

دراسة تأثير استخدام المجال الكهربائي والضغط المنخفض على عملية التنقيب بالليزر

م.م. زينب ناصر جميل*

تاريخ التسلم: 2008/6/30

تاريخ القبول: 2009/4/2

الخلاصة

جرت في هذا البحث دراسة تأثير المجال الكهربائي عند ضغط منخفض (10^{-2} m bar) على عملية التنقيب بالليزر باستخدام مواد مختلفة مثل (الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) والبراص). تم توظيف ليزر Nd: YAG النبضي بطول موجي ($1.06 \mu\text{m}$) وأمد نبضة ($300\mu\text{s}$) وبطاقات مختلفة تراوحت ما بين J (3-0.5). أظهرت النتائج المستحصلة ان اعلى نسبة الباعية كانت للفولاذ المقاوم للصدأ 49% عند طاقة (3J). بينما كانت اعلى نسبة باعية للبراص هي 36.6%.

Study effect of using electric field and low pressure on laser drilling process

Abstract

In this work, the effect of electric field at low pressure (10^{-2} m bar) on laser drilling process has been studied for Stainless-Steel type (304) and brasses.

Nd: YAG pulsed laser ($1.06\mu\text{m}$) of ($300\mu\text{s}$) pulse duration at various energy ranges between 0.5and 3J was used. The results indicated that the obtained maximum aspect ratio for St. St. equals to (49%) at maximum used Energy. However the obtained maximum aspect ratio for brass is (36.6%).

Keyword: Laser drilling, electric field effect, industrial applications. Laser –Material

المقدمة

مقدار الطاقة الساقطة وبالتالي خسارة في الطاقة المساهمة في عملية التفاعل أما الجزء الاخر فيمتص من قبل ذرات المادة على افتراض ان نفاذيتها صفر بالنسبة للمعادن ومما يساهم في عملية التنقيب مع حصول خسائر في الطاقة الممتصة بسبب التوصيل الحراري الذي تمتلكه المادة وامتصاص واستطارة شعاع الليزر الساقط من قبل ذرات المادة المتطايرة (المتبخرة) اثناء عملية التنقيب (3,4).

تمتص الالكترونات الحرة والمفيدة في ذرات المادة كمات من طاقة اشعة الليزر مما الى انتقال الالكترونات الى مستويات طاقةية اعلى (5) وقد تحدث تصادمات ما بين

أحدث اكتشاف أشعة الليزر عام 1960 ثورة في مجال التطبيق، وكان له الاثر الفعال في تطوير تقنيات وفتح افاق جديدة في مجالات العلم والمعرفة، وذلك لما تميزت به أشعة الليزر من خصائص تفردت بها دون المصادر الاخرى للطاقة، منها التشاكة والشدة العالية بالإضافة الى أحادية الطول الموجي والاتجاهية وكثافة القدرة العالية (1,2).

يتحدد تفاعل اشعة الليزر مع أي مادة من خلال ظاهرتي الانعكاس والامتصاص بالإضافة الى النفاذية، اذ تعاني أشعة الليزر عند سقوطها على اي مادة من انعكاس جزء منها من قبل سطح المادة وتمثل هذه خسارة في

* وحدة ابحاث الليزر/ قسم العلوم التطبيقية/ الجامعة التكنولوجية/ العراق - بغداد

الالكترونيات المثيجة وبشرط الارتفاع درجة لغرض اجراء عملية التنقيب في ظروف مختلفة وللتعرف على تأثير تشعيع المادة بالليزر , استخدمنا سبيكتين متباينتين في خواصها الفولاذ المقدم للصدأ (St.St (304) والبراص (Brass) والجدول (1) يبين الخواص الفيزيائية للمواد المستخدمة في البحث بالاضافة الى قيم الانعكاسية عند الطول الموجي (1.06µm) الليزر المستخدم . لقد اختيرت هاتين المادتين بسبب اهميتها في الاستخدامات في مجال الصناعة والتكنولوجيا المتخصصة .

ان للمجال الكهربائي تأثير كبير على كميات المادة المزالة بالليزر . ولدراسة تأثير المجال الكهربائي على ابعاد والشكل الهندسي للثقب المتولد في عملية التنقيب بالليزر , تم تثبيت لوحين متماثلين من النحاس متوازيين على قاعدة من مادة البيرسبكس لتسليط المجال الكهربائي بينهما من خلال توصيل الاقطاب الكهربائية المعزولة وباستخدام جهاز قدرة للفولتيات العالية تراوحت ما بين (0-5)kV ، وامازت القاعدة بامكانية تغير المسافة بين اللوحين . وقد تم وضع قاعدة العينة هذه داخل حجرة التفريغ . ليتسنى لنا دراسة أثر المجال الكهربائي والضغط المنخفض على عملية التنقيب بالليزر .

