم أخذ الصور المجهرية لمقاطع الكسر العرضية ، المبينة في الشكل (9).





A₆

الشكل (9) : مقطع عرضي للكسر للسبائك المختبرة عند اجهاد (400 MPa)

أظهر الفحص المجهرى للمقطع العرضي لمناطق الكسر للسبيكة الاساس غير المطلية (A₀) أن مواقع تكون الشقوق كانت في مواقع متفرقة وبداية حدوث الكسر لم تكن واضحة ، حيث بدأت الشقوق عند سطح السبيكة وانتشرت الى داخلها ، وظهرت علامات الشقوق على شكل بلاج الشاطئ (Beach marks على مقطع الكسر ، ومن الجدير بالملاحظة ، أن منطقة نشوء الشق وانتشاره كانت كبيرة جدا بالمقارنة مع منطقة الكسر النهائي مما يدل على طول الفترة الزمنية لحدوث الانهيار ، كما أن منطقة الكسر النهائي كانت خشنة مما يدل على فشل العينة كان من النوع المرن [17]. أما بالنسبة للعينة المطلية (A₁) أظهر الفحص أن بداية حدوث الكسر حدثت بالقرب من السطح ومن عدة اتجاهات وانتشرت الى داخل السبيكة ، تاركا وراءه سطحا مستويا مما يدل على بداية حدوث الشق كانت سريعة وهي من ميزات الكسر الهش (Brittle Fracture) دلالة على عدم تحمل هذا الطلاء لإجهادات (شد - انضغاط) الناتجة عن الكلال العمودي (المولى ، 2009)، بعكس منطقة انتشار الشق التي أظهرت انتشارا لشق الكلال ضمن منطقة عريضة من العينة وتركت وراءها سطحا خشنا والذي يدل على الكسر المطيلي .

وصولا منطقة الكسر النهائي أو منطقة الانهيار الهش (Brittle failure) والتي تميزت بأنها كانت أيضا كبيرة نسبيا مقارنة بتلك الموجودة في السبيكة الاساس غير المطلية ، وهذا يدل على الفشل المبكر لهذه السبيكة مقارنة بالسبيكة الاساس [18] . ويلاحظ من الفحص المجهرى للعينة المطلية (A₂) أن نقطة بداية الكسر وانتشاره داخل السبيكة كانت بطيئة وطويلا وذات خشونة ، وهذا ما يفسر السلوك المطيلي للسبيكة المطلية ، وقد يكون هذا السبب المسؤول عن مقاومة هذه السبيكة للإجهاد المسلط عليها وتحسين عمر الكلال . يشير الفحص الى أن نمو شقوق الكلال المتعددة حدث بالقرب من سطح الطلاء وانتشرت الى داخل السبيكة بشكل بطيء وهذا واضح فيمن امتداد منطقة انتشار الشق لأكثر من نصف المقطع العرضي للسبيكة الاساس، مما يدل على التلاصق الجيد ما بين طبقة الطلاء والسبيكة الاساس والذي أبطأت من تكون وانتشار الشقوق داخل السبيكة . أظهرت المقاطع المنهارة للسبيكتين (A₃) و (A₅) أن منطقة نشوء وانتشار شقوق الكلال كانت ذات مساحة صغيرة جدا مقارنة بمنطقة الكسر التي أحتلت مساحة كبيرة من السبيكة الاساس ، مما يدل على أن عملية نشوء وانتشار شقوق الكلال كانت سريعة وعنيفة وهو دليل على عدم تحمل طلاءات هذه السبائك لإجهادات الكلال (شد – انضغاط) العمودية ، كما لوحظ أيضا أن شقوق الكلال كانت كثيرة وعريضة وخاصة في العينة (A₃) ، مما أدى الى تشقق طبقة الطلاء في نقاط متعددة من السبيكة وتساقطها ، كذلك الحال في العينة (A₅) نلاحظ أن زيادة شقوق الكلال نتيجة احمال الكلال العمودية أدى اندماجها وحدث فجوات أسفل طبقة الطلاء ، مما أدى أيضا الى سقوط أجزاء كبيرة من طبقة الطلاء [19][20] . ، وتلعب العيوب الموجودة بطبقة الطلاء كالمسامات ، الفجوات ، والتكتلات الطلائية دورا مهما في تركيز اجهادات الكلال في مناطق تكون هذه الشقوق ، حيث تعمل هذه العيوب كرافعات للإجهادات (Stress Raiser) تؤدي الى التعجيل في هذه الشقوق . أظهرت المقاطع المنهارة للسبيكتين (A₄) و (A₆) أن منطقة نشوء وانتشار شقوق الكلال كانت ذات مساحة كبيرة مقارنة بمنطقة الكسر النهائي التي كانت ذات مساحة صغيرة قياسا بالسبيكة الاساس ، مما يدل على أن عملية نشوء وانتشار شقوق الكلال كانت بطيئة نسبيا ، مما يدل على أن تحمل هذه الطلاءات لإجهادات الكلال (شد – انضغاط) ، كما لوحظ أيضا وجود فجوة كبيرة في منطقة نشوء الشق في العينة (A₆) والتي تنشأ نتيجة لتجمع الشقوق المجهرية واندماجها في هذه المنطقة وهي ظاهرة مشابهة لما حدث في السبيكة (A₃) حيث عانت السبيكتين من تساقط طبقة الطلاء نتيجة تكون هذه الفجوات ، كما لوحظ أيضا انفصال طبقة الطلاء عند منطقة الكسر النهائي . ومن الجدير بالذكر أنه تم

