

Effect of Laser Surface Treatment on Some Mechanical Properties of Low Carbon Steel

Dr. Khansaa D. Salman

Electromechanical Engineering Department, University of Technology/Baghdad

Dr. Enaam O.Hasuon

Electromechanical Engineering Department, University of Technology/Baghdad

Email: enaamobiad@yahoo.com

Asaad K. Hamza

Electromechanical Engineering Department, University of Technology/Baghdad

Received on:19/6 /2011& Accepted on: 2/2/2012

ABSTRACT

This research aims to study the effect of localized laser surface treatment on mechanical behavior of low carbon steel. Laser Cw Nd : YAG was used in the treatment hardening of the specimens for different laser energy (2.7,3.3,4.37100J), with time interval for the beam (10^{-2} sec) and the laser intensity(4500,5500,7100 Watt/mm²) . Different mechanical tests were achieved Static and Dynamic on the specimens which were surface treated .Static tests included (Tensile test, Microhardness test) ,While the dynamic test included (Impact test) .

The results show that the mechanical properties for low carbon steel H_{0.2} strength by(0.9,10,25.5%) , ultimate tensile strength by(6.4,16.24,24.59%),while the increment fracture stress by (12,17.28,34.87%),also increment in microhardness by (3.4, 5 , 23%)and toughness by (4.3,10.86,20.8 %). Some of mechanical properties for low carbon steel reduce with increasing in laser energy which show in Young modulus (26.06,40.89,50.8%), Rigidity modulus by (25,40.5,48.99 %) , Poisson s' ratio (1.29,2.34,3.69%) .

أثر المعاملة السطحية الليزرية على بعض الخواص الميكانيكية للفولاذ منخفض الكربون

الخلاصة

يهدف البحث الى دراسة تأثير المعاملة الموقعية (السطحية) باستخدام الليزر على الخواص الميكانيكية للفولاذ منخفض الكربون . وقد تم استخدام ليزر نديميوم - ياك المستمر Cw Nd : YAG في معالجة العينات المستخدمة في البحث مستخدمين متغيرات تضمنت طاقة ليزرية مختلفة (2.7,3.3,4.3J) وفترة زمنية لكل حزمة ليزرية (10^{-2} Sec) وشدة ليزرية (4500,5500,7100 Watt/mm²) وقد أجريت اختبارات ميكانيكية ساكنة ومقترنة بالحركة تضمنت الساكنة منها فحصي الشد والصلادة أما المقترنة بالحركة فتركزت على فحص الصدمة . وقد أظهرت النتائج أن الخواص الميكانيكية للفولاذ منخفض الكربون تطورت بزيادة قيمة طاقة الليزر حيث سجلت مقاومة الخضوع ارتفاعاً بمقدار (0.9,10,25.5%) ومقاومة الشد القصوى (6.4,16.24,24.59%) أما أجهاد الكسر فقد سجل ارتفاعاً بمقدار (12,17.28,34.87%)، كما حققت الصلادة الدقيقة ارتفاعاً بمقدار (3,4,5.23%) والتمانة بمقدار (4.3,10.86,

(20.8%) وتقل بعض الخواص الميكانيكية للفولاذ منخفض الكربون بزيادة طاقة الليزر حيث أتضح ذلك في معامل المروننة، (26.06,40.89,50.8%) ، معامل الجساءة (25,40.5,48.99 %) ،نسبة بواسون(1.29,2.34,3.69%)