والشكل (1) يبين مخطط لمكونات حجرة التفريغ ومزودة بأقطاب المجال الكهربائي.

أستخدم مجهر ضوئي مصنع من قبل شركة (Leitz) لقياس قطر وعمق الثقب اذ توضع العينة على قاعدة المجهر ويغير ارتفاعها حتى يتم الحصول على أوضح صورة للسطح ثم يقاس الفرق بين حافتين متقابلتين من الثقب، ونتيجة عدم انتظام بعض الثقوب تم حساب معدل القطر لأكثر من اتجاه متعامد. أما بالنسبة لعمق الثقب اعتمد مبدأ الفرق في القراءتين لأوضح صورة لسطح العينة وقطر الثقب ومقارنة هذا القياس مع قياس عمق الثقب من خلال مقطعه الطولي.

تم دراسة الشكل الهندسي للثقب تحت المجهر الضوئي بازالة طبقات رقيقة من المادة تدريجياً لغاية الوصول الى أعماق نقطة في الثقب المتكون.

حرارة الوسط (المادة) . اما التصادمات الذي تحدث ما بين الالكترونات المثيجة واهتزازات الشبكة فأنها تؤدي الى رفع درجة حرارة المادة (6,7) . وفيما يلي بعض العمليات الفيزيائية التي تحدث داخل المادة نتيجة تفاعل الليزر مع السطوح (8).

بينت العديد من البحوث أن 90% من المادة المقذوفة الى خارج الثقب تكون بهيئة قطرات سائلة تتكثف على حافات الثقب المتكون والمتقي يكون على هيئة بخار المادة ونقل هذه النسبة بزيادة كثافة قدرة الشعاع الساقط الى اكبر من (10 W/cm²) (9). ولحساب سرعة ازالة المادة وتكون الثقب نطبق العلاقة الآتية (10):

$$V_s = \frac{I}{r[C(T_v - T_o) + L_v]} \dots\dots\dots(1)$$

حيث

- I : كثافة القدرة الممتصة W / cm² .
 - L_v : الحرارة الكامنة للتبخير J/g .
 - r : كثافة المادة gm/cm³ .
 - T_v : درجة التبخير C° .
 - T_o : درجة الحرارة الابتدائية للسطح C° .
 - C : الحرارة النوعية J/g. C° .
- بينما يمكن حساب الثقب المتولد في عملية التنقيب بالليزر من العلاقة الآتية :

$$h = \frac{E_o}{a \rho [c(T_v - T_o) + L_v]} \dots\dots\dots(2)$$

حيث

- E_o : طاقة الليزر الساقطة على السطح J.
- a : المساحة المتأثرة بحزمة الليزر cm²

الجزء العملي

تم استخدام ليزر نبضي Nd:YAG بأمد نبضة ثابت قدرة (300µs) وطول موجي (1.06µm) مجهز من شركة (JK Laser :U.K) طاقتة الخارجية تصل الى (3.1 J) ولبؤرة شعاع الليزر ضمن مساحة صغيرة جداً وزيادة كثافة القدرة لشعاع الليزر الساقط استخدمنا عدسة لامة ذات بعد بوري (20 cm)

التقب المتولد فيه أقل عمقاً من ذلك المتكون في الفولاذ المقاوم للصدأ.

يزداد قطر التقب المتولد من نبضة الليزر مع زيادة الطاقة الساقطة كما في الشكل (3) الذي يوضح تغير قطر التقب مع طاقة الليزر الساقطة. حيث تكون العلاقة ببعضها خطية عند الطاقات الواطئة وتصبح غير خطية عند الطاقات العالية.

ان الزيادة في طاقة شعاع الليزر الساقط تؤدي الى زيادة قطر التقب بسبب ظهور الانماط المستعرضة ذات المراتب العليا والتي تؤدي بدورها الى زيادة مساحة تبؤر الاشعة مما ينعكس على قطر التقب (12).

ويبدو جلياً من الشكل (3) ان قطر التقب يتأثر كثيراً بالانتشارية الحرارية للمادة، اذ يمتلك البراص قطعاً للتقب اكبر مما في الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) بثبوت الطاقة الساقطة بسبب انتشاريته الحرارية العالية التي تعمل على انتشار الطاقة الحرارية الى جميع جوانب التقب وبالتالي زيادة المساحة المتأثرة بالحرارة مما ينعكس على قطر التقب.

