تأثير المعالجة الحرارية السطحية بالليزر في الخواص الميكانيكية ومقاومة البلى لفولاذ سبائكي منخفض نسب عناصر الخلط وعالي نسبة الكربون

الدكتور المهندس خالد عثمان شرف*

الملخَص

هدَفَ البحث إلى دراسة تأثير المعالجة الحرارية السطحية بالليزر في الخواص الميكانيكية ومقاومة البلى لفولاذ سبائكي منخفض نسب عناصر الخلط وعالي نسبة الكربون في الوقت نفسه. قُسيَّت العينات باستخدام ليزر نوع نيديوم - زجاج، مع ثلاث طاقات ليزرية مختلفة. دُرِسَ سلوك البلى لعينات المعدن الأساس وللعينات المعالجة بالليزر باستخدام تقانة المسمار على القرص تحت ظروف الانزلاق الجاف عند تطبيق أحمال مختلفة وسرعات انزلاق مختلفة أيضاً. أظهرت هذه الدراسة أن معدل البلى يزداد مع زيادة قيم الحمل المطبق ويتناقص مع زيادة سرعة الانزلاق وأن معدل البلى عنداستخدام طاقة ليزر(0.94J) أقل مما هو عليه في حال استخدام الطاقات الأخرى(0.60J, 0.32). وبيّنت النتائج أيضاً أن قيم القساوة الميكروية تنخفض مع زيادة عمق التقسية، وأن قيم القساوة الميكروية عند طاقة ليزر(0.94J) أكثر مما هي عليه للطاقات الأخرى وعند العمق نفسه.

الكلمات المفتاحية: المعالجة السطحية بالليزر، الخواص الميكانيكية القساوة الميكروية، سلوك البلى.

* قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

1 - المقدمة:

توجه اهتمام الباحثين في السنوات الأخيرة إلى تقانة استعمال الليزر في المعالجات الحرارية السطحية بهدف تحسين خواص سطوح قطع الآلات وعناصرها المعرضة للإجهادات، ولزيادة مقاومتها للبلى(Wear) والتآكل(Corrosion) والأكسدة(Oxidation) والحصول على قساوة سطحية عالية[1,2,3].

تعدُّ تقانة الليزر من العلوم المتطورة التي تدخل في العديد من التطبيقات مثل استخدام الليزر في التطبيقات الطبية والاتصالات والبحوث العلمية والهندسية والعسكرية، وقد طُبِّقتْ على نطاقٍ واسعٍ في صناعة الإلكترونيات والسيارات وهياكل الطائرات.

تؤدي حزمة أشعة الليزر ذات الاستطاعة العالية جداً أكبر من(10^4 W/cm^2) الموجهة نحو القطعة المعدنية المراد معالجتها إلى حدوث سرعة تسخين سريعة جداً وسرعة تبريد ذاتية بحدود(10^3-10^6 °C/s) على سطحها. ويمكن باستخدام عدسات ضوئية الحصول على تركيز طاقة أشعة الليزر في نقطة البؤرة(Focus) على مساحة ضيقة جداً، فترتفع درجة حرارتها أكثر من مئة ألف درجة مئوية، مما يؤدي إلى قطع الأجسام المعدنية المختلفة أو لحامها أو حفرها، ويستخدم في هذه الأغراض الليزر النبضي الذي يوفر حزماً ذات طاقة عالية من أشعة الليزر[4,5,6].

إن تقنية التقسية السطحية بالليزر (Laser Surface Hardening) هي إحدى أهم تقانات المعالجة الحرارية السطحية(Surface Heat Treatment) وتتميز هذه التقانة بدقة عالية وتشوه أقل مقارنة بتقانات التقسية السطحية التقليدية[7].

أجريت العديد من البحوث والدراسات في هذا المجال، وقد لاحظ الباحث(Archard) أن معدل البلى يقل مع الزمن في الحالة المزَّيتة في حين يزداد في الحالة الجافة[8].

أمَّا الباحث(Victor G.) فقد درس البنية الميكروية للمعدن بعد المعالجة السطحية بالليزر[9]. وقام الباحث (Yaseen S. K) بدراسة تأثير الليزر في السلوك الميكانيكي للفولاذ الكربوني[10]. ونشر بعض الباحثين والمختصين العديد من المقالات حول المعالجة السطحية للفولاذ منخفض الكربون[11] لكن القليل منهم حاول إظهار تأثير المعالجة الحرارية السطحية بالليزر في كل من الفولاذ المتوسط والعالي نسبة الكربون والفولاذ السبائكي. لهذا فإن هدف البحث الحالي هو دراسة تأثير المعالجة السطحية بالليزر في خواص ومقاومة البلى لأحد أنواع الفولاذ السبائكي منخفض نسب عناصر الخلط وعالي نسبة الكربون الشائع الاستخدام في الصناعات الميكانيكية.

2 - التقسية السطحية بالمعالجات الحرارية:

تقتصر التقسية السطحية بالمعالجة الحرارية على عملية التقسية العادية أي تحويل البنية إلى بنية مارتنسيتية لسطح قطع الفولاذ الحاوي نسبة من الكربون تسمح بتقسيته، وذلك بتسخين السطح بحيث تتحول البنية فيه حتى عمق محدد إلى أوستينيت ثم تبريده تبريداً سريعاً بسرعة تفوق السرعة الحرجة للفولاذ.

تترافق زيادة القساوة مع زيادة الهشاشة (Brittleness) وخاصة في خلائط الفولاذ، لذلك يشترط أن تتوافر في أجزاء الآلات وعناصرها القساوة العالية على سطوحها لتقاوم التآكل والاحتكاك، وفي الوقت نفسه يجب أن تتوافر فيها المتانة وعدم الهشاشة لتتحمل ما قد تتعرض له من إجهادات وقوى مفاجئة. يتم اللجوء في مثل هذه الحالة إلى تقسية طبقة رقيقة من سطح القطعة، بتحويل بنيتها إلى مارتنسيت مع المحافظة على البنية الأساسية في لب القطعة والمكونة غالباً من فريت وبرليت، وذلك بالتسخين السريع لسطح القطعة بحيث

ترتفع درجة حرارته إلى ما فوق درجة التحول إلى أوستينيت، ثم المباغتة بالتبريد السريع قبل أن تصل درجة حرارة الأجزاء الداخلية إلى درجة التحول وبهذا فإن بنية الطبقة السطحية التي تحولت إلى أوستينيت تتحول إلى مارتنسيت، وتبقى بنية الأجزاء الداخلية على حالها. يمكن التحكم بسماكة الطبقة السطحية التي تتحول إلى مارتنسيت من خلال التحكم بزمن التسخين. فبزيادة زمن التسخين تزداد سماكة الطبقة التي تجاوزت درجة حرارتها درجة التحول إلى أوستينيت والتي ستتحول بالتبريد إلى مارتنسيت.

