

توضيح أغشية رقيقة من معدن التنتاليوم (Ta) بالليزر النبضي (PLD) على ركائز من الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L ودراسة تحسين خواصها السطحية

م. أحمد خضر^١ أ.د. محمد سلامة^٢ أ.د. مصطفى الموادي^٣

^١ طالب دكتوراه - قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

^٢ أستاذ دكتور في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة دمشق.

^٣ أستاذ دكتور عميد كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة دمشق.

الملخص

جرى في هذا العمل توضيح أغشية رقيقة من معدن التنتاليوم (Ta) على ركائز من الفولاذ المقاوم للصدأ من النوع (SS316L) باستخدام تقنية التوضيح بالليزر النبضي (PLD)، استعملت تقنيات عدة من أجل توصيف هذه الأغشية، من بينها: تقنية انعراج الأشعة السينية (XRD)، واختبار القساوة الميكروية (Micro-Hardness)، واختبار مقاومة التآكل لهذه الأغشية مقارنةً مع المعدن المرجعي SS316L باستعمال التقنية الرياضية لاستقراء تافل (Tafel Extrapolation Mathematical Technique). أبدت قيم القساوة الميكروية المركبة المقاسة لغشاء التنتاليوم والركائز تحسناً واضحاً بالمقارنة مع مثيلاتها المرجعية. كما أظهر اختبار التآكل في محلول فيزيولوجي ملحي طبيعي بتركيز (0,9% NaCl) أن مقاومة التآكل لغشاء التنتاليوم الموضَّع على ركائز من الفولاذ قد ازدادت بشكل ملحوظ مقارنةً مع قيمها المسجلة لركائز الفولاذ المقاوم للصدأ المرجعية. تعطي هذه النتائج فكرة واضحة من أجل توضيح أغشية من معدن التنتاليوم (Ta) على المواد الطبية الحيوية المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ (SS316L)، وذلك بهدف تحسين مواصفاتها السطحية ومواءمتها الحيوية كون معدن التنتاليوم يتمتع بمزايا متعددة، منها مقاومة التآكل العالية ومواءمته الحيوية.



حقوق النشر: جامعة دمشق -

سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق

النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

الكلمات المفتاحية: التوضيح بالليزر النبضي (PLD)، الأغشية الرقيقة، معدن التنتاليوم (Ta)، الفولاذ المقاوم للصدأ (SS316L)، استقراء تافل، مقاومة التآكل، المواد الطبية الحيوية.

Tantalum thin films deposition by pulsed laser (PLD) Technique on stainless steel SS316L substrate and studying the improvement of its surface properties

Ahmad khder¹ Mohammad Slamh² Mostfa Almoalde³

¹postgraduate student, Mechanical Design
Engineering Department, Mechanical and Electric
Engineering, Damascus University.

²Professor and Dean Mechanical and Electrical
Engineering College , Damascus University.

³Professor in Mechanical and Electrical Engineering,
Damascus University.

Abstract

In This Work, thin films of Tantalum metal were deposited on Stainless Steel (SS316L) substrates using Pulsed Laser Deposition (PLD) technique. Several modern techniques were used to characterize these films, including: X-ray diffraction (XRD) technique, Micro-Hardness test and Tafel Extrapolation mathematical technique for testing the corrosion resistance of these films compared to the reference metal (SS316L). These Tantalum (Ta) thin films were deposited on Stainless Steel (SS316L) substrates with 110 nm thickness. The measured composite micro-hardness values of Tantalum film and substrates showed a clear improvement compared to The reference substrates. The corrosion test in natural physiological saline solution (0.9% NaCl) showed that the corrosion resistance of Tantalum film deposited on steel substrates was significantly increased compared to its values recorded for reference stainless steel substrates. These results give a clear idea for placing Tantalum (Ta) films on biomedical materials made of stainless steel (SS316L), with the aim of improving their surface properties and biocompatibility as Tantalum metal has multiple advantages, including high corrosion resistance and biocompatibility



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Key words: Pulsed Laser Deposition (PLD), Thin films, Tantalum (Ta), Stainless Steel (SS316L), Tafel Extrapolation, Corrosion resistance, Biomedical materials.

١- المقدمة:

يتم استخدام الفولاذ المقاوم للصدأ (Stainless steel SS316L) على نطاق واسع كأدوات جراحية وسريرية وكزرعات ضمن جسم الإنسان، وذلك بسبب محتواه المنخفض من الكربون وخواصه الميكانيكية الممتازة ومقاومته العالية للتآكل، بالإضافة إلى الخاصية الأهم وهي أسعاره المنخفضة مقارنةً مع مثيلاته من المواد المعدنية الطبية الأخرى.