تعرف النسبة الباعية على انها النسبة بين عمق التقب الى قطره، وقد اعتبرها الباحثون مقياساً لكفاءة عملية التنقيب بالليزر من خلال الاعتمادية على مقدار زيادتها (12). يتبين لنا عند مقارنة الشكلين (2) و (3) ان الزيادة في عمق التقب اكبر من الزيادة في قطره ولذا ذات المواد عند طاقة الليزر الساقطة، والشكل (4) يمثل التغير في النسبة الباعية مع الطاقة الساقطة اذ نلاحظ زيادة النسبة السباعية بزيادة طاقة الليزر الساقطة بالاضافة الى كونها تبعت تأثير زيادة عمق التقب اكبر من قطره، وبذلك امتلك الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) اعلى قيم لها مقارنة مع البراص. تقل مخروطية التقب بزيادة طاقة الليزر الساقطة والشكل (5) يبين تغير مخروطية التقب مع طاقة الليزر للمواد المستخدمة في البحث. حيث يلاحظ ان زيادة طاقة الليزر تؤدي الى نقصان مخروطية التقب بسبب زيادة المواد المزالة من جدار التقب. ويوضح الشكل نفسه ان مخروطية التقب في البراص تكون اكبر مما في الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) وبثبوت طاقة الليزر الساقطة بسبب انتشارية الحرارية العالية.

تقاس مخروطية التقب (Hole Taper) عن طريق قياس قطري التقب عند السطح والقعر وعمقه داخل المادة.

قطر التقب عند السطح - قطر التقب عند القعر عند التقب

$$\text{Hole Taper} = \tan^{-1} \frac{\text{قطر التقب عند السطح} - \text{قطر التقب عند القعر}}{\text{عمق التقب}}$$

النتائج والمناقشة

جرت دراسة تأثير الليزر على عمق التقب حيث يزداد عمق التقب بزيادة طاقة شعاع الليزر الساقطة، وكما في الشكل (2) الذي يبين هذا التغير للمواد المستخدمة في البحث وهي الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) والبراص. اذ نلاحظ زيادة عمق التقب بزيادة الطاقة الساقطة ويعزى ذلك الى زيادة في مقدار الطاقة الممتصة من قبل المادة والتي تؤدي الى ارتفاع اكثر في درجة الحرارة وبالتالي زيادة كمية المادة المنصهرة والمقذوفة الى خارج التقب بسبب ضغط البخار المتولد. كما نلاحظ ان معدل الزيادة في عمق التقب لا يتناسب خطياً مع الطاقات العالية ويعود سبب ذلك الى نقصان طاقة الليزر الممتصة من قبل بخار المادة المتطايرة وتكون الوسط البلازمي والذي يؤدي بدوره الى نقصان عمق التقب.

يبين الشكل ايضاً انه بثبوت الطاقة الساقطة يتباين عمق التقب المتكون في المواد المستخدمة في البحث وذلك لاختلاف خصائصها مثل انعكاسية سطوحها وانتشاريتها الحرارية ودرجة حرارة انصهارها. اذ تعمل الانتشارية الحرارية العالية على نقل الطاقة الحرارية باتجاه العمق اكثر من الاتجاه المستعرض، اما بالنسبة لدرجة حرارة الانصهار فان المواد التي تكون درجة انصهارها واطئة تزداد سرعة وصولها الى درجة حرارة التبخر بشكل أسرع (11). وبذلك امتلك الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) قيم أعلى لعمق التقب المتولد مقارنة مع البراص على الرغم من امتلاك الاخير درجة حرارة انصهار اوطأ وانتشارية حرارية اعلى الا ان انعكاسية سطحه العالية والتي بلغت (80%) من اشعة الليزر الساقطة كانت السبب في كون

بزيادة فعل القوة ولغاية جهد (3KV) بعدها تتوقف الزيادة في العمق.

الجدولان (2) و (3) يبينان النسب المئوية للتغير في النسبة الباعية ومخروطية الثقب (الإشارة السالبة تعني نقصان في المخروطية) المتحققة من تأثير المجال الكهربائي للفولاذ المقاوم للصدأ والبراص على التوالي فقد اكتسب الأول زيادة مئوية بالنسبة الباعية (49%) بينما بلغت (36.6%) للثاني عند أعلى طاقة مستخدمة لليزر بينما بلغت النسبة المئوية للنقصان في مخروطية الثقب (29%) للفولاذ المقاوم للصدأ و (22%) للبراص عند تلك الطاقة.