أمَّا من حيث التطبيق التقني لهذا المبدأ، فإن هناك عدداً من التقانات التي تختلف بعضها عن بعض باختلاف مصدر الطاقة التي تؤمن الحرارة اللازمة للتسخين، وما يتطلبه هذا المصدر من تجهيزات وما ينطوي عليه من خصائص، فضلاً عمَّا يمكن أن يقدمه من ميزات لسطح القطعة المعالج. و أهم التقانات المستخدمة هي:

- التقسية بأشعة بالليزر(Laser beam hardening).

- التقسية باللهب(Flame hardening).

- التقسية بالتحريض(Induction hardening).

- التقسية بالأشعة الالكترونية (Electron beam hardening).

3 - التقسية بأشعة الليزر:

الليزر: هو تضخيم الضوء بواسطة الانبعاث المحفز للإشعاع. ويعدُّ علماً بحد ذاته من علوم البصريات والفيزياء التطبيقية، لكنه يدخل ضمناً في العلوم الطبية والهندسية وله خصائص لا تتوافر في المصادر الضوئية الأخرى منها:

1 - التركيز العالي للطاقة المعطاة والتأثير الموضعي لها مما يمكّن من إجراء معالجة حرارية للجزء المطلوب فقط من سطح المادة دون أن يسبب تسخيناً لباقي حجمها.

2 - الثبات في الاتجاه والبقاء على شكل حزمة واحدة متوازية دون انتشار أو تبديد.

3 - الثبات في اللون وصفائه، وتتميز أشعة الليزر عن أشعة الضوء العادي المتعدد الألوان بأن لها لوناً واحداً وصافياً.

4 - إمكانية إيصال الإشعاع الليزري إلى مسافات بعيدة وتسليطه على أماكن يصعب الوصول إليها.

5 - إمكانية توليد درجات حرارة عالية خلال مدة زمنية قصيرة.

6 - سهولة أتمتة عمليات المعالجة بالليزر.

7 - إمكانية التحكم بعناصر التشغيل الليزري الذي يقود إلى استنباط عدد كبير من طرائق المعالجة الليزرية للسطوح.

8 - الشدة العالية: حزمه الليزر ذات شدة عالية أكثر بكثير من شدة الضوء الذي نحصل عليه من أي مصدر آخر ويعزى السبب إلى تركيز الطاقة المنبعثة في حزمة ضيقة قليلة الانفراج.

يمكن أن تصنف أشعة الليزر وفقاً لنوع المادة الفعالة (الوسط الفعال المضيف)إلى:

1 - ليزر الحالة الصلبة (Solid-state Laser).

2 - ليزر الغاز(Gas Laser).

3 - ليزر الإكسيمر(Excimer Laser)، ويعتمد على

الغازات الخاملة.

4 - ليزر الأصباغ (Dye Laser).

5 - ليزر أشباه الموصلات (Semiconductor Laser).

يعدُّ الزجاج المنافس الكبير للياقوت، فالزجاج يختلف عن المواد الصلبة المضيفة، لكونه وحيد البلورة، رخيص الثمن وسهل الإنتاج بأشكال وأحجام تناسب عمل الليزر ذي الطاقات العالية. وفي بعض النواحي، يعدُّ الزجاج أفضل من الياقوت خاصةً عندما يستخدم الليزر للحصول على نبضات عملاقة خلال مدد زمنية جداً قصيرة، كل هذا يجعل من ليزرات نيوديوم - زجاج(Nd-glass) منابعَ مثالية للحصول على طاقات عالية في النمط النبضي أمَّا من الناحية العملية فإن أكثر أنواع الليزرات التطبيقية شيوعاً وفاعلية على الإطلاق، والمستخدمة في حقل الصناعة ومعالجة المواد هي: ليزر(Nd-YAG)، وليزر (Nd-glass) وليزر Co_2.

عند تسليط شعاع ليزري على سطح معدني فإن جزءاً من الطاقة التي يحملها الشعاع يمتصها السطح وتتحول إلى حرارة، وإذا كانت كثافة القدرة التي يحملها شعاع حزمة الليزر كبيرة بما فيه الكفاية فإن معدل كمية الحرارة المتولدة على السطح سيكون أكبر مما تستطيع ناقلية القطعة للحرارة تسريبه باتجاه الداخل، ومن ثم فإن درجة حرارة السطح سوف ترتفع بسرعة إلى ما فوق درجة التحول الأوستينيتي، في حين لا تزال الأجزاء الداخلية من القطعة باردة نسبياً، إذ إنَّ الانحدار في درجة الحرارة من السطح باتجاه الداخل غالباً ما يكون كبيراً. عند تحريك شعاع الليزر فوق سطح القطعة من نقطة إلى أخرى، فإن كل نقطة يصيبها الشعاع ترتفع درجة حرارتها بسرعة لتتحول إلى أوستينيت، ثم بمغادرة الشعاع لها تبرد بسرعة وتتحول تلقائياً إلى مارتنسيت نتيجة الفارق الكبير في درجة الحرارة بين السطح والأجزاء التي تليه من الداخل بفعل ناقلية الفولاذ الجيدة للحرارة.

ومن أهم ميزات أشعة الليزر أنها تخترق المواد واللدائن الشفافة والراتنجات العازلة دون أن تتلفها، في حين تسخن أو تصهر المعادن سواء كانت مطلية بالمواد الشفافة أو من دونها. ونظراً إلى تركيز الليزر في مساحة صغيرة جداً فإن سطح المناطق الملاصقة للحام لا تتعرض للتلف وتكون متناهية الضيق ولا تتأثر الأجزاء المعالجة حرارياً بالليزر ولا تفقد شيئاً من خواصها المكتسبة بالمعالجة الحرارية، حتى أنه يمكن مسك الأجزاء الملحومة باليد مباشرة بعد اللحام نظراً إلى تركيز الأشعة أو انخفاض مقدار الطاقة المستخدمة.

4 - هدف البحث:

هَدَفَ البحث إلى دراسة تأثير المعالجة الحرارية السطحية بالليزر في خواص ومقاومة البلى لأحد أنواع الفولاذ منخفض نسب عناصر الخلط وعالي نسبة الكربون الشائع الاستخدام في الصناعات الميكانيكية عند طاقات ليزرية مختلفة. كما هَدَفَ أيضاً إلى دراسة تأثير كل من سرعة الانزلاق والحمل المطبق في معدلات البلى.