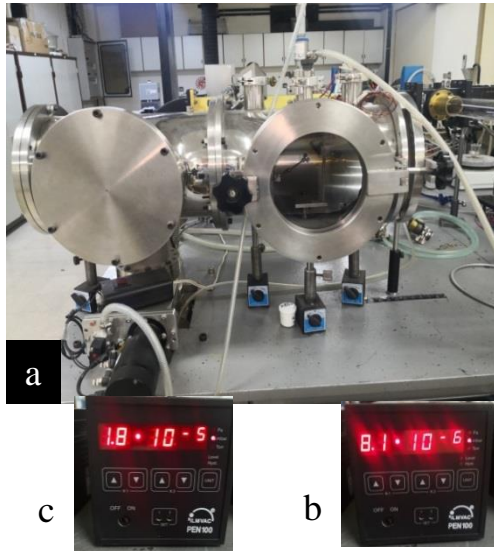
قام Manso و Marzo وآخرون [1] بتوضيح طبقة من معدن التنتاليوم Ta باستخدام طريقة توضيح البخار الكيميائي (CVD) بثخانة ($30\mu\text{m}$) على ركازة من الفولاذ المقاوم للصدأ (Stainless steel SS316L) لخلية وقود غشاء البوليمر المنحل بالكهرباء، ودرسوا الأغشية الموضوعة من حيث مقاومتها للتآكل، حيث انخفضت قيمة تيار التآكل i_{corr} من قيمة $4 \times 10^{-7} \text{Acm}^{-2}$ إلى $4.5 \times 10^{-9} \text{Acm}^{-2}$ وكانت زاوية التماس لقطرة الماء تزيد على 95° . وتركزت المحاولات التي أجراها كل من Liu و Meng وآخرون [2] وكذلك Guan و Wang وآخرون [3] بشكل مكثف على تطوير تقنيات تعديل السطوح المختلفة، وذلك من أجل تحسين الخواص السطحية وبخاصة من خلال استخدام تقنية الليزر النبضي وتقنية الإذابة.

وجد كل من Ivošević, M., R. Knight وآخرون [4]، وكذلك Lorenz و Ramachandra [5] أن طريقة التوضيح بالليزر النبضي (PLD) طريقة ذات مردودية عالية بالرغم من أنها غير مستخدمة بشكل واسع ومتكرر في مجال توضيح أغشية من معدن التنتاليوم وخالطه. تتمتع هذه الطريقة كذلك بإمكانية التحكم في بنية الأغشية وتركيبها، حيث تُعدُّ هذه الطريقة أداة مخبرية وبحثية مشهورة تُستخدم لتطوير الأغشية الرقيقة في مجالات واسعة من أبحاث المواد مثل النواقل الفائقة والأكاسيد والمواد الكهروكيميائية والبوليميرات.

وضَّع كل من Rodianah و Reza وآخرون [6] غشاء رقيق بثخانة ١ ميكرون من Ag-TaO على ركائز من الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L باستخدام الرشاشة المغنطونية، وكانت نتائج الاختبار الميكانيكي الميكروي لحد خضوع الالتصاق 672 ملي نيوتن، وأجريت معالجة تلمين التسلسلي عند درجة حرارة 500°C مع معدل تبريد 2 درجة مئوية / دقيقة، ووجد أنها تحسن من حد خضوع الالتصاق بمقدار 4.1 مرة (2749 ملي نيوتن)، ولاحظوا أن هذه المصفوفة النانوية المتبلورة تتمتع ببنية معتدلة الخشونة، واقتروا لمتانتها وزيادة حد خضوع الالتصاق للغشاء الحيوي المحضر استخدامها في تطبيق الأدوات الجراحية.

وضَّع Leng و Chen وآخرون [7] أغشية رقيقة من التنتالوم بطريقة التوضيح بإنفراغ القوس الكهربائي النبضي، وتم إنتاج أغشية أكسيد التنتالوم بواسطة تسخين غشاء التنتالوم إلى درجة حرارة 700°C ولمدة ساعة واحدة في الهواء. تم تمييز الأفلام باستخدام حيود الأشعة السينية (XRD). التجارب المخبرية كشفت اختلاف سلوك النمو والتكاثر للخلايا البطانية على أسطح العينة بشكل كبير وذلك للخلايا البطانية للوريد البشري السريري المستزرع (HUVEC) على Ta، وأغشية أكسيد التنتالوم، والركائز المرجعية من الفولاذ المقاوم للصدأ L316 والنتانيوم التجاري CP-Ti، حيث كان الالتصاق والنمو والشكل والاحتفاظ بالخلايا البطانية على أغشية التنتالوم وأكسيد التنتالوم أفضل بكثير من الفولاذ المقاوم للصدأ L316 وCP-Ti.

درس كل من Petrovskaya و Lapitskaya وآخرون [8] البنية المجهرية من خلال الفحص بمجهر للقوة الذرية لأغشية التنتالوم وخالطه، والتي وضعت على سطح ركائز من الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L وشرائح مجهر بتقنية الرشاشة المغنطونية. حيث وجد أن ألياف التنتالوم ذات البنية النانوية تعتمد إلى حد كبير على كل من المادة نفسها والخصائص الفيزيائية والكيميائية للسطح الموضَّع



(الشكل ١ a) المنظومة التجريبية للتوضيح بواسطة الليزر النبضي (PLD) (b) التخلية الأولية للمنظومة التجريبية (c) الضغط أثناء التجربة

جرى توضيح أغشية من معدن التنتاليوم (Ta) على ركائز من مجاوب بلورة الكوارتز Quartz Crystal Microbalance (QCM) وكذلك على ركائز من الفولاذ المقاوم للصدأ (SS316L) بواسطة التذرية بالليزر النبضي لهدف من معدن التنتاليوم (Ta) عالي النقاوة (٩٩%) باستخدام ليزر نبضي من نوع Nd-YAG طراز ٩٨٠ series YG Quantel ذي خط اصدار للمدروج الثالث (355nm) وبزمن عرض للنبضة $T_p = 6 \text{ ns}$ وتواتر نبضات قدره $F=5\text{Hz}$ ويكون مقدار طاقة النبضة الواحدة $E= 27 \text{ mJ}$ وبزاوية ورود لشعاع الليزر قدرها 45° ، وضع الهدف على حامل دوار (٢٠ دورة بالدقيقة) وعلى مسافة (3 cm) من حامل الركازة. يُبين الشكل (2) صورة للبلازما المحدثة بالليزر خلال توضيح الغشاء .

