دراسة خواص طبقات الطلاء المنتجة بالرش بالقوس الكهربائي

د.محمد جاسم كاظم* ، هالة سلمان حسن* و د.اسماعيل خليل جاسم**

تاريخ التسلم: ٢٠٠٤/٥/٣١
تاريخ القبول: ٢٠٠٤/١١/٢٢

الخلاصة

أجريت عملية الرش بطريقة القوس الكهربائي لسلك من سبيكة البرونز الفسفوري (Cu-15% Sn-0.65P) على قاعدة من الصلب متوسط الكاربون (0.4%C) . تم دراسة تأثير آلية تشكيل طبقات الطلاء على بنيتها المجهرية وباقي خواصها المتمثلة بخشونة وصلادة طبقة الطلاء بالاضافة الى الاطوار الناتجة.

لقد تم التوصل من خلال التحليل الدقيق لنتائج البنية المجهرية لطبقات الطلاء وفحوصات الخشونة والصلادة لسطح طبقة الطلاء والاطوار الناتجة الى ان الطلاءات الناتجة بعمليات الرش بالقوس الكهربائي للبرونز الفسفوري هي عبارة عن تركيب من الطبقات المتجمدة تجمداً سريعاً والتي تكون مساحة التلامس الحقيقية بينها محدودة.مما يؤدي الى خشونة سطحية عالية نسبيا وانخفاض في قيم الصلادة فيما لم تظهر نتائج حيود الأشعة السينية حصول تغيير في الاطوار بعد اجراء عملية الرش.

Abstract

The spraying process has been applied by spraying of Cu-15%Sn-0.65% P wire on a medium carbon(0.4%). The effect of the mechanism of lamella formation on the microstructure features and other properties such as roughness, hardness and phases formation,has been studied.

It has been concluded from the detailed analysis of microstructure of the coated layers that the layers formed are produced by rapid solidification. The real surface contact between the lamella is limited .This is resulted in increasing surface roughness and dicreasing hardness. X-ray diffraction data has not shown any change in phases formed after spraying process.

مقدمة

تعد عملية الطلاء الغطائي بالرش الحراري من اهم طرائق حماية أسطح المواد الهندسية عن طريق الحصول على توافقية في خواص السطح الخارجي والكتلة الأساس لغرض تحسين أداءها في مدى واسع من التطبيقات الصناعية[١،٢،٣]. تختلف عملية الرش بالقوس الكهربائي عن باقي طرائق الرش الأخرى في كونها تستخدم عادة سلكين معدنيين موصلين كمادة للطلاء ولهذا فهي في الغالب طريقة مصممة للرش الحراري للسبائك[٤،٥]. يستخدم التيار الكهربائي لتوليد الطاقة الحرارية اللازمة لصهر المواد.حيث يمثل السلكين القطبين اللذين يستهلكان بشكل مستمر بسبب انصهار نهايات الأسلاك الذي يحدث عند مرور القوس الكهربائي بينهما. بينما يحدث غاز التذرية قصا في القطرات المنصهرة ويحملها باتجاه السطح المحضر للمادة الأساس[٦، ٧].حيث تصطدم به بسرعة عالية جدا تصل إلى ٢٥٠ m/sec .يكون الترابط بين غطاءات الرش الحراري بالدرجة الأساس هو تشابك ميكانيكي بين الدقائق المذراة وسطح المادة الأساس.

يجب ان يخشن السطح كإحدى خطوات التحضير للحصول على افضل تلاصق وحالما يغطي الطلاء سطح المادة الاساس بشكل كامل فان مادة الطلاء تتلاصق مع بعضها. تشكل السبائك المرشوشة ترابطا معدنيا مع المواد الاساس المعدنية. تمتاز هذه الطريقة بمعدلات ترسيب عالية مقارنة مع باقي عمليات الرش الحراري تصل الى 40 kg/hr مما يجعل منها طريقة اقتصادية نسبيا في الاستعمال. كما تتميز طبقات الطلاء الناتجة بقوة تلاصق وتماسك عالية مقارنة مع طرائق الرش الأخرى على الرغم من احتوائها على مسامية عالية [٨، ٩].