5 - تحضير العينات:

قُطِّعت العينات بطول (10mm) وقطر(20mm) بغرض إجراء اختباري القساوة والتحليل الكيميائي، وأُسندت العينات على البارد ومن ثم نُعِّمَتْ وصُقِلَت. وأجري التنعيم الرطب باستخدام الماء وورق التنعيم من كاربيد السليكون SiC وبدرجات نعومة مختلفة (220, 320, 500,1000, 1200) أمَّا عملية الصقل (Polishing) فقد أُجريتْ باستخدام جهاز الصقل الكهربائي، حيث وضعت العينة على القرص الدوار مع وجود وسيط أكسيد الألمنيوم معلق بماء مقطر ذي مقاس(1µm) بعد ذلك

تغسل العينة جيداً وتكرر عملية الصقل ولكن مع وسيط صقل بمقاس(0.3μm) ثم تكرر العملية مع وسيط صقل بمقاس(0.05μm) حتى يصبح السطح كالمرآة، بعدئذ تُغسَ العينة جيداً بالماء ثم بالماء المقطر وتجفف في الهواء.

6- التركيب الكيميائي:

أجري اختبار التحليل الكيميائي لعينات الفولاذ المستخدم باستخدام جهاز التحليل الطيفي للمعادن (Atomic Absorption type IL 457) حيث أُخذَتْ ثلاث قراءات، وبعد ذلك حُسبَ متوسط القراءات الثلاث. ويبين الجدول(1) قيم التركيب الكيميائي للفولاذ المستخدم.

الجدول(1): التركيب الكيميائي للفولاذ المستخدم

C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe%
1.02	0.42	0.017	0.24	0.011	1.81	0.08	0.03	0.15	96.222

7 - الطريقة التجريبية:

أجري البحث على عينات من الفولاذ الآنف الذكر المستخدم في صناعة بعض أجزاء الآلات وعناصرها كالمسننات والمحاور والمحامل الدحروجية، وقد استُخدِمت تقنية التقسية السطحية بأشعة الليزر. إن الغرض الأساسي من إجراء عملية التقسية السطحية هو زيادة القساوة ومقاومة البلى والتعب في المنتج المعالج حرارياً. نُفِّذت عملية التقسية السطحية للعينات باستخدام ليزر نبضي نوع نيوديوم زجاج ذي طول موجي مقداره(λ=1060nm) وطول نبضة(τ=300μs). واستُخدِمَت طاقات الليزر المختلفة التالية(0.94J , 0.60 , 0.32) لإجراء التقسية.

8 - الخصائص الميكانيكية:

حُضِّرت عينات الشد طبقاً للمواصفة الأمريكية (ASTM E8) إذْ خُرِطتْ ونُعِّمتِ العينات بواسطة ورق الصنفرة بدرجة(600). بعد ذلك أجري اختبار الشد بواسطة آلة الاختبار العامة البريطانية الصنع (Universal Inestron Testing Machine، كما أجري اختبار القساوة وفق طريقة فيكرز(Vickers Test) حيث أخذ متوسط ثلاث قراءات وذلك للتأكد من بعض الخواص الميكانيكية للمعدن المستخدم. يبيّن الجدول(2) الخصائص الميكانيكية (Mechanical Properties)للفولاذ المستخدم.

الجدول (2): بعض الخواص الميكانيكية للفولاذ المستخدم

σ_y(kg/mm^2)	σ_u(kg/mm^2)	Elong.%	HV (kg/mm^2)
31.8	86.2	7.1	216

9 - تحضير عينات اختبار البلى:

شُغِّلتِ العينات على المخرطة وذلك لتحضيرها لاختبار البلى إذ تم الحصول على عينات بطول(15mm) وقطر(20mm) ونُعِّمتِ العينات باستخدام أوراق صنفرة مختلفة في درجة نعومتها ومصنوعة من كاربيد السيلكون وكانت درجات النعومة كالآتي (230, 500, 600 ,800, 1000, 1200). بعد ذلك صُقِلَتْ باستخدام معجون الماس ذي النعومة(5μm) وأخيراً غُسِلت العينات وجُفِّفتْ بالهواء.

9 -1- اختبار البلى:

استخدم جهاز البلى الانزلاقي الجاف (Dry Sliding Wear Machine) من نوع المسمار(الإصبع) على القرص(Pin-on-Disk)، ذي قرص من الفولاذ الكربوني بصلادة

(48HRC) وسرعة دورانية(430r.p.m) بغرض إجراء اختبار البلى. قُدِّرَ وحُلّ سلوك البلى للعينات قبل المعالجة بالليزر من نوع نيوديوم زجاج وبعدها، وذلك من خلال تطبيق أحمال مختلفة وسرع انزلاق مختلفة أيضاً. وقد دُرست الحالتان الآتيتان:

- تغيير الحمل المطبق(5,15,20,25N) مع تثبيت مدة انزلاق العينة على القرص الدوار(30min) وكذلك مسافة الانزلاق(5cm).
- تغيير سرعة الانزلاق (1.35, 2.25, 3.15, 4.05, 4.5 m/s) مع زمن ثابت مقداره (20min) وحمل مطبق ثابت عمودي على العينة مقداره(20N).

9 -2- حساب معدل البلى:

حُسب معدل البلى(Wear Rate) باستخدام الطريقة الوزنية. حيث أخذ وزن كل عينة قبل المعالجة بالليزر وبعدها بواسطة ميزان رقمي حساس بدقة 0.0001g من نوع (Denver). حُسب معدل البلى بواسطة العلاقة الآتية:

$$(\text{wear rate}) = \Delta W/S_D \ (g/cm)$$

$$\Delta W = W_0 - W_1$$

$$S_D = 2\pi.r.n.t$$

إذْ:

ΔW: التغير في الوزن(g).

W_0, W_1: وزن العينة قبل الاختبار وبعده(g).

S_D: مسافة الانزلاق(cm).

r: نصف قطر مركز الدوران أو(نصف القطر من مركز العينة إلى مركز القرص الدوار)(cm).

n : السرعة الدورانية أو سرعة القرص(r.p.m).

t: زمن الانزلاق(min)

أمَّا سرعة الانزلاق(Sliding velocity) فقد حُسبتْ من العلاقة الرياضية الآتية:

$$V = \frac{\pi DN}{60}$$

إذْ:

V: السرعة الخطية للانزلاق(m/s).