عليه الغشاء، وتجدر الإشارة إلى أن معظم الأغشية القائمة على التنتالوم وخلائطه قيد الدراسة تتميز بالبنية المسامية، سمح ترشيش غشاء من Ta_2O_5 بالحصول على سطح ناعم بحد أدنى قيمة الخشونة. تم إجراء تحقيقات إضافية للخواص الفيزيوميكانيكية ومقاومة التخرش، ووجد أن بنية الغشاء من نيتريد التنتالوم هو الأكثر نجاحاً بالنسبة للدعامات.

حسن كل من Mullera و Abkea [9] من التوافقية الحيوية للغرسات المصنعة من الفولاذ المقاوم للصدأ بشكل كبير بواسطة تعديل السطح الحيوي. وتم توضيح غشاء من أكسيد التنتالوم على ركيزة من الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L مكنت هذه الركيزة من التثبيت التساهمي لطبقة الكولاجين النشطة بيولوجيا باستخدام عوامل اقتران silane وجزيئات الرابط. بسبب الخواص الميكانيكية العالية والاستقرار الكيميائي الحيوي كان الاتصال التساهمي لطبقة الكولاجين أكثر ملاءمة من امتصاص الكولاجين الفيزيائي وذلك لتحسين الاندماج العظمي.

يكن الهدف من هذا البحث توضيح أغشية من معدن التنتاليوم (Ta) على ركائز من الفولاذ المقاوم للصدأ (SS316L) بطريقة التوضيح بالليزر النبضي (PLD)، حيث درست البنية الميكروية والخواص الميكانيكية من خلال قياس القساوة الميكروية بطريقة فيكرز (Vickers)، إضافة إلى دراسة سلوك التآكل باستعمال التقنية الرياضية لاستقراء تافل.

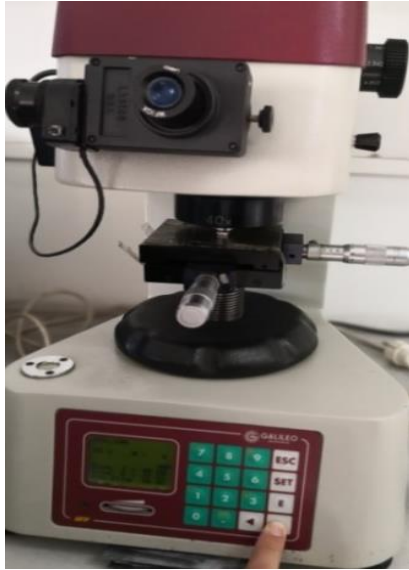
٢- العمل التجريبي:

تتكون منظومة التوضيح بالليزر النبضي (PLD) من حجرة من الفولاذ المقاوم للصدأ (SS316L) المبينة في الشكل (١) [10]، حيث جرى تخليتها بواسطة مضخة توربينية جزيئية إلى ضغط أولي قدره $P=8,1 \times 10^{-6} \text{ mbar}$ ، كما كان الضغط أثناء توضيح الغشاء الرقيق $P=1,8 \times 10^{-5} \text{ mbar}$

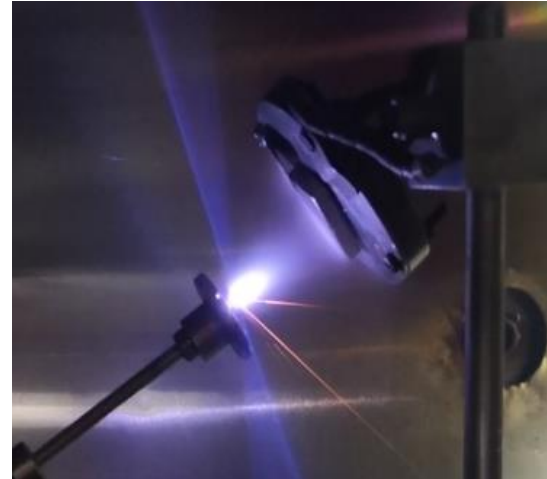


الشكل (٣) جهاز Stadi P لقياس انعراج الأشعة السينية XRD

أجريت تجارب القساوة وحساب القساوة الميكروية للأغشية باستخدام جهاز اختبار القساوة الميكروية من نوع Galileo المزود بالهرم الماسي بزواوية 120° ، وذلك لقياس قساوة فيكرز للبنية المركبة من الغشاء الموضع والركيزة كما هو مبين بالشكل (٤)، واستعمال أحمال $100g_f$ وزمن تطبيق للحمل قدره (15 s).



الشكل (٤) جهاز القساوة Galileo



الشكل (٢) البلازما المحدثة بالليزر خلال توضيح الغشاء

جرى تنظيف جميع الركائز قبل عملية التوضيح بالأسيتون والميثانول على التوالي بهدف إزالة بقايا آثار مسكها أو لمسها إن وجدت قبل بدء توضيح معدن التنتاليوم Ta، وبعد ذلك يتم التعامل مع العينات ومسكها بالملاقط حصراً. جرى استخدام عدة تقنيات لتوصيف الغشاء الرقيق لمعدن التنتاليوم Ta الموضع على الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L بتقنية الليزر النبضي، حيث تمت دراسة الخواص البلورية للأغشية الموضوعة بواسطة انعراج الأشعة السينية (XRD) باستعمال مقياس انعراج الأشعة السينية بالنفوذ من نوع StadiP ($Cu = 0.15405nm$) K_{α}, λ الشكل (٣).

