

## Study of the Effect of Adding Nickel on the Properties of Rust-resistant Alloys

Dr. Youssef Samir Deeb\*

(Received 4 / 5 / 2024. Accepted 25 / 6 / 2024)

### □ ABSTRACT □

This research aims to determine the behavior of paint or coating systems on rust-resistant alloys during oxidation processes. The well-known stainless steel alloy type (321) was chosen, and to study aluminum and nickel-aluminum plating systems in one stage at standard atmospheric pressure and at 1000 °C. ) Using the thermal cycle method, X-rays were used to determine the structure of the paint and the resulting oxide products. Paint or varnish is usually used to promote the formation of a protective oxide crust. However, the results indicate that none of these coatings are completely resistant to oxidation, but the nickel-aluminum coating showed the greatest resistance to oxidation. This is due to the formation of an oxide layer (NiO) under the aluminized oxide layer (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), which improves oxidation resistance.

**Keywords:** Alloy steel – oxidation resistance.

**Copyright**



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

---

\* Doctor - Department of Design and Production Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University - Lattakia - Syria. [youssefsamirdeeb@gmail.com](mailto:youssefsamirdeeb@gmail.com)

## دراسة تأثير إضافة النيكل على خصائص السبائك المقاومة للصدأ

د. يوسف سمير ديب\*

(تاريخ الإيداع 4 / 5 / 2024. قُبِلَ للنشر في 25 / 6 / 2024)

### □ ملخص □

يهدف هذا البحث إلى تحديد سلوك أنظمة الدهان أو الطلاء على السبائك المقاومة للصدأ عند عمليات التأكسد، وقد تم اختيار سبيكة الفولاذ المقاومة للصدأ المعروفة نوع (321)، ودراسة أنظمة الطلاء بالألمنيوم ونيكل - ألمنيوم بمرحلة واحدة عند الضغط الجوي المعياري وعند درجة  $C^{\circ}$  (1000) وبطريقة الدورات الحرارية وتم الاستعانة بالأشعة السينية لتحديد بنية الطلاء ونواتج الأكاسيد المتكونة. يستخدم الطلاء أو الدهان عادة لتعزيز تكوين قشرة أكسيدية واقية. إلا أن النتائج تشير بأن أي من هذه الطلاءات لا تقاوم التأكسد كلياً لكن الطلاء بـ نيكل - ألمنيوم أظهر أكبر مقاومة للتأكسد. ويعزى ذلك إلى تكوين طبقة الأوكسيد (NiO) تحت طبقة الأوكسيد الألوميني (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) الذين يعملان على تحسين مقاومة التأكسد.

الكلمات المفتاحية: سبائك الفولاذ - مقاومة التأكسد.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

\* دكتور - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.  
youssefsamirdeeb@gmail.com

**مقدمة:**

عند تعرض السبائك لدرجات حرارية عالية قد يكون على حساب عمر استخدامها بسبب تلفها نتيجة تأكسدها السريع وخاصة عند وجود بعض مركبات الكبريت والكلور وغيرها.

**الدراسات المرجعية Literature review:**

[1] أكد (Salvatore) في عام (1972) أن طور (NiAl) طور مستقر وله درجة انصهار عالية.  
 [2] قام (Ali and Shankar) في عام (1994) بدراسة أمانة سبائك (18-7) وتأثير العناصر المضافة إلى السبيكة على حركية نمو الطلاء الألوميني إذ استخدم الأمانة بفعالية منخفضة (process activity low) ومعاملة حرارية بدرجة  $K^{\circ}$  (1273) باستخدام الأمونيوم فلورايد كمادة منشطة ومسحوق يحتوي على 50% wt (Al-Ni) (نسب متساوية من الألمنيوم والنيكل) ويفترتات زمنية  $(1-2)h$ ، حيث لاحظ أن التركيب الدقيق للطلاء يتألف من الطور (NiAl)، ولاحظ أيضاً أن قياسات الوزن المكتسب أظهرت وجود علاقة القطع المكافئ التي تنمو لحد  $h(2)$ ، وهذا يوضح أن معدل النمو قد تباطأ ولاحظ بأن الطبقة الداخلية تتخذ وضع الحاجز ضد الانتشار المتبادل وتقلل من حركة نمو الطلاء الألوميني كذلك تم اختبار تأثير مكونات السبيكة الأساس على تركيب ومكونات طبقة الطلاء من قبل العالم (Shahrour) في عام (1994)، إذ وجد أن زيادة تركيز الكوبلت والكروم في سبائك النيكل يؤدي إلى تقليل معدل الانتشار الداخلي. كما لاحظ بان أوطأ معدل اختزال لطبقة  $(Ni_2Al_3)$  لتشكيل (NiAl)،  $(Ni_3Al)$  يحدث في السبائك التي تحتوي على نسبة عالية من الكوبلت (Co).

