الخصائص الميكانيكية للاغشية الصلبة الرقيقة

سلوان كمال جميل العاني و ذكرى قاسم عبد الرحيم
قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة بغداد - بغداد – العراق

الملخص

في هذا البحث تم عرض لبعض الخواص الميكانيكية للأغشية الصلبة الرقيقة وكذلك الطرق المتبعة لقياس تلك الخواص. إن دراسة الخواص الميكانيكية له أهمية كبيرة وذلك لدور تلك الخواص في التأثير على الخواص المختلفة للاغشية ومنها الخواص الكهربائية والبصرية والخواص الأخرى ذات العلاقة. وكذلك تحسين تطبيقات تلك الأغشية وحماية تركيبها الداخلي من التلف.

كلمات مفتاحية: أغشية رقيقة ، خواص ميكانيكية ، الإجهاد ، الصلادة ، الانفعال ، الالتصاقية.

1. المقدمة

لقد قام الباحثون بدراسة الخواص الميكانيكية منذ مطلع الستينات وكان أول المشتغلين بهذا المجال الباحث[25]. كانت أكثر الخواص دراسة هي الإجهاد المتولد عند نمو الغشاء، وبعد ذلك اتجه اهتمام الباحثين بالخواص الميكانيكية الأخرى مثل الالتصاقية والصلادة بالاضافة الى الإجهاد وعلاقة الخواص بعضها ببعض بالإضافة إلى ذلك دراسة الخواص الميكانيكية للاغشية ومقارنتها مع الخواص المماثلة لها في المواد الحجمية (Bulk materials).

كانت الأبحاث الأولية على الخواص الميكانيكية تتعامل بصورة عامة مع المعادن وبعدها تم العمل على المواد العازلة ((Dielectric وأشباه الموصلات وتم اقتراح مفاهيم نظرية عامة فيها لتفسير النتائج المستحصلة. وقام [5] بدراسة الخواص الميكانيكية لأغشية رقيقة من المعادن وأشباه الموصلات والعوازل والمقارنة بينها.

اتجهت أغلب البحوث إلى دراسة منحنيات الإجهاد – والمطاوعة بالإضافة لحدوث التشوه (غير المرن) والزحف (Creep) وعلاقة ذلك بقوة الشد وكذلك منشأ أو اصل الاجهادات الداخلية التي لها تأثير كبير على المواصفات المغناطيسية والتوصيلية الفائقة (المفرطة) والخواص البصرية للأغشية.

واتجهت بعض البحوث الحديثة إلى دراسة الخواص الميكانيكية للأغشية المتعددة الطبقات ومن هذه الخواص الصلادة الدقيقة واختبارات الشد وكذلك الإجهادات [45] 18]

تلعب الخواص الميكانيكية للأغشية الرقيقة دورا مهما جدا في كل تطبيق لأن استقرارية أنظمة الأغشية الرقيقة تعتمد عليها[43] ، حيث إن الإجهاد الداخلي والالتصاق غير الكافي على القاعدة يؤدي إلى تكون الشقوق وانبعاجها وانسلاخها من القاعدة. واتجهت البحوث إلى دراسة جملة من العوامل وتأثيرها في تحضير الغشاء وخصائصه البنائية وطبيعة القوى التي تتولد فيه وانعكاس ذلك على الخصائص الكهربائية والمغناطيسية والضوئية[41] وهذه العوامل هي:

1- ضغط وطبيعة الغازات المتبقية في حجرة التبخير وعلاقة ذلك بنقاوة الغشاء.
2- درجة حرارة المصدر (الفتيل) وعلاقتها بالطاقة الحرارية التي تحملها جزيئات المادة المتبخرة.
3- معدل الترسيب وتكاثف الذرات وتأثيره على بناء الغشاء وسرعة تكونه كجزر منفصلة في بداية الترسيب.
4- درجة حرارة القاعدة (الأرضية) وتأثيرها على درجة الحركة لذرات المادة المرسبة.
5- مادة القاعدة المرسب عليها وتركيبها الجزيئي.
6- التفاعل الكيميائي بين المادة المرسبة والقاعدة.

2. الخصائص الميكانيكية

تتأثر الخصائص الميكانيكية إلى حد كبير بالاستقرارية الميكانيكية (Mechanical stability) وقوة التلاصق مع القاعدة (Adhesion force). ولتحديد هذه الاستقرارية وقوة التلاصق فأن هناك عدة كميات يمكن قياسها لهذا الغرض وهي:

1- الإجهاد (Stress)
2- المتانة (Strength)
3- الكسر (Fracture)
4- الصلادة(Hardness)
5- الانفعال (Strain)
6- السلوك اللدن(Plastic behaviour)

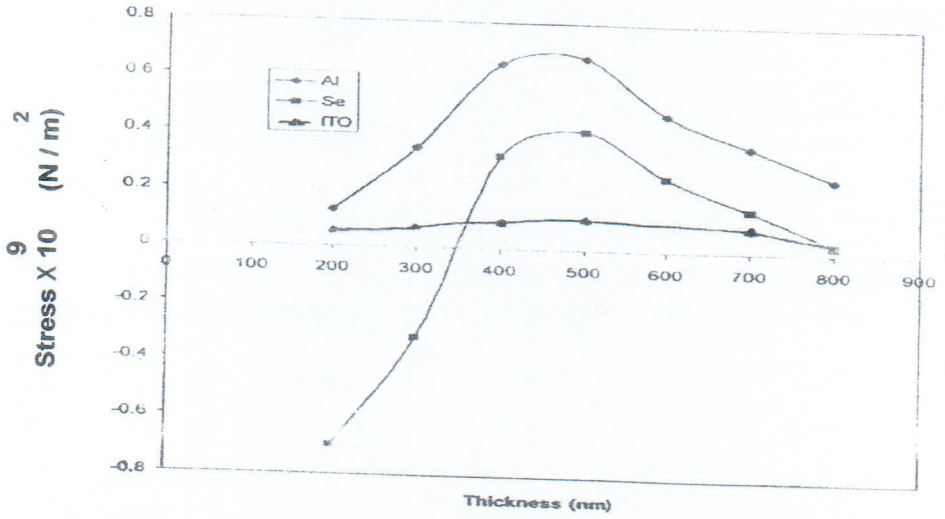
وسنأتي للحديث عن بعض من تلك الخواص ، ومن أهم تلك الخواص هو الإجهاد لأنه الأساس الذي تعتمد عليه الخواص الأخرى.

2 - 1 الإجهاد

يعتبر الإجهاد عاملاً مهماً جدا في تأثيره على كفاءة الغشاء ومدى صلاحيته في التطبيقات العملية ، وقد أجريت دراسات عديدة لمعرفة قيمة ونوع الإجهاد في المواد المعدنية خاصة والإجهاد ظاهرة لا يمكن تجنبها حيث تنشأ بنشوء الغشاء.

إن الأغشية المحضرة بالترسيب الحراري تقع تحت تأثير إجهاد داخلي عالي تبلغ قيمته بين (10^{10}-10^{9}) داين / سم^2 اضافة الى ذلك فأن الأغشية تمتلك كثافة عالية من العيوب (Lattice defects) وكثافة انخلاعات (Dislocation density) تصل إلى انخلاع / سم^2 ويحدث الانسلاخ بسبب نمو إجهاد القص (Shear stress) بين وجهي القاعدة والغشاء وزيادته بزيادة السمك مما يتسبَّب في جعل قوى التصاق الغشاء بالقاعدة غير كافية. وكذلك حصول التشقق (Cracking) أو التبعج (Buckling) اعتمادا على طبيعة الإجهاد المتولد إذا كان من نوع الشد (Tensile) أو الكبس (Compressive)[15] .