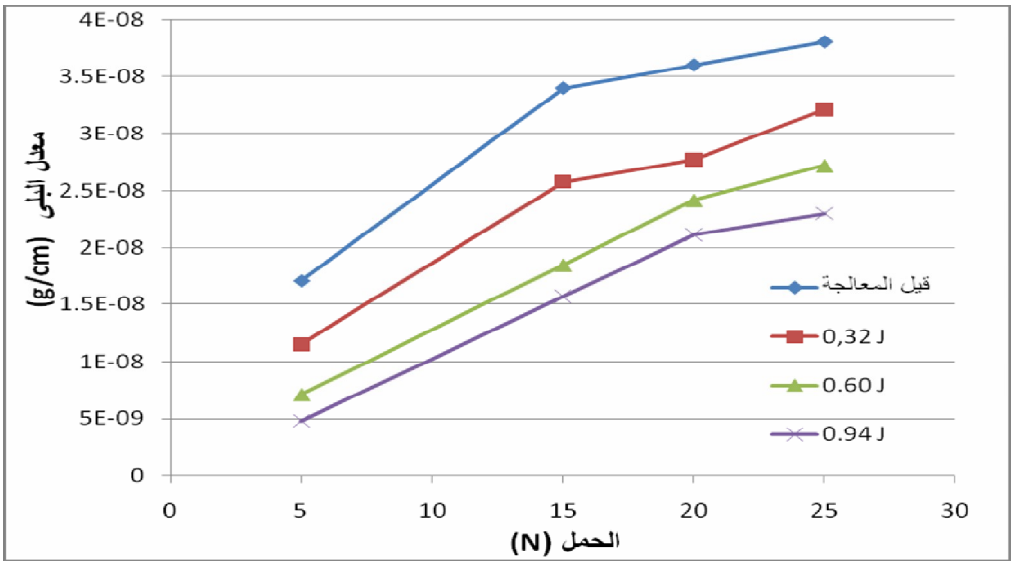
D: قطر الانزلاق الدائري(m).

N: سرعة دوران القرص(430 r.p.m).

يبيّن الجدول(3) معدلات البلى للعينات قبل المعالجة بالليزر وبعدها عند تطبيق أحمال مختلفة مع سرعة انزلاق ثابتة(2.25m/s). مُثِّلتِ النتائج على الشكل(1).

الجدول(3): قيم معدلات البلى للعينات قبل المعالجة بالليزر وبعدها عند تطبيق أحمال مختلفة مع سرعة انزلاق ثابتة(2.25 m/s)

الحمل (N)	5	15	20	25
معدل البلى قبل المعالجة (g/cm)	$1.71*10^{-8}$	$3.4*10^{-8}$	$3.6*10^{-8}$	$3.80*10^{-8}$
معدل البلى (g/cm) باستخدام 0.32 J	$1.15*10^{-8}$	$2.58*10^{-8}$	$2.77*10^{-8}$	$3.21*10^{-8}$
معدل البلى (g/cm) باستخدام 0.60 J	$7.10*10^{-9}$	$1.85*10^{-8}$	$2.42*10^{-8}$	$2.72*10^{-8}$
معدل البلى (g/cm) باستخدام 0.94 J	$4.80*10^{-9}$	$1.57*10^{-8}$	$2.11*10^{-8}$	$2.30*10^{-8}$



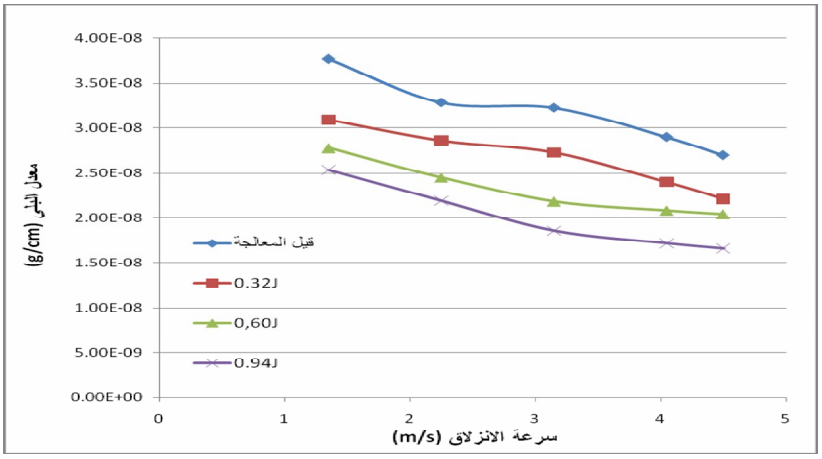
الشكل(1): تأثير الحمل المطبق في معدل البلى

يبيّن الشكل(1) تأثير الأحمال في معدل البلى للعينات قبل المعالجة السطحية بالليزر وبعدها مع مستويات الطاقة الثلاثة إذْ يلاحظ أن معدل البلى يزداد مع زيادة الحمل المطبق. تبيّن منحنيات العينات جميعها ثلاث مناطق واضحة هي: منطقة البلى المعتدل والبلى الانتقالي ثم البلى الحاد. يحدث البلى المعتدل في حدود تشكل طبقة الأكسيد التي تكون منطقة الاتصال والتماس الفعلية للسطوح المتقابلة لذلك يؤدي الاحتكاك إلى حدوث اهتراء قليل عند تطبيق حمل (5-15N). ويحدث البلى الانتقالي (Transition wear) ضمن معدل حمل(15-20N) حيث يتغير التشوه من المرن إلى اللدن مسبباً انهيار طبقة الأكسيد الهشة، ومن ثم تصبح المعادن على تماس حقيقي مع بعضها بعضاً؛ مما يؤدي إلى زيادة معدل البلى. أمَّا البلى الحاد فيحدث بعد تطبيق أحمال أكثر من(20N). إن الزيادة في معدل البلى في هذه المنطقة تعود إلى صلادة التشغيل ويعود السبب في ذلك إلى أن زيادة الحمل المطبق تؤدي إلى زيادة التشوه اللدن الذي يحصل عند قمم النتوءات مما يؤدي إلى زيادة في كثافة الانخلاعات مع زيادة التشوه[16]. ومن ثم ينتج تصليد انتقالي مع زيادة في قساوة العينة. ونتيجة لانزلاق السطوح المعدنية لكل من العينة والقرص الدوار فإن البلى الالتصاقي سوف يسبب تشويهاً ليناً واصلاداً انفعالياً للسطوح وللطبقات تحت السطحية[17]. تبيّن منحنيات العينات المعالجة بواسطة الليزر أن معدلات البلى تزداد مع زيادة الأحمال المستخدمة في هذه الدراسة حيث تم الحصول على أفضل مقاومة للبلى في النموذج المقسى بواسطة(0.94J).

كما يبيّن الجدول(4) معدلات البلى للعينات قبل المعالجة بالليزر وبعدها في أثناء استخدام سرعات انزلاق مختلفة وحمل مطبق ثابت مقداره(20N).

