الفصل الرابع

المراقبة الضوئية للخشونة السطحية واللمعان

Optical Inspection of Surface Roughness and Gloss

تشكل نوعية سطح المنتج، لمجموعة متنوعة من المنتجات التي تمثل مختلف القطاعات الصناعية، في كثير من الأحيان عاملاً مهماً. قد يمر سطح المنتج خلال سلسلة من عمليات الإنهاءات لتحسين نوعية السطح. سنعدد في هذا الفصل بعض الأمثلة التي تكون فيها جودة السطح محدِّدا هاما. على سبيل المثال، في حالة إنتاج صفيحة فولاذية لصناعة السيارات تُدَلفَن (تُلَف) أولاً ساخنةً نسبياً وبعد ذلك تُلَف على البارد في خط أسطواني. تَتْرك البكرات علامات إنهاءات نمطية على سطح الشريط الفولاذي. شكل الأسطوانة أساسي (إضافة إلى قوة تحمل الأسطوانة)، إذ أنها تتعلق بخشونة السطح المطلوبة ومادة سطح الصفيحة الفولاذية. وبطبيعة الحال يظهر اهتراء على سطح غلاف الأسطوانة وهذا الاهتراء يجعل خشونة سطح الشريط المعدني دالة على اهتراء الأسطوانة. قد تظهر حالة مماثلة أيضا في نوع آخر من عمليات الإنهاء السطحية، وهي في إنتاج الحبوب في صناعة المستحضرات الصيدلانية. عمليات الانتهاء السطحية لآلة كبس الحبوب هي أمر حاسم لمنع ، مثلاً ، التصاق مواد المسحوق على سطح المكبس. وهكذا عادة ما يكون المطلوب سطح مكبس ناعم جداً من أجل صناعة حبوب مثلى.

في حالة الهواتف الخلوية يتم الحصول على أغطية بلاستيكية عالية الجودة باستخدام التشغيل الآلي للتفريغ الكهربائي لأسطح قوالب الحقن. ينسخ ذوبان البلاستيك سطح القالب ويمكن حسب الطلب الحصول على سطح غير لامع خشن نسبيا. ومع ذلك، تتعرض الأداة للاهتراء مما قد يؤدي إلى اختلاف نوعية السطح الموضعية في المنتجات البلاستيكية خلال دورة عمل طويلة للأداة.

من الواضح أنه في بعض قطاعات الصناعة توجد رغبة في الحصول على سطح منتج أملس قدر الإمكان، بينما ترغب بعض القطاعات الأخرى الحصول على خشونة سطح عالية نسبياً والتي تكون بالنسبة لها مقياسا لجودة المنتج. العامل المشترك لهذه الفروع الصناعية هو الحصول على معلومات عن خشونة سطح المنتج، وأيضا عن علامات الإنهاء و على توجهاتهم. دور عمليات التصنيع، على سبيل المثال هنا ، لحالة الأداة أهمية كبيرة في إيجاد العملية الأفضل للحصول على الحالة المثلى لسطح المنتج [45]. تكون تقنيات القياس الضوئية لأسطح فائقة النعومة على غاية من الأهمية لا سيما في تحسين النوعية السطحية للأجهزة التي تعتمد على أشباه الموصلات ومنتجات أخرى عالية التقنية. وقد تم وصف القياس الضوئي لأسطح فائقة النعومة، على سبيل المثال، في كتاب بينت وماتسون *Bennett and Matson* [46].

(٤,١) تعريف محددات الخشونة السطحية

Definition of Surface Roughness Parameters

يعتمد قياس محددات خشونة السطح، التي سنعرفها أدناه، تقليديا على جهاز يسمى إبرة الألماس. و تكمن الفكرة بتطبيق قوة صغيرة على إبرة ألماس دقيقة بحيث تسجل السطح على طول خط دقيق، وعادة ما يكون قصيرا إلى حد ما. ولسوء الحظ، تنحصر مثل هذه التقنية في الظروف المخبرية، لا يمكن اعتبارها طريقة للفحص المباشر

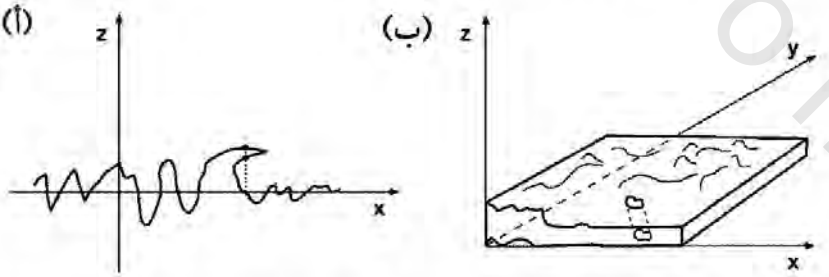
لنوعية سطح المنتج في موقع صناعي، حيث يمكن أن تكون سرعة الخط سريعة إلى حد ما. ولكن لحسن الحظ هناك حلول غير تدميرية لتقدير خشونة السطح والتي تعتمد على تقنيات القياس الضوئية مثل التثليث والانعكاس البراق والقلم الليزري. تؤمن مثل هذه التقنيات القياسية معلومات عيانية macroscopic عن خشونة السطح والتي هي تقديرية بالتأكيد حسب مفتشي الجودة في مختلف قطاعات الصناعة العملية. محددات خشونة السطح في الهندسة الأكثر شيوعاً هي متوسط خشونة السطح (R_a) و القيمة الفعالة (rms) لخشونة السطح (R_q). والتي تستند على تعريفات رياضية بحتة على النحو التالي :

$$R_a = \frac{1}{A}\iint_A |z(x,y) - \langle z(x,y)\rangle| dxdy, \qquad (٤,١)$$

$$Rq = \left\{\frac{1}{A}\iint_A [z(x,y) - \langle z(x,y)\rangle]^2 \, dxdy\right\}^{1/2} \qquad (٤,٢)$$

حيث z = z(x,y) هو الارتفاع كدالة للموضع في نظام الإحداثيات الديكارتية، و $\langle z(x,y)\rangle$ هو متوسط السطح الأساسي في منطقة مختارة من الفراغ xyz بحيث تكون z (x,y) أدنى تغير، وA هي المساحة الثانية. بملاحظة أن عملية مسح تضاريس السطح في القياسات العملية هي ثابتة بحيث إن طول المسافة المقطوعة الفاصلة على طول الخط، وليكن بالاتجاه x، هي أيضاً ثابتة ويعتمد مسح المنطقة A على إجراء المسح خطوة خطوة. تستخدم في كثير من الأحيان نظائر أحادية البعد للتعاريف (٤,١) و (٤,٢). وهذا يعني أن الشكل الجانبي هو z =z(x) وذلك لأن قياس السطح يتم على طول خط دقيق فقط. وبالتالي تحوي التكاملات اللازمة لحساب محددات خشونة سطح على متغير وحيد فقط. وللأسف، فإن التعاريف (٤,١) و (٤,٢) ليست خالية من المشاكل. فعلى سبيل المثال، لِنَقُل إننا قمنا بتدوير الشكل الجانبي المقاس أحادي البعد z =z(x) بزاوية ١٨٠° حول

المحور x. سوف نحصل وفقاً للتعريفين (٤,١) و (٤,٢) على نفس قيم محددات خشونة السطح سواء بالنسبة للشكل الأصلي أو للشكل الناتج من المرآة الدوارة. ومع ذلك، ممكن أن تكون دوالهم الميكانيكية مختلفة إلى حد ما. على سبيل المثال، في تطبيقات التزييت. حيث إن محددات خشونة السطح القياسية والهندسية العملية لا تتطابق على بعضها. كما أن هناك مشاكل أخرى موضحة في الشكل رقم (٤,١). لدينا في الشكل رقم (٤,١ أ) حالة تكون فيها لدالة الشكل الجانبي z قيمتين مختلفتين عند نفس النقطة. مثل هذا الوضع غير مقبول بالمفهوم التعريفي الرياضي للدالة z ، ولكن ممكن أن تظهر في الممارسة العملية مثل علامات الإنهاء هذه. وكذلك في قياس الشكل الجانبي للسطح، إما بواسطة القلم الميكانيكي أو الضوئي، حيث يصعب الوصول إلى المساحة الموجودة أسفل "القرن" في الشكل رقم (٤,١أ). الإشكالية الأخرى تظهر في الشكل رقم (٤,١ ب) حيث يظهر "ثقب دودة". مثل هذه الحالة قد تظهر في سياق الأوساط المسامية كالورق. وفي هذه الحالة تكون إمكانية تعريف الذروة داخل منطقة "ثقب الدودة" مشكوكا فيها. وعلى الرغم من وجود بعض المشاكل في تعريف محددات خشونة سطح إلا أنها توفر وسيلة جيدة للمفتشين لتقييم نوعية المنتجات خاصة المستوية في المواقع الصناعية. غير أن قياس خشونة سطح أجسام معقدة الشكل، على سبيل المثال، لا يزال يشكل الجدار الداخلي لأسطوانة محرك السيارة مشكلة.



الشكل رقم (٤,١). الحالات المثرضية لتعريف خشونة السطح. (أ) تعريف خشونة سطح لا لبس فيه عند موقع الخط المنقط و (ب) في موقع "ثقب الدودة".

بطريقة مماثلة للحالة أعلاه يمكن لنا أيضا تعريف محددات المنحدر العائدة لخشونة السطح باستخدام مفهوم المشتقات الجزئية كما يلي:

χω

$$S_{a,x} = \frac{1}{A}\iint_A \left| \frac{\partial z(x,y)}{\partial x} - \frac{\partial \langle Z(x,y) \rangle}{\partial x} \right| dxdy$$

(٤,٣)

$$S_{a,y} = \frac{1}{A}\iint_A \left| \frac{\partial z(x,y)}{\partial y} - \frac{\partial \langle z(x,y) \rangle}{\partial y} \right| dxdy$$

و

$$S_{q,x} = \left\{ \frac{1}{A}\iint_A \left[\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} - \frac{\partial \langle z(x,y) \rangle}{\partial x} \right]^2 dxdy \right\}^{1/2}$$

(٤,٤)

$$S_{q,y} = \left\{ \frac{1}{A}\iint_A \left[\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} - \frac{\partial \langle z(x,y) \rangle}{\partial y} \right]^2 dxdy \right\}^{1/2}.$$

تحصل عادة على محددات المنحدر في بعد واحد بواسطة الشروط التجريبية وذلك نظراً للسهولة العملية جزئيا فقط، بينما في الاتجاه الآخر هي محددة. ينبغي أن يعالج المنحدر في الحالة العامة باستخدام المشتق الاتجاهي، أي التدرج. و تتواجد نفس المشاكل المذكورة أعلاه من أجل "السلوك السيئ" في تعريف محددات المنحدر. محدد

obeikandl.com

المنحدر هو مقياس عملي من منظور، أن السطحين قد يأخذان نفس متوسط خشونة السطح ولكن قد يختلفان عن بعضهما البعض نظراً لكون متوسط المنحدرات مختلفا .

المحددات الأخرى المفيدة، إلا أنه يمكن استغلالها بدرجة أقل في الممارسة الهندسية اليومية، هي دالة الترابط التلقائي أو دالة الترابط الذاتي (AC) ودالة الكثافة الطيفية للقدرة (PDF). تحدد دالة الترابط التلقائي أوجه التشابه بين السطح الجانبي في الاتجاه الأفقي. يتم الحصول على الـ PDF بالمعامل التربيعي لتحويل فورييه وهي تصف بشكل خاص دورية علامات الإنهاء في مستوى التردد المكاني $(f_1 ، f_2)$ ، . يتم تعريف هذه الدوال ذات الطبيعة المتماثلة، في الحالة العامة من (٤,٥) و (٤,٦)

$$AC(\tau_1,\tau_2)=\frac{1}{A}\iint_A z(x,y)z(x+\tau_1,y+\tau_2)dxdy, \qquad (٤,٥)$$

$$\mathrm{PDF}(f_1,f_2)=\frac{1}{A}\left|\iint_A z(x,y)e^{2\pi i(x f_1+y f_2)}\,dxdy\right|^2 . \qquad (٤,٦)$$

يتم حساب AC وPDF عادة لحالة أحادية البعد. وهكذا يُعرَّف طول الترابط الذاتي 10 /AC (0) = 1 كمقياس يعتمد على مقدار ما يشابه الشكل الجانبي لسطح أحادي – البعد لذاته. تملك الإحصائيات السطحية تأثيراً على دالة الترابط التلقائي [47].