ويبين الشكل (1) الإجهاد لأغشية الألمنيوم Al الموصل والسلينيوم Se شبه الموصل وأوكسيد قصدير الانديوم ITO العازل[5]، وهي علاقة تزايد الإجهاد حتى يصل الى قيمة عظمى ويصل الغشاء إلى حالة الغشاء المتصل وبعد ذلك يبدأ بالانخفاض وهذا التصرف يتفق أيضا مع النتائج التي حصل عليها.[2,3]



شكل 1: الإجهاد كدالة لسمك الاغشية [5]

تؤثر ظروف الترسيب بصورة كبيرة على حجم الحبيبات ومعدل تكوين النويات والمراكز التي تنشأ عندها النويات لتتكون منها حبيبات الغشاء و إن أغلب هذه العناصر تأثيرا هو معدل الترسيب ودرجة الحرارة التي يجري عندها الترسيب والشوائب الموجودة التي تدخل في بناء الغشاء وطريقة الترسيب المتبعة في تكوين الغشاء.

إن نمو الغشاء في بداية الترسيب على القاعدة لايكون طبقة ذرية وإنما ينمو بشكل منتظم ويبدا بنويات تحوي نسبيا على عدد قليل من الذرات بحدود (10) عشر ذرات أو أكثر وتنمو هذه النويات لتكون حبيبات أو بلورات صغيرة(Crystallite) ، ويكون اتجاه البلورات في مستوى الغشاء عشوائيا إذا جرى الترسيب على قاعدة من مادة غير بلورية وباستمرار الترسيب فسوف تنشأ مراكز تكون النويات وتبدأ الحبيبات بالاتصال لتكون الغشاء المتصل الذي يحتوي على عدد من الثقوب والمسامات (pores) وباستمرار الترسيب سوف تؤدي إلى ملء تلك الثقوب ويكون مصدرا لكثافة عالية من العيوب التي تؤثر بصورة كبيرة على قيمة الإجهاد وبالتالي على الخصائص الميكانيكية الأخرى ([19] . وقد وضعت تفسيرات مختلفة حول أصل الإجهاد الداخلي فمنهم عزاه إلى التأثير الحراري وعملية التلدين التي تتسبب في حدوث تحولات بنائية وبالتالي تغير واختلاف في حجم البلورات. والبعض الآخر ينسب الإجهاد إلى التحولات في الطور خلال عملية التكاثف أو بسبب الطبقة السطحية للغشاء وعلاقتها بالتأكسد والشد السطحي والعيوب البنائية أو تأثير وجود الشحنات الكهربائية أو لأثر الحدود البلورية [19] . إما الإجهاد الداخلي في الغشاء فقد يقود إلى تكون الشقوق ويؤدي إلى انبعاجه وتقشره من القاعدة، وينشأ تباين في الخواص التي كانت متماثلة[17] .

إن الإجهاد الداخلي في الأغشية الرقيقة يتركب من مركبتين:

أ- **الإجهاد الحراري Thermal stress**

إن الإجهادات الحرارية ناتجة من اختلاف درجات الحرارة بسبب اختلاف معامل التمدد الحراري بين الغشاء والقاعدة. وإذا كان معامل التمدد الحراري للغشاء أكبر من معامل التمدد الحراري للقاعدة فإن إسهام الإجهاد الحراري (S_{th}) سيزداد وتكون الإجهادات الحقيقية صغيرة، ويمكن تقليل الإجهاد الحراري عن طريق مايأتي:

1- اختيار مادة القاعدة بحيث يتقارب معامل تمددها الحراري مع معامل التمدد الحراري للغشاء.
2- اجراء الترسيب بدرجة حرارة الغرفة.

توصل[15] إلى صيغة لحساب قيمة الإجهاد الحراري تعتمد على قيمة معاملات التمدد الحراري للقاعدة والمادة المترسبة وفرق درجات حرارة القاعدة أثناء عملية الترسيب وبعدها كما في المعادلة:

$$S_{th} = (\alpha_f - \alpha_s)\Delta T E_f \text{ ----------(1)}$$

حيث α_s, α_f هي معاملات التمدد الحراري لكل من الغشاء والقاعدة، ΔT الفرق في درجات حرارة القاعدة اثناء وبعد الترسيب و E_f معامل المرونة لمادة الغشاء.

ب- **الإجهاد الذاتي Intrinsic stress**

إن هذا النوع من الإجهاد له أهمية كبيرة لأنه انعكاس مباشر لنمو الغشاء ويعتمد على عدة عوامل:

أولا: سمك الغشاء: إن لسمك الغشاء أثراً كبيراً في نشوء الغشاء وتغيرات بنائه وإن علاقة الإجهاد بسمك الغشاء يختلف من مادة لأخرى.

ثانيا: درجة حرارة القاعدة: إذ تلعب دوراً مهماً في عملية تكاثف بخار المادة المرسبة من خلال سيطرتها على الحركة السطحية لذرات تلك المادة وبالتالي على بناء الغشاء النهائي.

ثالثا: معدل الترسيب: حيث بينت الدراسات أن زيادة معدل الترسيب يؤدي إلى زيادة الإجهاد.

رابعا: التلدين: إن عملية التلدين تؤدي إلى تقليل الفراغات في بناء الغشاء وبالتالي تقليل كثافة العيوب التي تؤدي الى تقليل قيم الاجهاد.

وهناك أربع طرق متبعة لقياس الإجهاد في الأغشية الرقيقة، ويبين الجدول (1) طرق القياس المعتمدة لقياس الإجهادات في الأغشية الرقيقة.

جدول (1): طرق القياس المعتمدة لقياس الاجهاد

ت	الطريقة	المبدأ	المصدر
1	القرص (Disk Method)	ملاحظة الانحراف في مركز القرص الدائري وباستخدام العلاقة $S = 2/3 \frac{E_f}{1-V_f} \frac{\delta^2}{r^2}$	Maissel and Glang (1970) [31]
2	حيود الأشعة السينية (X-ray diffraction)	ملاحظة التغيرات في ثوابت الشبيكة وباستخدام العلاقة $S = \frac{E_f}{2V_f} \frac{a_o - a}{a_o}$	Maissel and Glang (1970) [31] (Hoffman (1966 [22]
3	الانحناء (Bending)	اختيار قاعدة مستطيلة تثبت من أحد طرفيها ويكون انحناء في النهاية الطليقة وباستخدام العلاقة $S = \frac{E_s d_s^2 \delta}{3l^2 d_f}$	Al-Ani etal (2001) [5] , Hoffman (1966) [22] , Saeed (1980) [41]
4	طرق أخـــرى (Other Methods)	عن طريق التغير في بعض الخصائص الكهربائية والبصرية نتيجة الإجهاد	Hoffman (1966) [22] , Caswell etal (1979) [12]

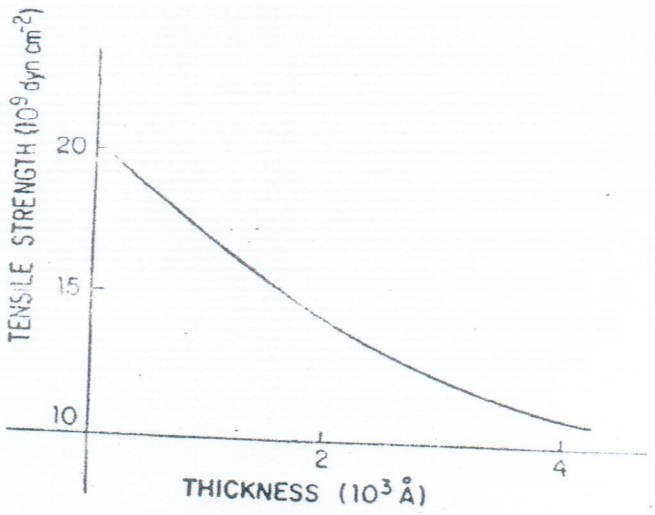
مفتاح للجدول: V_f = معامل بوازون، δ = التغير في مركز انحراف القرص، r= نصف قطر القرص الدائري، a_o , a = ثوابت الشبيكة، d_S = سمك القاعدة، d_f = سمك الغشاء، l = طول القاعدة التي يجري عليها الترسيب.