المقدمة

هنالك العديد من التقنيات المهمة التي تستخدم في مجال تقنية المعاملة السطحية بالليزر منها (التزجيج، التصفيح، التسيب، الصهر) التي تعمل على أحداث تغيير في السطح الخارجي للجزء الهندسي مع الاحتفاظ بالخواص الميكانيكية لمركز العينه [4-1]. ويمكن ملاحظة ذلك بشكل واضح في كل من الفولاذ المتوسط والعالي الكربون على الرغم من أن هذه الطريقة تستخدم بشكل واسع في الفولاذ منخفض الكربون [6,5]. أن هذه الطريقة تتضمن أساسا الصهر السطحي بالليزر LSM وتعيم في الحبيبات LSA [4-2]. في هذا البحث تم استخدام سبيكة الفولاذ منخفض الكربون لانه يعتبر من السبائك ذات التطبيقات الواسعة حيث يتم استخدامه في الصناعات الميكانيكية و أجزاء وسائط النقل. أن المعاملة السطحية بالليزر للسبائك الحديدية تحسن من الخواص الميكانيكية في أجزاء الماكينات التي تتعرض لاجهادات عالية مثل التروس وكراسي التحميل، وكذلك التصليد السطحي بالليزر يزيد مقاومة البلى وكذلك مقاومة الكلال نتيجة الاجهادات الضغطية المتبقية على السطح [9-7]. قام الباحث زياد أياد طه [10] (2003) بدراسة تأثير ليزر Nd:glass على الصلادة ومقاومة البلى لسبائك من الفولاذ وهي (فولاذ منخفض الكربون، فولاذ متوسط الكربون، فولاذ عالي الكربون) وكذلك سبيكة الالمنيوم AL-25 بأستخدام ثلاث طاقات لليزر (0.3,0.58,0.93 J). وقد أظهرت نتائج الباحث تحسن واضح في قيم الصلادة ومقاومة البلى لسبائك المستخدمة في البحث. بينما قام الباحثان S.P.Gadag and M.N.Srinivasan [11] (1996) بدراسة تأثير الصهر السطحي بالليزر Pulse Nd:YAG على خواص البلى الانزلاقي الجاف والتآكل بالتعرية في محلول حامض مخفف وقد أظهرت النتائج نقصان واضح في معدل البلى الانزلاقي وبمقدار مرتين مقارنة بالقيم قبل التصليد بالليزر وكذلك نقصان معدل التآكل بالتعرية بمقدار 40% مقارنة مع النتائج قبل التصليد بالليزر. قام الباحث V.ANTONOV وجماعته [12] بدراسة المعاملة السطحية لتقنية ليزر SAXS لصفحة فولاذ طري منخفض الكربون نوع 80KP المكافئ لفولاذ 1008 وقد تم استخدام ليزر نبضي نوع Nd-glass بطاقة (7J) وقد أدت المعاملة السطحية بالليزر الى تكوين بعض الاكاسيد السطحية مع جود اجهادات شديدة متبقية. أما الباحث C. Navas وجماعته [13] (2006) فقد قام بدراسة تأثير التصفيح بالليزر على مقاومة البلى لصمامات ماكينة الديزل. وقد أجرى الباحث عملية الطلاء على نوعين مختلفين من الفولاذ AISI 303 (منخفض الكربون). وقد بينت النتائج أن قيمة الصلادة نتيجة التصفيح بالليزر أكثر من 500HV وكذلك تحسن واضح في مقاومة معدل البلى في سبيكة AISI 1045 أقل مما هو عليه في السبيكة AISI 303.

الإجراءات العملية

المعدن المستخدم

في هذا البحث تم استخدام فولاذ منخفض الكربون. الجدول رقم (1) يبين نسب العناصر للفولاذ المستخدم في البحث حيث أجري فحص التحليل الطيفي في الشركة العامة للصناعات الميكانيكية والجدول رقم (2) يبين المواصفات الميكانيكية القياسية للفولاذ [14].

جدول رقم (1): نسب العناصر المكونة للفولاذ منخفض الكربون.

العناصر	%Fe	P %	S %	Mn %	C %
الشركة العامة للصناعات الميكانيكية	المتبقي	-	-	1.6	0.2
المواصفات القياسية	المتبقي	<=0.04	<=0.05	0.1-0.7	0.17-0.23

جدول رقم (2): المواصفات الميكانيكية القياسية للفولاذ المنخفض الكربون.

Yield stress σ_y (Mpa)	Ultimate tensile strength σ_u (Mpa.)	Young Modulus E (Gpa)	Rigidity modulus G (Gpa)	Elongati on %	Vickers Hardness Hv (kg/mm ²)
350	420	205	80	%15	126

المعاملة السطحية الليزرية .