تناولت العديد من البحوث والدراسات عمليات الطلاء بالرش الحراري بمختلف انواعه وخواص طبقات الرش الناتجة وامكانية التحكم في هذه الخواص فقد قام الباحثان Safai و Herman [١٠]

* قسم هندسة الانتاج والمعادن / الجامعة التكنولوجية
** وزارة العلوم والتكنولوجيا

https://doi.org/10.30684/etj.24.1A.13
2412-0758/University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq
This is an open access article under the CC BY 4.0 license http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

بدراسة البنية المجهرية وطريقة تشكيل دقائق الطبقة الاولى لطلاءات الالمنيوم المرشوشة بالبلازما باستخدام المجهر الالكتروني الماسح والنافذ وترابط هذه الدقائق بالسطح الاساس. اظهرت الدراسة ان هذه الدقائق تتكون من حبيبات تنمو باتجاه موازي لانسياب الحرارة. وعند استمرار تشكيل طبقات الطلاء فأن الاتجاهية في نمو الحبيبات تختفي بسبب نقصان معدلات التبريد بشكل ملحوظ. كما قام الباحثان بدراسة تأثير معلمات الرش (المسافة والسمك) في المسامية الناتجة في طبقات الطلاء. وتوصلا الى ان مسافة الرش هي العامل الاكثر تأثيرا على كمية المسامية الكلية وان الشكل السائد للمسامية هي المسامات الطولية الممتدة بين الدقائق باتجاه يوازي سطح طبقات الطلاء مما يؤدي الى تقليل ربط التماسك بين الدقائق وانخفاض الخواص الميكانيكية للطلاء.

كما تمت دراسة تأثير معلمات عملية الرش بالقوس الكهربائي في درجة حرارة دقائق الرش المنصهرة وخواص طبقات الرش من قبل Vakhalin وجماعته [١١] وعن طريق رش سبائك الالمنيوم على اساس من سبائك الالمنيوم. وقد وجد انه عند زيادة درجة حرارة الدقائق المنصهرة فأن ذلك يقود الى زيادة كلا من قوة التلاصق والكثافة للطلاء. كما درس الباحثان Yang و Kim [١٢] مشكلة انسياب الحرارة الى السطح الاساس ولكن في عمليات الاكساء بالرش بالقوس الكهربائي بتمريرات متعددة لمسدس الرش على سطح المادة الاساس. تم قياس تغير درجات الحرارة بأستعمال مزدوج حراري مثبت الى سطح المادة الأساس وكذلك تم نمذجة العملية باستخدام الطرائق العددية. وقد بينت النتائج امكانية السيطرة على درجة حرارة السطح الأساس تحت درجة حرارة معينة خلال تمريرات الرش لمنع حصول تحولات طورية على سطح المادة الأساس وذلك عن طريق السيطرة على الفترة الانتقالية بين تمريرات الرش والتي تنخفض خلالها درجة حرارة السطح. وكذلك أجرى الباحثان Miller و Kaiser [١٣] دراسة تأثير استخدام غاز خامل مثل الاركون أو النتروجين كغاز تذرية بدلاً من الهواء عند أجراء عملية الرش الحراري بالقوس الكهربائي للألمنيوم باستخدام الصلب الواطئ الكربون كقاعدة أساس. ووجدا انه عند التذرية بالهواء فأن ٤٥% من مادة الطلاء تُفقد في الأكسدة والتبخير لمادة الطلاء في منطقة القوس او في أثناء الطيران علاوة على اندفاع جزء من الدقائق خارج مجرى الرش وان استخدام الغاز الخامل يحسن من كفاءة الطلاء .

المواد المستخدمة

استخدم في هذا البحث الصلب متوسط الكربون (0.4%C) كقاعدة للطلاء وعلى شكل أقراص بقطر 18mm وبسمك 6mm. وكانت مادة الطلاء من سبيكة البرونز الفسفوري (Phosphor bronze) المثبت تحليلها الكيماوي في جدول١وهي على شكل سلك بقطر 1.6mm.