2-2 قوة المتانة Strength force

بالرغم من أن الغشاء منتظم إلا أنه يعاني زحفاً وتشويها وهناك أربعة تأثيرات للسطح على قوة المتانة وقد لخصت هذه التأثيرات من قبل [22] كما يلي:

1- الانخلاعات للسطح
2- وجود سطح جديد بسبب حركة الانخلاعات اللولبية التي تقطع السطح.
3- تأثيرات تشتت السطح بسبب طبيعة عدم انتظام السطح.
4- تغيرات ثوابت الشبيكة على السطح.

ويبين الشكل (2) العلاقة بين متانة السطح والسمك لغشاء النيكل حيث نلاحظ أن المتانة تزداد مع نقصان سمك الغشاء.



شكل 2 : العلاقة بين متانة السطح وسمك غشاء النيكل[22]

3-2 الكسر Fracture

عندما يكون الانفعال عالياً في الغشاء فأن الغشاء سوف ينكسر. وإن هذه التشوهات تحدث بواسطة الانخلاعات التي تكون مسؤولة عن الكسر في الغشاء.

4-2 الصلادة الدقيقة Microhardness

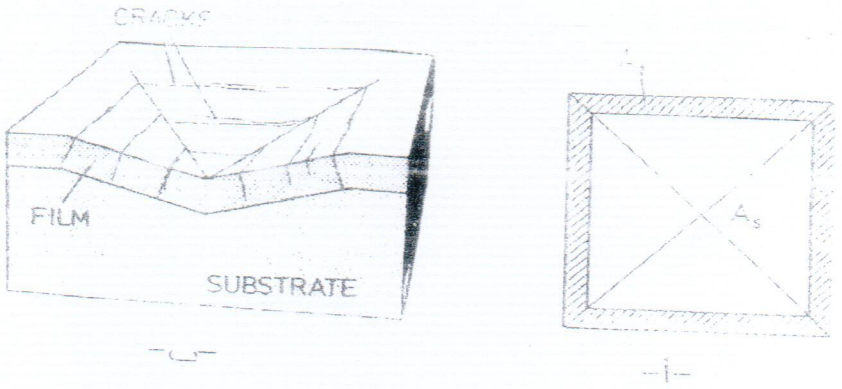
وهي إحدى الخصائص الميكانيكية المهمة للأغشية وترتبط مع خواصأاخرى مثلا مقاومة المادة للتخدش والتمزق. وتعرف الصلادة بأنها مقاومة المادة للتشوه اللدن الموضعي بتأثير اداة الغرز (Indenter) عليها بفعل الحمل المسلط ولزمن تأثير معين [27]

تعتمد الصلادة على بنية الغشاء المرسب وتركيبه الكيميائي وخواص السطح البيني (Interface) والاحتكاك بين أداة الغرز وسطح الغشاء علاوة على تأثير وجود فلزات أخرى مترسبة، إذ تؤثر في الصلادة بشكل ملحوظ وخاصة في الأغشية ذات الخواص الميكانيكية الضعيفة والسلوك المرن واللدن لتشوه الغشاء والقاعدة، وكذلك اختلاف الصلادة باختلاف الحجوم الحبيبية للغشاء نفسه نتيجة لظروف الترسيب. ويمكن الحصول على صلادة الغشاء أيضا من خلال صلادة الغشاء والقاعدة معا وصلادة القاعدة المرسب عليها وفق العلاقة الآتية[27]

$$H_C = \frac{A_f}{A} H_f + \frac{A_S}{A} H_S \text{ -------(2)}$$

حيث H_C صلادة الغشاء والقاعدة معا، H_f صلادة الغشاء، H_S صلادة القاعدة، A تمثل مساحة الغشاء والقاعدة معا $A=A_S+A_f$

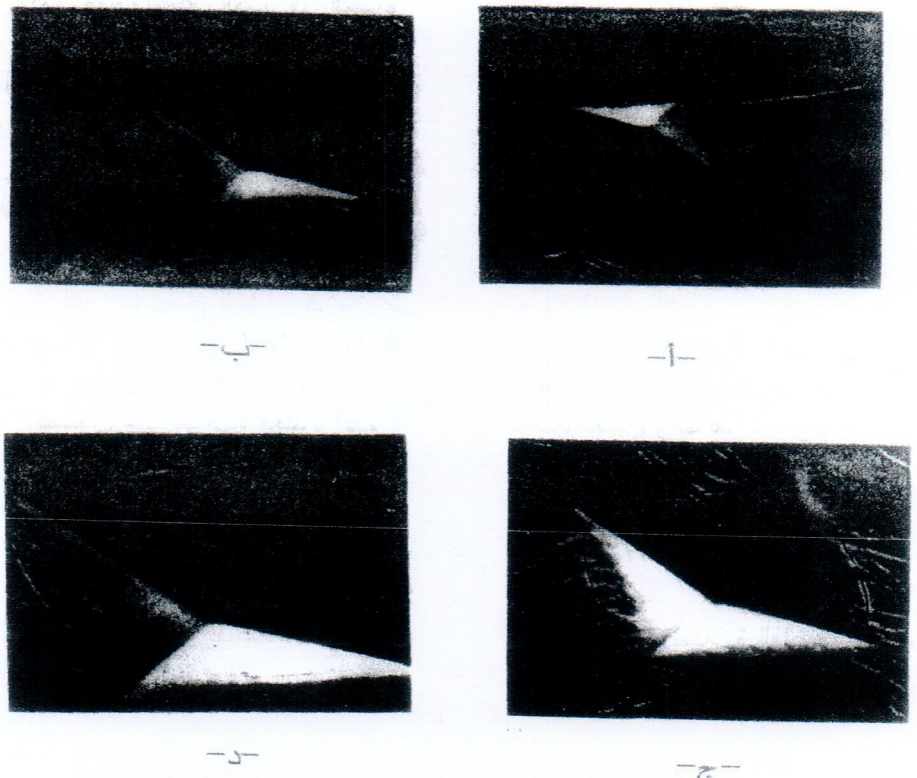
ويبين الشكل (3) رسما توضيحيا للأثر والتشقق الحاصل في الغشاء نتيجة تسليط حمل عليه.



-ب- -أ-

شكل 3: أ- يمثل مساحات تحت الحمل A_s, A_f للغشاء والقاعدة على التوالي
ب- مقطع عرضي للحز على مادة مطلي[27]

أما الشكل (4) فيبين بعض الصور للأثر المتولد على أغشية الكروم الرقيقة حيث نلاحظ وجود تشقق حول حافة التأثير على الغشاء من خلال الحمل المسلط ونلاحظ من الشكل أن عمق الأثر المتولد يزداد تدريجيا بزيادة الحمل المسلط من (أ) إلى (د) كما في الشكل أدناه[27] (Johnson and Hogmark (1984)).