٣- النتائج والمناقشة:

٣-١ حساب ثخانة الغشاء:

جرى حساب ثخانة الغشاء الرقيق من معدن التنتاليوم Ta الموضَّع بطريقة الليزر النبضي على ركازة من الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L، وذلك بتطبيق شروط الترسيب السابقة نفسها على بلورة الكوارتز Quartz crystal microbalance QCM لمراقبة عملية التوضيح الشكل (٦). كان Saurbrey [11] أول من اقترح استخدام العلاقة بين تغير تواتر الاهتزاز (Δf) للبلورة بوزن المادة الموضَّعة عليها (Δm) من خلال علاقته الشهيرة:

$$\Delta f = \left(f_0^2 \frac{\Delta m}{\rho_q N_q A} \right) \quad (1)$$

حيث:

f_0 : هي التواتر التجاوبي لبلورة الكوارتز المطلية بالذهب Au في هذا العمل، وهي دائرية بقطر 1 cm ($f_0=6.0$ MHz).

ρ_q : كثافة الكوارتز (2.65 g cm^{-3}).

N_q : ثابت اهتزاز الكوارتز $1.67 \times 10^{-5} \text{ Hz.cm}$

A : مساحة البلورة المطلية بالغشاء.

ومن ثم ربط تغير الكتلة بثخانة الغشاء الرقيق (d_f) وكثافة المادة المراد ترسيبها (ρ_f) من خلال العلاقة:

$$\Delta m = A \cdot d_f \cdot \rho_f \quad (2)$$

وبالتالي يتم حساب الثخانة من العلاقة التالية:

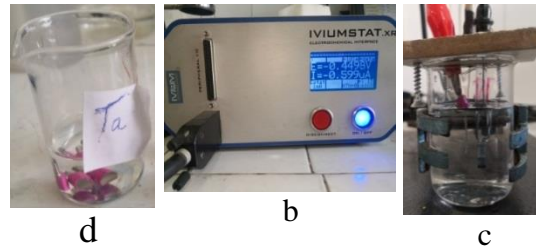
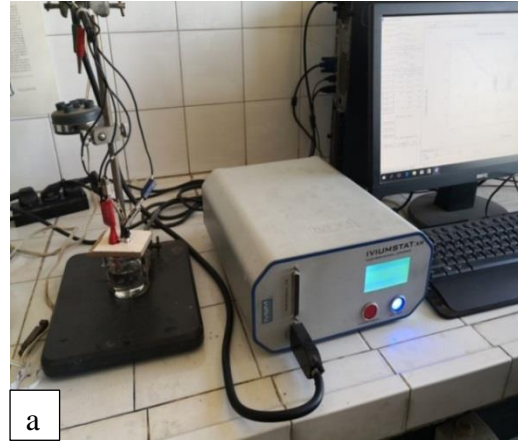
$$d_f = \frac{N_q \rho_q}{\rho_f f_0^2} \Delta f \quad (3)$$

إن كثافة التنتاليوم Ta تساوي 16.6 g/cm^3 وبالتعويض بالعلاقات السابقة تكون ثخانة الغشاء

الرقيق الموضَّع من معدن التنتاليوم، هي:

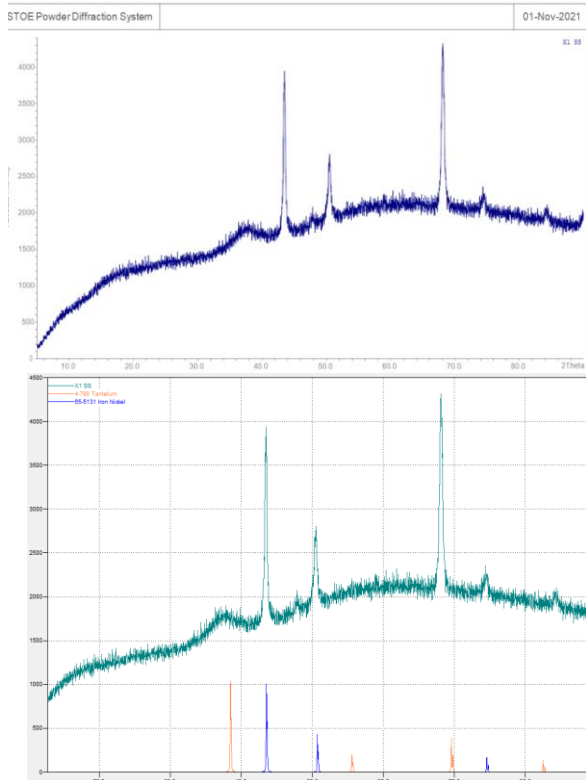
$$\Delta f (\text{Ta}) = 14.6 \text{ kHz}$$

$$d_f (\text{Ta}) = 110 \text{ nm.}$$



الشكل (٥) منظومة اختبار وقياس التآكل الكهروكيميائي (b) جهاز iviumstat.xr لتحليل التآكل (c) خلية ثلاثية الأقطاب (d) العينات المختبرة