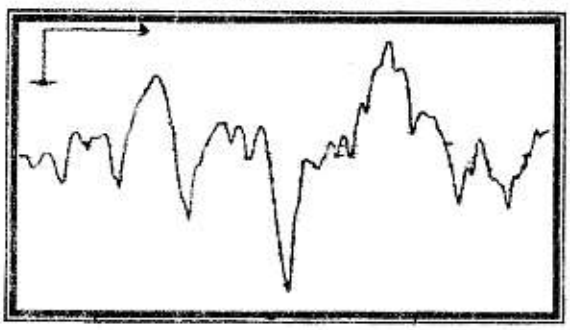
جدول ١ التحليل الكيماوي لمادة الطلاء

Element	Wt%
Sn	١٥,١
P	٠,٦٥
Cu	٨٤,٢٥

قبل أجراء عملية الرش تم تحضير اسطح قواعد الطلاء بشكل مناسب لانجاح عملية الطلاء ولغرض تحسين الربط الميكانيكي بين طبقة الطلاء وسطح المادة الأساس. تم غسل العينات بالماء المقطر والكحول وتجفيفها لإزالة الدهون والأوساخ من العينة ومن ثم أجريت عملية العصف الحبيبي (Grit blasting) لزيادة خشونة السطح العلوي للنماذج. تم استخدام حبيبات من كاربيد السليكون في عملية العصف وبمعلمات العصف المبينة في جدول ٢ والتي أعطت متوسط قيمة خشونة Ra= 8.5μm. يوضح الرسم البياني في شكل ١ الخشونة السطحية الناتجة . بعد ذلك تم أجراء تنظيف العينات بكحول الايثانول اظافة الى الامواج فوق الصوتية (Ultrasonic) .

جدول ٢ معلمات عملية العصف الحبيبي.

حجوم الحبيبات المستخدمة	٢mm ← 500μm
ضغط العصف	٥bar
زاوية العصف	٩٠°
مسافة العصف	٥cm
زمن العصف	15 sec



أجريت عملية الطلاء بالرش الحراري باستخدام منظومة الرش بالقوس الكهربائي نوع LG-200/H المنتجة من قبل الشركة السويدية OSU- MAS. وأجريت عملية الرش بمعلمات رش ثابتة. يوضح جدول 3 معلمات عملية الرش المستخدمة.

جدول 3 معلمات عملية الرش.

ضغط هواء التذرية (P_{air})	4 bar
ضغط هواء التغذية للسلك (P_{wire})	2 MPa
الفولتية (V)	25 Volt
السرعة الانتقالية (S)	6m/min
مسافة الرش	20 cm
عدد التمريرات	4

استخدم المجهر الضوئي لغرض فحص ودراسة طبقات الطلاء والاطوار المتكونة فيها والبنية الدقيقة . تمت دراسة المقطع العمودي مرة بعد أجراء عمليات التحضير وبدون اظهار البنية المجهرية لفحص الاطوار الناتجة وتقييم الحد الفاصل ومرة بعد اظهار كلا من طبقة الطلاء والسبيكة الأساس لدراسة البنية الدقيقة لطبقة الطلاء وتوزيع الأطوار المتكونة خلالها. تم تقطيع عينات الطلاء باستخدام جهاز القطع السلكي (Wire cut) لتجنب تأثر طبقة الطلاء ومن ثم أجراء إسناد على البارد للعينات المقطوعة. ثم تم تحضيرها بالطرق التقليدية مع مراعاة تسليط ضغط واطئ في أثناء عمليتي التنعيم والصقل لتجنب حدوث تغيير في البنية المجهرية للطلاء أو انفصال بعض الدقائق المرشوشة. استخدمت في عمليات التحضير أوراق سنفرة بدرجات مختلفة تتراوح ما بين ١٢٠ و١٠٠٠. ومعجون الماس بدرجة نعومة تصل الى 0.25 µm. ولغرض إظهار التركيب الدقيق لطبقة الطلاء تم استخدام محلول إظهار من كلوريد الحديديك الكحولي المكون من ٥ غم $FeCl_3$ و٩٥ مللتر كحول و 2مللتر HCl. بينما استخدم محلول إظهار من النيتال (Nital) بنسب حجمية ٢% حامض النتريك HNO_3 و ٩٨% كحول لإظهار البنية الدقيقة للمعدن الأساس.

تم أجراء فحص صلادة روكويل السطحية (Rockwell Superficial Hardness) نوع HR15T.ولاجل التعرف على الاطوار المتكونة لمادة الرش المستخدمة والتحولات الطورية التي حدثت بعد عملية الرش تم استخدام جهاز حيود الاشعة السينية (X- ray Diffractiometrs).

النتائج والمناقشة

١- البنية المجهرية للمواد المستخدمة.