-ب- -أ-

-د- -ج-

شكل 4: صور المجهر الالكتروني للأثر المتولد مع أحمال مختلفة [27]
أ- L=15gf , d=5.5µm، ب- L=25gf , d=8µm
ج- L=50gf , d=12µm، د- L=100gf , d=18µm

يتم استخدام اختبارات الصلادة الدقيقة للأغشية الرقيقة لأن سمك الغشاء قليل ولايجب أن يتعدى عمق الأثر الذي يتولد من الحمل إلى 10/1 من السمك، حيث إن نفاذه إلى عمق أكبر من هذه النسبة يؤدي الى نزول الحمل على القاعدة ويكون هناك خطأ في قياس الصلادة للغشاء، وإن هناك نوعين من الصلادة المايكرويه التي يكون فيها عمق النفوذ لايتعدى 7/1 من سمك الغشاء والمستخدمة في الاغشية الرقيقة وهما:

أ-صلادة فيكرز

تتضمن حز قطري لقاعدة مربعة الشكل بزاوية 136 درجة بتسليط حمل لمدة (10-15) ثانية على سطح المادة ويرمز لها بـ (Hv) ونحصل عليه بقسمة القوة (P) على مساحة السطح (M) وفق العلاقة[10] (()

$$H_V = \frac{P}{M} \text{-------(3)}$$

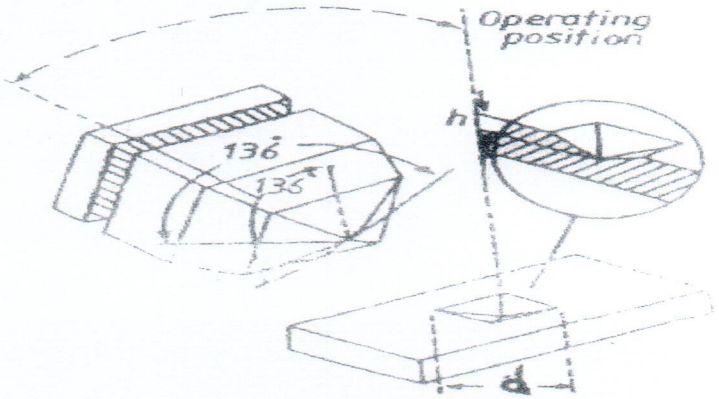
حيث أن:

$$M = \frac{d^2}{2\sin\alpha/2} \text{-------(4)}$$

حيث d قطر الحز ومن (3) و (4) نحصل على:

$$H_V = 1.8544\frac{P}{d^2} \text{-------(5)}$$

ويوضح الشكل (5) مخطط لكيفية الحصول على صلادة فيكرز



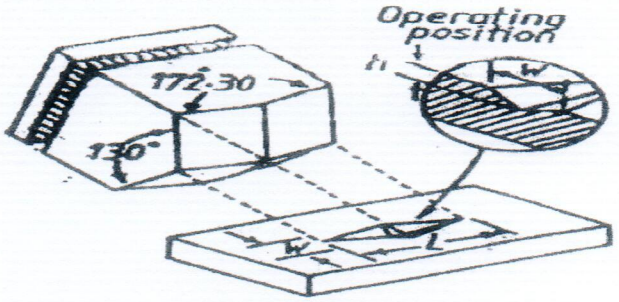
شكل 5: مخطط لكيفية الحصول على صلادة فيكر[10]

ب-صلادة كنووب Knoop hardness

تتضمن حز قطري لقاعدة بشكل معيني وبزاوية 172.3 درجة وبتسليط ثقل لمدة (10-15) ثانية على سطح المادة وتعطى بالعلاقة:

$$H_K = 14.23\frac{P}{L^2} \text{------(6)}$$

ويوضح الشكل (6) مخطط لكيفية الحصول على صلادة كنووب.



شكل 6: مخطط لكيفية الحصول على صلادة كنووب [10]

3 .الالتصاق Adhesion

إن الالتصاق هو تعبير عن القوى الداخلية الرابطة لسطح الغشاء وهذه القوى [26] هي :

1- القوى الكهربائية المستقرة
2- قوى فاندرفال
3- قوى الأواصر الكيميائية

وهناك عوامل تؤثر على قيمة الالتصاق ومنها:

1- الانتشار المستمر للأوكسجين من المحيط.
2- الشوائب الموجودة على القاعدة.

تعتمد الالتصاقية أيضا على الطاقة الحركية للذرات وتزداد الالتصاقية بزيادتها، أما الطاقة الممتزة (Adsorption Energy) تعد عاملا مساعداً لضبط سلوك تكاثف الذرات على السطح وتكوين النويات للغشاء على السطح وإن قيم الالتصاق لكل سم2 يمكن أن تساوي طاقة الامتزاز لكل ذرة التي تعطى بالعلاقة:-

$$E_o = \frac{-3\alpha_1\alpha_2 h(\nu_1\nu_2)}{2S^6(\nu_1+\nu_2)} \text{ ---------(7)}$$

حيث α_2, α_1 الاستقطابية لذرتين 1 و 2
ν_2, ν_1 الترددات الاهتزازية الخاصة
h ثابت بلانك
S مسافة التوازن للذرات المتكاثفة

وعندما تكون الذرات المتكاثفة متضمنة حصول أواصر كيميائية فأننا نحصل على قيم عالية لطاقة الامتزاز وبالتالي نحصل على قيم عالية لقوة الالتصاق.

إن من أهم الطرق لتعزيز الالتصاق بين الغشاء والقاعدة هي:

1- إخضاع القاعدة لقصف أيوني لأحد الغازات قبل أو بعد تحضير الغشاء
2- إخضاع الغشاء لقصف بسيل الكتروني
3- تنظيف القاعدة كيميائيا أو بطريقة التفريغ التوهجي

4- تسخين القاعدة قبل وبعد التحضير
5- خلق طبقة وسطية بين الغشاء والقاعدة لجعل قوة الارتباط ذات طبيعة كيميائية ومن هذه المواد أكاسيد المعادن.

وهناك عدة طرق عملية لقياس الالتصاقية بين الغشاء الرقيق والأرضية التي يرسب عليها، ويبين الجدول (2) الطرق المستخدمة لقياس الالتصاقية للاغشية الرقيقة والباحثين الذين استخدموا الطرق أعلاه.

جدول 2: طرق القياس المعتمدة لقياس الالتصاقية

ت	الطريقة	المبدأ	المصدر
1	الانحناء (Bending)	تنحني القاعدة حتى يزال الغشاء	Chatfield (1947) [13]
2	السحق (Squashing)	تسحق القاعدة حتى يزال الغشاء	Wlodek and Wulff (1960) [49]
3	الحك (Abrasion)	الصقل أو الحك لسطح القاعدة	Holland (1956) [24]
4	الحرارة والتبريد المفاجئ (Heating and Quenching)	التسخين وفجأة التبريد يؤدي الى إزالة الغشاء	Losse (1942) [30]
5	الخدش(Scratching)	باستخدام مسمار ذي رأس مدبب يسحب على الغشاء	Westwood (1976) [48]
6	الطرق (Hammering)	الطرق يكسر ويزيل الغشاء	Martin (1938) [32]
7	السحب(Pulling)	يسحب الغشاء بصورة مباشرة في حالة كون الغشاء سميكا أما إذا كان سمكه غير كافي فيتم لصق دبوس سميك على الغشاء لغرض سحبه من الأرضية وهي الطريقة التي اتبعناها لأغشية بسمك لا تزيد عن 800 نانومتر	Al-Ani (2002) [6] Moshi and Saeed (1989) [36]
8	القشر (Peeling)	الغشاء يتقشر باستعمال شريط قابل للالتصاق	Benjamin and Weaver (1960) [9]
9	التباطؤ (Deceleration)	يتعرض الغشاء أو القاعدة إلى تباطؤ ضعيف	May etal (1957) [33]