الجدول(4): قيم معدلات البلى(g/cm) للعينات قبل المعالجة بالليزر وبعدها عند سرعات انزلاق مختلفة(m/s) وحمل ثابت (20N)

سرعة الانزلاق	1.35	2.25	3.15	4.05	4.5
معدل البلى قبل المعالجة	$3.77*10^{-8}$	$3.29*10^{-8}$	$3.23*10^{-8}$	$2.9*10^{-8}$	$2.7*10^{-8}$
معدل البلى باستخدام(0.32 J)	$3.09*10^{-8}$	$2.86*10^{-8}$	$2.73*10^{-8}$	$2.4*10^{-8}$	$2.21*10^{-8}$
معدل البلى باستخدام(0.60 J)	$2.78*10^{-8}$	$2.45*10^{-8}$	$2.18*10^{-8}$	$2.08*10^{-8}$	$2.04*10^{-8}$
معدل البلى باستخدام(0.94 J)	$2.54*10^{-8}$	$2.19*10^{-8}$	$1.86*10^{-8}$	$1.72*10^{-8}$	$1.66*10^{-8}$



الشكل(2): تأثير سرعة الانزلاق في معدل البلى

يظهر الشكل(2) تأثير سرعة الانزلاق في معدل البلى، إذْ يلاحظ أن معدل البلى يتناقص مع زيادة سرعة الانزلاق. يمكن تفسير هذا السلوك بأخذ درجة الحرارة الناتجة عن الاحتكاك بالحسبان لأن درجة الحرارة تزداد مع زيادة سرعة الانزلاق في منطقة الالتحام بسبب الاحتكاك العالي مما يؤدي إلى تليين النتوءات. إن تبدد الحرارة عند السرعة الأعلى أقل مما هو عليه عند السرعة الأخفض[18]. وهذا يؤدي إلى تنعيم النتوءات وتليينها وتخفيض القوى المطلوبة لقص نقاط الالتحام، لذلك سيكون معدل البلى أقل. أظهرت المعالجة السطحية بالليزر للعينات أن معدلات البلى فيها تكون أقل مما هي عليه في العينات غير المعالجة بسبب البنية الميكروية الدقيقة الحاصلة في الطبقة المقساة بالليزر. لذلك نلاحظ أن العينات المعالجة بواسطة الليزر مع استخدام(0.94J) تملك قساوة سطحية أعلى ومقاومة تآكل أكبر مما هي عليه في حال استخدام طاقات أخرى(0.32 , 0.60J) .

10 - اختبار القساوة الميكروية:

أجري اختبار القساوة الميكروية(Micro-hardness Test) للسطح وفق طريقة فيكرز باستخدام رأس موشوري من الألماس مربع القاعدة مع تطبيق حمل مقداره(500g) وأُخذ ثلاث قراءات لقطر الأثر المتروك واعتمد المتوسط.

حُسبت القساوة الميكروية وفق العلاقة الآتية:

$$HV = 1.8544\ P/d^2_{(avg)}\ \ (kg/mm^2)$$

إذْ:

HV: قساوة فيكرز(kg/mm^2).

P: الحمل المطبق(kg).

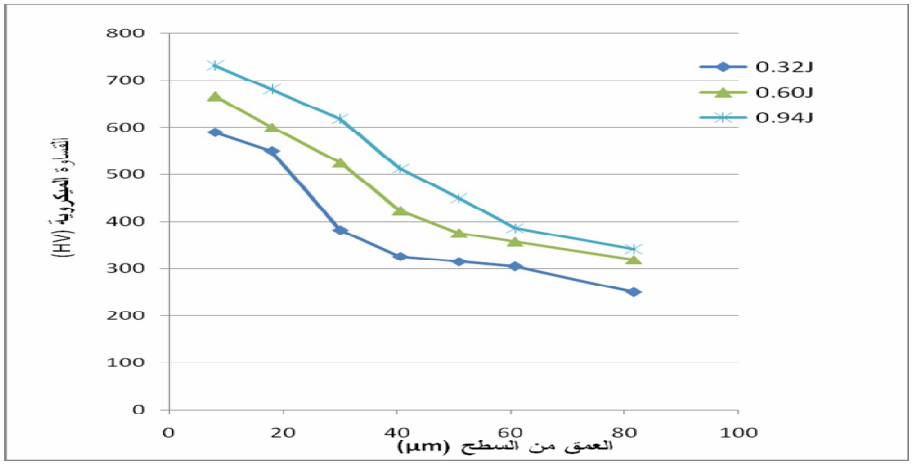
d_{avg}: متوسط قطر الأثر الذي يتركه الخارق(mm).

11 - قياس عمق التقسية:

بعد إجراء عملية المعالجة الحرارية السطحية بالليزر لعينات الفولاذ المستخدم في البحث، قيس عمق التقسية(Hardening Depth) والقساوة الميكروية للطبقات المقساة عن طريق إجراء مقطع عرضي متدرج من سطح العينة المعالجة. استُخدِمَ الميكرومتر المدرج على عدسة المجهر لقياس الأعماق، واستخدم جهاز القساوة الميكروية لتحديد القساوة عند كل عمق. يبيّن الجدو (5) قيم القساوة الميكروية عند كل عمق (المسافة من السطح) للعينات المعالجة باستخدام طاقات الليزر الثلاث المستخدمة. ومُثّلت النتائج على الشكل(3).

الجدول(5): قيم القساوة الميكروية(HV) عند أعماق مختلفة وباستخدام طاقات ليزرية مختلفة

0.32J	العمق (µm)	8.03	18.01	30.00	40.55	50.83	60.65	81.5
	القساوة الميكروية	589	550	382	325	314	304	250
0.60J	العمق (µm)	6.2	23	34	52	66.2	74.3	81.3
	القساوة الميكروية	667	600	525	423	376	357	318
0.94J	العمق (µm)	5.3	24.3	40.3	49.4	59.5	70,1	82.2
	القساوة الميكروية	731	681	618	512	449	386	341



الشكل(3): العلاقة بين القساوة الميكروية وعمق التقسية

يبيّن الشكل(3) العلاقة بين القساوة الميكروية وعمق التقسية للعينات مع مستويات الطاقة الثلاثة(0.32, 0.60, 0.94 J). من الشكل نلاحظ أن القساوة الميكروية تتناقص مع زيادة عمق التقسية ويعود ذلك إلى التدرج الكبير في درجات الحرارة التي تتغير من نقطة الانصهار إلى النقطة الحرجة على طول الطبقة من عشرات إلى مئات

الميكرومترات. لذلك نلاحظ أن القساوة الميكروية عند استخدام(0.94J) أكبر من القساوة الناتجة عن استخدام الطاقات الأخرى وذلك لأن استخدام الطاقة الكبرى يؤدي إلى الحصول على بنية دقيقة، التي بدورها تسبب زيادة في القساوة الميكروية.