أجريت المعاملة السطحية باستخدام ليزر نيديميوم - ياك المستمر Cw Nd:YAG ذو الطول الموجي ($1.06\mu\text{m}$) ومدى الطاقة الكلية للجهاز (5 J) تم اختيار ثلاث طاقات لأشعة الليزر أثناء المعاملة السطحية للفولاذ منخفض الكربون وهي (2.7, 3.3, 4.3 J) وقد استخدم جهاز (power meter) لقياس قدرة الليزر. أن شكل حزمة الليزر الخارجة من العدسة على شكل مستطيل عمودي طول (4 cm) وعرض (1.5 cm) لعينة اختبار الشد. وقد تم تسليط حزمة الليزر من على بعد (30 cm) ولفترة زمنية لكل حزمة مستمرة (10^2 Sec) بينما لعينة اختبار الصلادة الدقيقة فقد تم استعمال عدسة لامة لحزمة الليزر ذي بعد بؤري (28cm) حتى لا يحدث ضياع في القدرة الخارجة لان قطر عينه اختبار الصلادة الدقيقة (10mm) أما بالنسبة لعينة اختبار الصدمة فقد تم إجراء المعاملة السطحية الليزرية لثلاث أوجه للعينة الواحدة، الوجه الاول الذي يحتوي على حز والوجهين الاخرين على جانبي الحز. وقد تم اعتماد نفس الظروف التي تم اجراؤها لعينات اختبار الشد. والشكل رقم (1) يوضح منظومة الليزر النديميوم - ياك المستمر. Cw Nd:YAG ولحساب شدة الليزر تم استخدام المعادلة رقم (1).



الشكل (1): منظومة الليزر النديميوم-ياك

$$P_d = P/A * t \quad \dots(1)$$

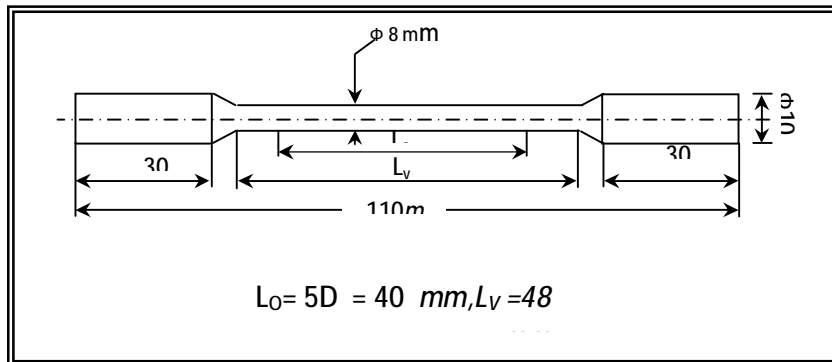
حيث ان:

- P_d = شدة الليزر (Watt/mm^2).
- P = طاقة الليزر (J).
- A = مساحة حزمة الليزر (mm^2).
- t = زمن تسليط حزمة الليزر (Sec).

الاختبارات الميكانيكية

أختبار الشد

تم إجراء أختبار الشد للعينات المستخدمة في البحث قبل وبعد المعاملة السطحية الليزرية Cw Nd :YAG ذلك باستخدام جهاز فحص الشد موديل INSTRON 1195 أنكليزي المنشأ . سعة الجهاز الكلية (2.5 ton) وسرعة التحميل المعتمدة لسبيكة الفولاذ منخفض الكربون الى سرعة الورقة البيانية (2mm/min) وقد صنعت عينات أختبار الشد بموجب المواصفة القياسية [15]. ASTM-E8M كما موضح في الشكل رقم (2) .



الشكل (2) : عينة اختبار الشد

وتبين المعادلات الرياضية حساب بعض الخواص الميكانيكية وكالاتي:

حساب قيمة نسبة بواسون (ν) (poisson 's ratio) من المعادلة الاتية:

$$\nu = (\delta d / d_0) / (\delta L / L_0) \quad \dots\dots(2)$$

حيث أن :

- ν = نسبة بواسون.
- L_0 = الطول اصلي (mm) .
- δL = التغير بالطول (mm) .
- d_0 = القطر الاصلي (mm) .
- δd = التغير بالقطر (mm) .

حساب معامل اللدونة وأس التصليد الانفعالي من المعادلة الاتية:

$$\sigma = K * \epsilon^n \quad \dots (3)$$

$$\text{Log } \sigma = \text{Log } K + n \text{Log } \epsilon \quad \dots(4)$$

حيث أن:

- ϵ = الانفعال الحقيقي .
- σ = الاجهاد الحقيقي (Mpa) .
- K = معامل اللدونه (Mpa) .
- n = أس التصليد الانفعالي .