يلاحظ من الفحص الدقيق للبنية المجهرية لسبيكة البرونز الفسفوري (Cu-15%Sn-0.65%P) التي يتكون منها سلك الطلاء (شكل 2-a) ونتائج حيود الاشعة السينية ان تركيب السبيكة يتكون من دقائق الطور ε (CuSn) بنسبة قليلة في أرضية المحلول الجامد α. يضاف الفسفور للسبيكة Cu-Sn بنسبة قليلة (0.65%) كعامل مختزل مزيل للأوكسجين ولتقليل قوى الشد السطحي للحصولعلى التصاقية عالية مع الصلب. يبين الشكل 2-b البنية المجهرية للصلب والتي هي عبارة عن بيرلايت وفرايت وبكسر حجمي متقارب.

٢- البنية المجهرية لطبقات الطلاء

يوضح الشكل ٣ البنية المجهرية لطبقات الطلاء بالرش بالقوس الكهربائي. حيث يتضمن التركيب المثالي لطبقة الطلاء المنتجة بعمليات الرش بالقوس الكهربائي بنية مجهرية طبقية من قطرات مسطحة ومتجمدة على شكل شرائح موجية متراكبة فيما بينها ناتجة عن اصطدام مجرى دقائق السلك المنصهر والتام الانصهار بالدرجة الرئيسة بالسطح الاساس.

تعتمد البنية المجهرية لطبقات الطلاء على الطريقة التي تسطحت فيها القطرات وتجمدت بعد الاصطدام. لذلك فأن العوامل الرئيسة التي أثرت عليها هي درجة الحرارة والسرعة والتوزيع الحجمي للدقائق والتي تتغير بصورة مستمرة خلال انتقال الدقائق المنصهرة باتجاه سطح قاعدة الطلاء. وأن التغيير في البنية المجهرية الناتجة هو دالة لدرجة حرارة وسرعة الدقائق في لحظة الاصطدام عند مختلف مناطق السطح الصلب. ولأن الخواص المختلفة تعتمد بصورة مباشرة على البنية المجهرية لطبقة الطلاء الناتجة فقد تحدد السلوك الميكانيكي لطبقات الطلاء الناتجة بالعوامل السابقة. اذ انه يعتمد بشكل كبير على درجة التماس بين طبقات الطلاء نفسها وبين طبقة الطلاء والسطح الاساس [14].

اوضح الفحص الدقيق للبنية المجهرية وجود العيوب التقليدية للرش بالاجواء الاعتيادية والتي تمثل المسامية الكبيرة والصغيرة وطبقة الاوكسيد المحيطة بالاطوار الناتجة التي هي طور المحلول الجامد (α) لمادة الطلاء المستخدمة (البرونز الفسفوري) بالدرجة الاساسية ويكون على

شكل شرائح مسطحة تأخذ شكلا موجيا وذات لون فاتح وكذلك الطور ε المتوزع بصورة غير منتظمة. تصل النسبة الحجمية للمسامية في طبقات الطلاء الى ٢٠% او أكثر اعتمادا على ظروف ومعلمات عملية الرشد[14]. يوضح شكل ٤ المسامية المتكونة في طبقات الطلاء والتي تكون على نوعين، المسامات الخشنة المتسببة عن العيوب في بنية الطلاء والناتجة عن الملئ غير الكامل للفراغات بين الدقائق المترسبة سابقا أثناء عملية الرش. ينتج هذا النوع من المسامية بسبب وجود كمية من الدقائق المرشوشة تكون غير تامة الانصهار عند الوصول الى سطح الصلب. والمسامات الناعمة التي تكون على شكل فجوات صغيرة محصورة كمناطق تلامس غير مثالي بين الطبقات خلال عملية تشكيل الطلاء والتي تعزى الى معلمات عملية الرش نفسها.

يلاحظ كذلك في طبقات الطلاء وجود بعض الدقائق غير المنصهرة من مادة الطلاء والموزعة بصورة غير منتظمة والتي تنتقل من الحافة الخارجية للرش بسبب درجة حرارتها وسرعتها الأقل من درجة حرارة وسرعة دقائق مركز الرش. لذلك لا تتماسك هذه الدقائق مع السطح الأساس عند اصطدامها به بل ترتد عنه لكنها تحبس إليه عن طريق انسياب الدقائق المنصهرة حولها مما يجعلها تشكل مناطق عيوب داخل الغطاء المترسب. يوضح الشكل ٥ لمقطع عمودي في عينة الطلاء التشويه الحاصل للتركيب الطبقي للطلاء نتيجة الدقائق غير المنصهرة.