4- العلاقة مابين الخواص الميكانكية والخواص الأخرى

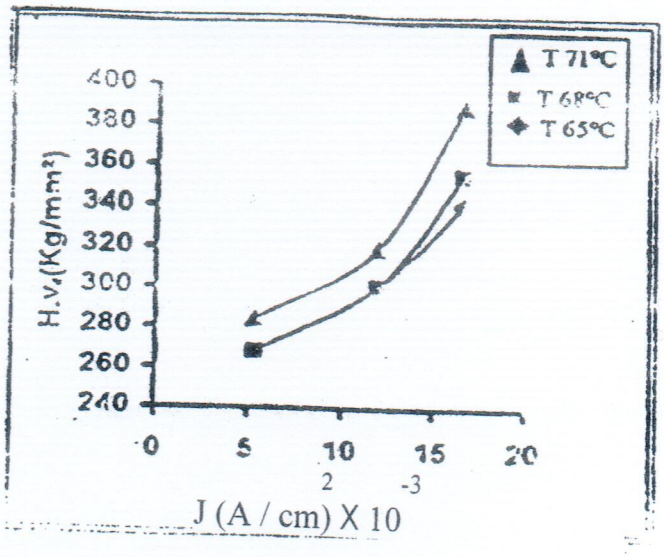
تؤثر العديد من العوامل في طبيعة الغشاء المترسب مثل درجة الحرارة وكثافة التيار ووجود الشوائب وبالتالي مدى ملائمته للتطبيقات المختلفة. ومع تباين التطبيقات وتنوعها توجد بعض الخواص الأساسية التي لابد من تحديدها لتحديد كفاءة الغشاء مثل سمك الغشاء وكذلك وجود المسامية ونوعها وعلاقتها بخشونة السطح والتصاق الغشاء بالقاعدة المرسب عليها ووجود الإجهادات الداخلية ومقاومتها للتآكل وللظروف الجوية ومقدار انعكاسيته للأطوال الموجية.[4])

وفيما يلي بعض الخواص التي لها الأثر الكبير على الخواص المختلفة وخاصة الميكانيكية منها:

4-1 الخواص الكهربائية:

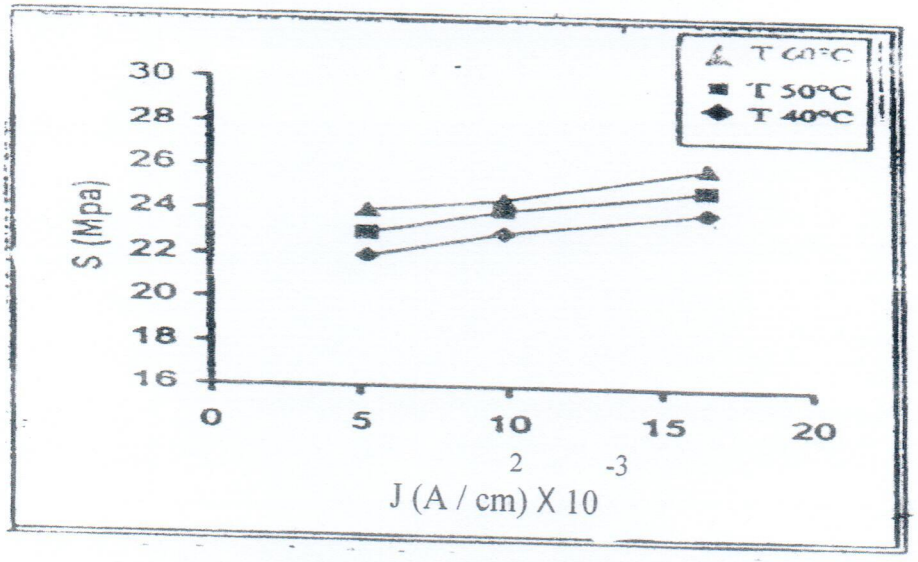
تعتبر كثافة التيار هي احدى الخواص المهمة للأغشية الرقيقة. والتي ترتبط بمسامية الغشاء وكذلك تتأثر بسمك الغشاء وكذلك تؤثر على خواص الغشاء وكفاءته للتطبيقات المختلفة. إن أبرز العوامل التي تؤثر على الكثافة هي ظروف الترسيب وطبيعة القاعدة التي يجري عليه الترسيب

ونلاحظ من الشكل (7) زيادة قيمة الصلادة مع زيادة قيمة كثافة التيار(J) وتحسن الصلادة عند نفس كثافة التيار مع زيادة درجة حرارة الترسيب لأغشية الذهب السبائكي([4].



شكل 7: زيادة قيمة الصلادة مع كثافة التيار لغشاء الذهب السبائكي [4]

أما الشكل (8) فيوضح كيفية تغير الإجهاد (S) مع كثافة التيار. حيث نلاحظ زيادة قيمة الإجهادات الداخلية مع زيادة كثافة التيار (J) وذلك بسبب انخفاض الانتظام في عملية نمو الغشاء بفعل زيادة كثافة التيار التي تؤدي إلى زيادة معدل الترسيب مما لايتيح الفرصة الكافية للذرات الواحدة كي تأخذ المواقع الملائمة لها بتأثير اختلاف الثوابت الشبيكية والأقطار الذرية للأيونات المترسبة وبالتالي عدم توافق في البنى البلورية فتسبب ضعفا وإجهادا للسطح البيني بين الغشاء والقاعدة[4]



شكل 8: تغير الإجهاد مع كثافة التيار لغشاء الذهب السبائكي [4]

2-4 التركيبية والبنائية

أ المسامية Porosity

تعرف المسامية بأنها الفجوات والفراغات الموجودة في الأغشية الرقيقة وتؤثر في خواصها. وهي نوعان مسامات مغلقة التي توجد ضمنيا بين الطبقات المترسبة وسببها فقاعات الهواء ووجود بعض الذرات على السطح وتكون مصدراً للاجهادات ومسامات مفتوحة وهي مسارات تربط سطح القاعدة مع سطح الغشاء الخارجي وسببها وجود شوائب على سطح القاعدة أو أن تكون عملية التنظيف غير دقيقة ومن الصعب أن ترتبط الذرات الواصلة في تلك المناطق بسبب عدم التوافق. وتنشأ هذه المسامات من الخشونة والعيوب السطحية[4]

ب مقاومة البلى Wear resistance

يعرف البلى بأنه فقدان المادة المستمر بفقدان جسيمات من على السطح الصلب بسبب الفعل الميكانيكي المستمر عليها، إن البلى للأغشية تعتمد على خصائص الغشاء كالكثافة والمسامية والسمك وصلادة الغشاء والقاعدة وكذلك الحمل المسلط على الغشاء.

أما أنواع البلى فهي البلى الالتصاقي والاحتكاكي والتآكلي، ويعتبر البلى الالتصاقي أكثر الأنواع شيوعا ويؤدي إلى حدوث التشوه والتشكل اللدن الموضعي للسطح ضعيف التماسك حيث تكون الأواصر ضعيفة ويكون الغشاء لينا وبالتالي يؤدي إلى خفض قيمة الالتصاقية له.

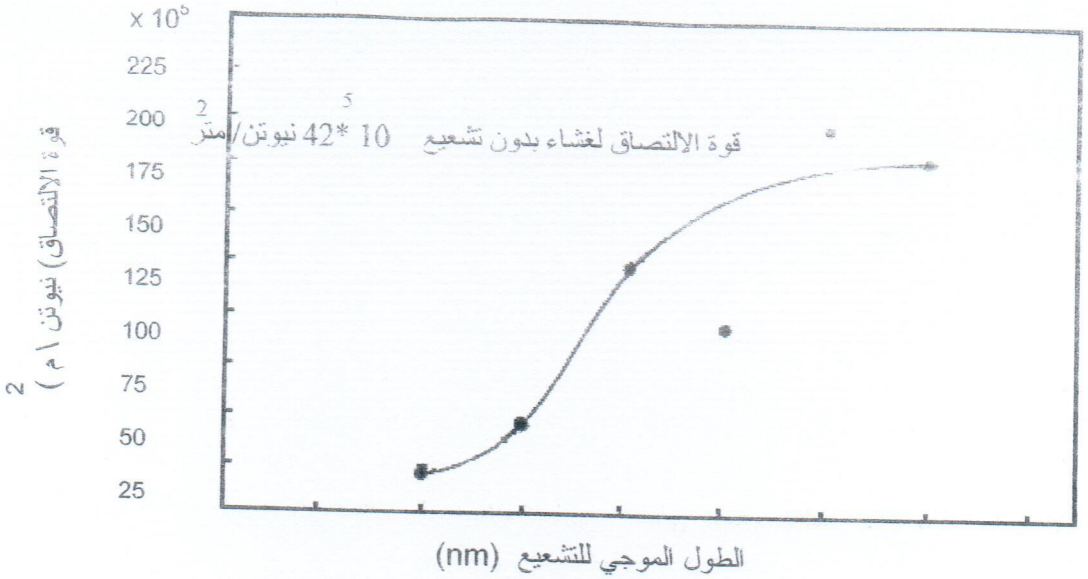
ج- الامتزاز وانتشار الغازات ونمو الغشاء Adsorption , gas diffusion and film growth