حساب معامل القص او معامل الجساءة (Rigidity modulus) من المعادلة
الاتية:

$$G = E / 2(1+\nu) \quad \dots(5)$$

حيث أن :

- G = معامل الجساءة (Gpa) .
- E = معامل المرونة (Gpa) .

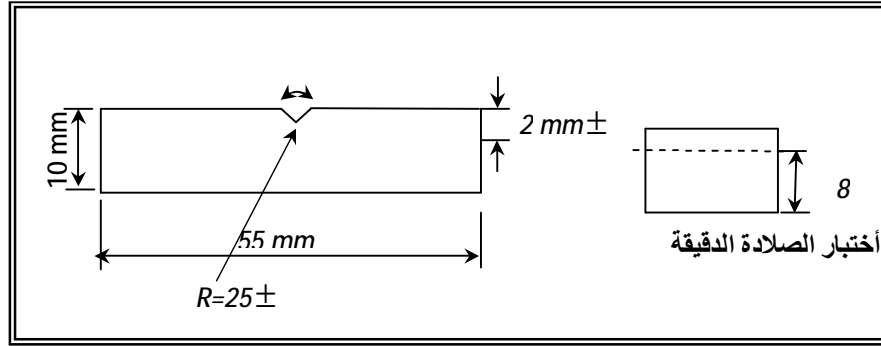
أختبار الصدمة

تم إجراء أختبار الصدمة بطريقة شاربي V- Charpy بأستعمال جهاز أختبار الصدمة موديل HECKERT الماني المنشأ. أما عينه أختبار الصدمة فقد صنعت حسب المواصفة القياسية [15]. ASTM والشكل رقم (3) يوضح عينة الصدمة من هذا الاختبار تم حساب المتانه (Toughness) وكما يلي:

$$T_0 = P_0 / A \quad \dots (6)$$

حيث ان :

- T_0 = المتانه (Kg/m) .
- P_0 = الطاقة الممتصة (Kg.m) .
- A = مساحة مقطع العينه عند الحز (m²)



الشكل (3): عينة أختبار الصدمة.

تم إجراء أختبار الصلادة الدقيقة للعينات المعاملة سطحيًا بالليزر باستخدام جهاز فحص الصلادة الدقيقة HV 1000 Digital Microhardness صيني المنشأ وأقصى تحميل للجهاز . (9.8N) وقد صنعت عينة أختبار الصلادة الدقيقة بسمك (10mm) وقطر (10mm) .

البنية المجهرية

تم التعرف على البنية المجهرية وذلك باستخدام مجهر ضوئي الماني المنشأ مربوط بكاميرا وحاسوب . وقد تم تصوير العينات مجهرًا قبل وبعد المعاملة السطحية الليزرية ولاعماق مختلفة لسبيكة الفولاذ المستخدمة بالبحث وطاقت ليزيرية مختلفة.

قياس الحجم الحبيبي

يمكن قياس حجم الحبيبات بطريقة (intercept) وذلك بأخذ خط يقطع عدد من الحبيبات من بداية العينة إلى نهايتها عند قوة التكبير المستخدمة في البحث . ومن ثم تطبيق المعادلة الآتية [16]:

$$G.S = \frac{L}{M \times N} \quad \dots\dots(7)$$

حيث أن :

L = طول الخط .

M = قوة التكبير .

N = عدد حدود الحبيبات مع خط التقاطع .

وتكرر خطوات هذه الطريقة عدة مرات لأخذ متوسط الحجم الحبيبي لكل طور.