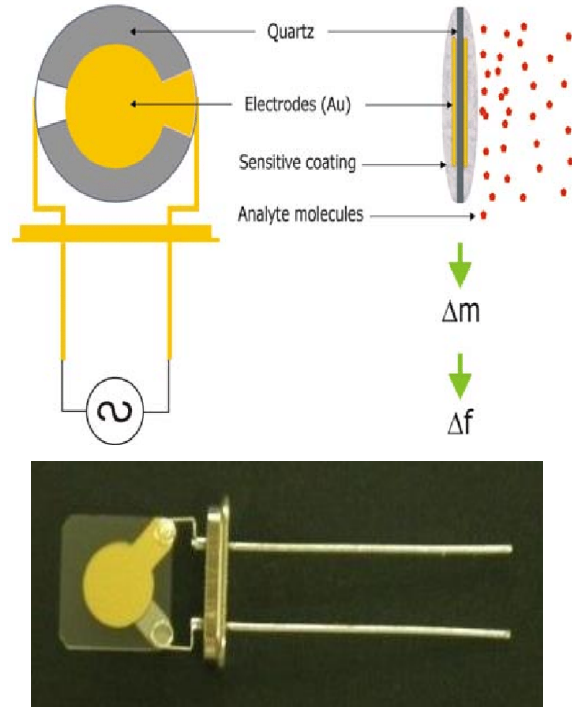
استعملت التقنية الرياضية الاستقراء تافل لاستنتاج مقدار التآكل الكهروكيميائي لأغشية التنتاليوم Ta الموضَّعة على ركائز من الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L بالمنظومة الموضحة في الشكل (٥-a) والمكونة من جهاز *iviumstat.xr* لتحليل التآكل الشكل (٥-b)، واستخدمت خلية تقليدية ثلاثية الأقطاب بسعة 300 ml الشكل (٥-c)، وأخذت قياسات التآكل للعينات الشكل (٥-d) بوسط سائل ملحي (NaCl 0.9 % المكافئ للسائل الفيزيولوجي) حيث تم وضع هذه العينات في المحلول لمدة عشرة أيام وفي درجة حرارة الغرفة 25°C . واستنتجت البارامترات الحدية i_{corr} , E_{corr} من منحنيات تافل (Tafel plots).



الشكل (٧) مخططات انعراج الأشعة السينية لعينة SS316L الموضَّع عليها غشاء من معدن Ta

٣-٣ القساوة الميكروية Microhardness:

جرى قياس القساوة الميكروية المركبة للغشاء الموضع وركازة الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L، وذلك بأخذ القيمة الوسطى لأربع قراءات في نقاط مختلفة، وذلك بتطبيق حمل مقداره (100 gf) لقياس القساوة المركبة SS316L/Ta. يبين الشكل (8) صور مأخوذة بالمجهر الضوئي لأثر رأس هرم القساوة (الثلم) للعينة SS316L والعينة SS316L/Ta، حيث وجد أن قيم القساوة المتوسطة على التوالي 371HV للركازة من الفولاذ SS316L و 474HV للبنية المركبة غشاء SS316L/Ta الموضع بتقنية PLD كما هو موضح في الجدول (١).



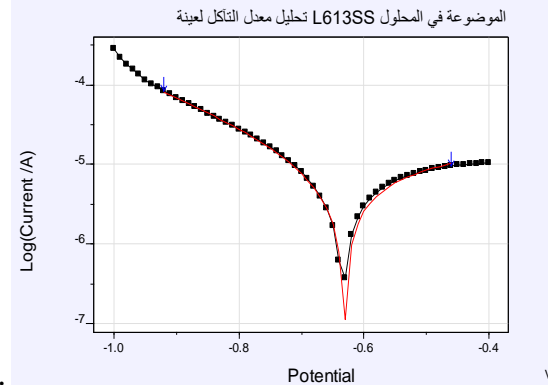
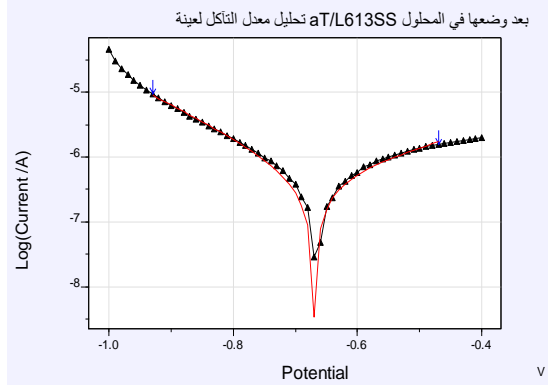
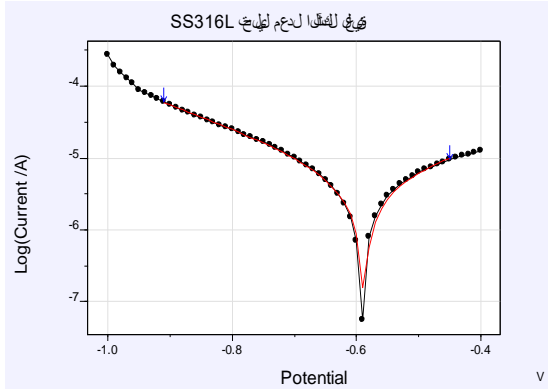
الشكل (٦) المقياس الميكروي لبلورة الكوارتز

Quartz crystal microbalance QCM

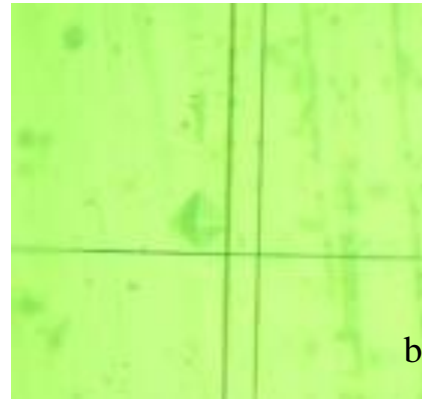
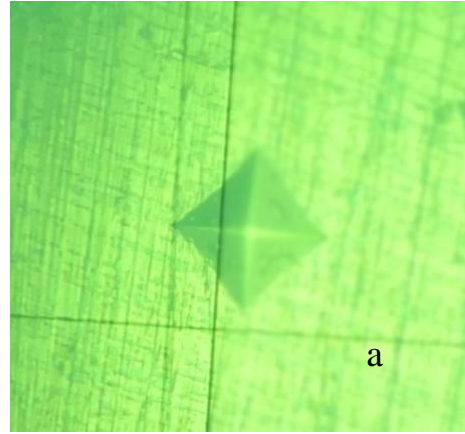
٢-٣ التوصيف البلوي (XRD):