أيضا تمييز وجود فجوات في السبيكة المطلية (A₄) ولكن بحجم أقل ، مما يدل على أن معدل تكون الشقوق المجهرية وتجمعها في منطقة نشوء كانت أقل من تلك الملاحظة في السبيكة (A₆) .

الاستنتاجات Conclusion

- 1 – أظهرت نتائج اختبار الكلال الدوراني ، بأن عدد الدورات لغاية الفشل تقل تدريجيا مع زيادة الاجهادات العمودية المسلطة عليها لجميع العينات .
- 2 – أظهرت نتائج اختبار الكلال ، أن السبائك المطلية (A₁) ، (A₃) ، (A₄) ، (A₅) و (A₆) قد قللت من عمر الكلال مقارنة مع السبيكة الأساس غير المطلية (A₀) .
- 3 – أظهرت نتائج اختبار الكلال الدوراني ، بأن السبيكة المطلية (A₂) أبدت تحسنا جيدا في مقاومة الكلال ، حيث وجد أن مقدار التحسن في عمر الكلال ازداد بمقدار (11.717 – 57.540 %) عند تغير قيمة الاجهادات المسلطة عليها ضمن المدى (300 – 600 MPa) .
- 4 – الطبقة السطحية للطلاءات كانت متكونة من العديد من الترسبات والاطوار الثانوية والتي تعود الى أطوار النيكل والكروم والالمنيوم وهي ناتجة من التفاعل ما بين مكونات الطلاء والسبيكة الأساس عند درجات الحرارة العالية أثناء الطلاء والمعاملة الحرارية .
- 5 – أظهر فحص المجهر الالكتروني الماسح أن معظم الطلاءات الحرارية كانت غير متجانسة وخالية من العيوب والتشققات المجهرية مع بعض المسامات في أجزاء قليلة من طبقة الطلاء .

المصادر References

- 1- Jassim Ismael . K. , Ahmed S. Basil , 2019 , “ Pysical Properties of (Basalt-Ni) System by Thermal Spray Flame Technique “ , Journal of University of Babylon for Pure and Applied Science . Vol.(27),No(4).
- 2- د.اسماعيل خليل جاسم واخرون ، 2004 ، " تأثير مسافة الرش على خواص طبقة الطلاء " ، مجلة الهندسة والتكنولوجيا ، المجلد 23 ، العدد 5.

- 3-Mcgrann R.T.R., Greving, D.J., Shadley, J.R., Rybicki, E.F., Kruecke, Tl.T., Bodger, B.E., 1998 , Surface coating technology ,No. 59, p.108-109.
- 4- Saad Gh. Rifai, Edrees E. Khadeer , 2024 , “Study the effect of thermal spraying with various ceramic powders on the sliding wear of steel alloy (AISI 1020)” , Journal of Engineering Resistance and reviews , 51-59(1)1 .
- 5- د. اسماعيل خليل جاسم واخرون ، 2004 ، " دراسة تأثير المعاملات الحرارية على الخواص الكهربائية والمسامية لطبقات طلاء المؤلفات السيرميتية المحضرة بطريقة الرش الحراري " ، مجلة الفيزياء ، جامعة بغداد .
- 6- Vooreald, H.J.C. and Souza, R.C., Pigatin, W.L., Cioffi, M.O.M. , 2005, Evaluation of WC-17Co and WC-10Co-4Cr thermal spray coatings by HVOF on the fatigue and corrosion strength of AISI 4340 steel “ , v surface & Coatings Technology 190, p.155-164 .
- 7- Vooreald, H.J.C., Souza, R.C., Pigatin, W.L., Cioffi, M.O.M., v , 2005, “ Surface Coating Technology”, 190 .
- 8- Barbera-Sosa, J.G., Santana, Y.Y., Villalobos-Gutiérrez, C., CabelloSequera, S., Staia, M.H., Puchi-Cabrera, E.S., 2010, “Effect of spray distance on the corrosion-fatigue behavior of a medium-carbon steel coated with a Colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spray”, Surface & Coatings Technology 205, p. 1137–1144.
- 9- Ahmed, R., Hadfield, M., 2001 ,” Mechanisms of Fatigue Failure in Thermal Spray. Coatings”, JTTEE5 11, pp. 333-349.