النتائج والمناقشة

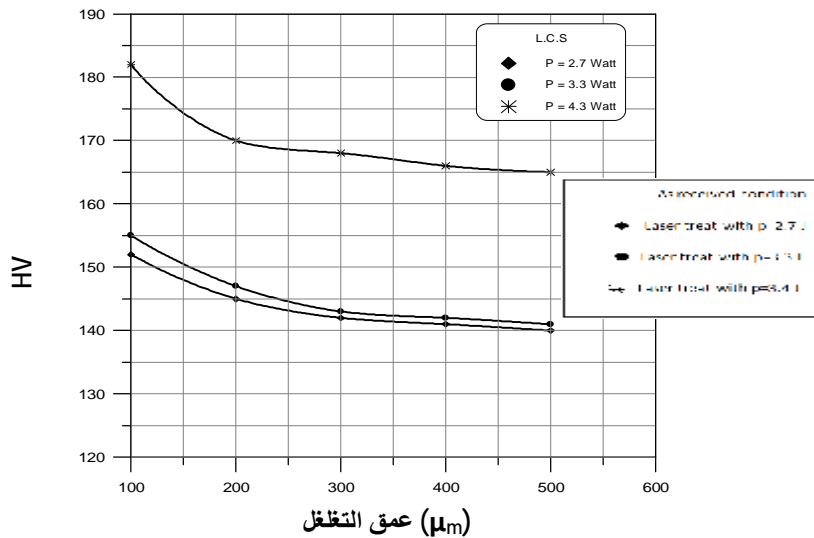
مناقشة الصلادة الدقيقة

شكل رقم (4) يوضح زيادة الصلادة الدقيقة بزيادة طاقة الليزر . حيث أن طاقة الليزر (4.3J) تعطي أعلى قيم للصلادة الدقيقة مقارنة مع الطاقة (3.3J) و (2.7J) ولاعماق تغلغل مختلفة . وأن أعلى قيم للصلادة الدقيقة عند عمق (100 μm) من السطح وذلك بسبب تنعيم الحبيبات في السطح مقارنة مع أعماق التغلغل الأخرى وذلك لأن الحبيبات الناعمة ذات مساحة سطحية

أصغر وهذا بدوره يؤدي الى زيادة قيمة الصلادة الدقيقة . الجدول رقم (3) يبين قيم الصلادة الدقيقة لطاقات الليزر المستخدمة في البحث ولاعماق مختلفة.

جدول رقم (3) :نتائج اختبار الصلادة الدقيقة للفولاذ منخفض الكربون وعمق التغلغل بعد اجراء المعاملة السطحية بالليزر.

عمق التغلغل μm	الصلادة HV (Kg/mm ²)		
	الطاقة المستخدمة		
	P ₁ = 2.70 (J)	P ₂ = 3.30 (J)	P ₃ = 4.3 (J)
100	152	155	182
200	145	147	170
300	142	143	168
400	141	142	166
500	140	141	165

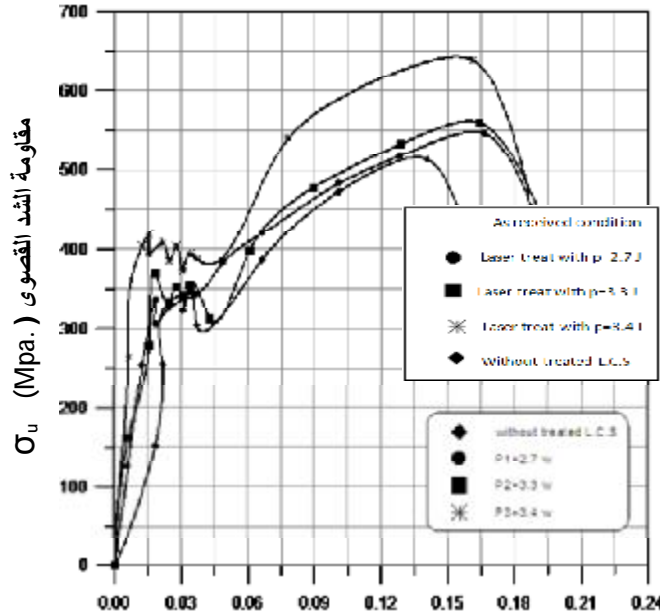


الشكل (4): العلاقة البيانية للصلادة الدقيقة وعمق التغلغل للفولاذ المنخفض الكربون.