يؤثر الضغط المحيط بالمادة في كمية المادة المزالة من الثقب ومن هذا المنطلق شملت هذه المحاولة الاستفادة من دمج تأثيري الضغط المنخفض والمجال الكهربائي الذي يمتلك كل منهما تأثيراً إيجابياً في زيادة عمق الثقب لتحسين كفاءة عملية التنقيب لتحسين كفاءة عملية التنقيب بالليزر، وتم اختيار الضغط المنخفض والمجال الكهربائي لامتكانية توظيفهما معاً في خلية التفريغ كما اختبر الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) لاجراء عملية التنقيب عليه. والشكل (11) يمثل الزيادة الحاصلة في النسبة الباعية للثقب دالة لطاقة الليزر الساقطة بتأثير الضغط المنخفض والمجال الكهربائي على الفولاذ المقاوم للصدأ علماً ان مقدار الضغط المنخفض من خلية التفريغ التي اجريت عليها عملية التنقيب هو (10^{-2} mbar) بينما يوضح الشكل (12) نقصان مخروطية الثقب دالة لطاقة الليزر الساقطة بتأثير الضغط المنخفض والمجال الكهربائي على الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) ويمكن تفسير ذلك ان الضغط المنخفض المحيط بالعينة يساهم بصورة فاعلة في تمدد الأبخرة والمواد المتطايرة اي بزيادة سرعة انتشارها وبما ان ذروة المادة المقذوفة التي تتكون على هيئة بخار وقطرات منصهرة تقذف باتجاه الشعاع المنعكس لشعاع الليزر الساقط وفي حالة السقوط العمودي على سطح العينة فإنها تقذف باتجاه شعاع الليزر خلال المادة هذا بالإضافة الى ازاحتها بسبب المجال الكهربائي مما يضيفي زيادة أكثر من تأثير كل

اثبتت النتائج ان للمجال الكهربائي دور فعال في تحسين كفاءة عملية التنقيب بالليزر كما في الشكل (6) الذي يمثل النسبة الباعية للثقب المتولد دالة لطاقة الليزر الساقطة على الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) عند التنقيب باستخدام المجال الكهربائي، تم تسليط مجال كهربائي منتظم على العينة من خلال لوحين نحاسيين متوازيين تفصل بينهما مسافة (1cm) وجهد كهربائي مستمر مقداره (3KV). حيث تم تثبيت العينة في منتصف المسافة الفاصلة بين اللوحين بحيث يتعامد اتجاه الليزر الساقط مع اتجاه المجال الكهربائي. ويتضح من الشكل اثر المجال الكهربائي في زيادة النسبة الباعية للثقب ولمدى الطاقات المستخدمة.

يمثل الشكل (7) تغير مخروطية الثقب دالة لطاقة الليزر الساقطة على الفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) عند التنقيب باستخدام المجال الكهربائي حيث يلاحظ من الشكل اثر المجال الكهربائي في نقصان مخروطية الثقب ولمدى الطاقات المستخدمة ويمكن تفسير ذلك من خلال القوة الناتجة عن المجال الكهربائي والمسلطة على بخار المادة المتطايرة لاحتوائه على جسيمات مشحونة (الكترونات وايونات ذرات المادة) حيث تعمل هذه القوة على ازالة الجسيمات المشحونة جانباً مؤدية الى نقصان في امتصاصية شعاع الليزر من قبل البخار، اي زيادة في عمق الثقب المتولد (13،14).

يبين الشكلين (8) و (9) التغير في النسبة الباعية ومخروطية الثقب على التوالي دالة لطاقة الليزر الساقطة على البراص عند التنقيب باستخدام المجال الكهربائي حيث يتضح من الشكل (8) اثر المجال الكهربائي في زيادة النسبة الباعية للثقب بينما يوضح الشكل (9) اثر المجال الكهربائي في تقليل مخروطية الثقب ولمدى الطاقات المستخدمة.

لغرض التعرف على مدى تأثير المجال الكهربائي في عمق الثقب تم اجراء عملية التنقيب للفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304) ومادة البراص.

بثبوت طاقة الليزر الساقطة بمقدار (2J) ولقيم من الجهد تراوحت ما بين (0.5KV) كما في الشكل (10) حيث يبين ان عمق الثقب يزداد

- &electro optics (ICALEO), Vol.95, ISBN 2003.
- 3- E. Armon, Y. Zvirin, G. Laufer, and A. Solan, J. Appl. phys, Vol.65, No.12, P.4995 – 5002, (1989).
- 4-d.j. hwang t.y. choi c.p. grigoropoulos," Liquid-assisted femtosecond laser drilling of straight and three-dimensional microchannels in glass",Appl. Phys. A 79, 605–612 (2004)
- 5- N. Rykalin, A. Uglov, A.Kokora "Laser Machining and Welding" Pergamon Press, ch.1, ch.2, ch.4,1978.
- 6- T.P.Hughes "Plasmas and Laser Light" Adam Hilger, Ltd, ch.7, 1975.
- 7- J. Ready, Proc. Of IEEE, Vol.70, No.6, P.533-544, 1982.
- 8- M. Bertolotti " Physical Process in Laser – Material Interactions"Plenum Press, P.49-77,1983.
- 10- R.E. Wanger J.Appl. phys., Vol.45, No.10, P.4631-4636,1974.
- 10- J. Wilson, J.F.B. Howkes "Lasers Principles and Applications Prentice Hall, ch.5, 1987.
- 11- J. Ready " Effects of High – power Laser Radiation" Academic Press, ch.1,ch.3, 1971.
- 12- W.K. Hamoudi and B.G. Rasheed, Int. J. for the joining of materials, Vol.7(2/3), P.63-69, 1995.