ويتم الحصول على الشكل الجانبي للسطح عادة بأخذ عينات منفصلة ولكن التباعد بين نقاط البيانات يكون متساوياً. يتعين على المرء في تحليل البيانات أن يستخدم تقديرات تقريبية للمحددات المذكورة أعلاه باستبدال التكاملات المعنية بالمجامع المقابلة، أو باستخدام مطابقة المنحنيات للحصول على دوال مستمرة.

نظرية الاحتمالات مفيدة في وصف الارتفاعات. دالة التوزع w = w(z) .

$$\int_{-\infty}^{\infty} w(z)dz = 1 \qquad (٤,٧)$$

تعطي معلومات عن تماثل أو عدم تماثل "الهضاب" و "الوديان" أي انحراف التوزع. الحالة الأبسط هي دالة التوزيع الجاوسي، أي، شكل جاوسي متماثل التوزع. ولسوء الحظ، غالباً ما تكون دالة التوزع للمرتفعات السطحية لأنواع مختلفة من أسطح المنتج غير متماثلة، على سبيل المثال، عملية الإنهاء كاللف السطحي. وقد يحدث أن يكون التعبير الرياضي البسيط للتوزيع غير مباشر، كمثال على هذه الحالة علينا أن نتذكر حالة البنية السطحية المعقدة للورق، وعليه ، غالباً ما يمكن اعتبار التوزع الجاوسي على أنه يمثل التقريب الأول للنموذج الإحتمالي الإحصائي للسطح.

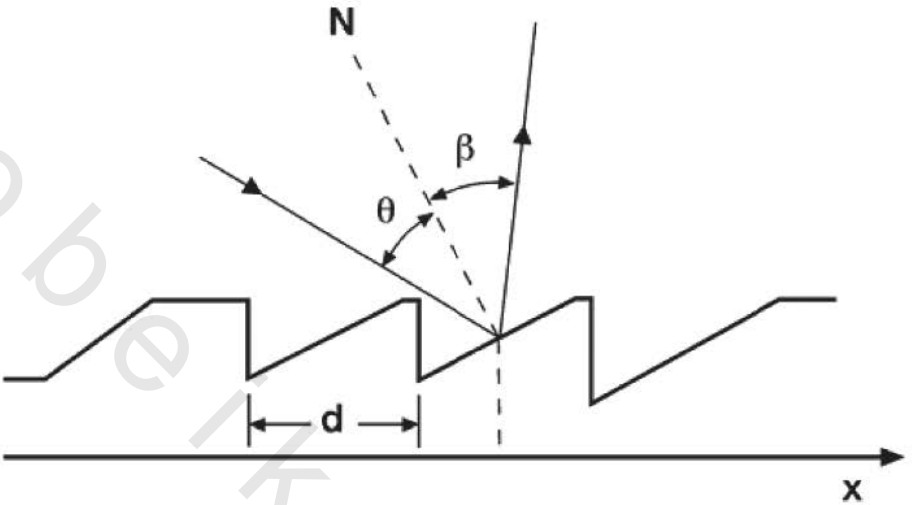
(٤,٢) المراقبة الضوئية لعلامات الإنهاء
Optical Inspection of Finishing Marks

يمكن تقسيم خشونة سطح تقريباً إلى خشونة سطح ماكروي (عيني) وميكروي (مجهري). ومن الواضح أن خشونة سطح الماكروي أمر يستند على الإدراك البصري، بينما خشونة السطح الميكروية تتطلب وسائل أخرى للحصول على بيانات عن ذلك. العين البشرية دقيقة ومداها الديناميكي واسع، وقد كان الفحص الضوئي لفترة طويلة أسلوبا معتمدا لفحص جودة سطح المنتج في الصناعة. وهذا صحيح حتى الآن ، على الرغم من أن الطلب على الفحص التلقائي الذي يعتمد أكثر أو أقل على جهاز الرؤية الآلية أصبح أقوى في العديد من قطاعات الصناعة التحويلية. توفر حزمة ليزر هيليوم نيون HeNe موسعة طريقة لطيفة في حالة الفحص الضوئي للخشونة الماكروية أو للانحناء غير الطبيعي للكشف عن تشوهات سطح ما، شيء آخر هو كيفية تحليل بيانات صورة كهذه، البيانات التي هي واضحة للعين البشرية، لكن ليست لنظام يعتمد كاميرا CCD وجهاز كمبيوتر.

يوفّر الضوء الأحادي اللون والمترابط من مصادر ليزرية مختلفة رخيصة، بما في ذلك أجهزة ليزر أشباه الموصلات، مجساً لمراقبة الخشونة الصغيرة الميكروية للسطح لفحص مجموعة متنوعة من مختلف الأسطح. ومن العوامل العملية الهامة عادة تباعد أشعة الليزر المنخفض. تتيح خاصية شعاع الليزر هذه القياس عن بعد والكشف. كذلك الضوء الأحادي اللون مهم أيضا خاصة في تحليل البيانات التي تتضمن نماذج رياضية بسيطة نسبياً و التي تفترض عادة استخدام ضوء أحادي اللون. يمكن لأشعة الليزر أن تُستغل كمصدر ضوئي للكشف عن اتجاه مفضل لعلامات الإنهاء والتي قد يتم الكشف عنها أيضاً بالفحص الضوئي، مثلاً، يستطيع المرء تمييز علامات الإنهاء بالعين المجردة بالنسبة للمنتجات المعدنية المدرفلة الباردة. تشكل علامات الإنهاء عادة بنية لمحزوز حيود غير مثالي وهكذا ، يظهر كمثال في الشكل رقم (٤,٢) الشكل الجانبي للانعكاس عن أخاديد محزوز الحيود، ستتحاد أشعة الليزر من محزوز الانعكاس كهذا. يمكن الحصول على الحيود الأعظمي عند منطقة مجال بعيدة إذا كان الشرط

$$m\lambda = d(x)(\sin\theta(x) \pm \sin\beta(x)), \qquad (٤,٨)$$

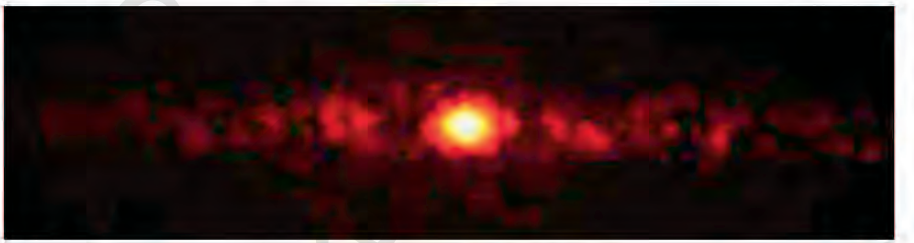
محققاً. الرمز m في (٤,٨) هو رتبة الحيود، λ هو الطول الموجي لليزر، و θ هي زاوية السقوط و β زاوية الحيود. تطبق إشارة النبضة إذا كان الشعاع الساقط والمنعكس يقعان في نفس الجهة بالنسبة للعمود على محزوز الحيود. نظراً لعدم انتظام محزوز الحيود يمكن القول إنها تشطيبات إنهاء، تعتمد كافة محددات محزوز الحيود على الموقع على محور x، كما أوضّح في المثال في الشكل رقم (٤,٢) بشكل عام قد يتعين التعامل مع علاقة رياضية محددة لنمط الحيود ومحزوز الحيود، كنظام ثلاثي الأبعاد. يلاحظ عادة عدد كبير



الشكل رقم (٤,٢). في نظام الأخدود التوهجي لمحزوز حيود عاكس.

نسبياً لدرجات حيود تمتد غالباً بزاوية كبيرة في أقصى منطقة المجال نظراً لكون محزوز الانعكاس لسطح المعدن أو للمنتجات الأخرى غير مثالي. يلاحظ على سبيل المثال في منطقة المجال البعيد ، في حالة لف مسطحة متوازية، خط كامل من درجات حيود مختلفة ونمط بقعي أيضا حول الخط، شريطة أن يتم تطبيق حزمة الليزر في الاتجاه العمودي على بنية الأخدود. يحاكي نموذج الحيود عمليات الإنهاء في حالة الالتفاف السطحي المتقطع، حيث يغطي خطان درجات الحيود المختلفة في منطقة المجال البعيد والتي تظهر في صورة خط متقطع. وفي الحالات المذكورة أعلاه قد يلاحظ اتجاه علامات الإنهاء بالعين المجردة. يجب أن تكون علامات الإنهاء غير مرئية في بعض التطبيقات، وهذا يحدث عادة عند تلميع السطح. ومع ذلك، وحتى في هذه الحالة يمكن كشف علامات الإنهاء الأصلية عادة بتجربة بسيطة لتشتت أشعة الليزر. يكون ضوء المسبار الليزري حساسا جداً لدراسة علامات الإنهاء الطبيعية و يكشف حتى عن علامات خفية على الفحص المرئي. كما يعطي القياس المرئي معلومة عن نجاح عملية الإنهاءات.

يُوضِّح الشكل رقم (٤,٣) نموذج حيود تم الحصول عليه من صفيحة فولاذية مدلفنة على البارد. حيث يمكن زيادة عدد مرات الفحص المتزامن لمواقع مختلفة لعلامات الإنهاء بتحويل شعاع ليزر واحد إلى عدة أشعة بواسطة محزوز الحيود، أو باستخدام مصفوفة عدسات ميكروية. الجزء الصعب هنا هو تحقيق نظام تصوير وتحليل بحيث يقوم بتسجيل معلومات لعدد كبير من البقع على الجسم.



الشكل رقم (٤,٣)، نموذج حيود لفولاذ مدرفل على البارد . و مصدر الضوء كان ليزر HeNe.

(٤,٣) قياس خشونة سطح باستخدام شعاع الليزر

Measurement of Surface Roughness Using Laser Beam

يجب اتخاذ بعض الحيطة عند قياس خشونة السطح باستخدام التقنيات الضوئية، وتحديداً محددات خشونة السطح الميكانيكية أعلاه، التي لا تأخذ في الاعتبار بعض السمات المحددة التي تظهر عند استخدام الضوء للتدقيق في السطح. وعلى سبيل المثال حالة سطح خشن نسبيا وسطح متعدد وأيضا في بعض الحالات (وسط مسامي) قد يكون لتشتت الضوء الشديد أثر على الإشارة، وقد تؤدي إلى تقديرات خاطئة لخشونة السطح.

نقترح استخدام مفهوم خشونة السطح الضوئي (R_o) بدلاً من خشونة السطح في بعض الحالات، على سبيل المثال، عند كشف إشارة ضوئية قد تحمل ضجيجاً بسبب تشتت ضوء وحيد أو متعدد، أي حالة انتشار ضوء. تظهر مثل هذه الحالة على سبيل المثال في

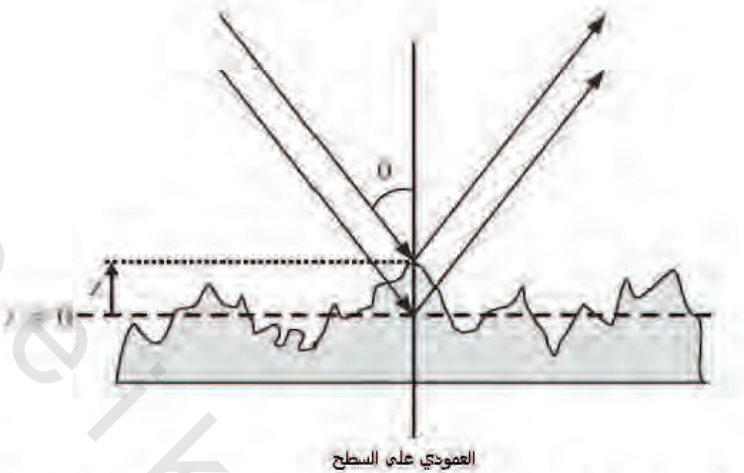
الكشف عن الضوء المنعكس المنتظم من السطح الخشن. يمكن للمرء، لحسن الحظ، في بعض الحالات إيجاد علاقة جيدة بين المحددات الميكانيكية والضوئية لخشونة السطح. وهكذا، يمكن من حيث المبدأ استخدام طريقتين وهي الضوئية والميكانيكية (قلم الماس) لتقييم خشونة سطح من السطوح غير القابلة للكسر.