ترتبط نسبة كل من الاطوار السابقة وتوزيعها داخل طبقات الطلاء بشكل مباشر بتغيير معلمات عملية الرش. يوضح الشكل ٦ مقطعا عموديا في عينة الطلاء بعد اجراء عمليات التحضير عليها وطبيعة الحد الفاصل بين طبقة الطلاء والسطح الاساس الناتج عن معلمات رش مناسبة(جدول ٣)[14]. يلاحظ امكانية الحصول على طلاءات معدنية بالتصاقية عالية بأستخدام عمليات الرش بالقوس الكهربائي نسبة الى باقي طرائق الرش الحراري الأخرى[6]. تتأثر قوة التلاصق والتماسك لطبقات الطلاء بشكل مباشر بنسب الاطوار السابقة.

تمتاز طلاءات الفسفور برونز المنتجة بعمليات الرش الحراري بكونها طلاءات ذات معامل تقلص واطيء ومحتوى اوكسجيني واطيء والتصاقية عالية بالسطح الاساس[14]. لذلك يلاحظ بشكل عام من دراسة البنية المجهرية لطبقات الطلاء وتحديد الكسر الحجمي للمسامية انخفاض المسامية وحدوث تسطيح عالٍ نسبيا لدقائق الرش. يعود ذلك الى تأثير وجود عنصر الفسفور في سبيكة الطلاء والذي يعد عاملاً مختزلاً مزيلاً للأوكسجين مما يزيد من عملية الترطيب بين دقائق الطلاء نفسها وبين طبقات الطلاء والمادة الاساس.

٣- الخشونة السطحية

ترافق طلاءات الرش بالقوس الكهربائي خشونة سطحية عالية نسبيا وسطح معتم. يوضح الشكل٧ السطح العلوي لطبقة الطلاء بقوة تكبير منخفضة والخشونة السطحية الناتجة والتي تكون بحدود 9±2 μm اعتمادا على المتغيرات المستخدمة في عملية الرش.

٤- الصلادة

تكون قيم الصلادة المقاسة لطبقة الطلاء بحدود 50 HR15T وتتباين هذه القيم بين منطقة وأخرى لنفس الأنموذج ويصل مقدار التباين بحدود ±3 بمقياس HR15T. وهذا ناتج عن الاختلاف في شكل وتوزيع المسامية والأطوار الناتجة داخل طبقات الطلاء كما هو واضح في الشكل٣ . الاختبار بشكل عام يعطينا قيمة أوطأ للصلادة مقارنة مع صلادة السلك والذي تكون قيمة صلادته ٧٨ بمقياس HR15T وذلك بسبب المسامية في طبقات الطلاء.

٥- الأطوار الناتجة

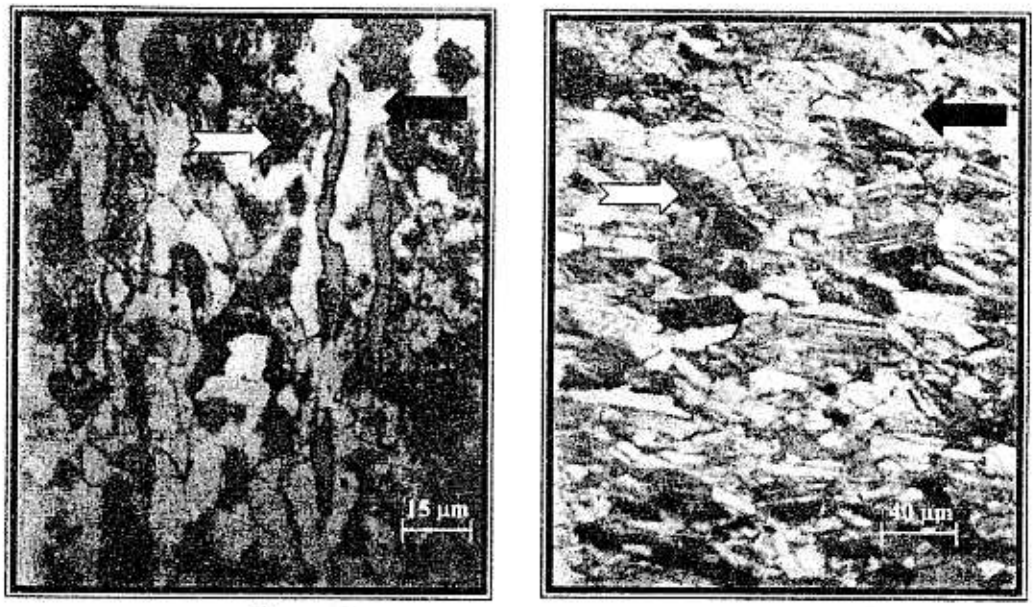
بينت تحليلات حيود الأشعة السينية لطبقة الطلاء Cu-15%Sn (شكل ٨) والمبينة تفاصيلها في الجدول ٤ بأنها تتكون بصورة رئيسية من المحلول الجامد α بالإضافة إلى ظهور كمية قليلة من طور ε (CuSn). بينت نتائج الفحص بحيود الاشعة السينية عدم الكشف عن وجود الاكاسيد وذلك بسبب انخفاض نسبته داخل طبقات الطلاء.