ان قياس الاجهاد يمكن استخدامه لدراسة تأثير عوامل الترسيب مثل الوسط ودرجة حرارة القاعدة على نمو وتركيب الأغشية، كذلك يمكن استخدامه لدراسة امتزاز الغاز أي عملية تكثيف جزيئات الغاز على السطح، حيث ان الغازات التي يتم امتزازها على سطح الغشاء لاتخترق الغشاء ولهذا فإن تغيرات الإجهاد يمكن استخدامها كمجس أو متحسس للفراغات والقنوات في هذه الأغشية [2] [33]

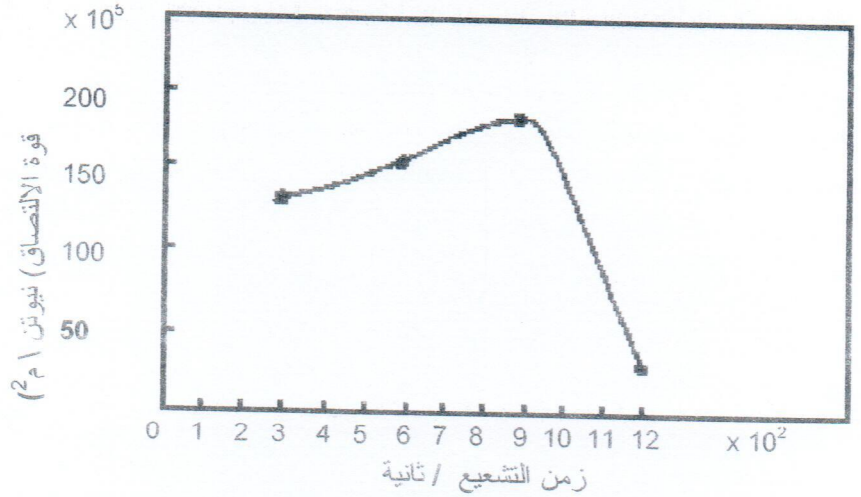
3-4 الخواص البصرية Optical properties

إن للخواص البصرية تأثيراً كبيراً على الخواص الميكانيكية حيث تعمل طاقة الفوتونات الساقطة على زيادة الالتصاقية بسبب أن طاقة التنشيط قد استخدمت لتحويل قوى الارتباط البيني إلى الأصرة الكيميائية التي تزيد من الالتصاقية وبالتالي التقليل من الإجهادات، كذلك إن الطاقة التي تعمل على استرخاء الشد السطحي وتوسع من مساحة الارتباط بين الغشاء وقاعدته وهذا يكون لأطوال موجية معينة حيث أن بعض الطاقات تعمل العكس[36] .

ويبين الشكل (9) العلاقة بين طاقة التشعيع وقوة الالتصاق [9]، حيث نلاحظ زيادة الالتصاقية بزيادة طاقة التشعيع لمادة الحديد. أما الشكل (10) يبين العلاقة بين قوة الالتصاق و زمن التشعيع.



شكل 9: العلاقة بين طاقة التشعيع وقوة الالتصاق لغشاء الحديد [9]

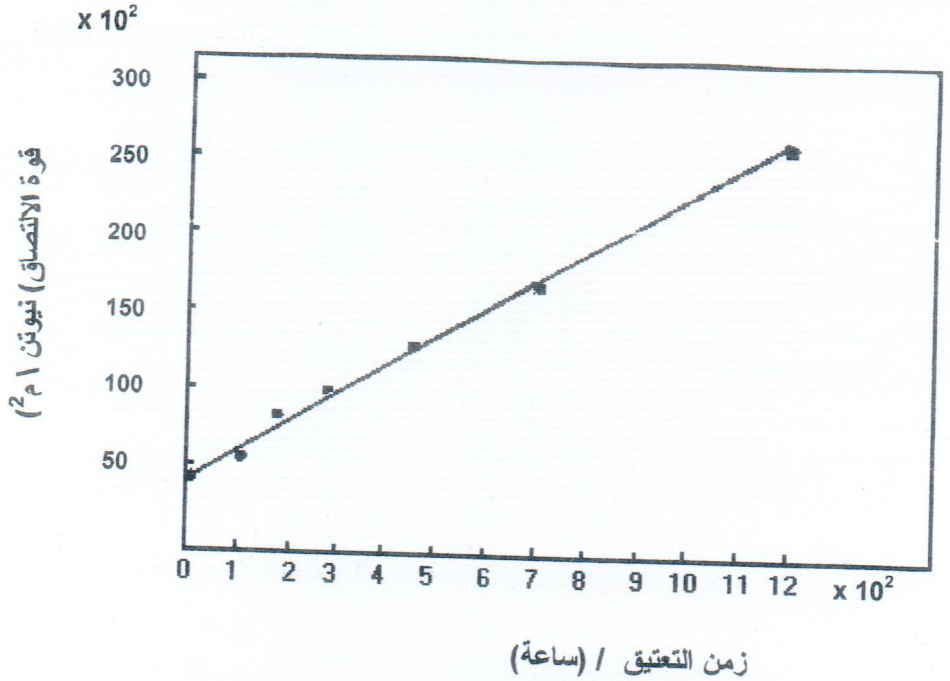


شكل 10: العلاقة بين زمن التشعيع وقوة الالتصاق

4-4 علاقة قوة الالتصاق بزمن التعتيق

إن زمن التعتيق (Aging)يزيد من قوة الالتصاق حيث إن التعتيق يؤدي إلى تكون طبقة أوكسيدية على السطح مما يزيد من التصاق الغشاء بقاعدته، كذلك يعزى السبب الى امكانية حصول الانتشار من الغشاء الى داخل القاعدة بمرور الزمن بعد التحضيـــر [36]

ويبين الشكل (11) العلاقة بين قوة الالتصاق وزمن التعتيق حيث نلاحظ ان العلاقة طردية حيث تزداد الالتصاقية بزيادة زمن التعتيق.



شكل 11: العلاقة بين قوة الالتصاق وزمن التعتيق لغشاء الحديد [36]

5-الدراسات والبحوث الحديثة

5- 1 الدراسات العراقية

سيتم في هذه الفقرة إيجاز الأبحاث المنشورة والرسائل الجامعية التي أجريت في جامعاتنا والتي تمكنا من الحصول عليها وكما يلي:

5-1-1 تمت دراسة الاجهادات للأغشية المعدنية الرقيقة (Al , Pb , Ag , Au) ووجد أن الإجهادات تكون إما شدية أو انضغاطية وكذلك دراسة تأثير معدل الترسيب على قيمة هذه الإجهادات وعلاقة الإجهاد مع درجة حرارة الانصهار عند ثبوت السمك والعلاقة بين الإجهاد والسمك [41].

5-1-2 درس أثر التشعيع بالفوتونات على قوة التصاق أغشية الحديد والألمنيوم ووجد أن قوة الالتصاق تزداد مع زيادة طاقة الفوتونات ولاطوال موجية معينة وان فترة التعتيق تعمل على تعزيز قوة التصاق أغشية الحديد.

5-1-3 أجريت دراسة ومقارنة لبعض الخصائص الميكانيكية لأغشية الألمنيوم والسيلينيوم وأوكسيد قصدير الأنديوم الرقيقة ووجد أن الالتصاقية تزداد مع زيادة درجة حرارة التلدين طرديا وعكسيا مع سمك الأغشية وكذلك بالنسبة للصلادة حيث تزداد الصلادة للأغشية الملتصقة بصورة قوية وبالتالي يكون الاجهاد قليلا، وكذلك وجد ان الاجهاد يكون متغيرا مع السمك ويكون الإجهاد إما شدي أو اضغاطي [7] [6] ([5].