منهما على انفراد مما يزيد من عمق الثقب وبالتالي نسبته الباعية ونقصان مخروطية الثقب.

والجدول (4) يبين النسب المئوية للتغير في نسبته الباعية ومخروطية الثقب المتحققة من تأثير الضغط المنخفض والمجال الكهربائي للفولاذ المقاوم للصدأ. حيث بلغت النسبة المئوية في النسبة الباعية (65%) عند اعلى طاقة بينما بلغت النسبة المئوية لنقصان مخروطية الثقب (36%) عند الطاقة نفسها.

الاستنتاجات

- 1- يتأثر عمق الثقب وقطره بالخصائص الفيزيائية للمادة مثل الانتشارية الحرارية وانعكاسية السطح، حيث يزداد عمق الثقب وقطره بزيادة طاقة الليزر الساقطة .
- 2- حقق استخدام المجال الكهربائي في عملية التنقيب بالليزر زيادة في النسبة الباعية للثقب ونقصانا في مخروطية الثقب ولجميع طاقات الليزر الساقطة .
- 3- أدى إجراء عملية التنقيب تحت ضغط منخفض وباستخدام المجال الكهربائي الى زيادة في النسبة الباعية للثقب جاوزت الزيادة المتحققة باستخدام المجال الكهربائي منفرداً اذ بلغت (65%) عند اعلى طاقة للفولاذ المقاوم للصدأ بينما قلت مخروطية الثقب وبلغت النسبة المئوية (36%) عند الطاقة نفسها وللمعدن ذاته.

المصادر References

- 1- د. وليد خلف حمودي ، د. خالد عبد الحميد الخطيب "ضوئيات الكم والليزر" ، 1989
- 2- P. W. French, M. Naeem, & K.G. Watkins. Laser Percussion Drilling of Aerospace Material, international Congress on application of lasers

15-Metals handbook Desk edition, ASM, (1995)

13- U.A. Arfov, V.B. Lugovskoi and V.A. Makarenko, Sov.phys. solid state, Vol.20 , No.5, P.867-870, 1978.

14- B.I.Vasilev, A.Z. Grasyuk and M.P.Frolov, Sov. Phys. Tech. phys., Vol.31, No.4, P.473-474, 1986.

جدول (1) يبين الخواص الفيزيائية للمواد المستخدمة في البحث (15)

نوع المادة	الكثافة / g / cm ³	درجة الانصهار k	الانتشارية الحرارية / cm ² / s	الحرارة النوعية J/g.°C	التوصيلية الحرارية W/cm.e	الانعكاسية عند 1.06 μm
St. St (304)	7.9	1700	0.053	0.46	0.15	52%

جدول (2) يبين النسب المئوية للتغير بالنسبة الباعية ومخروطية الثقب عند التنقيب باستخدام المجال الكهربائي لل فولاذ المقاوم للصدأ نوع (304)

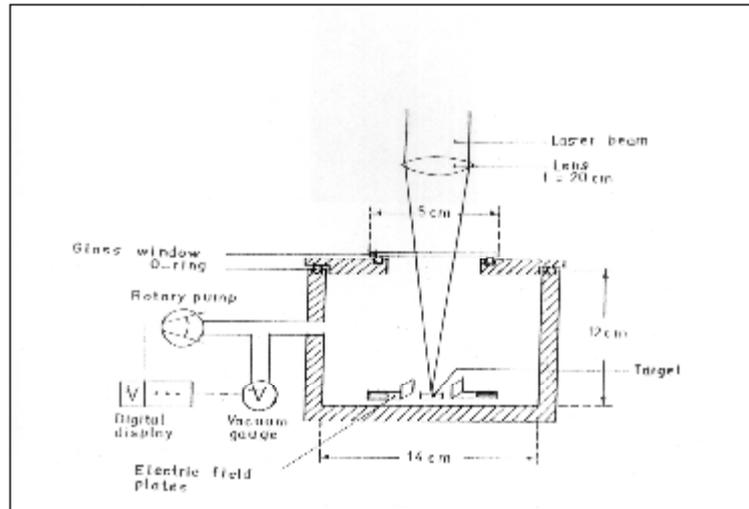
النسب المئوية للتغير		E (J)
مخروطية الثقب	النسبة الباعية	
-16.4	30	0.5
-21	36	1
-24	40.4	1.5
-26.7	44.7	2
-28.2	47	2.5
-29	49	3

جدول (3) يبين النسب المئوية للتغير بالنسبة الباعية ومخروطية الثقب عند التنقيب باستخدام المجال الكهربائي لمادة البراص