الاستنتاجات

- من خلال التحليل الدقيق لمتغيرات عملية الرش المختلفة للبرونز الفسفوري تم التوصل الى ان الطلاءات الناتجة بعمليات الرش الحراري للبرونز الفسفوري هي عبارة عن تركيب من الطبقات المتجمدة بشكل سريع والتي تكون مساحة التلامس الحقيقي بينها محدودة . كذلك تؤدي عملية الطلاء بالرش بالقوس الكهربائي إلى وجود مسامية في طبقات الطلاء تصل إلى ٢٠% والتي يمكن تقليلها باختيار معلمات الرش المناسبة ولا يمكن إلغاءها بشكل كامل مما يؤدي إلى انخفاض في قيم الصلادة المقاسة وارتفاع الخشونة السطحية لطبقة الطلاء.

المصادر

1. M.P. Groover, "Foundamentals of Modern Manufacturing: Materials, processes and Systems", Prentice Hall, Inc., 1999.
2. S. Grainger, "Engineering Coating: Design and Application", Wood head publishing, 1994.
3. M.L. Thorpe, Advanced Materials and Processes, 10/88, P.69.
4. A. J. Genetti, "Engineering and Design: Thermal Spraying: New Construction and Maintenance", Department of the Army-U.S. Army Corps of Engineering- Washington, DC 20314-1000, Manual, No. 1110-2-3401, January 1999.
5. D.R. Marantz, in "Science and Technology of Surface Coatings", NATO Advanced study Institute on the science and Technology of Surface Coatings, Imperial College of Sciences Technology and Medicine, London, 1974, Academic press, P.308, Eds. B.N. Chapman and J.C. Anderson.
6. F. Vanden Berge, "Thermal Spray Processes" Stork Cellramic, Inc., Milwaukee, Wisconsin, Internet Site, 1998. [http: // www. cellramic. strok group. com/ thermal. htm].
7. H. Herman and S. Sampath, "Thermal Spray Coatings", Internet Site 1996. [http: // dol 1. eng. sunysb. edu / tsl / thermal / article 1. html].
8. . Muirhead, in "Science and Technology of Surface Coatings", NATO Advanced study Institute on the science and Technology of Surface Coatings, Imperial College of Sciences Technology and Medicine, London, 1974, Academic press, P.248, Eds. B.N. Chapman and J.C. Anderson.
9. M. Donovan and H. Reiter, Surfacing Journal, Vol.13, No.2, 1982, P.26.
10. S. Safai and H. Herman, Thin Solid Films, Vol.45, 1977, P.295.
11. V.A. Vakhalin, V.V. Kudinov, V.E. Belashchenko and E. I. Skidan, Fiz. Khim. Obrab. Mater., Vol.6, 1979, P.52. (From Metals Abstracts, Vol.13, Au gust 1980, P. 198).
12. W.B. Kim, Y.S. Yang and S.J. Na, Surface and Coating Technology, Vol.37, No.4, 1989, P. 399.
13. J.J. Kaiser and R.A. Miller, Advanced Materials and Processes, 12/89, P.37.
١٤. هالة سلمان حسن،دراسة الطلاء الغطائي للسبائك،رسالة ماجستير مقدمة الى قسم التعليم التكنولوجي في الجامعة التكنولوجية ،٢٠٠٢.