على العموم فقد وجد هذا الباحث بالنسبة لسبائك (Cr-Ni) بأن زيادة محتوى الكروم في السبيكة يؤدي إلى تقليل الألمنيوم المكتسب في طبقة الطلاء بسبب كمية ترسبات الكروم الكبيرة في طبقة الطلاء، إن كمية الألمنيوم الواطنة في طبقة الطلاء تسمح بدورها بعملية الانتشار الخارجي للنيكل من السبيكة الأساس.

[3] قام (Roy and Seal) في عام (2000) بدراسة تأثير أكسيد السيريوم على سلوك التأكسد الدوري والتأكسد بدرجات الحرارة الثابتة (oxidation Isothermal) حيث قام بطلاء عدد من سبائك الفولاذ المقاوم للصدأ (321) ، 316 ، 304) وذلك بغمر العينات في خليط رقيق القوام من  $(CeO_2)$  ولاحظ بأن السبيكة (321) المطلية بأوكسيد السيريوم أبدت أفضل مقاومة للتأكسد وتتبعها السبائك على التوالي واستنتج بأن السبيكة (321) التي تبدي أفضل مقاومة للتأكسد كان نتيجة تشكيل  $(TiO)$ ،  $(FeTiO_3)$  عند نهاية أول دورة حرارية وذلك لأن السبيكة (321) هو النوع الوحيد الذي يحتوي على عنصر (T)، وأكد باحثون آخرون بأن سبيكة (Cr-Ni) أكثر كفاءة لمقاومة درجات الحرارة من سبيكة (Cr-Fe) وكذلك من المعروف أن الطلاء المزوج من كروم - ألمنيوم أو سيلكون - ألمنيوم له مقاومة عالية للتأكسد.

[4] قام (D.H.Xiao) وزملاؤه في عام (2001) بدراسة تأثير إضافة عنصر النحاس في الخواص الميكانيكية لسبيكة (Al-Cu-Mg-Ag) بنسبة % (4-8) Cu، وقد لاحظوا زيادة في مقاومة الشد من Mpa (434) إلى Mpa (559) عند درجة حرارة الغرفة ومن Mpa (141) إلى Mpa (228) عند درجة حرارة  $(300^{\circ}C)$  مع حدوث نقصان طفيف في الاستطالة. إن المقاومة العالية للسبيكة الحاوية على % (8) Cu سببها يعود إلى الكثافة العالية للترسبات من نوع  $(\theta-\Omega')$  ويزيد من استقرارية الطور  $(\Omega)$  لكن يقل حجمه بسبب تكون أطواراً ثانوية من  $(\theta)$  ذي التركيب الكيميائي  $(Al_2Cu)$  تتسبب في تقوية السبيكة. إن إضافة النحاس فوق حد ذوبانيته في الألمنيوم يتسبب بإفراط بالتقوية للسبيكة عند درجة حرارة الغرفة.

[5] قام (P.E.J.Rivera) وآخرون في عام (2004) بدراسة بتحليل التجمعات المتكونة في السبيكة التالية: (AL- Cu-Mg-Ag) قبل بدء عملية الترسيب فيها، أي في المراحل الأولية لعملية التعتيق بأستعمال المجهر المجسي (Three dimensional atom probe analyses)، وقد استنتجوا ما يأتي : بعد مرور (5) sec على عملية التعتيق للسبيكة عند  $180^{\circ}\text{C}$  تتكون تجمعات من (Mg-Ag) فقط غير واضحة المعالم ولا وجود لذرات النحاس في هذه التجمعات وبعد مرور (120)sec عند درجة حرارة  $180^{\circ}\text{C}$  تظهر التجمعات على شكل صفائح يصل تركيز النحاس فيها إلى % (30) وهذا يؤدي إلى ظهور الطور ( $\Omega$ ) ذي التركيب الكيميائي (Ag)  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  بشكل واضح، وهذا يشير إلى أن تكون التجمعات في المراحل الأولى هو السبب في عملية التخليق غير المتجانس للطور ( $\Omega$ ) في المراحل الأولية لتكونه إذ تكون التجمعات المتكونة من (Ag-Mg) كمواقع للتخليق. إن الطور ( $\Omega$ ) يحسن من الخواص الميكانيكية للسبيكة (Al-Cu-Mg-Ag) نتيجة لتوزيعه المنتظم في التركيب النهائي للسبيكة.

[6] قام (Wang Tao) وزملاؤه في عام (2007) بدراسة تأثير درجة حرارة وزمن التعتيق الاصطناعي على خواص الشد والقساوة لسبيكة الألمنيوم (7055) وكانت أعلى قيم قساوة ومقاومة شد للسبيكة عند التعتيق في درجة الحرارة  $^{\circ}\text{C}$  (120) لمدة (24)h.