يوضح الشكل (٧) مخططات انعراج الاشعة السينية لعينة من الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L الموضع عليها غشاء رقيق من معدن التنتاليوم Ta بطريقة الليزر النبضي حسب الشروط الموضحة سابقاً. يلاحظ وجود قمة عند الزاوية 38.79° تنسب إلى التوجه البلوري (110) والذي يوافق الطور β ذا البنية المكعبة (Ta-c) الذي يُنسب الى المجموعة الفضائية $m3-Im$ ذات أبعاد الخلية الأولية $a=b=c=3.3058\text{\AA}$ بحسب قاعدة البيانات (PDF: 44-1288)، كما تنسب القمتين عند الزاويتين 44.39° و 48.28° إلى التوجهين البلوريين (111) و (101) على الترتيب للطور السداسي والتي توافق المجموعة الفضائية $P63/mmc$ ، حيث أبعاد الخلية الأولية وعند الزوايا 50.8° و 68.2° و 74.8° إلى التوجه البلوري (200) و (202) و (220) على التوالي.

البارامترات الكهروكيميائية لمنحنيات تافل في أبحاث Frankel وآخرين [8]، حيث يُمثل E_{corr} كمون التآكل على المحور (x) و i_{corr} لوغاريتم تيار التآكل على المحور (y) ذي التدرج اللوغارتمي. تتناسب عادةً كثافة تيار التآكل المستنتجة من منحنيات الاستقطاب مع معدل التآكل [12]. تظهر الدراسة الحالية أن الغشاء الرقيق من معدن التنتاليوم Ta الموضَع بتقنية PLD على الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L، يُبدي سلوك تآكل أفضل من عينة الشاهد (الفولاذ غير المطلي) في الشروط نفسها والوسط الأكل المختار



الشكل (٩) منحنيات الاستقطاب الديناميكي لاستقرار تافل.



الشكل (٨) صور المجهر الضوئي لأثر قساوة فيكرز (a) الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L (b) الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L الموضَع عليها غشاء رقيق من معدن التنتاليوم Ta الجدول (١) قياسات القساوة التي أجريت على عينات مرجعية من SS316L وعينات من SS316L/Ta

العينة	الحمولة g	زمن تطبيق الحمل s	القساوة بلا غشاء HV	القساوة مع غشاء من Ta HV
SS316L	100	15	401.0	455.6
	100	15	381.8	462.7
	100	15	354.7	425.9
	100	15	347.4	551.1
المتوسط الحسابي			371.2	473.8

3-4 قياسات التآكل:

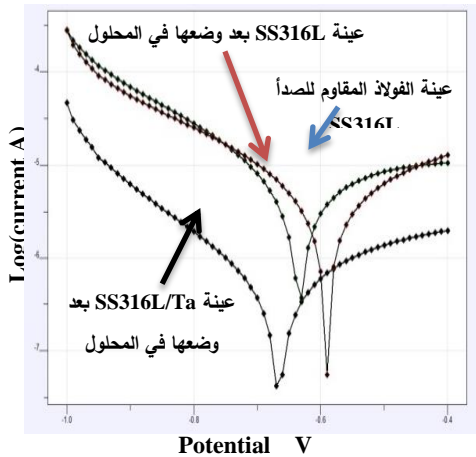
يوضح الشكل (٩) منحنيات الاستقطاب الديناميكي ومواءمة تافل لها (Tafel fit) وتبين الجداول (٢) القيم المستنتجة من برنامج IviumSoft لكل من (a) عينة الشاهد ركازة SS316L (b) عينة الشاهد ركازة SS316L الموضوعة في المحلول الفيزيولوجي ذي التركيز (0.9% NaCl) في درجة حرارة 25°C . (c) الغشاء الموضَع بتقنية PLD الموضوعة في الشروط السابقة نفسها. حُدثت

ويعزى ذلك الى تشكل طبقة من الأكسيد التي تحمي الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L، كما لوحظ أن قيمة تيار التآكل والموافقة لأعلى مقاومة تآكل توافق العينة الموضع عليها غشاء التنتاليوم Ta بتقنية الليزر النبضي PLD وذلك لكون هذا الغشاء المكون من معدن التنتاليوم Ta يتمتع بمقاومة تآكل عالية بالإضافة إلى الحصول على نعومة سطح عالية (خشونة منخفضة) بعد توضيح معدن التنتاليوم Ta ذي البنية البلورية من مكعبات متمركز الحجم، و/أو بسبب بنيته البلورية ذات حجم الحبيبات الناعم.

الجدول (٣) قيم كمن التآكل E_{corr} ولوغاريتم تيار التآكل i_{corr}

ومقاومة التآكل Rp ومعدل التآكل C. Rate

نوع العينات	i_{corr} تيار التآكل أمبير/أ .	E_{corr} كمن التآكل فولت/ V	Rp مقاومة التآكل أوم Ohm	C. Rate معدل التآكل مليمتر بالسنة mm/y
SS 316L	3.52E-06	-0.5569	1.61E+04	٠.٠٢٧٢٣
بعد SS 316L وضعها في المحلول	9.01E-06	-٠.٦١٠٣	1.49E+04	٠.٠٣٦٤٥
SS 316L مرسب عليها Ta بعد وضعها في المحلول	4.37E-07	-٠.٦٧٧	1.25E+05	٠.٠٠٣٣٨