يجب أخذ الحيطة عند تصميم وتركيب مقياس خشونة سطح ضوئي أو أية أجهزة قياس ضوئية أخرى لكي تعمل في بيئات صناعية قاسية لتجنب، مثلاً جزيئات الغبار على العناصر الضوئية. وهذا ليس ممكناً دائماً. عادة ما يزود العميل الذي يشتري جهاز القياس الضوئي بتعليمات عن كيفية إدارة مهام التنظيف النموذجية للعناصر الضوئية. ومع ذلك، قد يتطلب جهاز القياس لفحص سنوي أو لفحص متكرر أكثر كثافة من قبل الشخص المُخوّل.

يعني الانعكاس المنتظم أن زاوية السقوط و زاوية انعكاس لأشعة الليزر القادمة هي نفسها. وبالإضافة إلى ذلك، يجب أن تكون الأشعة الساقطة والمنعكسة والعمودي على السطح في المستوي نفسه. للنظر بعد ذلك للانعكاس المنتظم عن السطح الخشن وفقا للشكل رقم (٤,٤) تسقط موجة مستوية من الليزر على السطح. يؤدي ذلك إلى تشتت الضوء نظراً لخشونة السطح، مما يعني أنه سيظهر تشتت للضوء بالإضافة إلى الإنعكاس البراق للضوء والذي سينتشر في نصف كرة. رسمنا في الشكل رقم (٤,٤) شعاعين ضوئيين متاخمين لها توخياً للتبسيط. بسبب خشونة السطح، أي الارتفاع Z، سيكون هناك فرق مسار ضوئي بين الشعاعين، والذي يحسب من المثلثات من العلاقة:

$$\Delta s = 2z \sin\theta \qquad (٤,٩)$$

حيث θ زاوية السقوط، تساوي زاوية الانعكاس. يمكن مجددا حساب فرق المسار الضوئي بمساعدة فرق الطور. وهكذا نستطيع الكتابة



الشكل رقم (٤,٤) انعكاس منتظم لشعاعين ضوئيين ليزريين متجاورين من على سطح خشن.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2z \sin\theta, \qquad (٤,١٠)$$

حيث λ هو الطول الموجي لليزر. يتداخل الشعاعان المتجاوران ومجالهما الناتج بعد الانعكاس، شريطة أن تحافظ الأشعة على أشكال موجتها المستوية

$$\overline{E} = \overline{E}_o e^{i(\bar{k}.\bar{r}-wt)} + \overline{E}_o e^{i(\bar{k}.\bar{r}-wt+\Delta\phi)}, \qquad (٤,١١)$$

حيث $\overline{E}_o$ هو سعة المجال الكهربائي، و $\bar{k}$ هو العامل الموجي، و $\bar{r}$ هو العامل المكاني و ω هو التردد الزاوي للإشعاع الليزري الأحادي اللون و t يشير إلى الزمن. نحصل من (٤,١١) على علاقة مفيدة (نموذجية للتداخل)، وهي تحديداً شدة الضوء (I) التي تتناسب مع

$$I = \left|\overline{E}\right|^2 = \overline{E}.\overline{E}^* = 2\left|\overline{E}_o\right|(1+\cos\Delta\phi). \qquad (٤,١٢)$$

من المعادلة (٤,١٢) يمكننا أن نستنتج أن أقصى شدة يتم الحصول عليها عندما يتحقق الشرط $\Delta\phi = 0$ ، أي في حالة السطح الأملس تماما، بينما يتم الحصول على الحد الأدنى للشدة عندما $\phi = \Delta\pi$. وهذا الشرط الأخير يعني أن السطح خشن تماما. ومن

المؤسف و بسبب أن نموذجنا النوعي البسيط الذي تضمن دالة جيب التمام الدورية، يتم الحصول على الحد الأقصى للتداخل من أجل الأعداد الصحيحة لـ 2π. بالطبع مثل هذه الحالة لامعنى لها عملياً. و من ثم فإن السؤال عن كيفية بناء جهاز بحيث يكون نطاق العمل أقل دائماً من الحد الأعلى لزاوية الطور والتي هي π. هناك إمكانيتان لإيجاد مثل مجال العمل هذا. يتعين على المرء أن يتذكر أن مجال خشونة سطوح الأجسام المستوية قد تكون معروفة مسبقاً من المواصفات الخاصة للمنتج الموصى بها من قبل الشركة المصنعة. هذا يوفر أُطرا لمحددات القياس للجهاز. نستنتج من (٤,١٠) أن زاوية الطور تتناقص سواء في ما لو جعلنا الطول الموجي لليزر يزداد أو أن زاوية السقوط تزداد. يكون الطول الموجي لليزرات الرخيصة من وجهة النظر التقنية عادة ثابتاً ؛ لذلك تكون أسهل طريقة بالتأثير على زاوية السقوط.

فيما يلي سنتعامل مع النموذج الشائع لبيكمان وسبيزيتشينو *Beckmann and Spizzichino* [47] الذي استخدم خاصة في قياس خشونة سطح المعادن، وقدم سيلو *Cielo* [49] إنجازه في صناعة المعادن. يستند النموذج بشدة على إحصاءات خشونة السطح الغاوسي. الافتراضات هي أننا نتعامل مع موصل مثالي وأن توزع ارتفاع السطح و دالة الترابط التلقائي تتبع التوزع الطبيعي و انحناء السطح أكبر بكثير من الطول الموجي للضوء. يمكن إيجاد استنتاج مطول إلى حد ما للنتيجة (٤,١٣) وذلك لسطح خشن ناتج عن عمليات عشوائية والذي يمكن الحصول عليه من كتاب بيكمان سبيزيتشينو *Beckmann and Spizzichino* (انظر أيضا [٥٠]).

$$I = I_o e^{-\left(\frac{4\pi R_O \cos\theta}{\lambda}\right)^2}, \qquad (٤,١٣)$$

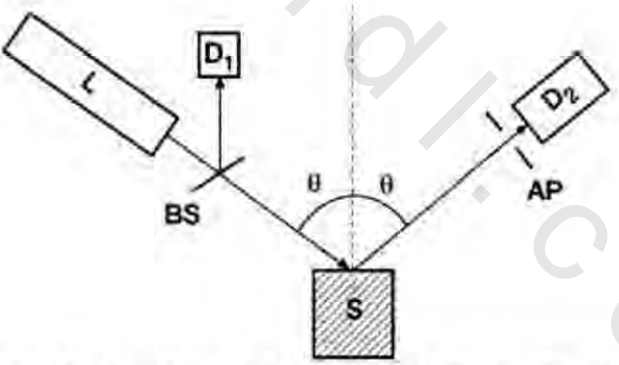
حيث يفترض أن السطح الأملس يعكس الضوء الساقط ١٠٠٪ تماما و I_o شدة شعاع الليزر الساقط. وفي الحالة العامة عندما تكون احتمالات توزع دالة خشونة السطح غير معروفة قد نعبر عن شدة الضوء المكتشفة بشكل رياضي بالدالة التابعة لـ

$$I = f(N,\theta,R_a)I_o, \qquad (٤,١٤)$$

حيث N هو معامل الانكسار العقدي للوسط الحجمي و كذلك

$$|f(N,\theta,R_a)| < 1. \qquad (٤,١٥)$$

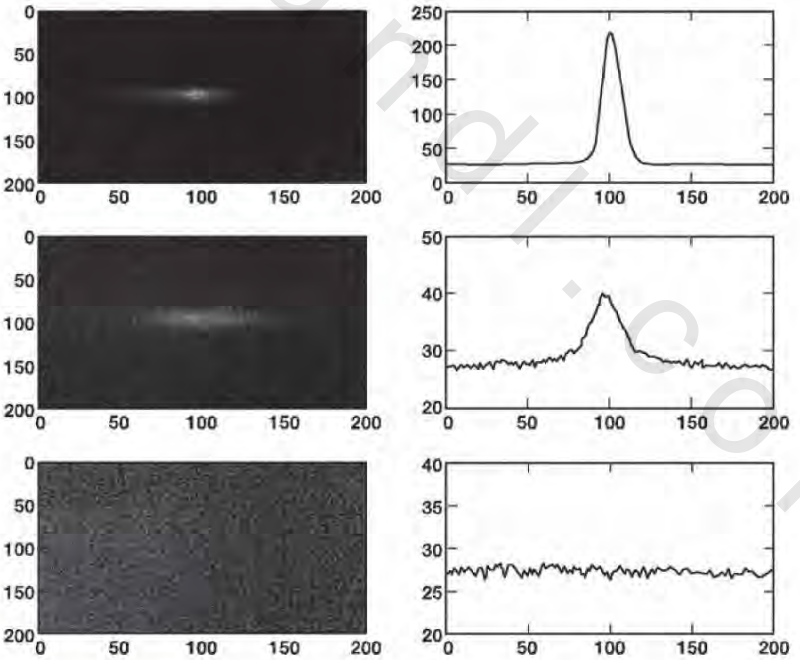
يبين الشكل رقم(٤,٥) رسماً تخطيطياً لنظام القياس. نحتاج لمجزئ شعاع للإشارة المرجعية حتى يمكن أن نلغي تأخر الليزر في تحليل الإشارات بواسطة الكشف عن النسبة I/I_{ref}. لتقييم خشونة سطح ضوئياً ينبغي على المرء أن يرتب مسحاً تزامنياً لزوايا السقوط والانعكاس. وبالتالي يتطلب ذلك مقياس زوايا (جونيوميتر). سيكون مثل هذا الإجراء بمثابة مضيعة للوقت، ويمكن أن يكون موقع الفحص قد مر بعيداً إذا كان نظام القياس وضع لرصد الهدف بشكل آني عن طريق الشبكة العنكبوتية (الانترنت).



الشكل رقم (٤,٥). نظام قياس لانعكاس منتظم لأشعة ليزر. L ليزر، D كاشف؛ S عينة؛ BS مقسم الشعاع و AP الفتحة.

ومن ثم فإن نمط المسح الزاوي هو ممكن فقط بالفحص من دون اتصال ضمن الشروط المخبرية المسيطر عليها. مع ذلك إذا كان متطلب الحصول على القيمة المطلقة للخشونة الدقيقة للسطح البصري هو محدد غير حرج ، عندها يمكن للمرء ضبط معدل زاوية

السقوط ورصد نسبة الشدة لتقييم زيادة أو نقصان خشونة السطح الضوئي. من الممكن إيجاد مثلاً، كشف حدود خشونة السطح المطلوب لمنتج مستو باستخدام شعاع ليزري أو أكثر تعمل بزوايا سقوط مختلفة، وذلك بملاحظة أن بقعة الليزر كبيرة نسبيا على السطح قرب مكان السقوط، وذلك لأن الحساس يكامل خشونة السطح لمنطقة مثل هذه. لذلك نحصل على تقدير للخشونة السطحية الوسطية. ويمكن أن يكون كاشف نظام القياس ديود ضوئي إلى جانب فتحة انعكاس التشتت، أو أن يكون كاميرا CCD. تمكّن الحالة الأخيرة، من أن نسجل نموذج للانعكاس الزاوي. و تتوفر بالتالي معلومات متزامنة عن الانعكاس المنتظم والانعكاس المشتت في شكل هندسة محدد. تُبين في الشكل رقم (٤,٦) مثالاً عن تطوير الانعكاس المنتظم من خلات النشا المضغوط كدالة لزاوية السقوط وذلك باستخدام CCD الكاميرا ككاشف.