[7] قام (D. Wang, D. R) وزملاؤه في عام (2008) بدراسة تأثير حالات التعتيق المختلفة (T4) تحت التعتيق، (T6) أفضل تعتيق، (T7) التعتيق المفرط و (High-Temperature Aging (HTA) - وهو تعتيق بمرحلتين مع تطبيق انفعال مسبق بمقدار % (5)- على خواص الشد ومقاومة تشقق التآكل الإجهادي لسبيكة (7050) وكانت أعلى مقاومة شد عند تطبيق معالجة (T6).

[8] قام (Ibrahim, M. F) وزملاؤه في عام (2014) بدراسة تأثير درجات حرارة وأزمنة التعتيق الاصطناعي ثنائي المراحل والمفرد في خواص الشد لسبيكة الألمنيوم (7075) وحصل على أعلى مقاومة شد للسبيكة بتطبيق التعتيق الاصطناعي المفرد.

[9] قام (Huang, Xing) وزملاؤه في عام (2015) بدراسة وأضاف الباحث % (0.1) زركونيوم و % (0.1) سكانيديوم للسبيكة (Al-5.42Zn-1.98Mg-0.3Cu) وبلغت مقاومة الشد الأعظمية (530) MPa عند التعتيق الاصطناعي في درجة الحرارة  $^{\circ}\text{C}$  (120) لمدة (24)h.

[10] قام (Mandal, P. K) وزملاؤه في عام (2017) بإضافة السكانيديوم (Sc (Scandium) لسبيكة الألمنيوم ذات التركيب (Al-6.5Zn -2.9Mg) وبلغت قساوة فيكرز للسبيكة (340) HV عند إضافة السكانيديوم بنسبة % (0.45)wt وتطبيق التعتيق الاصطناعي.

[11] قام (P. K. Rout, M. M. Ghosh) وزملاؤه في عام (2017) بدراسة تأثير حالات التعتيق المختلفة (T4) تحت التعتيق، (T6) أفضل تعتيق، (T7) التعتيق المفرط و (High-Temperature Aging (HTA) - وهو تعتيق بمرحلتين مع تطبيق انفعال مسبق بمقدار % (5)- على خواص الشد ومقاومة تشقق التآكل الإجهادي لسبيكة (7017) وكانت أعلى مقاومة شد عند تطبيق معالجة (T6).

[12] قام (RDrunka) وزملاؤه في عام (2023) بدراسة نظام طلاء معقد لتحسين مقاومة التآكل سبائك المغنيسيوم (AZ31) باستخدام أكسدة البلازما كهربائياً (PEO)، الانحلال الحراري للرش (SP) وجزأين طلاء. تم اختبار العينات للتآكل باستخدام طريقة القياس الوزني بالغمر في محلول كلوريد الصوديوم 3% لمدة أسبوع واحد والكتلة تم تسجيل الخسارة. تمت دراسة مورفولوجيا الطلاءات (PEO) و (SP) باستخدام (SEM)، والتحليل الكيميائي لطلاء (SP)

بواسطة (EDS). وقد وجد أن (30)Min من وقت الرش في عملية (SP) تسببت في حدوث تشققات سطحية في الطلاء. تم تطبيق الطلاء بأعداد متفاوتة من طبقات الطلاء التمهيدي والطلاء وطبقتين كل منهما أنتجت أفضل النتائج من حيث المقاومة للتآكل

### المشكلة العلمية للبحث :The scientific problem of research

تتلخص المشكلة العلمية للبحث بنقص مقاومة سبيكة الفولاذ المقاومة للصدأ المعروفة نوع (321) عند عمليات التأكسد، و بالتالي نقص عمر خدمتها، وبارتفاع ثمنها، عدا عن تكاليف الصيانة المرتفعة عند إصلاحها واستبدالها.

### أهمية البحث وأهدافه:

#### هدف البحث :The novelty of the search

بعد الاطلاع على العديد من الدراسات المرجعية كان هدف البحث:

تحسين مقاومة سبيكة الفولاذ المقاومة للصدأ المعروفة نوع (321) عند عمليات التأكسد وإطالة عمر السبيكة للتأكسد، من خلال التحكم بالأطوار المتكونة بعد عملية الطلاء الحصول على الطبقة الأوكسيدية الواقية.