الشكل (١٠) مقارنة منحنيات تافل للعينات الثلاث

ترتبط عملية التآكل بشكل كبير بتفاصيل سطح الغشاء وبنيته الميكروية، والتي تحدد مدى مقاومته للتآكل، حيث تحدث تفاعلات التآكل في النقاط الأكثر فعالية على السطح، ويرتبط ذلك بعدة عوامل منها حدود ووجوه الحبيبات وحوافها وجودة التبلور والشوائب والشقوق

الجدول (٢) القيم المستنتجة من برنامج IviumSoft
الجدول تحليل معدل التآكل لعينة SS316L/Ta قبل وضعها في
المحلول

	Model data	Tafel data	Pol. Res.
E. corr V	-٠.٦٣١٢	-٠.٦١٠٣	-٠.٦٢٦٢
i corr. A	9.01E-06	4.71E-06	4.87E-06
I cor. A/cm ²	6.01E-06	3.14E-06	3.25E-06
Rp Ohm	1.13E+04	1.49E+04	1.03E+04
ba V/dec	١.١٦٧	٠.٤٦١	
bc V/dec	٠.٢٩٣	٠.٢٤٨	
C. Rate mm/y	٠.٠٦٩٧٤	٠.٠٣٦٤٥	٠.٠٣٧٧١

الجدول تحليل معدل التآكل لعينة SS316L بعد وضعها في

المحلول

	Model data	Tafel data	Pol. Res.
E. corr V	-0.5879	-0.5569	-0.5874
i corr. A	5.59E-06	3.52E-06	3.88E-06
I cor. A/cm ²	3.73E-06	2.34E-06	2.59E-06
Rp Ohm	1.39E+04	1.61E+04	1.29E+04
ba V/dec	0.419	0.239	
bc V/dec	0.313	0.287	
C. Rate mm/y	0.04332	0.02723	0.03007

الجدول تحليل معدل التآكل لعينة SS316L/Ta بعد وضعها

في المحلول

	Model data	Tafel data	Pol. Res.
E. corr V	-0.6696	-0.677	-0.6616
i corr. A	4.57E-07	4.37E-07	5.06E-07
I cor. A/cm ²	3.05E-07	2.91E-07	3.37E-07
Rp Ohm	1.20E+05	1.25E+05	9.88E+04
ba V/dec	0.34	0.36	
bc V/dec	0.2	0.192	
C. Rate mm/y	0.003538	0.00338	0.003918

بين الجدول (٣) كلاً من قيم كمن التآكل E_{corr}

وكتافة تيار التآكل i_{corr} ومقاومة التآكل Rp ومعدل التآكل السنوي C. Rate كما يبين الشكل (١٠) مقارنة منحنيات تافل للعينات الثلاث الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L قبل وضعه في المحلول الفيزيولوجي وبعده، وكذلك الموضع عليه معدن التنتاليوم Ta وذلك بعد وضعه في المحلول نفسه. حيث يُلاحظ تحسن في مقاومة التآكل للعينات المرجعية، وذلك بعد وضعها في المحلول الفيزيولوجي،

والانخلاعات. يتركز معدل التآكل للعينات المدروسة حسب النخر المحلي أي على شكل حفر (التآكل النقري) ضمن الأخاديد والعيوب السطحية الناتجة أثناء عمليات الإنتاج المختلفة وكذلك الشقوق الميكروية والحدود بين الحبيبات، كما ويحدث التآكل بشكل واسع على السطوح الخشنة [13]. وكما يبدو في نتائج هذا البحث المقدم من قبلنا لغشاء معدن التنتاليوم Ta المحضر بتقنية PLD والموضوع على ركازة الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L، حيث تم الحصول على أفضل خواص تآكل لهذا الغشاء لكون سطحه ذي نعومة أعلى (أقل أخاديد وحفر)، ولكون معدن التنتاليوم Ta يتمتع بمقاومة تآكل عالية نتيجة تشكل طبقة من أكاسيد التنتاليوم TaO_n، هذا، وتتوافق النتائج التي جرى الحصول عليها مع عدة دراسات علمية سابقة توضح أن حجم الحبيبات يعد من العوامل الأساسية في مقاومة التآكل لسطوح المعادن والخواص الميكانيكية [14-15]، حيث تتوافق أعلى مقاومة تآكل للأغشية ذات الحبيبات الأصغر.

٤) وجد تحسن واضح وكبير من ناحية مقاومة التآكل حيث ازدادت هذه المقاومة من (1.49×10⁴ Ohm) الى (1.25×10⁵ Ohm)، ولوحظ أن تيار التآكل قد انخفضت قيمته من (9.01×10⁻⁶ A) إلى (4.37×10⁻⁷ A)، ويتعلق هذا كُلُّه بنعومة السطح وتغطية العيوب السطحية وتشكل طبقة واقية من أكاسيد التنتاليوم المقاومة للتآكل.

٥) نتيجة لزيادة مقاومة التآكل، وخاصة ضمن الأوساط المشابهة للأوساط الفيزيولوجية وزيادة القساوة السطحية فإن توضيح غشاء من معدن التنتاليوم يؤدي إلى زيادة المواءمة الحيوية، وبالتالي تقبل الجسم للزرعات المصنعة من الفولاذ المقاوم للصدأ الموضوع عليه أغشية من معدن التنتاليوم.