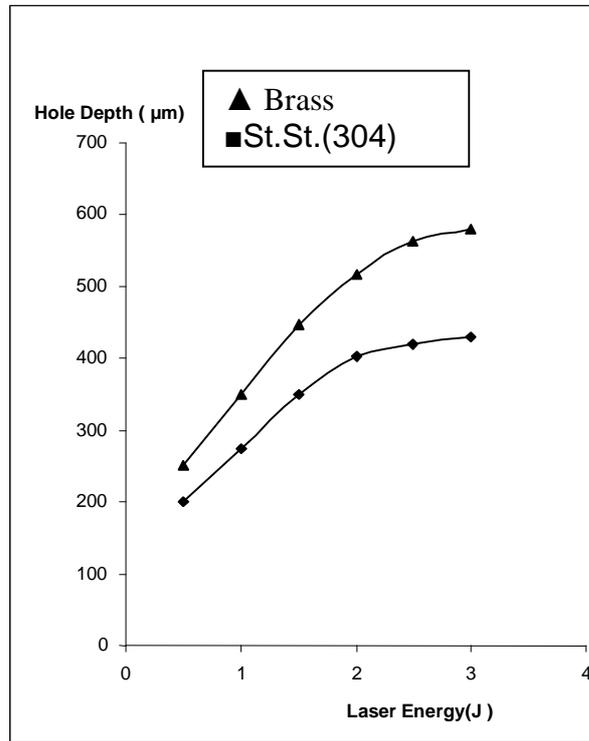
النسب المئوية للتغير		E (J)
مخروطية الثقب	النسبة الباعية	
-9.3	20.5	0.5
-14	25	1
-16.5	28.5	1.5
-19	32.2	2
-21.2	36	2.5
-22	36.6	3

جدول (4) يبين النسب المئوية للتغير بالنسبة الباعية ومخروطية الثقب عند التنقيب تحت ضغط منخفض وباستخدام المجال الكهربائي للفولاذ المقاوم للصدأ نوع (304).

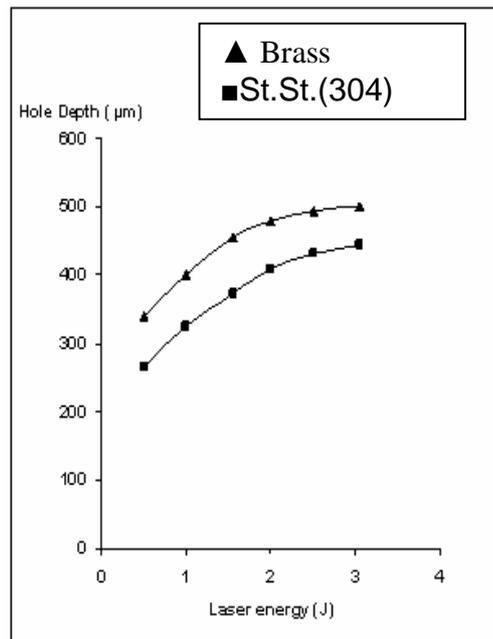
النسب المئوية للتغير		E (J)
مخروطية الثقب	النسبة الباعية	
-21	40	0.5
-26.5	47	1
-30	52.5	1.5
-33	57.5	2
-35	61.5	2.5
-36	65	3



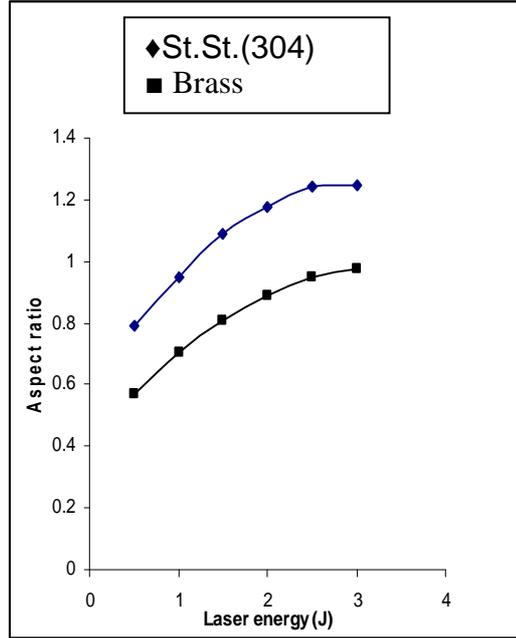
الشكل (1) مخطط لـ حجرة التفريغ ومزودة بأقطاب المجال الكهربائي