#### أهمية البحث :Research Importance

تأتي أهمية هذا البحث من:

- ✓ تحديد سلوك أنظمة الدهان أو الطلاء على سبيكة الفولاذ المقاومة للصدأ المعروفة نوع (321) عند عمليات التأكسد، بما يتوافق مع حاجات الصناعات الحديثة المحلية ويحقق أهم المتطلبات التصميمية والتكنولوجية للتطبيقات الهندسية في مختلف القطاعات الصناعية.
- ✓ تقليل الوقت والمال المهدورين في أعمال الصيانة، وتحسين عمر المواد الهندسية المصنوعة من سبيكة الفولاذ المقاومة للصدأ المعروفة نوع (321) من خلال مقاومة نواتج الأكاسيد المتكونة.
- ✓ إغناء البحث العلمي الذي يتناول سلوك أنظمة الدهان أو الطلاء على سبيكة الفولاذ المقاومة للصدأ المعروفة نوع (321)، بحيث تتمكن من تطبيق ذلك على سبائك أخرى لاحقاً والإفادة منها في الصناعات الحديثة المحلية فيما بعد.

### طرائق البحث ومواده:

#### 1- سبيكة الفولاذ المقاومة للصدأ المعروفة نوع (321):

سبيكة واسعة الاستخدام تصنع منها الآلات الخارجية في الصناعات الكيماوية والفحم والبتروكيمياويات ذات المتطلبات العالية لمقاومة التآكل على حدود الحبيبات، والأجزاء المقاومة للحرارة من مواد البناء، والأجزاء التي تواجه صعوبات في المعالجة الحرارية، مثل أنابيب احتراق غاز نفايات النفط، وأنابيب عادم المحرك، وقذائف الغلايات، والمبادلات الحرارية، وأجزاء فرن التدفئة، وأجزاء محرك الديزل، وأوعية ضغط الغلاية، مركبات نقل المواد الكيماوية، ومفاصل التمدد، وأنابيب الفرن، والأنابيب الملحومة الحلزونية للمجففات، والطائرات.

#### 2- الجانب العملي في المخابر :The practical side in laboratories

##### (1) تحضير العينة:

تم تحضير العينة من سبيكة الحديد (فولاذ أوستينايتي) نوع (321) وبأبعاد  $(2 \times 1)$  Cm.



الشكل (1) عينات غير مطلية من سبيكة الحديد (فولاذ أوستينايتي) نوع (321) وبأبعاد  $(2 \times 1)$  Cm

تم تنظيف العينة لإزالة الشحوم تنظيفاً جيداً باستخدام بعض المحاليل الحمضية والقلوية والمذيبات العضوية، ثم وزنها بدقة وذلك باستخدام ميزان حساس في مخبر مقاومة المواد في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة تشرين موضح في الشكل الآتي:



الشكل (2) الميزان المستخدم في وزن عينات سبيكة الحديد (فولاذ أوستينايتي) نوع (321) وبأبعاد  $(2 \times 1)$  Cm

تم إجراء اختبارات التحليل الكيميائي في مخبر مقاومة المواد في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة تشرين للتحقق من النسب المئوية للعناصر الداخلة بتركيب السبيكة المعدنية المدروسة بواسطة جهاز التحليل الكيميائي (Foundry-Master) الموضح في الشكل الآتي:



الشكل (3) جهاز التحليل الكيميائي (Foundry-Master)

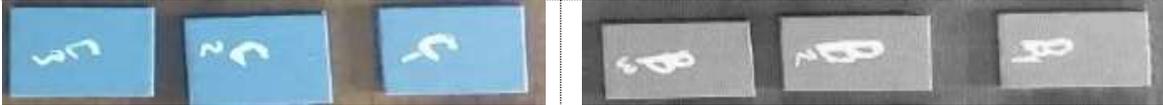
يبين الجدول (1) مكونات السبيكة نوع (321) :

الجدول (1) نسب مكونات سبيكة الفولاذ (321)

FE%	CR%	S%	MN%	NI%	C%	السبيكة (321)
متوازن	8.962	0.604	1.477	18.636	0.0544	الفولاذ المقاوم للصدأ

(2) الطلاء والأكسدة:

تمت عملية الطلاء باستخدام طريقة السمّنتة التي هي إحدى طرق الطلاء الانتشاري، في هذه العملية تم غمر النموذج المراد طلاؤه في مزيج يتكون من معدن الطلاء والمادة المنشطة التي عادةً تتكون من كلوريد الأمونيوم ( $NH_4Cl$ ) إضافة إلى مادة الألومينا. يوضع المسحوق والعينة المراد طلاؤها في بوتقة مغلقة. و ثم توضع البوتقة في فرن كهربائي مفرغ من الهواء بدرجة حرارة  $C^{\circ}$  (950-1000) ولمدة (2)h.