5-1-4 درست بعض الخصائص الميكانيكية أغشية الذهب السبائكي المحضرة بطريقة التبخير الحراري وحيث وجدت علاقة تغير الإجهاد والصلادة مع كثافة التيار وكذلك تم معرفة تأثير المسامية ومقاومة البلى على تلك الخصائص (4).

وفي الجزء القادم سوف نتطرق لأهم الدراسات العالمية والتي أجريت خلال العقد الماضي.

2-5 الدراسات العالمية

استمرت الأبحاث في دراسة الخواص الميكانيكية للأغشية الرقيقة، حيث تم إيجاد العلاقة مابين مختلف الخواص الميكانيكية لأغشية ITO الرقيقة من قبل([42] من خلال دراسة تأثير الاجهاد في الالتصاقية وعلاقة الصلادة والإجهاد، وقام [14] بدراسة تأثير ضغط غاز الاركون في عملية نمو وتركيب الغشاء والخواص الميكانيكية لأغشية التيتانيوم والألمنيوم ودراسة تأثير سمك الغشاء ودرجة حرارة القاعدة وضغط الغاز. كما درس تأثير المعاملة الحرارية على الخواص الميكانيكية والتركيبية لغشاء الألمنيوم وفي العام نفسه قام [34] بدراسة الالتصاقية لأغشية السليكايت والزيولايت[9]. أما [47] فقد قاما بدراسة مقارنة مابين بعض الخواص الميكانيكية لأغشية الألمنيوم والنحاس مقارنة للخواص المماثلة لها في المواد الحجمية ووجدا انها تختلف بسبب تأثيرات السطح البيني والتركيب الداخلي للغشاء.

استخدم [16] اختبارات عديدة لتحديد خصائص اغشية TiN , NbN , CrC والتراكيب متعددة الطبقات. واستمرت الدراسات بأتجاه اخر حيث قام [37] بدراسة تأثير خواص القاعدة في نمو أغشية التيتانيوم وقياس الاجهادات للاغشية. وقام [20] بدراسة الخواص الميكانيكية لأغشية TiN , TaN , NbN وهي معامل يونك والصلادة وقوة التصدع والاجهادات، أما [39] فقد قاموا بدراسة اختبار تطبيق الصلادة على حزم الالمنيوم وتم حساب معامل المرونة.

وقام[38]) بدراسة تأثير الخواص الكيميائية للقاعدة في نمو أغشية التيتانيوم وباستخدام الماء وبمختلف الضغوط الجزيئية للماء وتم قياس الإجهاد لهذا الغشاء.

الجدول (3) يوضح الدراسات والبحوث التي أجريت لدراسة الخواص الميكانيكية المختلفة على بعض الأغشية الرقيقة المواد منذ عام 1960 وحتى الآن.

جدول 3: يوضح بعض المواد التي تم دراسة الخواص الميكانيكية لها.

ت	نوع المادة	طريقة التحضير	الخواص التي تم قياسها	المصدر
1	Si	التبخير الحراري	الإجهاد	Holland (1960) [25]
2	Si	التبخير الحراري	الإجهاد	Hill etal (1966) [66]
3	W,Nb,Zr,V,Al	الترذيذ	الإجهاد	Hoffman and John (1977) [23]
4	ITO	الترذيذ	الإجهاد	Just etal (1977) [28]
5	Pb,Al,Ag,Au	التبخير الحراري	الإجهاد	Saeed (1980) [41]
6	Se	الطلاء الأيوني	الالتصاق	Raven (1988) [40]
7	TiC , TiN	الطلاء الأيوني	الالتصاق والصلادة	Hummer and Pery (1983) [26]
8	Au , Ag , Cu ,Ge	التبخير الحراري	الاجهاد	Abermann etal (1983) [1]
9	Gr	التبخير الحراري	الصلادة	Abermann (1992) [3]
10	Cu , Ag	التبخير الحراري	الإجهاد	Abermann (1990) [2]
11	Fe	التبخير الحراري	الالتصاق	Moshi and Saeed (1989) [36]
12	Al	التبخير الحراري	الالتصاق	Moshi and Saeed (1989) [35]
13	TiO2	الترذيذ	الإجهاد	Vertenar (1990) [46]
14	Cu	التبخير الحراري	الإجهاد والالتصاق	Lafontaine and Li (1990) [29]
15	Ge	التبخير الحراري	الإجهاد والالتصاق	Thurner and Abermann (1990) [44]
16	ITO	التبخير الحراري	الإجهاد والصلادة	Suzuki etal (1994) [42]
17	TiAl , Al , Ti	الرش	الإجهاد	Combadiere (1997) [16]
18	NbN , CrC , TiN		خواص متعددة	Hedenqvist etal (1997) [20]
19	Ti	UHV(cantilever beam tech.)	الإجهاد	Poppeller and Abermann(1997) [37]
20	Ti	UHV(cantilever beam tech.)	الإجهاد	Poppeller and Aberman (1998) [38]
21	Al,Se,ITO	التبخير الحراري	الإجهاد، لالتصاقية، الصلادة	Al-Ani etal (2001) [5] , Al-Ani etal (2002) [6]

6-التوجهات المستقبلية

إن أغلب البحوث الحديثة تتجه إلى دراسة خواص سطح القاعدة المرسب عليها الأغشية الرقيقة سواء كانت الخواص الفيزيائية او الكيميائية وتأثير تلك الخواص على نمو الأغشية وانعكاس ذلك على الخواص المختلفة للأغشية ومن ضمنها الخواص الميكانيكية، بالإضافة إلى ذلك دراسة تأثير الغازات الداخلة أثناء عملية تحضير الغشاء والتفاعل الذي يحدث بين تلك الغازات والأغشية.وإن ذلك بالتأكيد له تأثير مباشر وحاسم على دخول هذه الأغشية في تطبيقات حديثة ومستقبلية ،

7-الاستخلاصات

1-7 لقد تم عرض الخواص الميكانيكية للأغشية الرقيقة وتوضيح أهم النماذج النظرية والعلاقات الرياضية للطرق المستخدمة لقياس هذه الخواص ومنها الإجهاد والمتانة والكسر والصلادة بإنواعها والانفعال والالتصاقية.

2-7 تم استعراض أهم طرق القياس العملية للخواص الميكانيكية للأغشية الرقيقة وتأثيرها على الخواص الأخرى كالكهربائية والبصرية والتركيبية ومجالات تطبيقها صناعياً.

3-7 تم عرض ما متوفر لدينا من ابحاث ورسائل دراسات عليا في مجال الخواص الميكانيكية للأغشية الرقيقة عربيا وعالميا.