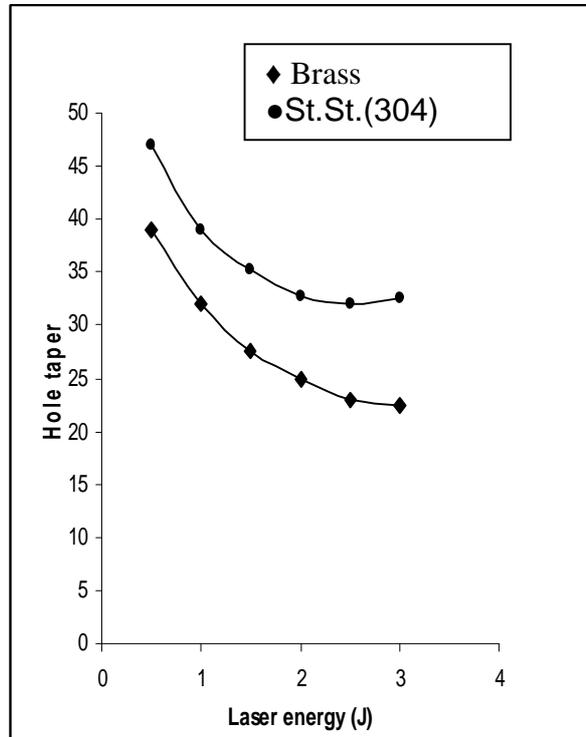
الشكل (2) يبين التغير في عمق الثقب مع طاقة الليزر الساقطة والمواد المستخدمة في البحث



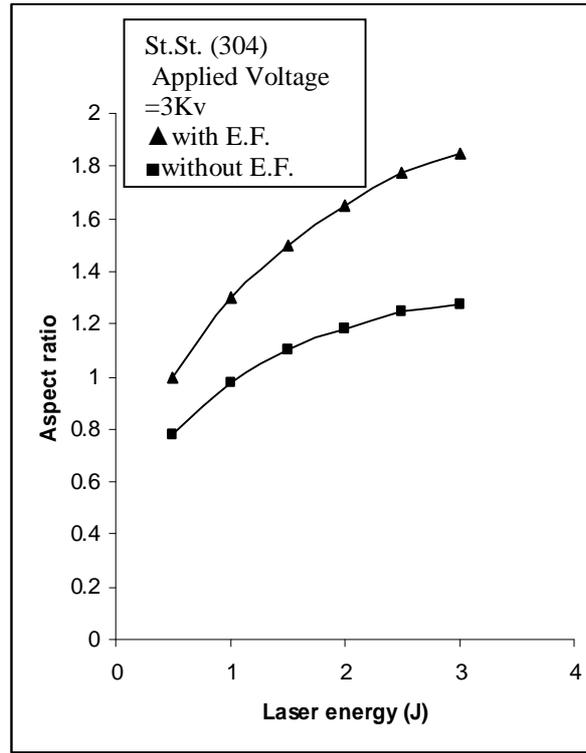
الشكل (3) يبين التغير في قطر الثقب مع الطاقة الساقطة والمواد المستخدمة في البحث



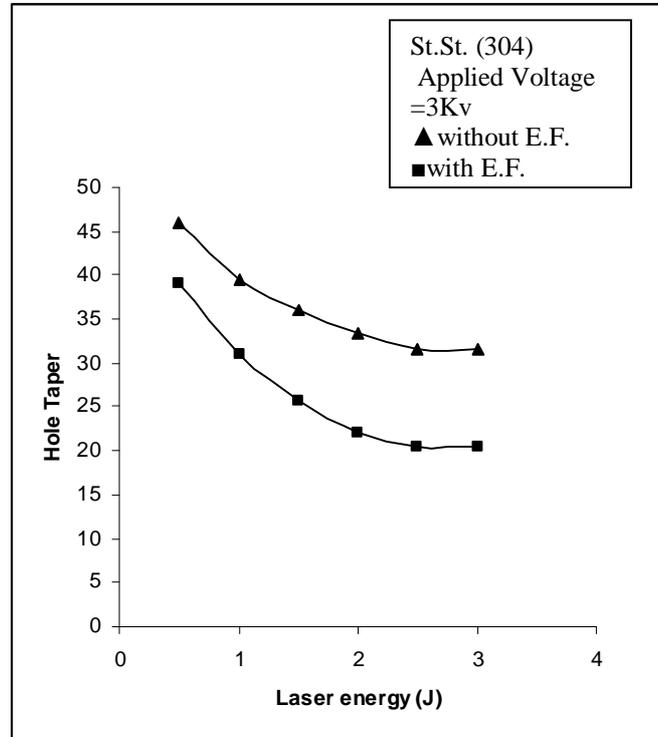
الشكل (4) يبين التغير في النسبة الباعية مع الطاقة الساقطة للمواد المستخدمة