عينات مطلية من السبيكة نوع (321) مطلية بالأمونيوم

عينات مطلية من السبيكة نوع (321) مطلية بالنيكل والالمنيوم

الشكل (3) عينات غير مطلية من سبيكة الحديد نوع (321) مطلية بالنيكل والالمنيوم



الشكل (4) فرن المعالجة الحرارية

يبين الجدول (2) مكونات المسحوق المستخدم في الطلاء.

الجدول (2) نسب مكونات المسحوق المستخدم في الطلاء

NI%	AL%	NH4CL%	AL2O3%	M (مكونات المسحوق)
12.5	12.5	3	72	X (النسبة)

تتم عملية الأكسدة بتهيئة النماذج وذلك بتنظيف العينات تنظيفاً جيداً ثم توزن النماذج بميزان حساس. يسخن الفرن إلى درجة الحرارة المطلوبة  $1000^{\circ}\text{C}$  تدفع العينة إلى داخل الفرن، وبعد انقضاء الفترة الزمنية المطلوبة تخرج العينة من الفرن لتبرد حتى درجة حرارة الغرفة ويعاد وزنها مجدداً لحساب التغير في الوزن لوحدة المساحة، وهكذا تتكرر العملية طيلة الفترة التي تتعرض لها العينة للأكسدة. وقد تم أكسدة العينات لفترة (160) hr بطريقة الدورات الحرارية (Oxidation Thermal Cyclic).

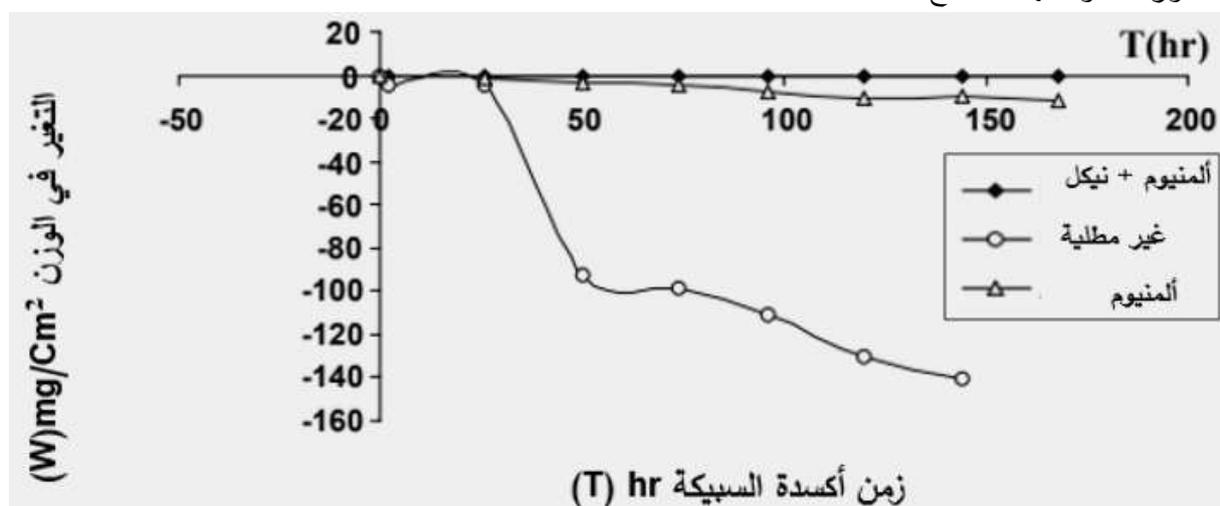


الشكل (6) جهاز الأشعة السينية (X) المستخدم

### النتائج والمناقشة:

النتائج:

يبين الشكل (6) والجدولين (3)، (4) النتائج التي تم الحصول عليها بعد اجراء عملية الطلاء والأكسدة للنموذج والأطوار المتكونة لهذه النماذج:



الشكل (6) العلاقة بين التغير في الوزن مع الزمن لأكسدة السبيكة المطلية بالألومنيوم والمطلية بالنيكل-ألومنيوم وغير المطلية.

يبين الجدولان (3)، (4) نتائج تحليل العينة باستخدام الأشعة السينية (X) بعد عملية الطلاء، وبعد عملية الأكسدة على الترتيب:

الجدول 3 : نتائج تحليل العينة باستخدام الأشعة السينية (X) بعد عملية الطلاء

HKL	الطور	الشدة	DA°	2θ
110	Ni3Al	VS	1.17	40.5
110	NiAl	VS	2.87	31
102	Ni3Al	W	2.01	45.2
018	NiAl	W	1.61	55

الجدول 4 : نتائج تحليل العينة باستخدام الأشعة السينية (X) بعد عملية الأكسدة

HKL	الطور	الشدة	DA°	2θ
111	NiO	S	2.41	47
200	NiO	VS	2.09	55
006	Al2O3	VW	3.78	29.8
111	NiAl	S	1.51	1.6
114	Al2O3	S	2.51	45.1