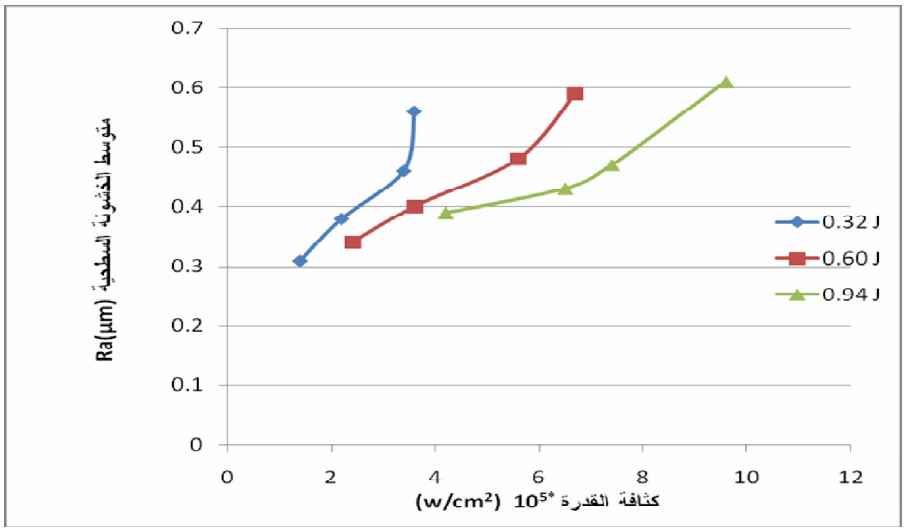
12 - قياس متوسط الخشونة السطحية:

استُخدِمَ جهاز(Talysurf-4) لقياس متوسط الخشونة (Average Roughness) السطحية

للعينات بعد المعالجة بالليزر، وذلك لمقارنة نتائج الخشونة السطحية الحاصلة من تأثير المعالجة السطحية بالليزر باستخدام طاقات مختلفة . يبيّن الجدول(6) قيم متوسط الخشونة السطحية للعينات(Ra) وقيم كثافة استطاعة الليزر مع مستويات الطاقة الثلاثة المستخدمة في البحث(0.32, 0.60, 0.94J). أظهر اختبار الخشونة أنه عند زيادة طاقة الليزر تزداد خشونة السطح ويرجع ذلك إلى الأثر الحراري لأشعة الليزر على سطح المعدن. يؤدي الارتفاع الكبير في درجة حرارة السطح إلى نشوء التوتر السطحي الذي يرتبط بانصهار صغير على سطح المنطقة المعالجة معطياً السطح طبقة غير منتظمة لها شكل الموجة[12,13].

الجدول(6): قيم متوسط الخشونة السطحية(Ra) وكثافة القدرة وفقاً لمستويات طاقة الليزر المستخدمة

طاقة الليزر (J)	كثافة القدرة (W/cm^2)	متوسط الخشونة السطحية (µm)
0.32	$1.4*10^5$	0.31
	$2.2*10^5$	0.38
	$3.4*10^5$	0.46
	$3.6*10^5$	0,56
0.60	$2.4*10^5$	0.34
	$3.6*10^5$	0.40
	$5.6*10^5$	0.48
	$6.7*10^5$	0.59
0.94	$4.2*10^5$	0.39
	$6.5*10^5$	0.43
	$7.4*10^5$	0.47
	$9.6*10^5$	0.61



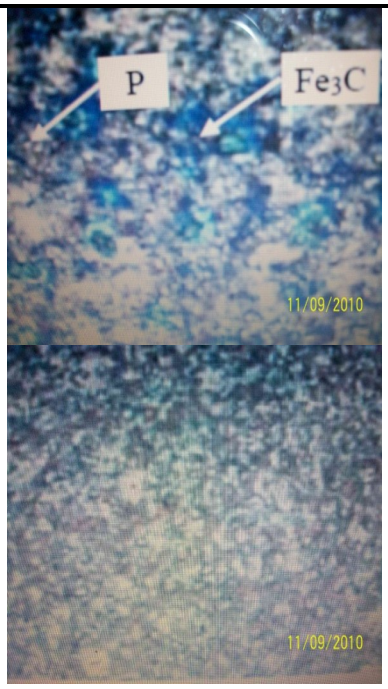
الشكل(4): العلاقة بين متوسط الخشونة السطحية وكثافة القدرة

يبيّن الشكل(4) تأثير كثافة القدرة في متوسط الخشونة السطحية، إذْ يلاحظ أن متوسط الخشونة السطحية يزداد مع زيادة كل من كثافة القدرة وطاقة الليزر، بسبب الأثر الحراري لأشعة الليزر في سطح المعدن. إن الخشونة السطحية للعينات المعالجة بواسطة طاقة الليزر(0.94J) أكبر مما هي عليه في سطوح العينات المعالجة بواسطة مستويات الطاقة الأخرى(0.32, 0.60J).

13 - فحص البنية المجهرية:

أجريت عمليات التنعيم(grinding) للعينات قبل المعالجة السطحية بالليزر وبعدها، باستخدام ورق تنعيم من كاربيد السيليكون SiC ذي درجات نعومة مختلفة بدءاً من(500, 600, 800, 1000)، بعد ذلك غُسلت العينات ونُظفت بالماء، ثم أجريت عملية الصقل(polishing) المناسبة باستخدام محلول الألومينا، وبعد الانتهاء من هذه العملية غُسلت العينات جيداً بالماء ثم بالكحول، وجففت بالهواء. ثم أجريت عملية الإظهار(Etching) باستخدام محلول النيتال المكون من(2%) حامض النتريك و (98%) كحولاً مثيلياً، بعد ذلك غُسلت وجُففت العينات، حيث أصبحت جاهزة للفحص المجهري.

استُعمِل المجهر الضوئي المجهز بكاميرا رقمية لتصوير البنية المجهرية للعينات المفحوصة، بهدف معرفة التركيب المجهري لعينة المعدن الأساس من جهة، والتغيرات البنيوية التي تطرأ على العينات المعالجة بالليزر مع مستويات الطاقة الثلاثة المستخدمة من جهة ثانية. يبيّن الشكل(5) صور البنية المجهرية للعينات قبل المعالجة السطحية بالليزر وبعدها باستخدام مستويات الطاقة الثلاثة، حيث يظهر التغير في البنية مع تغير طاقة الليزر. يلاحظ من الشكل أن دقة البلورات ونعومتها تتعلق بزيادة مقدار طاقة الليزر، لذلك عند استخدام 0.94J تصبح البنية أدق وأنعم، ومن ثمّ تزداد القساوة لتصل إلى أعلى مستوى لها. ونتيجةً للفحص المجهري نلاحظ أن تأثير المعالجة بالليزر مع ازدياد مستوى الطاقة يظهر من خلال التحسن الظاهر في نعومة السطح.