4-7 تم شرح سلوك بعض هذه الخواص لأغشية معدنية رقيقة وعازلة وشبه موصلة وذلك لإيضاح نوع العلاقة بين هذه الكميات المقاسة وتم النطرق إلى توجهات البحوث الحديثة والمستقبلية في هذا المجال

المراجع

1) Abermann. R , R. Koch and H. P. Martinz (1983) , "Internal stress of thin silver , copper , gold and charmanium films a comparison " , Vacuum , 33 , p.871.
2) Abermann, R. , (1990) , "Measurements of the intrinsic stresses in thin metal films" , Vacuum , 41 , No.4-6 , pp(1279-1282).
3) Abermann, R, (1992) , "In situ measurement of stresses in thin films" , Mat. Res. , Soc. Symp. Proc. 239 , pp(25-36).
4) Al-Ani. A, (2000) , "Gold alloy plating" , MSc. Thesis submitted to Dept. of Applied Sciences , University of Technology , Iraq.
5) Al-Ani , S.K.J و R.Al-Haddad and Th.Al-Ani (2001) , "Study and comparison of the structure and stress for thin Aluminum (Al) , Selenium (Se) and the Indium tin oxide (ITO) films" , Iraqi J. of Science ,42C , No.3 , pp.29-42.
6) Al-Ani S.K. J., R.Al-Haddad and Th. Al-Ani (2002) , "Study and comparsion for hardness of thin Aluminum (Al) , Selenium (Se) and Indium tin oxide ITO films" , Iraqi J. of Science , 43C , No.3 , pp.69-76.
7) Al-Ani. Th , S.K.J.Al-Ani and R. Al-Haddad (2002) , "Study and comparison for adhesion of thin Aluminum (Al), Selenium (Se) and Indium tin oxide ITO films" , Iraqi J. of Science ,43C, No.1 , pp.36-44
8) Benamati B. G., P.Casarade and A. Fazio , (1996) , "Effect of heat temperature and cooling rate on microstructural and mechanical characteristics of Aluminide coating on MANET Steel" , J. of Nuclear Materials , 230 , No.3 , pp.(214-218).
9) Benjamin. P , C. Weaver (1960) , "Measurement of adhesion of thin films" , Proc. Roy. , Soc. A 254 (1960)163.
10) Bolton. W , (1998) , "Engineering materials technology" , 3rd ed. PP(55-59).
11) Caswell.H.L. , J.R. Preiest and Y.Bndo (1979) , J.Appl. Physics 315.
12) .Chatfield. H.W , (1947) , Paint , 17 , 295.

13) Chinmulgund. M , M.Inturi and R.B. Barnard , (1996) , "Effect of Ar gas pressure on growth , structure and mechanical properties of Ti , Al , TiAl and Ti//3Al films" , Thin Solid Films , 270 , No.1-2 , pp(260-263).
14) Chopra.K.L , (1975) , "Thin film phenomena" , McGraw – Hill , Book Company , New York , PP(266-327)
15) Combadiere.L.M. , (1997) , "Influence of substrate temperature on the mechanical properties of thin films" , Surface and Coating Technology 88 N1-3 , pp(28-37).
16) Eckertova. L , (1984) , " Physics of Thin Films " , 2 end. Plenum Press New York and London.
17) Gao H.C.. and C. Lee (1992) , "Elastic contact versus identation modeling of multi – layered materials , Int. Journal of Solids and Structures 29 , No.20 , PP.(2471-2492).
18) Heavens O.S , (1970) , "Thin film Physics" , Methuen and Co. Ltd. Halsted press , New york , pp(53-61).
19) Hedenqvist.P , S. Jaconson and S. Hogmark , (1997) , "Thirbological PVD coatings characterization of mechanical properties " , Surface and Coatings Technology , 97 , pp.(212-217).
20) Hill.A.E. and G.R. Hoffman (1966) , "Stress in films of silicon monoxide" , J. of Appl. Phys. , 18 , pp.(13-22).
21) .Hoffman. R.W , (1966) , "The mechanical of thin condensed films" , New York , p.11
22) Hoffman D..W. and A. John. , (1977) , "The compression stress transition in Al , V , Zr , Nb and W metal films sputtered at low working pressures" , Int. Conf. on Metallurgical Coatings , PP.(387-395).
23) Holland. L (1956) "Vacuum deposition of thin films " , Chapman and Hall , Ltd , London.pp.98-103.
24) Holland L. ,(1960) , "Annealing of residual stress in silicon monoxide films" , J. Appl. Phys. , 12 , Oct. , PP(580-581).
25) .Hummer. E and A. J. Pery (1983) , "Adhesion and hardness of ion-plated Tic and TiN coatings" , Thin Solid Films , 101 , pp(243-251).
26) Johnson, B and S. Hogmark , (1984) , "Hardness measurements of thin films" , Thin Solid Films , 114 , pp257-269.
27) .Just. M , N. Maintzer and I.Blech. , (1977) , "Stress in transparent conductive Sn-doped Indium oxide thin films" , Elsevier Seqvoia , pp(119-120).
28) .Lafontaine. R W. and B. , Li , (1990) , "Effect of residul stress and adhesion on the hardness of copper films deposited on Silicon" , J. of Materials Research , 5 , N4 , pp(776-783).
29) Loose. S.V. , (1942) , Trans , Electrochem , Soc. 107.
30) Maissel.I. L and R. Glang , (1970) " Hand book of thin film technology " , Mc Graw – Hill , New York , pp (4-47).
31) Martin.C. R , (1938) , Proc. Finishing London 2,7.
32) .May. D. W. , W. Smith and C. O. Snow (1957) , Nature , 179 , 494.
33) Mintova. S. and K.Valentin , (1996) , Adhesivity of molecular sieve films on metal substrate " , Zolites , 17 , No.5-6 , pp.(462-465).
34) Moshi ,G. , M.Saeed , (1989) , "Styudy of some Adhesion parameters of Al films" , J. of Engineering and Technology , 4, No.7.
35) Moshi ,G. and M. Saeed , (1989) , "The effect of radiation on the adhesion force for Iron films" , J. of Engineering and Technology , 2, pp.(98-113).
36) .Poppeller. M , and R. Abermann , (1997) , "Influence of substrate properties on the growth of titanium films , Part I , Thin Solid Films , 295 , pp.(60-66).
37) Poppler. M. and R. Abermann , (1998) , "Influence of substrate properties on the growth of titanium films" , Part II , Thin Solid Films , 320 , pp.(3331-337).
38) .Randall. N.X, E. Hollander and C. Julia (1997) , "Application of nano hardness tester of Aluminum bond pads surface and coatings technology " , Thin Solid Films.
39) Raven (1988) , "The adhesion and interface chemistry of ion-plattted Selenium " , Thin Solid Films , 87 , pp(337-346).
40) Saeed M.. , (1980) , 'Study of the stress for metal thin films" , M.Sc. Thesis , University of Technology , Baghdad , Iraq.
41) .Suzuki.S. H , N.Oyama and T. Suzuki , (1994) , "Effect of internal stress on adhesion and other mechanical properties of evaporation ITO films" , J. of Adhesion Science and Tech. 8 , No.3 , pp(261-271).

42) Tong.C. H. , C.M. LO. , (1976) , J.Vac. Sci. , Tech. 13 , p99.
43) Thurner and Abermann. G.R, (1990) , "On the mechanical properties of UHV- deposited Cr films and their dependence on substrate temperature oxygen pressure and substrate material " , Vacuum , 41 , pp(1300-1301).
44) .Van. H , D.Josell and D.Shechtman (1996) , "Tensile test of low density multilayer thin film" , Materials Research Society , USA , PP. 139-144.
45) Vertenar. P (1990) , " The stress reduction in TiO2 films" , Vacuum , 40 , No.1 1 , 2 pp(173-170).
46) Vinci. R. , and J.Joost , (1996) , "Mechanical behavior of thin films" , Polymers Annual Review of Materials Science , 26 , pp.(431-462).
47) .Westwood.W.D , (1976) , Glow discharche sputtering , Progress in Surface Science, 67 , pp(71-111).
48) Woldek. S.T. and T. Wulff (1960) , J. Electrochem , Soc. , 107 , 565.

The Mechanical Properties of Thin Solid Films

S.K.J. Al-Ani and Th. Al-Ani
Department of Physics , College of Science , University of Baghdad , Jadirya , Baghdad , IRAQ.
E.mail: saiwan _ kamal @ yahoo.com

Abstract

In this paper, the mechanical properties of thin solid films are presented.These properties are: stress, hardness, strain and adhesion. The available measuring methods are reviewed in details. The study of such properties is of great importance especially in their effects on the electrical , optical and related properties of thin films.
Furthermore , it improves the applications of these films, as well as protecting their internal structure from damage.

Keywords: Thin film , mechanical properties , stress , hardness , strain , adhesion .