#### المناقشة:

يُلاحظ من الشكل (6) أن النموذج المطلي بـ المنيوم - نيكل، لم يفقد من الوزن إلا القليل حيث بلغ الفقدان في الوزن حوالي  $0.2 \text{ cm} / \text{mg}$  خلال  $150 \text{ h}$ . أكسدة وعند مقارنة هذا النموذج مع النموذج المطلي بالأمينيوم يُلاحظ أن فقدان الوزن في هذه العينة حوالي  $12 \text{ cm} / \text{mg}$  لنفس الفترة الزمنية من الأكسدة وهذا يؤكد أن العينة المطلية بالأمينيوم و نيكل هو أفضل بكثير من العينة المطلية بالأمينيوم فقط، حيث أبدت مقاومة أكبر للسبيكة وإطالة لعمر السبيكة للتأكسد. وبعد إجراء عملية التحليل السطحي للنموذج بطريقة الأشعة السينية (XRD) تبين الأطوار المتكونة بعد عملية الطلاء هي (NiAl)، (Ni3Al) وكما هو مبين في الجدول (3).

ومن دراسة نتائج الأشعة السينية بعد عملية الأكسدة للعينة المطلية بالأمينيوم و نيكل تبين أن الطبقة السطحية لهذه العينة هي الطور (Al2O3)، (NiO) زيادة إلى تكوين طور (NiAl) وكما هو موضح في الجدول (4). إن السبيكة (321) SS مصممة لتكوين القشرة الواقية (Cr2O3) حين تأكسدها وذلك لاحتوائها على  $18\% \text{ Cr}$ . وتنمو هذه القشرة بفعل انتشار الكروم باتجاه القشرة الخارجية ويسبب ذلك في تناقص تركيز الكروم في المنطقة بين السبيكة والأكسيد وبالتالي تكون أكاسيد ثنائية غير مستقرة (FeCr2O4)، مما يسهل انتشار أيونات الحديد نحو الخارج لتكوين أكسيد (Fe3O4) أسفل القشرة الواقية ويصاحب ذلك زيادة في معدل تأكسدها. وبهذه الآلية سوف ينمو الأكسيد مع زيادة زمن التعرض، ومع الزيادة الحاصلة في سمك الأكسيد سوف يتعرض إلى الإجهادات الحرارية والميكانيكية وسببه اختلاف معاملات التمدد. وفي كثير من الأحيان يصيبها التشقق (Cracking) فيخلق ممر سهلاً لدخول الأوكسجين نحو السبيكة ويؤكسد عناصرها داخليا فيحدث التأكسد الداخلي (oxidation Internal) ومع تساقط

القشرة الخارجية ( $Cr_2O_3$ ) تتزايد معدلات التأكسد بشكل مطرد ويرافق ذلك استنزاف لعناصر السبيكة، ومما يزيد الحالة سوءاً هو تساقط القشرة الواقية بعد تعرضها لكل دورة حرارية فتزداد سرعة الانهيار. كما هو واضح في الشكل (6) بأن التناقص في الوزن بعد (150) h بلغ ما يقرب  $cm/mg$  (140) هذا بالنسبة للسبيكة غير المطلية.

أما بالنسبة للسبيكة المطلية بالألمنيوم فيمكن ملاحظة التناقص بالوزن والذي لا يزيد عن  $cm/mg$  (12) إن الهدف من الطلاء هو الحصول على الطبقة الأوكسيدية الواقية ( $Al_2O_3 - \alpha$ ) وتتكون هذه الطبقة نتيجة الألفة العالية بين الألمنيوم والأوكسجين ويمكن تصنيف أكاسيد الألمنيوم إلى نوعان. الأول هو من النوع المستقر ( $Al_2O_3 - \alpha$ ) والذي يمثل الطبقة الواقية والأخر غير مستقر وهو من نوع ( $Al_2O_3 - \gamma$ ) وهذا الأوكسيد لا يخضع لقوانين الترموديناميك ويتقشر بسهولة ويتكون عادة في المراحل الأولية من عملية الأكسدة وهذا يؤدي إلى تناقص في الوزن خلال المرحلة الأولية، ولكن يتحول هذا الأوكسيد مع زيادة الزمن إلى النوع الواقية ( $Al_2O_3 - \alpha$ )، ومعنى ذلك أن تكوين قشرة خارجية تغطي كامل السطح قد تحتاج إلى وقت طويل وقد يحدث ذلك خلال التأكسد بأسلوب الحرارة الثابتة (Isothermal) ولكن باستخدام أسلوب الدورات الحرارية (cyclic thermal) إن هذه القشرة لا يكتمل نموها خلال مدة الدورة. وهذا ما يفسر تناقص الوزن باستمرار.