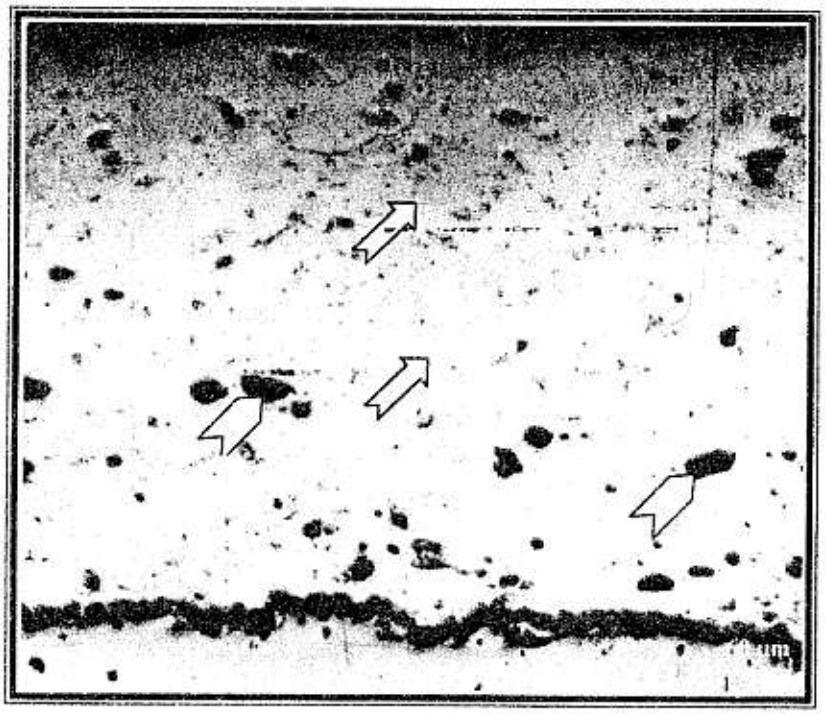
b a

شكل 2 a –البنية المجهرية لسبيكة سلك الطلاء Cu-15% Sn
b– البنية المجهرية للفولاذ متوسط الكاربون

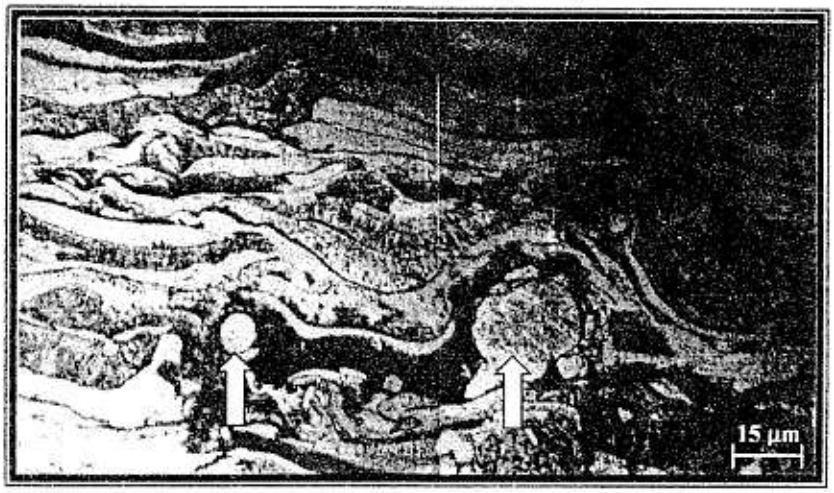
α فرايت ⇧ بيرلايت. ⇧ CuS.

مادة الإسناد
طبقة الطلاء
الحد الفاصل
سطح الصلب

شكل 3 مقطع عمودي في طبقة الطلاء يبين البنية المجهرية الأنموذجية لطبقات الطلاء والاطوار الناتجة. ⇧ طور مادة الطلاء ⇧ المسامية.