مناقشة نتائج اختبار الشد

من نتائج اختبار الشد التي تم الحصول عليها قبل وبعد المعاملة السطحية بالليزر CW Nd :YAG نلاحظ عند زيادة طاقة الليزر تزداد قيمة إجهاد الخضوع (σ) (وهذا ينتج عن تكون أشرطة لودرز (Luders bands) [17] . وذلك بسبب زيادة درجة الحرارة التي تؤدي بدورها الى زيادة كثافة الانخلاعات وبالتالي حدوث الاصلاد الانفعالي الذي ينتج

عنه زيادة في مقاومة الشد القصوى (σ_u) و الذي يؤدي بدوره الى زيادة مقاومة الكسر وهذا ما يتفق مع الباحثون T.A. Hassan [18]. الشكل رقم (5) يوضح العلاقة ما بين الاجهاد الحقيقي - الانفعال الحقيقي للشبكة المستخدمة للظروف المختارة.



الشكل (5) : العلاقة ما بين الاجهاد الحقيقي - الانفعال الحقيقي للشبكة المستخدمة (فولاذ منخفض الكربون) عند الظروف المختارة .

ومن هذا الاختبار أيضا يتبين زيادة ثابت اللدونة K مع زيادة طاقة الليزر وللأسباب التي تم ذكرها مسبقا بينما قيمة أس الاصلاد الانفعالي n , معامل المرونة E , معامل القص G ونسبة بواسون ν فتقل عند زيادة طاقة الليزر مما يؤكد على وجود تصليد سطحي لشبكة الفولاذ منخفض الكربون عند معاملتها بالليزر [19-22]. والجداول رقم (4) يوضح النتائج الخاصة بذلك قبل وبعد المعاملة الحرارية السطحية بالليزر.

جدول رقم (4): الخواص الميكانيكية لسبائك الفولاذ منخفض الكربون
قبل وبعد المعاملة السطحية بالليزر.

نوع المعاملة السطحية	اجهاد الخصوع σ_f	اجهاد الاقصى σ_w	اجهاد الكسر σ_r	النسبة المئوية لتطور اجهاد الخصوع σ_f	النسبة المئوية لتطور الاجهاد الاقصى σ_w	معامل المرونة E	معامل القص G	نسبة بواصون ν	ثابت الدونة K (MPa.)	أس التصليد الانفعالي n
	(MPa.)			%	%	(GPa.)				
بدون معاملة حرارية	333	513	324	-	-	193.4	78.6	0.23	457.08	0.3505
بطاقة $P_1=2.7 J$	336	546	363	0.9	6.4	143	58	0.2246	473.15	0.299
بطاقة $P_2=3.3 J$	369	560	380	10	9.16	114.3	40.5	0.2217	478.63	0.273
بطاقة $P_3=4.3 J$	418	639	437	25.5	24.59	109	40.09	0.1848	512	0.26

مناقشة نتائج اختبار الصدمة

من نتائج اختبار الصدمة قبل وبعد المعاملة السطحية بالليزر، نلاحظ عند زيادة طاقة الليزر تزداد مقاومة الصدمة وكذلك المتانة وهذا ينتج عن زيادة في امتصاص الطاقة لعينة الاختبار عند طاقة ليزرية (4.3 J) أكثر مما هو عليه للطاقت الأخرى المستخدمة في البحث. والجدول رقم (5) يوضح نتائج اختبار الصدمة قبل وبعد المعاملة السطحية لسبائك الفولاذ منخفض الكربون.

جدول رقم (5): نتائج اختبار الصدمة للفولاذ منخفض الكربون قبل وبعد
المعاملة السطحية الليزرية.

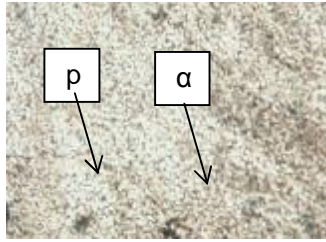
نوع المعاملة السطحية	الطاقة الصدمية P_0 (Kg. m)	المتانة T_0 (Kg/m)	النسبة المئوية لتطور الطاقة الصدمية %	النسبة المئوية لتطور المتانة %
بدون معاملة حرارية	23	278.5	-	-
بطاقة $P_1=2.7 J$	24	300	4.3	4.3
بطاقة $P_2=3.3 J$	25.5	318.7	10.86	6.23
بطاقة $P_3=4.3 J$	27.8	347.5	20.8	8.287