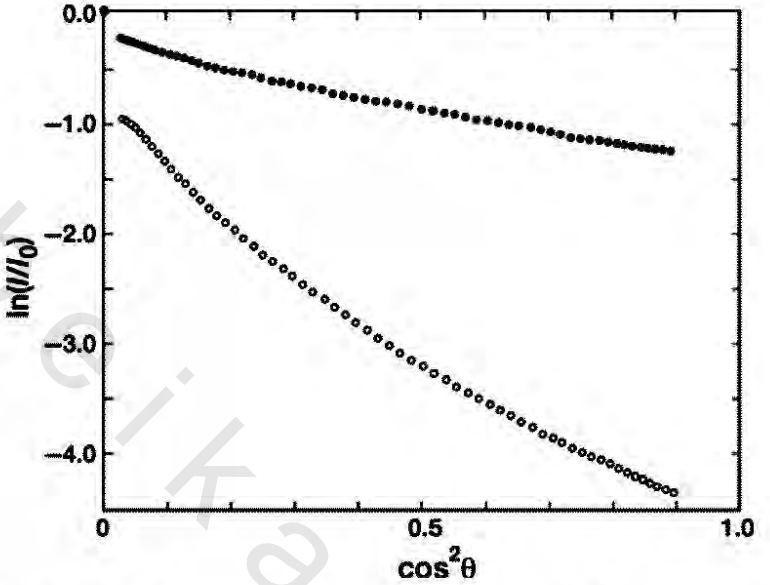


الشكل رقم(٤,٦) تطوير نمط الانعكاس البرّاق من خلات النشا المدمجة. صورة نموذج الانعكاس (يسار) وتوزيع شدة الضوء المقابلة (يمين) على طول الخط [51]

نلاحظ أنه يظهر من الصور في الشكل رقم (٤,٦) نموذج منقط لزاوية سقوط منخفضة نسبيا، بينما يصبح الانعكاس البراق قوياً نسبيا من أجل زاوية سقوط مرتفعة نسبياً.

يأخذ الدواء شكل قرص في كثير من الأحيان، و تؤثر مسامية وخشونة سطح القرص على معدل إطلاق مادة الدواء في التركيب الخليوي للمادة مثل خلات النشا. و التي لها أهمية حاسمة في علاج بعض الأمراض. لتوفير الجرعات الصحيحة ولمعرفة معدل إطلاق وامتصاص محتوى العقاقير. يُغلَّف القرص كإجراء إضافي، ويمكن استخدام الغلاف لحالات عملية مختلفة، كالتحكم بإطلاق العقار من القرص أو لحماية العقار من البيئة الحمضية للمعدة. من الممكن تقييم خشونة سطح القرص مع أو بدون غلاف باستخدام تقنيات القياس الضوئية. الغاية من مثل هذا الفحص هو مساعدة صانعي الأقراص على تحسين نوعية الأقراص. ورغم أن الجهاز المذكور أعلاه يعتمد على استخدام ضوء وحيد اللون إلا أن الخصائص الطيفية للمعدن أو غيره من الأوساط المادية يجب أن تكون معروفة، خاصة إذا كان أحدهم يريد قياس خشونة أسطح مواد مختلفة. وهذا أمر مهم في معايرة نظام قياس الخشونة المطلقة للسطح.

نعرض في الشكل رقم(٤,٧) مثالاً على بيانات المقياس الزاوي لمكبسين صفائحيين فولاذيين، وذلك لواحد مستخدم وآخر غير مستخدم. تستخدم مثل هذه المكابس في صناعة الأدوية لتصنيع الأقراص. يظهر لوغاريتم معدل شدة التعرض كدالة في $\cos \theta 2$ ، يشير المنحنى العلوي إلى أن خشونة سطح المكبس غير المستخدم أقل من تلك للمستخدم.



الشكل رقم (٤,٧) إشارة للانعكاس البراق لشعاع الليزر من مكبس مستعمل (المنحنى السفلي) و مكبس مسطح جديد (المنحني العلوي) مستخدم في صناعة الأدوية [52]

وعادة ما يتم رفض استخدام المكبس المستعمل أو أنه يخضع لتجديد سطحه بعد فترة انتهاء الصلاحية. واحد من أعراض انخفاض جودة المكبس هو التصاق مسحوق الحبة على وجهه الضاغط. ومن الممكن تنظيف سطح المكبس بواسطة الملمعات الميكانيكية، أو باستخدام التذرية الليزرية. لاحظ أنه في قياس المقياس الزاوي أحد المؤشرات الذي يدل على نعومة السطح هو مستوى الإشارة كما في الشكل رقم (٤,٧) أيضا كيف أنه لاتزال زاوية قدوم صغيرة تعطي إشارة.

تؤدي زوايا القدوم الصغيرة في السطوح الخشنة إلى الحصول على إشارة مهملة والتي هي في الأساس ضجيج. يمكن أن تستخدم بيانات القياس الشكل رقم (٤,٧) أيضا للتقديرات الإحصائية لخشونة السطح. نستطيع أن نستنتج أن الإحصاءات السطحية لهذا السطح هي غاوسية تقريبا نظرا للبيانات الخطية المأخودة من لوغاريتم

معدل الكثافة للمكبس غير المستخدم في الشكل رقم (٤,٧)، في حين أظهرت تغيرات في الإحصائية مقابل المكبس المستخدم بسبب اهترائه، وابتعدت عن إحصائيات خشونة السطح الجاوسي. نذكر أن الـ DOE يستخدم أيضا لفحص خشونة السطح سواء باعتبارها وحدة إسقاط الهدب [53]، أو كمحلل لموجة الضوء المتشتت، على سبيل المثال، من المعادن والورق والأقراص وغيرها [54].

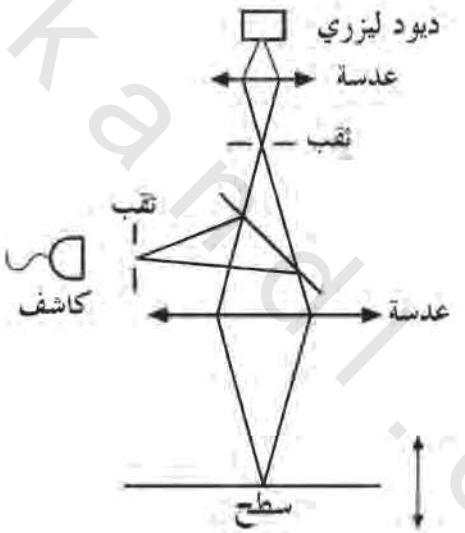
الاتجاه في المستقبل لاستخدام تقنية التحليل العملي (PAT) في مجال الصناعات الدوائية، وهي مسألة كانت مطبقة منذ فترة طويلة في بعض القطاعات الصناعية الأخرى. القضايا الهامة في مجال الصناعات الدوائية هي الأمن و الفحص المباشر في الوقت الحقيقي لحالة المواد الخشنة من دون تماس و نجاح العملية والمنتج النهائي. تتضمن تقنية القياس الضوئي استخدام الليزر كمصدر ضوئي والكاميرات CCD لتكوين معلومات مصورة و يُلَبّي تحليل رامان و تيراهرتز Raman- and terahertz الضوئي والطيفي معظم مطالب القياس، ولكن قبل ذلك يجب أن يتم إنجاز الكثير من العمل على الأقل كحل جزئي لتحقيق النجاح.

(٤,٤) قياس خشونة السطح باستخدام شعاع ليزري مُركَّز

Beam Measurement of Surface Roughness Using Focused Laser

هناك إنجازات مختلفة للأجهزة الضوئية لقياس السطح الجانبي باستخدام شعاع ليزري مركز كمجس. حالما يتم قياس السطح الجانبي، فإن مختلف المحددات الإحصائية لخشونة السطح يمكن حسابها من البيانات المقاسة. توفر مثل هذه البيانات الإحصائية من الجانب الصناعي معلومات هامة عن تاريخ جودة المنتج، و من الممكن أن تساعد في تحسين المحددات العملية إذا تم تركيب نظام موثوق للتغذية الراجعة. يكون مثل هذا الإجراء عملي خصوصا عندما يتم تنظيم عملية فحص سليمة للمنتج وجودته آنياً.

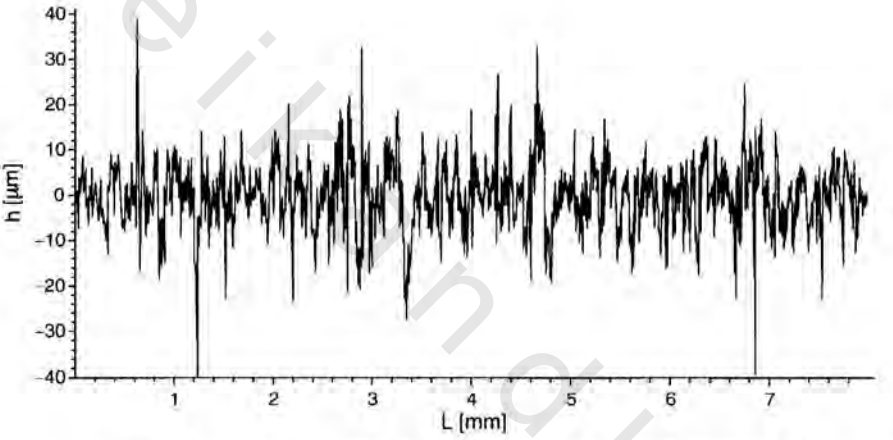
نتدارس هنا قياس المظهر السطحي باستخدام مقياس المظهر الجانبي الليزري باستخدام مقياس متحد البؤرة والتثليث الليزري تتضمن كل من هاتين الطريقتين عادة مسح خط دقيق وفحص صورة البقعة الليزرية على سطح المنتج. ويعرَّف التمايز الجانبي بواسطة خصر شعاع الليزر ويكون عادة بين ١ و١٠ميكرومتر يجب أن يكون مقياس الشكل على السطح أكبر من خصر الشعاع. يُعرض في الشكل رقم (٤,٨) رسم تخطيطي لمبدأ قياس متحد البؤرة للسطح الجانبي.



الشكل رقم (٤,٨). مبدأ مقياس الشكل الجانبي الليزري profilometer .

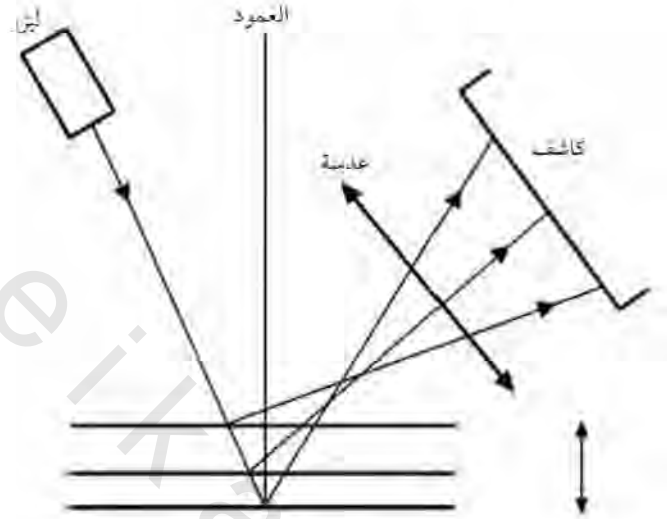
تسقط حزمة الليزر بشكل متعامد مع السطح. المصدر الضوئي عبارة عن ديود ليزري مستقر. يركز الشعاع الخارج باستخدام نظام عدسة موضح في الشكل رقم (٤,٨) يمسح الشعاع المركز في الاتجاه العمودي. يتم الحصول على الحد الأقصى لشدة الضوء مرة عند تزامن "القمة" أو "القاع" مع نقطة بؤرة العدسة السفلى. في الحالة التي

يكون فيها الضوء الساقط على الكاشف الضوئي خارج التركيز فإن شدة الضوء تتناقص بشدة نظراً لحجب ثقب الدبوس. للقيام السريع نحتاج إلى تردد قياس عال وإلى سرعة مسح ضوئية عالية في الاتجاه العمودي. يُظْهر الشكل رقم (٤,٩) الشكل الجانبي لسطح نموذجي لمنتجات من الفولاذ بواسطة مقياس الشكل الجانبي الليزري.



الشكل رقم (٤,٩). الشكل الجانبي السطحي لعينة من الفولاذ سجلها قلم ليزري.