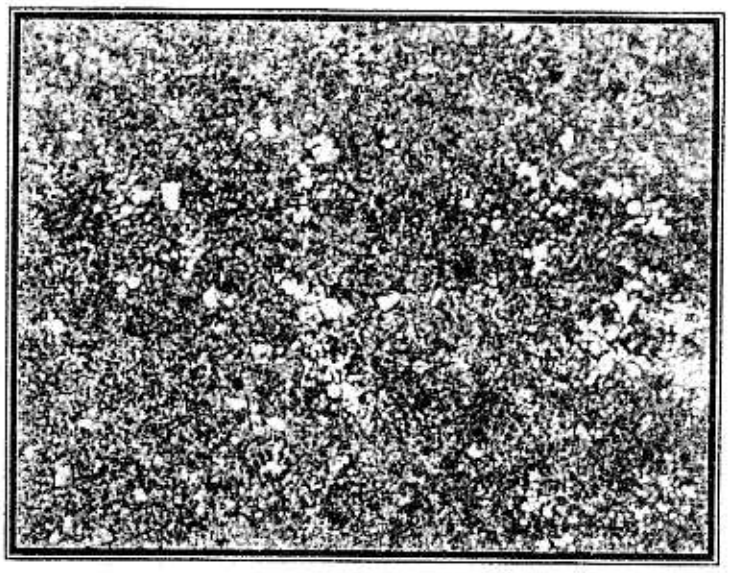


شكل 4 مقطع عمودي في عينة الطلاء بعد اجراء عمليات التحضير عليه يوضح المسامات الخشنة ⇖ والناعمة ⇗ في طبقات الطلاء.



شكل 5 مقطع عمودي في عينة الطلاء بعد اجراء عمليات التحضير والاظهار يوضح التشويه الحاصل في التركيب الطبقي للطلاء نتيجة الدقائق غير المنصهرة. ⇧

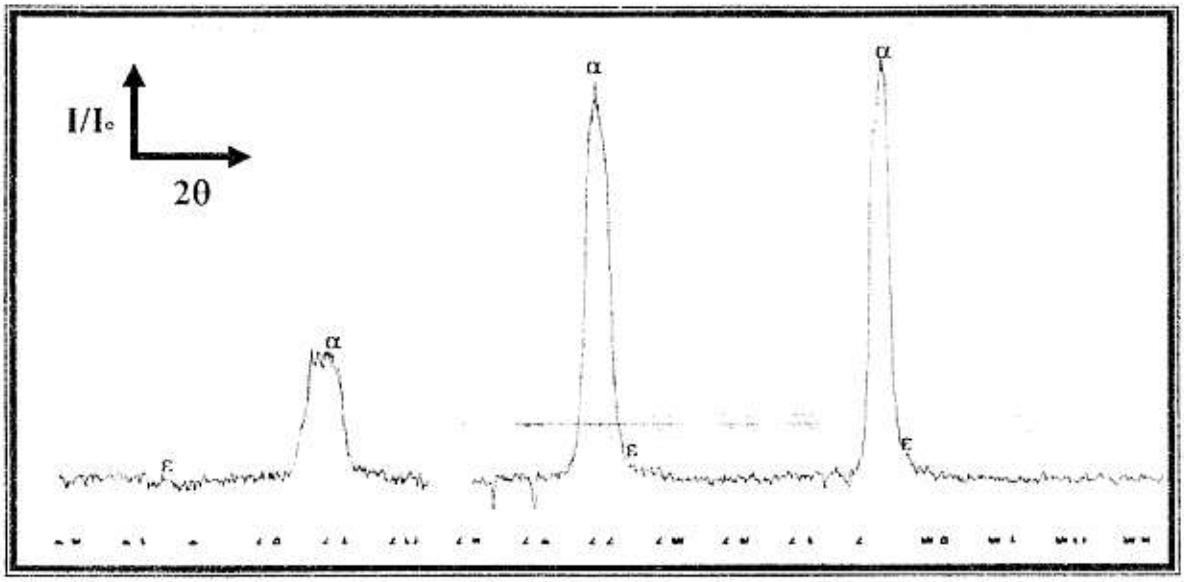
شكل 6 قطع عمودي في عينة الطلاء بعد اجراء عمليات التحضير يوضح الحد الفاصل بين طبقة الطلاء والسطح الاساس الناتج عن اختيار معلمات رش مناسبة.
١. طبقة الطلاء. ٢. منطقة الحد الفاصل. ٣. المادة الاساس.



شكل 7 السطح العلوي لطبقة الطلاء والخشونة السطحية الناتجة.

جدول 4 نتائج التحليل بحيود الأشعة السينية لطبقة الطلاء.

2θ	d. meas., nm	d. stand., nm	Phase	Relative Intensity
42.4	0.2132	0.2131	ε	% 9
42.8	0.2113	0.209	α	% 100
49	0.1859	0.1859	ε	% 5
50.2	0.1817	0.181	α	% 93
73.9	0.12813	0.128	α	% 23
77.7	0.1229	0.122	ε	% 5



شكل 8 منحني التحليل بحيود الأشعة السينية (XRD) لطبقة الطلاء.