وكما هو معلوم، فبعد كل دورة من تكوين الأوكسيد وتساقطه سينفذ كمية أكبر من الألمنيوم إلى الحد الذي لا يمكن تكوين هذه القشرة الواقية. لذا فإن تساقط القشرة الخارجية للأوكسيد ( $Al_2O_3$ ) أدى إلى الانهيار السريع للسبيكة إذ بلغ خلال (150) h وبالمقارنة مع السبيكة غير المطلية من الشكل (6) يتضح مقدار الحماية التي وفرتها طبقة الطلاء الألوميني للسبيكة وعند مقارنتها معاً مع السبيكة المطلية بـ نيكل - المنيوم في درجة حرارة  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  يُلاحظ أن فقدان وزنها لا يتجاوز  $0.2\text{ } mg/cm^2$  ومن خلال ما أكدته نتائج فحص حيود الأشعة السينية جدول (3) وجود الطور الرئيسي الغني بالنيكل ( $Ni_3Al$ ) في طبقة الطلاء الخارجية، وإن سبب تكون هذا الطور هو أن انتشار الألمنيوم أسرع من انتشار النيكل، وذلك لأن نصف قطر ذرة الألمنيوم أصغر من نصف قطر ذرة النيكل، وهذا يجعل الألمنيوم قادراً على اختراق البنية البلورية للسبيكة أكثر من النيكل. كما أن النتائج التي تم الحصول عليها من تحليل الأشعة السينية تتوافق مع كثير من الدراسات التي تؤيد أن طور ( $NiAl$ ) طور مستقر وله درجة انصهار عالية وهذا يتفق مع الدراسات المرجعية، كذلك فإن الدراسات تشير إلى أن طور ( $Ni_2Al_3$ ) هو الطور المتكون عند درجات حرارية منخفضة مع نشاط عالي للألمنيوم فأن الطور ( $NiAl$ ) الغني بالألمنيوم هو الطور المتكون إذ إن درجة الحرارة العالية المستخدمة كافية لتحويل طور ( $Ni_2Al_3$ ) إلى طور ( $NiAl$ ) ومن خلال فحص السبيكة بعد عملية الأكسدة نلاحظ من الجدول (4) أن الأطوار الرئيسية المتكونة هي الألومينا ( $Al_2O_3$ ) وأوكسيد النيكل ( $NiO$ ). وهكذا يتبين أن القشرة الأوكسيدية ( $Al_2O_3$ ) استطاعت توفير الحماية للنموذج المطلي. أي أن العينة المطلية بـ نيكل - ألمنيوم وبدرجة حرارة عالية  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  قد كونت قشرة أوكسيدية واقية، وفرت الحماية طيلة مدة الأكسدة بحيث لم تفقد من وزنها شيء يذكر بالمقارنة مع السبيكة المطلية بالألمنيوم وغير المطلية، ويمكن تفسير ذلك على أن النيكل يتأكسد بمعدل أعلى من بقية العناصر مما يؤدي إلى تكون أوكسيده قبل غيره من الأكاسيد على سطح السبيكة في المرحلة الأولية من التعرض. يتبين من ذلك أن أوكسيد النيكل ( $NiO$ ) قد حسن من التصاق قشرة الألومينا مع السبيكة نتيجة وجود نوع من أنواع الربط بين القشرة والسبيكة.

لذلك يمكن القول أن الطور المتكون بعد الطلاء يتحكم بتكوين نوع الأوكسيد ومعدلات تكونها في المراحل الأولية من التعرض وهذا بدوره يلعب دوراً مهماً فيما يعقبه من الأكاسيد المتكونة في المراحل التالية وهي التي تحدد مدى مقاومته

في نهاية الأمر. وفي كل الأحوال فإن هذا النظام من الطلاء قد وفر للسبيكة مقاومة جيدة للتأكسد عند مقارنته مع العينة غير المطلية أو حتى المطلية بالألمنيوم فقط.

### الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال ما تقدّم في هذه الدراسة، يمكن استنتاج ما يأتي:

- ❖ أن العينة المطلية بالألمنيوم ونيكل هو أفضل بكثير من العينة المطلية بالألمنيوم فقط حيث أبدت مقاومة أكبر للسبيكة وإطالة لعمر السبيكة للتأكسد. وبعد إجراء عملية التحليل السطحي للنموذج بطريقة حيود الأشعة السينية (XRD) تبين الأطوار المتكونة بعد عملية الطلاء هي بالدرجة الأساس (NiAl), (Ni3Al).
- ❖ أن طور (Ni2Al3) هو الطور المتكون عند درجات حرارية منخفضة مع نشاط عالي للألمنيوم فإن الطور (NiAl) الغني بالألمنيوم هو الطور المتكون إذ إن درجة الحرارة العالية المستخدمة كافية لتحويل طور (Ni2Al3) إلى طور (NiAl).