مسرد المصطلحات:

- SS316L: الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (316L)
- PLD: Pulsed Laser Deposition التوضيح بالليزر النبضي
- Quartz Crystal Microbalance (QCM) مجاوب بلورة الكوارتز
- P: الضغط الأولي والضغط أثناء التجربة (mbar)
- λ: طول موجة الليزر (1064 nm)
- T_p: زمن عرض النبضة (6 ns)
- F: تواتر النبضات (5Hz)
- E: طاقة النبضة (27 mJ = 0.027 J)
- f₀: التواتر التجاوبي لبلورة ما (f₀=6.0 MHz)
- ρ_q: كثافة الكوارتز (2.65 g cm⁻³)
- N_q: ثابت اهتزاز الكوارتز (1.67×10⁻⁵ Hz.cm)
- A: مساحة البلورة المطلية بالغشاء (cm²)

4- الاستنتاجات الممكنة من البحث:

(١) وظفت تقنية التوضيح بالليزر النبضي PLD لتحضير أغشية رقيقة من معدن التنتاليوم Ta على ركائز من الكوارتز (QCM) (وذلك لحساب ثخانة الغشاء الموضوع) وعلى ركائز من الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L.

(٢) نوقشت نتائج خواص هذا الغشاء من حيث زيادة مقاومته للتآكل، وذلك بالنسبة لأغشية الموضوعة على ركائز الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L/Ta ومثيلتها المرجعية، حيث بينت هذه الدراسة أن مقاومة التآكل لأغشية Ta الموضوعة على الفولاذ المقاوم للصدأ SS316L، في وسط فيزيولوجي، أن هذه الأغشية تتمتع بمقاومة تآكل أعلى مقارنةً مع ركائز الفولاذ نفسها SS316L.

(٣) أوضحت هذه الدراسة ازدياد قيم القساوة الميكروية بشكل ملحوظ حيث كانت قيمتها (371HV)

(nm)	• d_f : ثخانة الغشاء الرقيق
(g/cm ³)	• ρ_f : كثافة المادة المراد ترسيبها
(Å)	• a,b,c: أبعاد الخلية الأولية
(V)	• E_{corr} : كمون التآكل
(A)	• i_{corr} : لوغاريتم تيار التآكل
(Ohm)	• R_p : مقاومة التآكل
(mm/y)	• C. Rate: معدل التآكل السنوي

Reference: المراجع:

- [1] A.P. Manso , F.F. Marzo , Xabier Garicano, Cinthia Alegre, Antonio Lozano, Felix Barreras "Corrosion behavior of tantalum coatings on AISI 316L stainless steel substrate for bipolar plates of PEM fuel cells" <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.157> 0360-3199/© 2020 Hydrogen Energy Publications LLC. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [2] Liu, X.-B., X.-J. Meng, H.-Q. Liu, G.-L. Shi, S.-H. Wu, C.-F. Sun, M.-D. Wang, and L.-H. Qi, *Materials & Design*, (2014). 404.
- [3] Wang, Z., K. Guan, M. Gao, X. Li, X. Chen, and X. Zeng, *Journal of Alloys and Compounds*, (2012). 518.
- [4] Ivošević, M., R. Knight, S. Kalidindi, G. Palmese, and J.K. Sutte, *Solid particle erosion resistance of thermally sprayed functionally graded polymer/ceramic coatings*. 2004. 498.
- [5] Lorenz, M. and M.S. Ramachandra Rao, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 3. (2014). 030301.
- [6] Rodianah Alias, Reza Mahmoodian, Mohd Hamdi Abd Shukor, Been Seok Yew¹, and Martini Muhamad¹, "Enhancement of As-sputtered Silver-tantalum Oxide Thin film Coating on Biomaterial Stainless steel by Surface Thermal Treatment" Citation: AIP Conference Proceedings 1948, 020003 (2018); doi: 10.1063/1.5030882.
- [7] Y.X. Leng, J.Y. Chen, P. Yang, H. Sun, J. Wang , N. Huang "The biocompatibility of the tantalum and tantalum oxide films synthesized by metal vacuum pulse arc source deposition" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 242 (2006) 30–32.
- [8] A. S. Petrovskaya, V. A. Lapitskaya, G. B. Mel'nikova, a T. A. Kuznetsova, S. A. Chizhik, A. V. Zykova, and V. I. Safonov "Microstructure OF Thin Films OF Tantalum And Its Compounds" *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 94, No. 4, July, 2021 UDC 539.211:539.231.
- [9] R Mullera, J Abkea, E Schnella, F Macionczyk, U Gbureckb, R Mehrlc, Z Ruszczakc, etc "Surface Engineering Of Stainless Steel Materials By Covalent Collagen Immobilization To Improve Implant Biocompatibility" *Biomaterials* 26 (2005) 6962–6972.
- [10] A. Alkhawwam, B. Abdallah, A. K. Jazmati, M. Tootanji and F. Lahlah "Deposition OF TiAlV Thin Films by Pulsed Laser AND DC Magnetron Sputtering: Stuctural, Compositional AND Electrochemical Corresion Study" *Surface Review and Letters* Vol. 27, No. 08, 1950188 (2020).
- [11] Saurbrey *G. Z Phys* 1959; 155: 206.
- [12] Frankel, G.S., *Fundamentals of Corrosion Kinetics*, in *Active Protective Coatings: New-Generation Coatings for Metals*, A.E. Hughes, et al., Editors. 2016, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 17.
- [13] Wang, Z.B., J. Lu, and K. Lu, *Surface and Coatings Technology*, 6. (2006). 2796.
- [14] Frankel, G.S., *Active Protective Coatings*. Materials Science 233. 2016: Springer.
- [15] Mao, X.Y., D.Y. Li, F. Fang, R.S. Tan, and J.Q. Jiang, "Application of a simple surface nanocrystallization process to a Cu–30Ni alloy for enhanced resistances to wear and corrosive wear" *Wear* 271 (9-10), 1224-1230.