يبين الشكل رقم (٤,١٠) مبدأ جهاز التثليث الليزري. يتم اختيار الشكل الهندسي للقياس بحيث يسقط شعاع خرج الديود الليزري بشكل مائل. مع ذلك، يتم الحصول على بقعة صغيرة من شعاع المجس فقط إذا كانت زاوية السقوط قريبة من سقوط الضوء العمودي، وهذا هو المفضل في جهاز التصوير للحصول على دقة أفضل في الكشف عن موقع البقعة الضوئية في مستوى التصوير.



الشكل رقم (٤,١٠). مبدأ جهاز التثليث الليزري. اتجاه الشعاع الخفيف بعد الانعكاس يعتمد على تموج السطح (الموصوفة هنا كخط مستقيم).

يكون الكاشف إما كاشف حساس الموقع، والذي هوسريع، أو أنه CCD كاميرا أبطأ. تتحرك البقعة الضوئية عند مستوى الصورة وفقا لتباين الارتفاع للشكل الجانبي للسطح. عندما تتم معرفة الشكل الهندسي للنظام يمكن الحصول على شكل السطح الجانبي بتطبيق علم المثلثات. كما أنه من الأهمية بمكان الكشف عن شدة ضوء عالية. وبالتالي فإن خصائص السطح الطيفية مهمة بالتأكيد. تفضل الأسطح ذات العاكسية العالية. الاستشعار عن بعد ممكن بتجهيز الأجهزة بالبصريات المناسبة. للتشغيل الآني عن طريق شبكة الإنترنت، مثلاً يمكن توثيق مستمر لتاريخ خط خشونة سطح المنتج عند اللف البارد، على سبيل المثال يمكن التنبؤ بتغيير الأسطوانة باستخدام جهاز التثليث. يكون التنفيذ الأسهل بتثبيت موقع رأس القياس على الشريط المعدني، وبالتالي يمكن الحصول على معلومات الشكل الجانبي السطحية على طول خط ما، أو

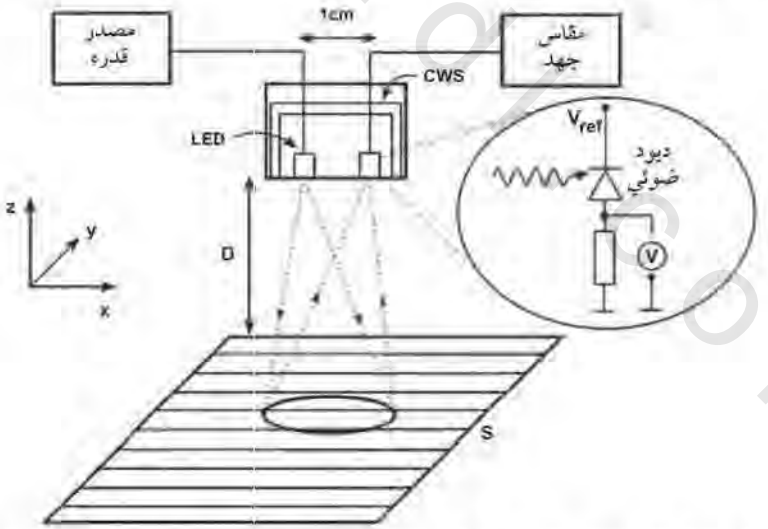
بينما يجري الشريط على طول اتجاه الآلة، إذا كان يوجد جهازا استشعار أو أكثر، على طول الخطين. يمكن الحصول على صورة أفضل لخشونة السطح باستخدام جهاز الماسح الضوئي الذي يمسح الشريط على عرض اتجاه الآلة. تشغيل الجهاز الكامل بالزمن الحقيقي غير ممكن في الوقت الراهن ولا يمكن للمرء الحصول عموما على كامل خشونة سطح السير بالأجهزة الموصَّفة أعلاه. وهكذا لا يزال الطلب جاريا لأجهزة أكثر كفاءة لقياس خشونة سطح ما. ومع ذلك فإن مفتشي الجودة في الصناعة سعداء عادة حتى ولو بصورة متقطعة لخشونة السطح والتي يتم الحصول عليها من أجهزة القياس التجارية الأوتوماتيكية التي تراقب حالة المنتج.

(٤,٥) حساس الاقتراب ذو الترابط التلقائي المنخفض لمراقبة الخشونة السطحية

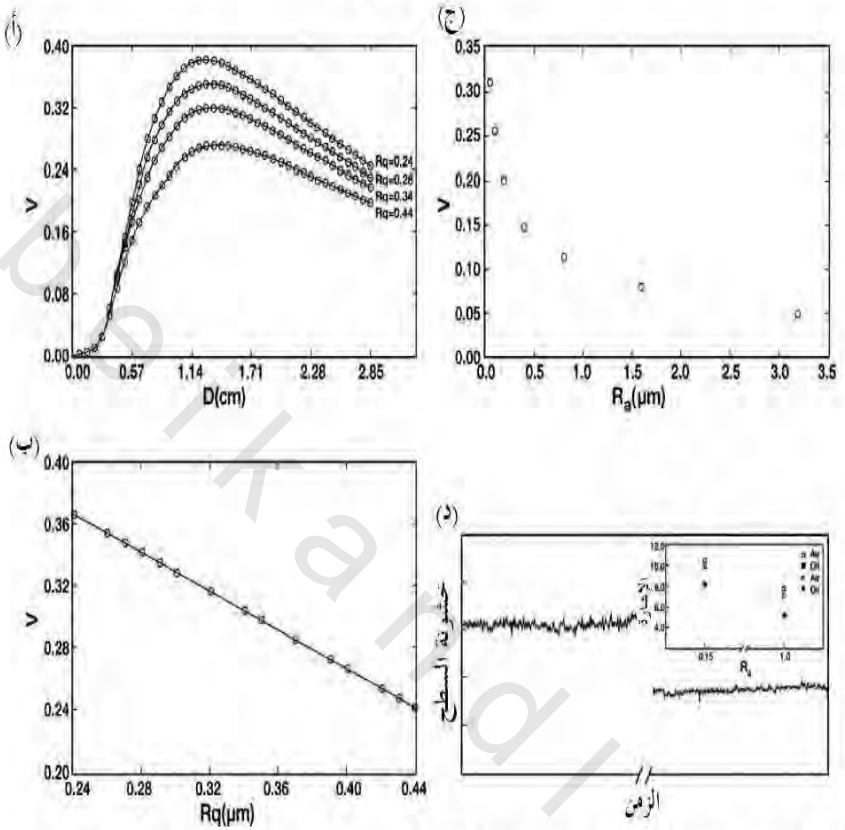
Monitoring Roughness Coherent Proximity Sensor for Surface Low

في الواقع يمكن تقدير خشونة سطح وخاصة تغيراته باستخدام حساسات تقريبية بسيطة ورخيصة. يعرض الشكل رقم (٤,١١) مثالاً على هذا الجهاز [55]. مصدر الضوء في هذا الحساس عبارة عن ديود باعث للضوء LED يعمل بطول موجي ٩٤١ نانومتر مع عرض نطاق طيفي حوالي ٥٠ نانومترا. تعتمد إشارة الحساس على المسافة من السطح وعلى خشونة سطح الجسم. ويبين الشكل رقم (٤,١٢ أ) منحنيات لقيم فعالة مختلفة لخشونة سطح لعينات الألومنيوم المائية المدرفلة على البارد كدالة للمسافة المقاسة. ومن الواضح أنه يمكن الحصول على حساسية أفضل مقابل خشونة السطح بالقرب من القيمة القصوى للإشارة. تعرض في الشكل رقم (٤,١٢ ب) إشارة لرأس حساس يقع على مسافة ثابتة من السطح، وذلك لخشونة سطح عينات مختلفة من الألومنيوم، ويشير هذا الشكل إلى علاقة خطية ضمن نطاق خشونة سطح ضيق نسبياً. تميل الإشارة إلى أن تكون دالة غير خطية لمتوسط خشونة سطح في حالة خشونة سطح أوسع نطاقا. هذا مبين في الشكل رقم (٤,١٢ ج) لمعايير خشونة سطح نيكل مشكل

إلكترونياً وملفوف بشكل صفائحي flat-lapped. في الشكل رقم (٤,١٢ د) نظهر بيانات من القياس الآني (المباشر). سُجِّلت إشارات خشونة سطح عند جانب الجهة اليمنى بعد أن تم عمل ١٠٠ طن من الفولاذ المدلفن على البارد. وكانت سرعة خط الإنتاج مئات الأمتار في الدقيقة الواحدة. ومن الواضح أن خشونة سطح السير أصبحت أصغر في الحالة الأخيرة و التي يمكن رؤيتها إذا قارنا الإشارات على جانبي الجهة اليسرى و الجهة اليمنى مباشرة في الشكل رقم (٤,١٢ د). والسبب أن سطح الأسطوانة نفسها قد أصبح أكثر نعومة. عند إدراج الشكل رقم (٤,١٢ د) يتبين أنه لطبقة زيت الدرفلة فوق المعدن تأثير على الإشارة في حالة عينتين من الفولاذ لهما متوسط خشونة سطح مختلفة. يتم في عملية الدرفلة على البارد استغلال الزيت لتقليل الاحتكاك بين الأسطوانة والصفائح المعدنية. يتعين على المرء أخذ الحذر في حالة الحساسات الضوئية إذ يكون الزيت مزعجاً.



الشكل رقم (٤,١١). جهاز تحسس اقتراب يعتمد على ديود ضوئي , LED و نظام تبريد مائي ,CWS و سطح S.



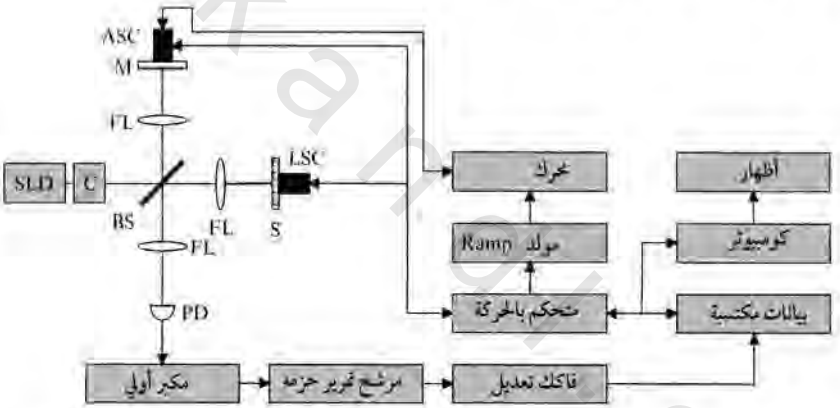
الشكل رقم (٤,١٢). (أ) و(ب) إشارات من أسطح ألمنيوم خشنة تم الحصول عليها من أجهزة تحسس الاقتراب، (ج) إشارة من معايير الخشونة السطحية للنيكل، و(د) الإشارات الآتية لجهاز درفلة الفولاذ على البارد تم الكشف عن مستوى منخفض للإشارة بعد درفلة على البارد لـ ١٠٠ طن من الفولاذ. في حالة إدراج (د) يتوضّح دور زيت الدرفلة على مقدار الإشارة.

عادة ما يتعين على المرء أن يولي انتباهاً عند تركيب المقياس في مكان ما بحيث يتم تقليل التشويشات الضوئية الخارجية الشاردة مثل الزيت والغبار في المصنع. الاهتزازات موجودة دائماً في الصفائح الفولاذية، لكن يمكن أن تلغى بالتصميم الميكانيكي للمقياس وتحاليل الإشارة.