مناقشة البنية المجهرية

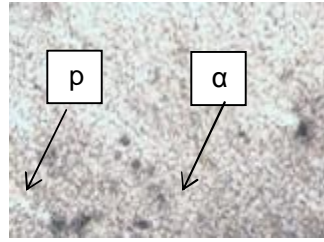
بما ان التصليد بالليزر لا يؤدي الى تغيير في الاطوار كما بين ذلك الباحثان [15,19].
DUTTA , I MANNA, Sadhana. لوقد أظهرت نتائج البحث أن زيادة طاقة الليزر تزيد من قيم
اجهاد الخضوع ومقاومة الشد القصوى وذلك لان طاقة الليزر تسبب زيادة في درجة حرارة السطح
لسبيكة الفولاذ منخفض الكربون والذي يؤدي بدوره الى تنعيم الحبيبات عند السطح مقارنة مع
حجم الحبيبات باتجاه مركز العينة وهذا ينتج عن الاصطاد الانفعالي الذي يحدث عند زيادة طاقة
الليزر وكما مبين في الشكل رقم (6) والذي يوضح التراكيب المجهرية على
بعد ($100,300,500 \mu m$) من السطح وللعينات قبل وبعد المعاملة السطحية بالليزر وللطاقات .
($4.3,3.3,2.7 J$) بزيادة طاقة الليزر اي عند طاقة ليزر ($4.3 J$) نلاحظ ان حجم الحبيبات اصغر
مقارنة مع طاقة الليزر ($3.3 J$) والتي بدورها تعطي حبيبات أصغر مقارنة مع طاقة الليزر ($2.7 J$)
والجدول رقم (6) يوضح حجم الحبيبات قبل وبعد المعاملة بالليزر .

جدول : (6) حجم الحبيبات للفولاذ منخفض الكربون قبل وبعد المعاملة
السطحية بالليزر للظروف المختارة.

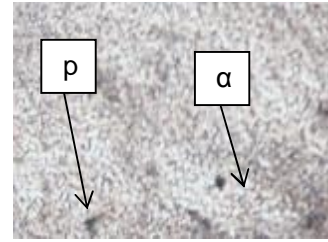
نوع المعاملة السطحية	حجم الحبيبات (μm)	
	طور الفرايت α	طور البيرلايت P
بدون معاملة حرارية	16.3	15.5
بطاقة $P_1=2.7 J$	12.0	11.3
بطاقة $P_2=3.3 J$	8.7	7.2
بطاقة $P_3=4.3 J$	5.8	4.9



بدون معاملة حرارية بالليزر
لعمق (100μ_m)



بدون معاملة حرارية بالليزر
لعمق (300μ_m)



بدون معاملة حرارية بالليزر
لعمق (500μ_m)



معاملة حرارية بالليزر لعمق (100μ_m)
(p1=2.7 J)



معاملة حرارية بالليزر
لعمق (300μ_m) (p1=2.7 J)



معاملة حرارية بالليزر
لعمق (500μ_m) (P1 = 2.7 J)



معاملة حرارية بالليزر لعمق
(p2=2.7 J) (100μ_m)



معاملة حرارية بالليزر
لعمق (300μ_m) (p2=3.3 J)



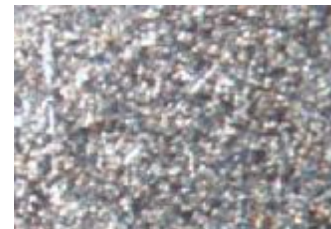
معاملة حرارية بالليزر
لعمق (500μ_m) p2=3.3 J



معاملة حرارية بالليزر لعمق (100μ_m)
(p3=4.3J)



معاملة حرارية بالليزر لعمق (300μ_m)
(p3=4.3J)



معاملة حرارية بالليزر لعمق (500μ_m)
(P3=4.3J)

الشكل (6): التراكيب المجهرية لاعمق مختلفة لسبيكة الفولاذ منخفض الكربون المعامل حراريا وبطاقات ليزرية مختلفة وبقوة تكبير . (ولجميع العينات قوة التكبير 270X).