❖ إن الطور المتكون بعد الطلاء يتحكم بتكوين نوع الأوكسيد ومعدلات تكونها في المراحل الأولية من التعرض.

### التوصيات والمقترحات للأعمال المستقبلية Recommendations and proposals for future work:

من خلال ماتقدّم نوصي بما يأتي:

- ✚ إجراء الدراسة بشكل حاسوبي للتنبؤ بالنتائج التجريبية لاحقاً، والاستفادة من النموذج الحاسوبي ومن عملية المحاكاة في إعطاء تقييم أولي واختصار الوقت والتكلفة.
- ✚ إجراء دراسة تجريبية لسلوك أنظمة الدهان المختلفة على مختلف أنواع السبائك المعدنية المقاومة للصدأ والتآكل الإجهادي.
- ✚ استخدام السبيكة المطلية بالألمنيوم ونيكل هو أفضل بكثير من السبيكة المطلية بالألمنيوم فقط، لأنها تعطي نتائج جيدة من حيث المقاومة وعمر الخدمة.
- ✚ إتباع وتنفيذ استراتيجيات الصيانة الدورية الوقائية للمواد الهندسية المصنوعة من سبيكة الفولاذ نوع (321)، والانتباه عند أدائها للعمل، ومعالجة الأخطاء عندما تظهر بأسرع ما يمكن، بغرض خفض تكلفة الصيانة المستقبلية وتقليل الهدر، وتحسين العمر الاستثماري وتحقيق اقتصادية عالية.

### References:

- [1] Salvatore, J., 1972. " *the super alloy*", ed.by C.T. Sims and W.C Hagel, John Wiley , New york , pp. 341 – 368.
- [2] Shankar, R. and Ali, V ., 1994. " *the effect of diffusion barrier formation on the kinetics of aluminizing*". Journal of Materials Science. 29 (20), pp. 5424 –5428.
- [3] Seal, S. and Roy, K., 2000. " *ceria-based high – temperature coatings for oxidation prevention*". metals and material society.52(1), pp.1-7.
- [4] D.H.Xiao, J.N.Wang, S.P.Chen, D.Y.Ding " *Effect of Cu Content on the Mechanical Properties of An Al-Cu-Mg-Ag Alloy*" Shanghai Jiao Tong University, China 2001.
- [5] P.E.J.Rivera " *Tailoring of Oswald ripening behavior in multi-component Al-alloy*" Scripta Materialia, December 2004, P.708.
- [6] W. Tao, Y. Z. Min, S. Kai, L. Jie, and H. J. Wu, " *Single-aging characteristics of 7055 aluminum alloy*," Trans. nonferrous Met. Soc. china, vol. 17, 2007.

- [7] D. Wang, D. R. Ni, and Z. Y. Ma, “*Effect of pre-strain and two-step aging on microstructure and stress corrosion cracking of 7050 alloy*,” Mater. Sci. Eng. A, vol. 494, pp. 360–366, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2008.04.023.
- [8] M. F. Ibrahim, A. M. Samuel, and F. H. Samuel, “*A preliminary study on optimizing the heat treatment of high strength Al-Cu-Mg-Zn alloys*,” Mater. Des., vol. 57, pp. 342–350, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.11.078.
- [9] X. Huang, Q. Pan, B. Li, Z. Liu, Z. Huang, and Z. Yin, “*Microstructure, mechanical properties and stress corrosion cracking of Al-Zn-Mg-Zr alloy sheet with trace amount of Sc*,” J. Alloys Compd., vol. 650, pp. 805–820, 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.08.011. vol. 1, no. 6, pp. 12–17, 2013.
- [10] P. K. Mandal, R. Anant, R. Kumar, and V. M. R. Muthaiah, “*Effect of scandium on ageing kinetics in cast Al-Zn-Mg alloys*,” Mater. Sci. Eng. A, vol. 696, no. February, pp. 257–266, 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.04.067.
- [11] P. K. Rout, M. M. Ghosh, and K. S. Ghosh, “*Microstructural, mechanical and electrochemical behaviour of a 7017 Al-Zn-Mg alloy of different tempers*,” Mater. Charact., vol. 104, pp. 49–60, 2015, doi: 10.1016/j.matchar.2015.03.025.
- [12] R Drunka, P Iesalniece, I Steins, L Grase , T V Eiduks , K Savkovs and I Blumbergs “*Complex coating system for improving corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy*” ,Mater. Charact., [Volume 36](#), August 2023, 106639