البنية المجهرية لعينة المعدن الأساس البنية المجهرية للعينة المعالجة بالليزر باستخدام (0.32J)

البنية المجهرية للعينة المعالجة بالليزر البنية المجهرية للعينة المعالجة بالليزر باستخدام (0.60J) باستخدام (0.94J)

الشكل(5): صور البنية المجهرية للعينات قبل المعالجة بالليزر وبعدها باستخدام مستويات الطاقة الثلاثة مع تكبير 200X.

14 - النتائج والمناقشه:

تعدُّ مشكلة البلى الناتجة عن احتكاك عناصر الآلات إحدى أهم المشكلات الميكانيكية التي تواجه التقدم التكنولوجي، إذ يتعلق البلى بعدة عوامل منها: الحمل المطبق، سرعة الانزلاق، نوع عملية الاحتكاك، الحرارة الناتجة عن الاحتكاك في منطقة الالتحام بين الجزأين المحتكين، بنية المواد المحتكة وخواصها ونوع المعالجة الحرارية السطحية للمعدن[12] . ويقسم البلى الاحتكاكي إلى نوعين: احتكاك جاف واحتكاك مزيَّت، حيث يحدث الاحتكاك الجاف بين السطوح المعدنية دون وجود تشحيم أو تزييت، ويحدث الاحتكاك المزيَّت عند وجود طبقة من الشحم أو الزيت بين السطوح المحتكة [13,14]. إن أهم الأسباب الرئيسية للبلى هي: الحك أهم اسباب البلى المتعلقة بادوات تشغيل المعدن او بتطبيقات الجزء المتحرك.

يظهر بلى الالتصاق عندما تكون المواد على تماس مع بعضها بعضاً على شكل كشط أو حك(scuffing) أو تثليم (scoring) أو تشابك(seizing) أي التصاق السطحين المتحركين بسبب نقص التزييت أو نقص الخلوص أو على شكل تهارش (Galling)[15]. هناك ثلاث آليات للبلى هي: آلية البلى الأوكسيدي وآلية البلى الأوكسيدي-المعدني وآلية البلى المعدني. تحدث آلية البلى الأوكسيدي نتيجة تشظي الأكاسيد من سطح العينة المتعرضة للبلى والمتكونة نتيجةً للحرارة الناتجة من الاحتكاك. أمَّا آلية البلى الأوكسيدي -المعدني فإنها تحدث نتيجةً لكون ضغط التحميل له القدرة على تكسير جزئي للأكاسيد المتكونة على السطح المتعرض للبلى.

وتحدث آلية البلى المعدني الحاد نتيجةً لكون ضغط التحميل له القدرة على تكسير كلي للأكاسيد المتكونة على السطح المتعرض للبلى ونتيجةً لذلك فإن اتصالاً معدنياً سوف يحدث، مما يؤدي إلى حصول التحام كلي بين السطحين. يؤدي تكسر هذا الالتحام نتيجةً لاستمرار الانزلاق إلى تكوين دقائق بلى معدنية. يبيّن الشكل(1) تأثير الأحمال في معدل البلى للعينات قبل المعالجة السطحية بالليزر وبعدها مع مستويات الطاقة الثلاثة إذْ يلاحظ أن معدل البلى يزداد مع زيادة الحمل المطبق. تبيّن منحنيات العينات جميعها ثلاث مناطق واضحة هي: منطقة البلى المعتدل والبلى الانتقالي ثم البلى الحاد. يحدث البلى المعتدل في حدود تشكل طبقة الأكسيد التي تكون منطقة الاتصال والتماس الفعلية للسطوح المتقابلة لذلك يؤدي الاحتكاك إلى حدوث اهتراء قليل عند تطبيق حمل(5-15N). ويحدث البلى الانتقالي(Transition wear) ضمن معدل حمل(15-20N) حيث يتغير التشوه من المرن إلى اللدن مسبباً انهيار طبقة الأكسيد الهشة، ومن ثمَّ تصبح المعادن على تماس حقيقي مع بعضها بعضاً؛ مما يؤدي إلى زيادة معدل البلى.

أمَّا البلى الحاد فيحدث بعد تطبيق أحمال أكثر من(20N). إن الزيادة في معدل البلى في هذه المنطقة تعود إلى صلادة التشغيل ويعود السبب في ذلك إلى أن زيادة الحمل المطبق تؤدي إلى زيادة التشوه اللدن الذي يحصل عند قمم النتوءات مما يؤدي إلى زيادة في كثافة الانخلاعات مع زيادة التشوه[16]. ومن ثمَّ ينتج تصليد انتقالي مع زيادة في قساوة العينة. ونتيجة لانزلاق السطوح المعدنية لكل من العينة والقرص الدوار فإن البلى الالتصاقي سوف يسبب تشويهاً ليناً واصلاداً انفعالياً للسطوح وللطبقات تحت السطحية[17]. تبين منحنيات العينات المعالجة بواسطة الليزر أن معدلات البلى تزداد مع زيادة الأحمال المستخدمة في هذه الدراسة حيث تم الحصول على أفضل مقاومة للبلى في النموذج المقسى بواسطة(0.94J). يظهر الشكل(2) تأثير سرعة الانزلاق في معدل البلى، إذْ يلاحظ أن معدل البلى يتناقص مع زيادة سرعة الانزلاق. يمكن تفسير هذا السلوك بأخذ درجة الحرارة الناتجة عن الاحتكاك بالحسبان لأن درجة الحرارة تزداد مع زيادة سرعة الانزلاق في منطقة الالتحام بسبب الاحتكاك العالي مما يؤدي إلى تليين النتوءات. إن تبدد الحرارة عند السرعة الأعلى أقل مما هو عليه عند السرعة الأخفض[18]. وهذا يؤدي إلى تنعيم وتليين النتوءات وتخفيض القوى المطلوبة لقص نقاط الالتحام، لذلك سيكون معدل البلى أقل. أظهرت المعالجة السطحية بالليزر للعينات أن معدلات البلى فيها تكون أقل مما هي عليه في العينات غير المعالجة بسبب البنية الميكروية الدقيقة الحاصلة في الطبقة المقساة بالليزر. لذلك نلاحظ أن العينات المعالجة بواسطة الليزر مع استخدام(0.94J) تملك قساوة سطحية أعلى ومقاومة تآكل أكبر مما هي عليه في حال استخدام طاقات أخرى(0.32 , 0.60J).