(٤,٦) مقياس التداخل ذو الترابط التلقائي المنخفض كمقياس للشكل الجانبي للأوساط المسامية

Low Coherence Interferometer as a Surface Profilometer of Porous Media

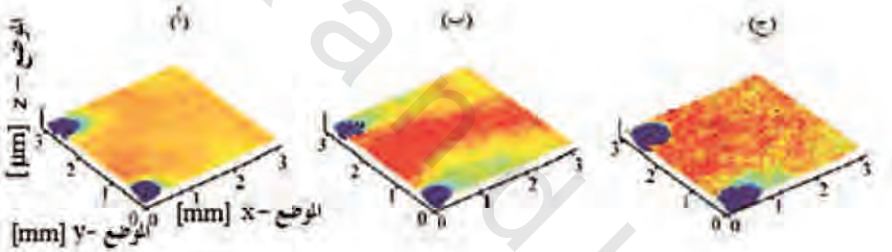
يوفر التصوير المقطعي بالترابط التلقائي الضوئي (OCT) وسيلة جيدة لقياس الشكل الجانبي لسطح عينات مسامية مثل الورق، أقراص دواء، الخ. يعتمد الجهاز العملي على مقياس تداخل منخفض الترابط والذي يظهر في الشكل رقم (٤,١٣). يكون مصدر الضوء عبارة عن ديود فائق الإضاءة ينتج أشعة تحت الحمراء وتبلغ ذروة قدرة انبعاثه العشرات من الـ mWs.



الشكل رقم (٤,١٣). الرسم التخطيطي الخاص من OCT لقياس خشونة سطح الورق.

يضيء الديود مقياس التداخل من نوع مايكلسون ذو تركيبة الفضاء الحر. يُقسَّم الشعاع المُفَرق من الديود الضوئي الفائق الإضاءة بالتساوي بواسطة مجزئ شعاع مكعب إلى ذراعي مقياس التداخل. يحتوي الذراع المرجعي على ماسح ضوئي محوري لإنتاج التعديل التداخلي. يمكن أن ينفذ المسح باستخدام محرك إضافي أو ماسح كهروضغطي.

يكون الجسم في ذراع القياس ويمكن للجسم أن يُمسَح، بتمايز يتراوح عادة بين ميكرومتر ١٠-٢٠ لقياس طوبوغرافيا السطح الثلاثية الأبعاد. عند استخدام OCT في النمط الأول لمقياس التداخل المنخفض الترابط (LCI) من الممكن استخدام الانعكاس الأول للعينة المسامية مقابل العمق. نرى في الشكل رقم (٤,١٤) خرائط تضاريسية تم الحصول عليها من ورق ناعم، وورق فائق النعومة - وورق الطباعة زيروكس، على التوالي. ولقد تم الحصول على متوسط خشونة سطح لدرجات الورق الثلاثة هذه، بالاستفادة من (٤,١) ومن المسح الضوئي لمنطقة ٣×٣ (ميليمتر)٢.



الشكل رقم (٤,١٤). خرائط طبوغرافية من ورق التصوير زيروكس وورق ، SC و الورق الناعم سُجِّلت بواسطة OCT. تم حفر ثقبين إبريين من أجل تحديد موضع العينات، اللذين يمكن تمييزهما من الصور. كانت متوسط خشونة السطح ١.٧٨ ميكرومتر (للورق الناعم) ٥.٤٠ ميكرومتر (للورق نوع SC) و ٧.٣٨ ميكرومتر (لورق التصوير Xerox).

من الواضح أن الـ OCT يوفر جهازاً جيداً للحصول على بيانات طبوغرافية من وسائط مسامية مثل الورق وأقراص الأدوية، الخ. كما وجد أن هذا الجهاز مفيد في فحص خشونة سطح الورق والطباعة [56، 57].

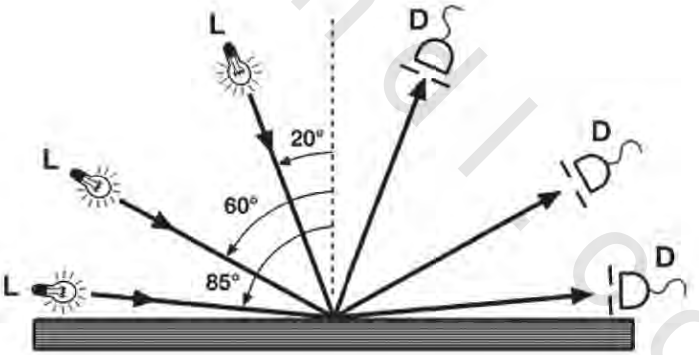
(٤,٧) اللمعان البرَّاق Specular Gloss

اللمعان خاصية هامة في الحالات التي يكون فيها الانطباع الجمالي مطلوبا من المنتج. وتقدر هذه الخواص فيما يتعلق بالعديد من المنتجات مثل الهواتف المحمولة والأواني، والرسم على الأنابيب، والسيارات، فقط على سبيل المثال لا الحصر. ومع ذلك، هناك حالات يكون فيها اللمعان المهمل هو الخاصية المطلوبة. يبدو أن فحص اللمعان يعتمد اعتماداً كبيرا على استجابة العين البشرية. يعتمد الإحساس باللمعان أيضا على خشونة السطح و بنية الجسم والخواص الطيفية له. من أجل الأوساط غير المسامية تكون شدة انعكاس الضوء من سطح الجسم أمرا حاسما كي يكون لامعاً أم لا. أما في حالة الأوساط المسامية عند تفسير قياس اللمعان فيجب أن يؤخذ في الاعتبار معظم التشتت. على الرغم من أن العين البشرية أداة ممتازة لقياس اللمعان إلا أنها غير كافية في قطاعات الصناعة، حيث تحظى أتمتة عمليات الإنتاج بتقدير كبير. كثيراً ما يستخدم مقياس اللمعان المباشر وغير المباشر للفحص الروتيني لسطح المنتج. نود أن نشير إلى أنه على الرغم من أن للبريق تأثيرا قويا على الإحساس البصري، فإن تعريف اللمعان يسري على كامل الطيف الكهرومغناطيسي. بمعنى أن البريق يمكن قياسه، مثلاً، إشعاع برتبة تيراهيرتز من جسم ما.

تم وصف المبادئ النظرية والقياسية وتقييم اللمعان في [58، 59]. أجريت أيضا مقارنة بين مقاييس اللمعان المختلفة في [60]. هناك أنواع مختلفة من اللمعان [58، 59]، مثل البريق العاكس، واللمعان المتباين، والبريق، وغياب اللمعان المشع، والتمايز بين اللمعان المنعكس، وغياب لمعان ملس السطح، ولكن سنركز هنا على اللمعان البرَّاق فقط، أي نسبة تدفق الإضاءة المنعكسة من الجسم بإتجاه العاكس إلى تدفق الإضاءة المنعكسة من اللمعان القياسي. سنعبّر عن اللمعان البرَّاق من الآن فصاعدا ببساطة

"باللمعان". تم توحيد قياس اللمعان، مثلاً، من قبل ASTM و ISO المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس ولاختبار المواد. مبدأ القياس بسيط و يمكن توسيعه لجعل قياس اللمعان يتم بشكل آني on-line وغير آني off-line. يُضاء السطح غير اللامع أو اللامع باستخدام مصدر ضوئي أبيض وذلك بتجميع الأشعة بواسطة عدسة كما هو موضح في الشكل رقم (٤,١٥). يتم تجميع الضوء المنعكس بشكل منتظم بواسطة عدسة أخرى للكاشف الضوئي. يجب أن يكون الجسم مستوياً وفقاً للمعايير. يكون السطح المرجعي القياسي مُلَمَّعًا بدرجة عالية جداً، فالزجاج الملون الأسود له معامل انكسار ١٥٦٧. ينبغي إعطاء المعيار ١٠٠ وحدة اللمعان البراق (GU) لجميع الزوايا الساقطة، ولكن من حيث المبدأ في هذا التعريف لا يوجد حد أعلى للّمعان. عادة ما يستخدم مقياس اللمعان٢٠° أو ٤٦° أو ٦٠° أو ٧٥° أو ٨٥° كزاوية سقوط الضوء. تستخدم زاوية صغيرة في حالة الأجسام اللامعة بينما تستخدم زاوية كبيرة بالنسبة للأسطح غير اللامعة، على التوالي. على سبيل المثال، تستخدم زاوية سقوط مرتفعة في معامل ترقيق الورق في قياس لمعان ورق مصقول مغلف وغير مصقول. عادة ما يتم اختيار زاوية سقوط للسطح غير اللامع مختلفة عن زاوية سقوط السطح اللامع على الرغم من أنهما مصنوعان من المادة نفسها. من الواضح من الفقرات السابقة أن خشونة السطح، حسب التضاريس [61]، وسمات اللمسات الأخيرة تميل إلى تشتيت الضوء الساقط على الجسم. لذلك فإن اللمعان يعتمد على هذه العوامل، إضافةً إلى الخصائص الطيفية للسطح، وبشكل أكثر دقة، على معامل الانكسار العقدي وتغيره المكاني. يعود إلى زاوية السقوط المائلة التي تستخدم في قياس اللمعان، والاستقطاب الضوئي الذي هو أيضا قضية. تتصرف المجالات الكهربائية المستقطبة p و s في الانعكاس الضوئي بطريقة مختلفة وفقا لمعادلات فرينل. إن استخدام معادلات فرينل

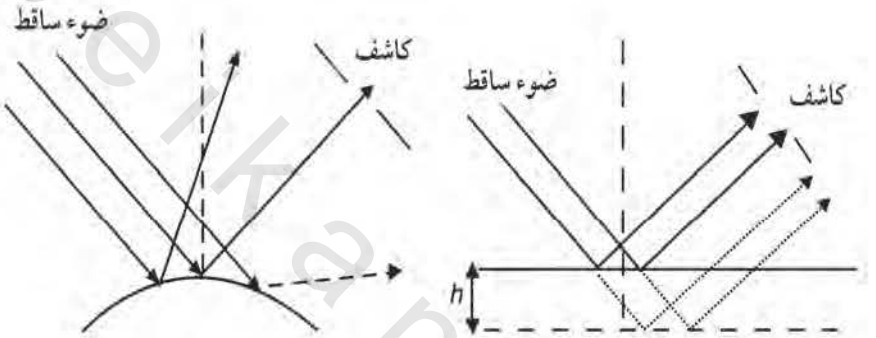
للأسطح الخام مشكوك بصحته فعلاً إلا أنها تعطي صورة نوعية لإدراك أن شدة الضوء المنعكس تعتمد على استقطاب الضوء الساقط وعلى زاوية السقوط ومعامل الانكسار العقدي للوسط. من الواضح أن انتشار الضوء من على السطح الخشن يتعرض أيضا إلى انعكاس مرآتي ولهذا السبب يحصل التشويش، أي، يحصل خطأ في قياس اللمعان. من الممكن أن يكون لسطحين مختلفين انعكاس مرآتي متماثل إلا أن الانعكاس المشتت لهما مختلف. مثل هذه الأسطح ممكن أن تفصل عن بعضها البعض بكشف الضوء المتشتت إما في زاوية واحدة أو في أكثر من زاوية مختلفة عن زاوية الانعكاس البرَّاق. في مثل هذه الحالات نتحدث عن تباين اللمعان. على العكس من ذلك تكون معايير متطلبات لمعان الجسم المستوي مقيدة.



الشكل رقم (٤,١٥). مقياس اللمعان التقليدي. أوضّحت أبعاد القياس النموذجية. L مصباح؛ وD كاشف.

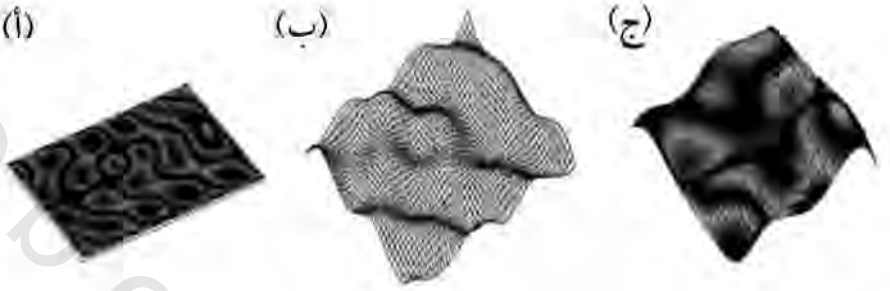
تكون منطقة فحص الضوء الساقط عادة كبيرة نسبيا في مقياس اللمعان التجاري. ولذلك، فإنه عادة ما يكون فحص الأسطح الصغيرة والمنحنية مشكلة. تتطلب معظم مقاييس اللمعان جهة اتصال (قد يتم الكشف عن لمعان الورق فائق

النعومة بدون لمس وعن بعد لحظياً في مصانع الورق باستخدام نظام المسح الضوئي) مع الجسم وبالتالي الأجسام الهشة هي خارج نطاق الفحص بمقاييس اللمعان هذه. وعادة ما تواجه الحركة الرأسية للشبكة مشكلة ، عندما يتعلق الأمر بالفحص المباشر اللحظي في عملية التصنيع حيث يتحرك موقع الشبكة. قمنا بتوضيح المشاكل المتعلقة بقياس اللمعان المرتبط بالحركة الرأسية للشبكة والجسم المنحنى في الشكل رقم (٤,١٦).