الاستنتاجات

1. زيادة طاقة الليزر أدت الى تحسن واضح في الخواص الميكانيكية مثل (مقاومة الخضوع , مقاومة الشد القصوى , ثابت اللدونة , مقاومة الصدمة).
2. زيادة طاقة الليزر أدت الى نقصان في قيم أس الأصلاذ الانفعالي ومعامل يونك ومعامل القص ونسبة بواسون.
3. زيادة طاقة الليزر أدت الى زيادة قيم الصلادة الدقيقة والتي تقل قيمتها بالابتعاد عن سطح العينة المصلدة.
4. حدوث تعميم في الحبيبات عند السطح المصلد حيث يقل حجم الحبيبات مع زياد طاقة الليزر.

REFERENCES

- [1] Vasconcelos G. de , dos Reis and J.L., Campanha M.V., "Thermal Treatment of the AISI M2 High Speed Steel Promoted by a CO₂ laser Beam", Materials Science Form Vols. 591-593, (2008), pp62-67.
- [2] Watkins K.G. , Mc . Mahon M.A. , MSteen W. , Mater science and Engineering A231 , (1997), p55.
- [3] Navas C., A. Code C., Cadenas M. and de J. Damborenea, "Tribological properties of laser cald Stellite 6 coatings on steel substrates", Surface Engineering , Vol. 22, No.1, (2006), p26.
- [4] Grum J. , "Comparison of different techniques of laser surface hardening ", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering ", Vol.24, No. 1, (2007), p17.
- [5] Aotonov V. , Iordonora I., krezhov k. , " SAX Investigation of laser treated surface of low carbon mild steel" , pl.
- [6] Mustafa Mamat, Novan Tofany and Agus Kartono , "Numerical Analysis of Heat Conduction and Phase Transformation in Laser Transformation Hardening: Influences of Heating Duration and Laser Beam Intensity", Applied Mathematical Sciences , Vol.4., No. 61, (2010), pp 3019 -3033.
- [7] Sebinki W. , lubinski J. I. , Druet K. , Advances in Materials science , Vol.4, No.2 (4), (2003) p 71. Ole Sadven, "Laser Surface Tranformation Hardening ", Metals Handbook, 9th Edition, Vol 4, (1988), pp(507- 517).
- [8] LEI Sheng , LIU Quankun, MA Yuping , REN Jingming, "Wear Performance of Laser Surface Hardened GCR16 Steel", Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., Vol.25, No.1, (2010), p 84.
- [9] 2003. زياد أباد طه ، المعاملة الحرارية لسبائك الفولاذ والالمنيوم بأستخدام الليزر "، أطروحة ماجستير ، علوم الليزر ، الهندسة الميكانيكية ،
- [10] Gadag S.P. , Srinivasan M .N., "Surface Properties of laser processed ductile iron", Appl. Phys. A63, (2009) , P409-414
- [11] Antonov V. , "Saxs Investigation of laser treated of low Carbon and iron-Carbon Chromium Steel ", University of sofia <http://www.eptcch.hit.edu> .

-
- [12] Navas C. , Conde A. , Cadenas M. and de Damborenea J. , "Tribological Properties of laser Clad Stellite 6 Coatings on Steel Substrates ", Surface Engineering, vol.22, No.1, (2006), P26 -34 .
- [13] Design World , <http://matweb.com>.
- [14] Annula Book of ASTM standards volumes, 3.01 and 3.02 philadelphia USA, (1988).
- [15] ASTM international, "Standard Test Methods for Determining Average Grain size", Designation: E112 – 96e³
- MECHANICAL METALLURGY by GEORGE. DIETER International student Edition ,(1976).
- [16] Hassan T.A. "Study of mechanical properties of steel with Nd: glass Laser. Msc Thesis , university of Baghdad, (1994).
- [17] DUTTA MAJUMDAR J. and I MANNA, Sadhana , Vol.28 , parts 3& 4, June, August ,(2003), P533 .
- [18] JONHSON W., MELLOR P.B., "Engineering Plasticity", Von Nostar and Reinhold Company London, (1978), p16.
- [19] Rowe G.W., "Principles Industrial Metal Working Processes", Edward Arnold, London, (1971), pp20-24.
- [20] Ling Y., " Uniaxial True Stress – Strain after Necking “, AMP Journal of Technology , Vol.5, June, (1996), p41.