تؤدي استمرارية الانزلاق إلى حصول تشويه لدن في السطح المتضرر من البلى. ويستمر هذا التشوه إلى نهاية عملية الانزلاق. يختلف هذا التشوه في المعادن اللينة عنه في المعادن الصلدة، إذ يتمثل التشوه في المعادن اللينة بالانسياب اللدن في السطح المتضرر. في حين يتمثل في المعادن الصلدة بتكسر السطح، الذي يعتمد على الحمل المطبق. فبزيادة الحمل المطبق يقل مقدار التكسر ويتجه

المعدن نحو الانسياب اللدن نتيجة لارتفاع درجة الحرارة في منطقة الالتحام بسبب الاحتكاك العالي المؤدي إلى ليونة النتوءات. لهذا فإن معدل الإزالة والتشويه المتولد يبقى ثابتاً تقريباً مع استمرار الانزلاق. يبيّن الشكل(3) العلاقة بين القساوة الميكروية وعمق التقسية للعينات مع مستويات الطاقة الثلاثة(0.32, 0.60, 0.94 J). من الشكل نلاحظ أن القساوة الميكروية تتناقص مع زيادة عمق التقسية، ويعود ذلك إلى التدرج الكبير في درجات الحرارة التي تتغير من نقطة الانصهار إلى النقطة الحرجة على طول الطبقة من عشرات إلى مئات الميكرومترات. لذلك نلاحظ أن القساوة الميكروية عند استخدام (0.94J) أكبر من القساوة الناتجة عن استخدام الطاقات الأخرى وذلك لأن استخدام الطاقة الكبرى يؤدي إلى الحصول على بنية دقيقة، التي بدورها تسبب زيادة في القساوة الميكروية. ويبيّن الشكل(4) تأثير كثافة القدرة في متوسط الخشونة السطحية، إذْ يلاحظ أن متوسط الخشونة السطحية يزداد مع زيادة كل من كثافة القدرة وطاقة الليزر، بسبب الأثر الحراري لأشعة الليزر في سطح المعدن.

يظهر الشكل(5) البنية المجهرية للعينات قبل المعالجة السطحية بالليزر وبعدها باستخدام مستويات الطاقة الثلاثة، حيث يظهر التغير في البنية مع تغير طاقة الليزر. يلاحظ من الشكل أن دقة البلورات ونعومتها تتعلق بزيادة مقدار طاقة الليزر، لذلك عند استخدام 0.94J تصبح البنية أدق وأنعم، ومن ثمَّ تزداد القساوة لتصل إلى أعلى مستوى لها. ونتيجةً للفحص المجهري نلاحظ أن تأثير المعالجة بالليزر مع ازدياد مستوى الطاقة يظهر من خلال التحسن الظاهر في نعومة السطح.

15 - الاستنتاجات:

1. يزداد معدل البلى مع زيادة الحمل المطبق.
2. تقود زيادة الحمل إلى جعل أخاديد البلى أكثر نعومة ودقة بسبب الزيادة في القساوة الميكروية. 3. يتناقص معدل البلى مع زيادة سرعة الانزلاق.
4. تتناقص القساوة الميكروية مع زيادة عمق التقسية.
5. تم الحصول على أفضل نتائج التقسية عند تطبيق طاقة ليزرية(0.94J) وذلك لأن استخدام الطاقة الكبرى يؤدي إلى الحصول على بنية دقيقة، التي بدورها تسبب زيادة في القساوة الميكروية. 6. تم الحصول على أفضل النتائج لمقاومة البلى عند تطبيق طاقة ليزرية مقدارها (0.94J). . إن الخشونة السطحية للعينات المعالجة بواسطة طاقة الليزر(0.94J) أكبر مما هي عليه في سطوح العينات المعالجة بواسطة مستويات الطاقة الأخرى(0.32, 0.60J).
8. يؤدي استعمال قيمة عالية لكثافة القدرة مع مدة زمنية قصيرة إلى التموج الخفيف على سطح المنطقة المعالجة وهذا سيجعل السطح أكثر خشونة ومن ثمَّ نخلص إلى أنه كلما زادت كثافة قدرة الليزر، تغيّرت خشونة السطح نحو الزيادة.
9. يتحسن التركيب المجهري من حيث النعومة مع زيادة طاقة الليزر.
10. تشير نتائج الاختبارات العملية بشكل واضح إلى تأثير حالات تغيير طاقة الليزر في سطح سبيكة الفولاذ السبائكي المستخدم في هذا البحث وفي مقاومة البلى والتي ستسهم إلى حدٍ ما في تحسين تقانة المعالجة بالليزر إلى مستوى إمكانية التطبيق الصناعي.

المراجع:

1- غانم محمد. طرائق المعالجة السطحية بالليزر. المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر، دمشق.1992. تدقيق ومراجعة د. م. محمد علي سلامة.

2- غانم محمد. الأسس الفيزيائية لليزرات التقنية. المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر، دمشق.1992. تدقيق ومراجعة د. م. محمد علي سلامة.

3- اللحياني سعود بن حميد. الليزر وتطبيقاته. جامعة أم القرى، 2008.

4. John C. Ion. Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application. 2008. Internet. 5.William D. Callister, JR. Materials Science and Engineering an Introduction. Seventh edition, USA-2007.

6. W. M. Stean, in : D. Belforte, M. Levitt (Eds.), The Industrial Laser Handbook, Laser Focus, Littleton, MA (1986) 158.

7. Mik Corite, Heat Treatment of Steel. 2004. Internet.

8. Archard H. J. P. and Hirst W., The Wear of Metals Under un Lubricated Conditions, Proc. Roy. Soc., A 236, 1956.

9. Victor G. Laser Heat Treatment in Laser Material Processing, Bass M (ed), vol. (3) North Holand, USA (1983).

10. Yaseen S. K. The effect of laser on the Mechanical behavior of Carbon Steel. MSc thesis: University of Technology (1990).

11. V. Antonov, I. Iordanova, K. Krezhov, Investigation of Laser Treated Surface of Low Carbon Mild Sheet Steel, p (1-20).

12. Czicons H. (Tribology), Tribology Series, 1, 1980, p.7.

13. Eyer T.S. (Wear workshop) Brunel university, Metallurgy department 7th edition. April, 1982, p. 12.

14. Davies V.H. and Bolton L.A., "The mechanism of wear", The Welding Institute Abington-Hall Abington Cambridge, 1980, p 4-10.

15. ASM Handbook Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology,1991.

16. J. F. Ferrero, E. Yettou, J. J. Barrau and S. Rivallant. Analysis of a dry friction problem under small displacements: application to a bolted joint. Wear/ Volume 256, Pages 1135-1143 (June 2004).

17. Kenneth G. Budinski. Surface engineering for wear resistance. Prentice Hall, Englewood Cliffs. USA. 420p–(1995).

18. Bolton, W. Engineering Materials Technology, Butterwort Heinemann (London) 1998.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2010/7/27.