10 - المولى ، يحيى عبدالكريم سليمان عبدالله ، 2009 ، " دراسة الكلال بطريقة الانحناء الدوار لسبيكة (AISI 304) المطلية بدرجات الحرارة العالية "، أطروحة دكتوراه، كلية العلوم – جامعة الموصل .

11- Aljowary, Saad Ghanim Rifai Mahmood. , 2024 ,” Study the effect of thermal spraying with various powders on the rotational fatigue behavior and sliding wear of a steel alloy. AISI1020”, M.Sc. Thesis, College of Science University of Mosul, Iraq.

12- La Barbera-Sosa, J. G., Santana, Y. Y., Villalobos-Gutiérrez, C., Cabello-Sequera, S., Staia, M. H., & Puchi-Cabrera, E. S. , 2010 , “Effect of spray distance on the corrosion-fatigue behavior of a medium-carbon steel coated with a Colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spray”, Surface and Coatings Technology, 205(4), 1137-1144

13- Bhatia, R., Singh, H., & Sidhu, B. S. , 2012 ,” Characterisation of 80% Cr₃C₂–20%(Ni-20Cr) Coating and Erosion Behaviour”, Asian Journal of Engineering and Applied Technology, 1(2), 5-12.

14- Bolelli, G., Candeli, A., Lusvarghi, L., Ravaux, A., Cazes, K., Denoirjean, A., and Bianchi, L., 2015 ,”Tribology of NiCrAlY+ Al₂O₃ composite coatings by plasma spraying with hybrid feeding of dry powder suspension”, Wear, 344, 69-85

15- Michalak, M., Sokołowski, P., Szala, M., Walczak, M., Łatka, L., Toma, F. L., and Björklund, S., 2021 ,”Wear behavior analysis of Al₂O₃ coatings manufactured by APS and HVOF spraying processes using powder and suspension feedstocks”, Coatings, 11(8), 879.

- 16- Rasidi Nawir , Soehardjono and Dewi Sri Murni , 2011 , “ Performance of Steel Structures Under Fatigue Cyclic Loading “, Volume 5, No. 3(Serial No.40), Journal of Civil Engineering and Architecture, ISSN 1934-7359 ,pp. 265-272.
- 17- Dayani Siavash Borhan , 2017 , “ Improvement of fatigue and corrosion-fatigue resistance of AZ31B cast alloy by cold spray coating and top coating “ , Master’s Degree in Mechanical and Mechatronics Engineering , Waterloo, Ontario, Canada .
- 18 – Barbera-Sosa J.G. La , Santana Y.Y. , Moreno E. , Cuadrado N. ,Renault P.O. , Bourhis E. Le , Staia M.H. & Puchi-Cabrera E.S. , 2010 , “ Effect of spraying distance on the microstructure And mechanical properties of a Colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spraying “ , Surface & Coatings Technology 205 pp. 1799-1806.
- 19- Costa M.Y.P. , Ventitti M.L.R., Cioffi M.O.H. , Voorwald H.J.C. , Guimaraes V.A. , and Ruas R. , 2011 , “ Fatigue behavior of PVD coated Ti-6Al-4V alloy “ , International Journal of Fatigue ,33, pp. 759-765.
- 20 - Alweendo Shatumbu Thomas, , Motoaki Morita, Kayo Hasegawa and Shinichi Motoda , 2021 , “Fatigue Properties of Hot-Dip Galvanized AISI 1020Normalized Steel in Tension–Compression and Tension–Tension Loading” , Materials 14, 7480.