الشكل رقم (٤,١٦). إشكالية الأجسام في الكشف التقليدي عن اللمعان. جسم منحني (يسار) و الحركة الرأسية للشبكة (على اليمين).

بيَّنا في الشكل رقم (٤,١٧) المشاكل المرتبطة بتباين اللمعان الموضعي. تكمن أهمية اللمعان الموضعي، على سبيل المثال، في فهم أفضل لمحددات الإنتاج وفي بحث وتطوير D & R جودة المنتج. على سبيل المثال، إذا أخذنا بعين الاعتبار نوعية الطباعة على الورق و ما لكثافة وتبقع لمعان الضوء الساقط من أهمية بالنسبة للهدف من طباعة صور أفضل على الكتب والمجلات في المطابع ثم بتبادل الرأي والتشاور عن دور الخصائص البصرية وخشونة السطح مع القراء المهتمين ببريق الطباعة [62، 63]. يمكن التغلب جزئيا على الأقل على مشاكل مقاييس اللمعان التقليدية باستخدام مقياس لمعان يعتمد عنصرا ضوئيا حيوديا، الذي سيتم وصفه في الفقرة (٤,٨).



الشكل رقم (٤,١٧). التغير المكاني (أ) معامل الانكسار ، و (ب) الخشونة السطحية، و (ج) معامل الإنكسار والخشونة السطحية معاً يجعلان تفسير اللمعان الموضعي مشكلة.

(٤,٨) عنصر ضوئي حيودي يرتكز على مقياس اللّمعان

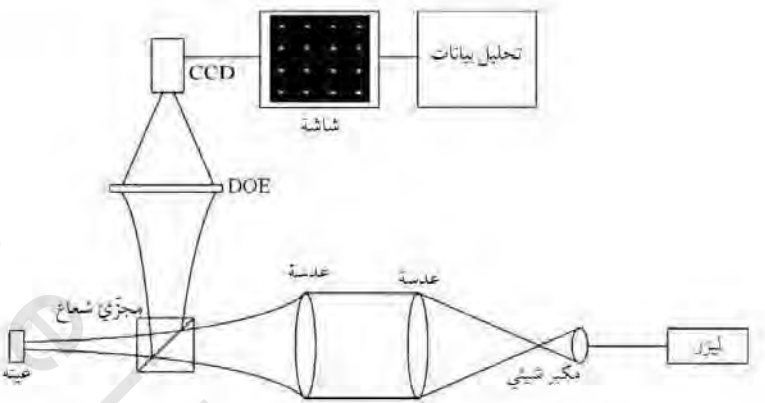
Diffractive Optical Element Based Glossmeter

اعتبار أننا غالباً ما نقوم بفحص الأشياء بحيث يكون خط النظر على امتداد الخط العمودي على سطح قياس اللمعان عند زاوية كبيرة جداً لسقوط الضوء هو إلى حد ما صناعي. يعود السبب في ارتفاع قياس زاوية اللمعان إلى كون إشارة الانعكاس البراق منخفضة نوعا ما، ولا سيما على الأسطح غير اللامعة والخشنة والمسامية. وهي أيضا سيئة لقياس اللمعان عند السقوط المائل، ولكن نظراً لاختلاف إنهاءات السطح، يتطلب السقوط من زوايا مختلفة على الرغم من التعامل مع المواد نفسها. وبالتالي، قد يكون من الصعب مقارنة لمعان نفس المواد ذات خشونة سطح مختلفة. وأحد الحلول لهذه المشكلة يكون بقياس الانعكاس المرآتي عند سقوط الضوء عمودياً.

جهاز القياس الواعد عنصر ضوئي حيودي يعتمد على مقياس اللمعان Diffractive optical element based glossmeter (DOG) [64]. يبين الشكل رقم (٤,١٨) رسماً تخطيطياً خاصاً بنظام القياس. ينتمي هذا الجهاز إلى فئة الرؤية الآلية. أما مصدر

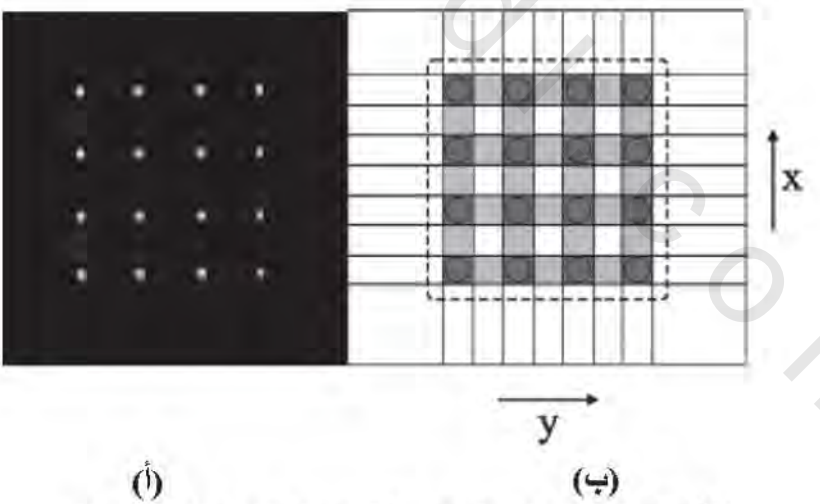
الضوء فهو ليزر هيليوم نيون HeNe أو ليزر أشباه الموصلات. من الممكن قياس اللمعان الموضعي وتغيراته من أجسام صغيرة ومنحنية بتركيز شعاع الليزر وتوجيهه. استخدم في الفقرة (٣,٢) الـ DOE كوحدة إسقاط. وظيفته هنا مختلفة، حيث إنه يُستخدم كمحلل للضوء المشتت. شُوِّهَتْ هنا جبهة الموجه الساقطة نظراً لخشونة السطح. ومع ذلك، الـ DOE هو حساس لسعة وطوِّر المجال المُشَتَتْ والذي يعيد بناء الهولوغرام ذي المنشأ الحاسوبي. قمنا بمقارنة اللمعان الذي تم الحصول عليه من جهاز قياس الـ (DOG) مع الذي تم الحصول عليه من مقياس اللمعان التجاري التقليدي للأسطح المسطحة فوجدنا علاقة مثالية تقريباً بين مقياسي اللمعان لمواد مختلفة. وهذا يثير الدهشة لأن مقياس اللمعان التقليدي يستخدم مصدرا ضوئيا أبيض في حين يعتمد جهاز قياس الـ (DOG) على استخدام شعاع ليزر مترابط أحادي اللون. المثير للاهتمام أن نلاحظ أن الانعكاس المرآتي هو الأضعف في حالات السقوط العمودي، ومع ذلك فإن الـ (DOG) هو حساس عند هندسة القياس هذه، و يمكن أن يستخدم من الناحية العملية، لجميع أنواع الأسطح، بما في ذلك الأسطح الناعمة جداً، مثل الأسطح النانوكاربونية. لمثل هذا القياس الهندسي أيضا مزايا أخرى مثل أنه أتاح إمكانية محدودة للحركة الرأسية للمنتج وأن يلعب استقطاب الضوء الساقط دوراً مهملاً.

يعرف اللمعان في حالة جهاز قياس الـ (DOG) بمساعدة بيانات الصورة المبينة في الشكل رقم (٤,١٩) وتحسب الكثافة المحصلة لنموذج الصورة داخل المنطقة، والتي مُيِّزت بخط متقطع في الشكل رقم (٤,١٩) على النحو التالي:



الشكل رقم (٤,١٨). مقياس لمعان يعتمد عنصر ضوئي حيودي.

$$I = \frac{1}{nm}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} I_{i,j}, \qquad (٤,١٦)$$



(أ) (ب)

الشكل رقم(٤,١٩). بيانات صورة من الـ (DOG) تستخدم في تحليل اللمعان.

حيث n وm أبعاد صورة الـ DOE ، و $I_{i,j}$ كثافة الصورة في (i,j) عنصر لمصفوفة الكاشف لكاميرا الـ CCD. يتم تعريف اللمعان كما يلي :

$$G=\frac{I_S}{I_R}\times 100, \qquad (٤,١٧)$$

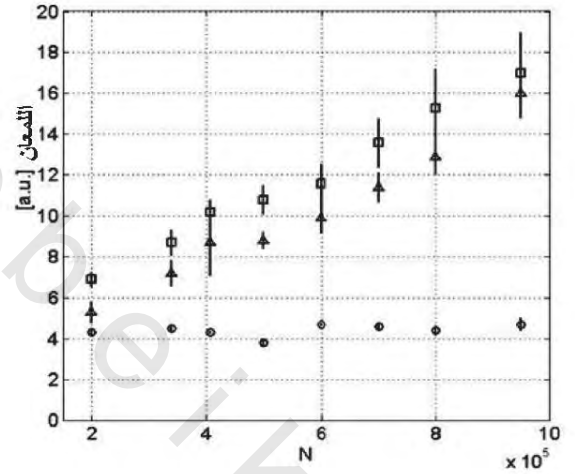
يتم قياس I_s و I_R من العينة والمرجع والذي هو مرآة عالية الجودة أو مقياس اللمعان التجاري. القياس العملي لسطح غير منتظم، كاتجاه علامات الإنهاء، هو رؤية مصفوفة من ١٦ بقعة ضوئية تعطى بالعلاقة:

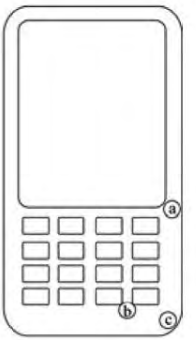
$$V=\frac{I_{Max}-I_{Min}}{I_{Max}+I_{Min}} \qquad (٤,١٨)$$

حيث I_{Max} يعني متوسط القيم العظمى لـ ١٦قمة و I_{Min} هي متوسط القيم الصغرى بين القمم. يتم الحصول على رؤية في كلا الاتجاهين x و y.

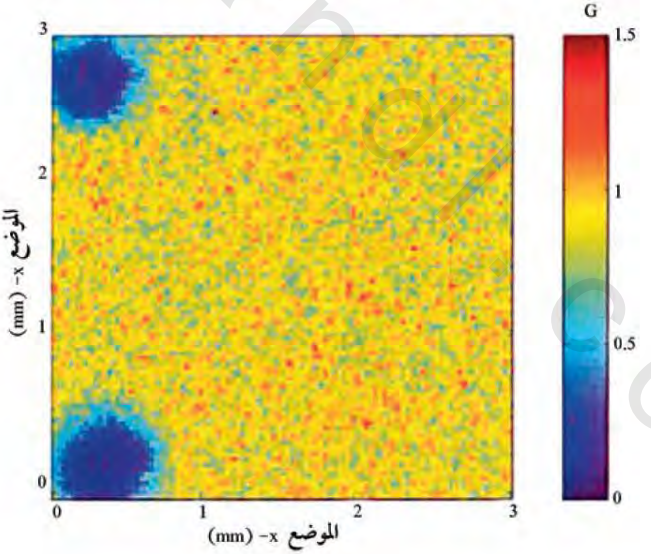
يبين الشكل رقم (٤,٢ يمين) قالب حقن لمنتج بلاستيكي أسود مصنوع من أكريلونيتريل- بوتادين- الستايرين acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) في خليط متعدد الكربونات polycarbonate (PC)، تم قياس اللمعان في ثلاثة مواقع أ، انتشار؛ و ب لامع ؛ و ج نصف لامع. تغير خشونة السطح الموضعية كان بسبب اهتراء الأداة، والذي يتزايد كدالة لدورة عمل الأداة. مقدار انخماص شعاع الليزر كان ٣٠ ميكرومتر وقد استخدمت مرحلة مسح المواقع أ و ب و ج. و وفقاً للبيانات، المبينة في الشكل رقم (٤,٢٠ يسار)، يمكن أن تسجل علاقة خطية بين انخفاض خشونة السطح (اهتراء الأداة) ولمعان المنتجات البلاستيكية التي تم التقاطها في مراحل مختلفة من عملية الإنتاج.

طُبِّق الـ (DOG) أيضا في مجال فحص السيراميك اللامع المصقول، مثل المناطق الداخلية لأكواب القهوة، نظراً لاهتراء أدوات المادة بسبب غسالة الأواني. ولأن الـ (DOG) يقدم معلومات عن اللمعان الموضعي بواسطة مسح الليزر للعينة، كخريطة ثنائية الأبعاد للمعان يبين الشكل رقم (٤,٢١) مثال لعمل خريطة كهذه لعينة من الورق .





الشكل رقم (٤,٢٠). تطور لمعان منتجات بلاستيكية كدالة لدورة عمل أداة اللدائن. الموقع أ (دائرة)، والموقع ب (مثلث) والموقع ج (مربع).



الشكل رقم (٤,٢١). خريطة لمعان مرمزة لونياً لعينة ورقية. النماذج الدائرية في الزوايا اليسرى عبارة عن ثقوب إبرية يمكن أن تستخدم في تحديد مواقع العينة. الاختلاف الموضعي للمعان في هذا الشكل هو بسبب خشونة السطح الموضعية ومعامل انكسار الورق.

الفحص بواسطة الـ (DOG) للمعادن، والتي تم إنتاجها من سبائك فولاذ مختلفة و بعمليات إنهاء مختلفة والتي تستخدم في صب القوالب البلاستيكية، تم اختبارها بهدف الحصول على جودة للسطح أفضل أعلى من معايير الأسطح. و كان هذا ناجحاً، ويمكن أيضا اكتشاف معلومات حول عدم انتظام العلامات السطحية [65].

(٤,٩) المحددات الإحصائية لتقييم اللمعان
Statistical Parameters for Gloss Assessment

قدّمنا في الفقرة ٤-٨ طريقة المسح النقطي للمعان البرّاق باستخدام الـ (DOG) سنبين بعد هذا كيف يمكن تحليل البيانات (DOG) باستخدام النماذج الإحصائية المماثلة لتلك والتي كنا قد استخدمناها بالفعل لوصف خشونة السطح. ونتابع التعاريف المقدمة في [66]. أولاً نحدد القيمة المتوسطة و القيمة الفعالة لتغير اللمعان كما يلي:

$$G_a = \frac{1}{A}\iint_{A} |G(x,y) - \langle G(x,y)\rangle| dxdy, \qquad (٤,١٩)$$

و

$$G_q = \left\{\frac{1}{A}\iint_{A} [G(x,y) - \langle G(x,y)\rangle]^2 dxdy\right\}^{1/2}, \qquad (٤,٢٠)$$

حيث G = G (x,y) هو اللمعان كدالة للموقع و< G (x, y)> هو متوسط اللمعان بطريقة أن G (x ،y) أدنى تغيير و كحالة خاصة، تحديداً محددات اللمعان على طول خط مستقيم هي تبسيط للعلاقات (٤,١٩) و (٤,٢٠) إلى بعد واحد. بعد ذلك يمكننا تعريف ميل محددات اللمعان باستخدام مفهوم المشتقات الجزئية على النحو التالي:

$$G_{a,x} = \frac{1}{A}\iint_{A}\left|\frac{\partial G(x,y)}{\partial x} - \frac{\partial \langle G(x,y)\rangle}{\partial x}\,dxdy\right|,$$

(٤,٢١)

$$G_{a,y} = \frac{1}{A}\iint_{A}\left|\frac{\partial G(x,y)}{\partial y} - \frac{\partial \langle G(x,y)\rangle}{\partial y}\,dxdy\right|,$$

$$G_{q,x} = \left\{\frac{1}{A}\iint_{A}\left[\frac{\partial G(x,y)}{\partial x} - \frac{\partial \langle G(x,y)\rangle}{\partial x}\right]^2 dxdy\right\}^{1/2},$$

(٤,٢٢)

$$G_{q,y} = \left\{\frac{1}{A}\iint_{A}\left[\frac{\partial G(x,y)}{\partial y} - \frac{\partial \langle G(x,y)\rangle}{\partial y}\right]^2 dxdy\right\}^{1/2},$$

في الحالة العامة يجب تحديد الميلان بالاستفادة من المشتقات الاتجاهية باستخدام مفهوم التدرج. والمحددات الأخرى المفيدة هي دالة الترابط التلقائي (AC)، ودالة كثافة طيف القدرة (PDF) للمعان. تكميم دالة الترابط الذاتي لتشابهات بروفيل اللمعان في الاتجاه الجانبي، بينما تصف الـ PDF الناتجة عن المعامل التربيعي لتحويل فوريه، تغيرات اللمعان، خصوصا تواترها في مستوى التردد المكاني (f_1، f_2). يتم تعريف هذه الدوال على النحو التالي:

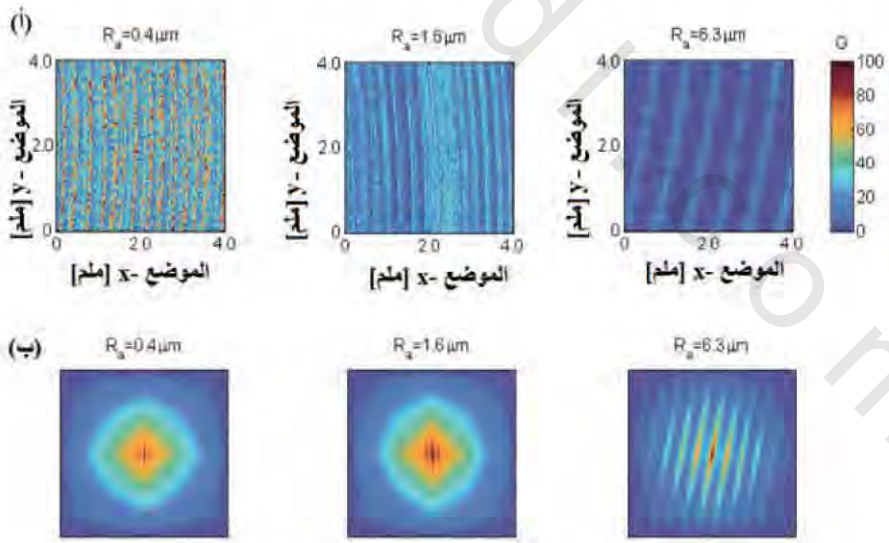
(٤,٢٣)
$$AC(\tau_1,\tau_2) = \frac{1}{A}\iint_{A} G(x,y)z(x+\tau_1, y+\tau_2)\,dxdy,$$

(٤,٢٤)
$$\mathrm{PDF}\,(f_1, f_2) = \frac{1}{A}\left|\iint_{A} G(x,y)e^{2\pi i(xf_1+yf_2)}\,dxdy\right|^2.$$

الطريقة الأكثر ملاءمة عادة هي أن يتم حساب AC و PDF بحالة بعد واحد في دراسات خشونة سطح. وهكذا وبطريقة مماثلة طول الترابط الذاتي للمعان، l = AC(0)/10

يُعرَّف على أنّه مقياس تماثل الشكل الجانبي للّمعان أحادي البعد لنفسه. يتم الحصول على الشكل الجانبي للّمعان بأخذ عينات منفصلة ولكن بنقاط بيانية متساوية البعد. وهكذا يتعين على المرء في تحليل البيانات أن يستخدم تقديرات تقريبية للمحددات المذكورة أعلاه باستبدال التكاملات المتضمنة بالمجاميع المقابلة.

وعلى الرغم من التشابه بين تعريفات محددات الخشونة واللمعان السطحي، إلا أن هناك اختلافات حاسمة. يتوقف اللمعان ليس فقط على خشونة سطح وبنية وسمات الإنهاء، والتي هي نتيجة للمعالجة السطحية، بل أيضا على معامل الانكسار العقدي للوسط. أبرزنا في الشكل رقم (٤,١٧) أنواعاً مختلفة من السطوح حيث تم توضيح تعقد عوامل المحددات الإحصائية للّمعان، المذكورة أعلاه، هي عامة وتشمل أيضا بنية سطحية معقدة. نظهر في الشكل رقم (٤,٢٢أ) خرائط اللّمعان لمعايير خشونة سطح المعادن (أسطح مفتولة) و في الشكل رقم (٤,٢٢ ب) نماذج الترابط الذاتي AC المقابل.



الشكل رقم (٤,٢٢). (أ). خرائط اللمعان من معايير السطح للمعادن، (ب) الترابط الذاتي.

الجدول رقم (٤,١). محددات اللمعان الإحصائية لمعايير الخشونة السطحية بعض المعادن.

	R_a= ٠,٤ ميكرومتر	R_a= ١,٦ ميكرومتر	R_a= ٦,٣ ميكرومتر
G_{mean}	٣٤,٨٥	١٧,٨٩	٥,٦٣
G_a	١٦,١٥	٨,٠٠	٢,٦١
G_q	٢٩,١٣	٩,٦٦	٣,٥٨
$G_{a,x}$	٧,٤٠	٣,٣٢	١,٠٨
$G_{a,y}$	٣,٩٧	١,٥٣	٠,٩٧
$G_{q,x}$	٩,٦٧	٤,٤٠	١,٥٦
$G_{q,y}$	٥,٣٨	٢,١١	١,٣٨

في الجدول رقم (٤,١) توجد محددات اللّمعان الإحصائية المحسوبة لهذه العينات. محددات اللّمعان الإحصائية تساعد في تقدير نجاح عملية إنهاء السطح، وكذلك جودته. ومن الواضح أن لتحليل اللّمعان الإحصائي تطبيقات في مختلف قطاعات الصناعة. ويمكن استخدام بيانات الشكل رقم (٤,٢٢) في تقدير الملامح المكانية للّمعان ولتبقع المنتجات. تواتر علامات الإنهاء واضحة من البيانات في الشكل رقم (٤,٢٢).

وفّر أوكسمان Oksman وآخرون حساساً [٦٧] ومحددات إحصائية [٦٨] لتقييم اللمعان التباييني، مما يحقق جنبا إلى جنب مع اللمعان البرّاق صورة أوسع حول الظاهرة التي تفهم على أنها "لمعان".

(٤,١٠) خلاصة ونتائج

Conclusions

كانت مُهمة فحص الجودة السطحية وستكون قضية في مختلف القطاعات الصناعية مثل المعادن، الورق، البلاستيك، الخ. لذكر بعض الأمثلة. يتضمن الفحص السطحي النموذجي هذه الأيام مسحاً استشعارياً نقطياً أو خطياً للمنتج. ولسوء الحظ، لا يقدم أسلوب القياس هذا معلومات شاملة عن المنتج ككل. ولذلك، تفضل في البيئات الصناعية الأنظمة التي يمكنها قياس سريع لمساحة كبيرة. وهناك قياسات تجرى و إلى الآن في المختبر، مثل لمعان الطباعة. وسيكون التوجه على سبيل المثال في حالة المطابع، لإمكانية فحص جودة الطباعة بشكل آني. هناك قضايا أخرى وهي الطباعة الديناميكية و تبقع الطباعة مع إعطاء تحاليل إحصائية كافية للبيانات المقاسة. التمكن من القيام بفحص تلقائي لخشونة سطح متموج ولمعان أجسام معقدة الشكل هو المهمة الأكثر صعوبة، مثل السطح الداخلي لفنجان القهوة، أو الأداة اللازمة لحقن قوالب الأغطية البلاستيكية للهواتف النقالة وملحقات السيارة. يمكن أن تواجه تقنيات القياس الضوئية غير التلامسية هذه التحديات، و لكن لتحقيق ذلك نحتاج بالتأكيد إلى بحث وتطوير مناسبين، و يرتبط ذلك بشكل تفضيلي بتأمين مقاييس متعددة القياس للأسواق.