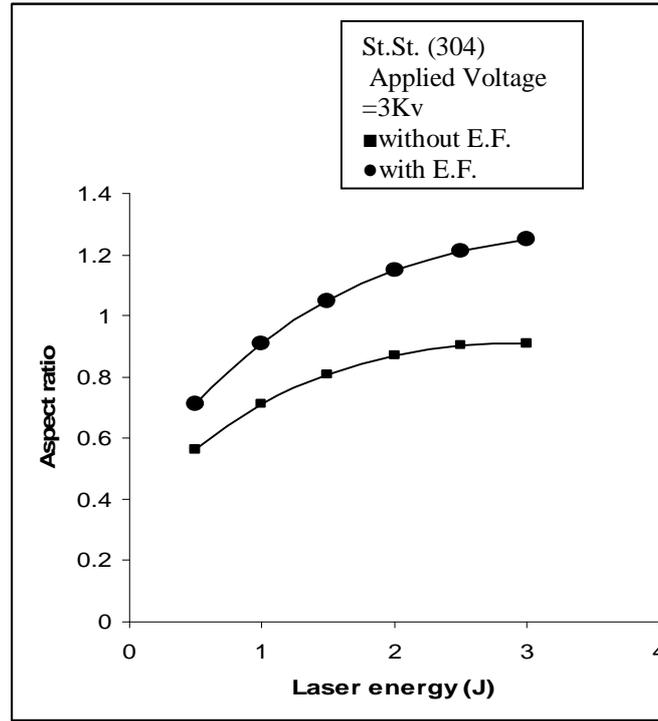
الشكل (5) يبين التغير في مخروطية الثقب مع طاقة الليزر الساقطة وللمواد المستخدمة في البحث



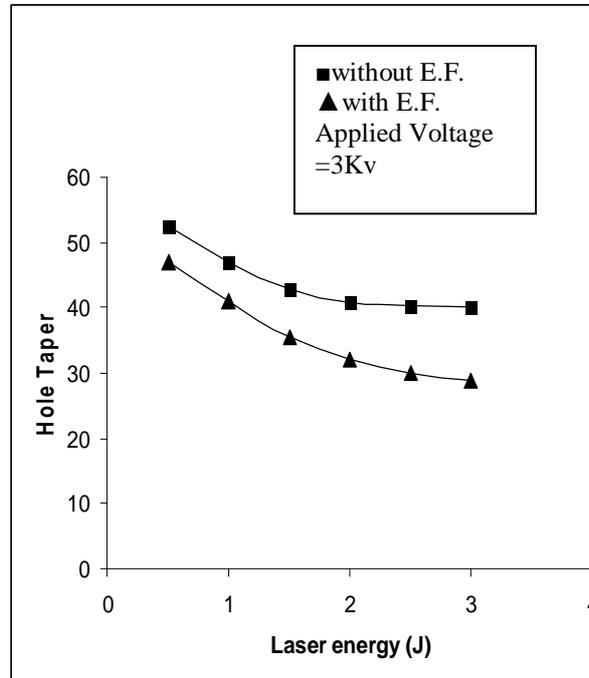
الشكل (6) يبين التغير في النسبة الباعية مع طاقة الليزر الساقطة عند التنقيب باستخدام مجال كهربائي للفلوآد المقاوم للصدأ



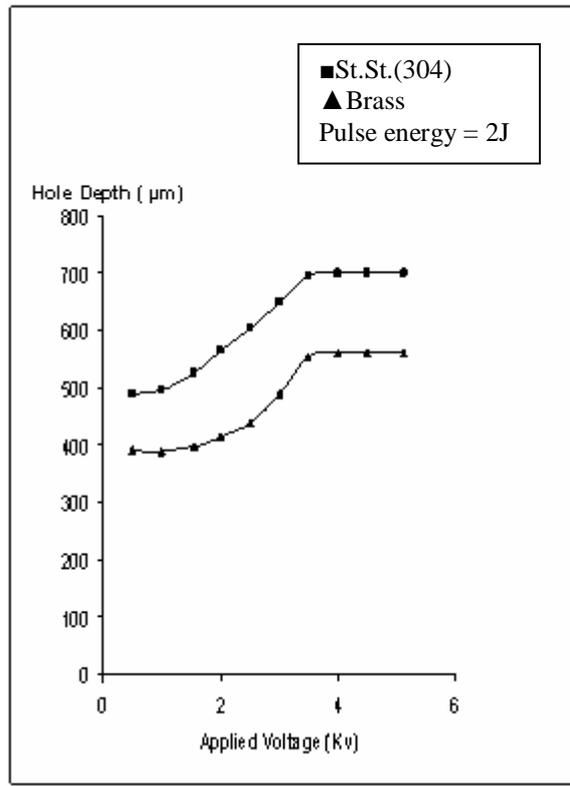
الشكل (7) يبين تغير مخروطية الثقب مع طاقة الليزر عند التنقيب باستخدام مجال كهربائي للفلوآد المقاوم للصدأ.



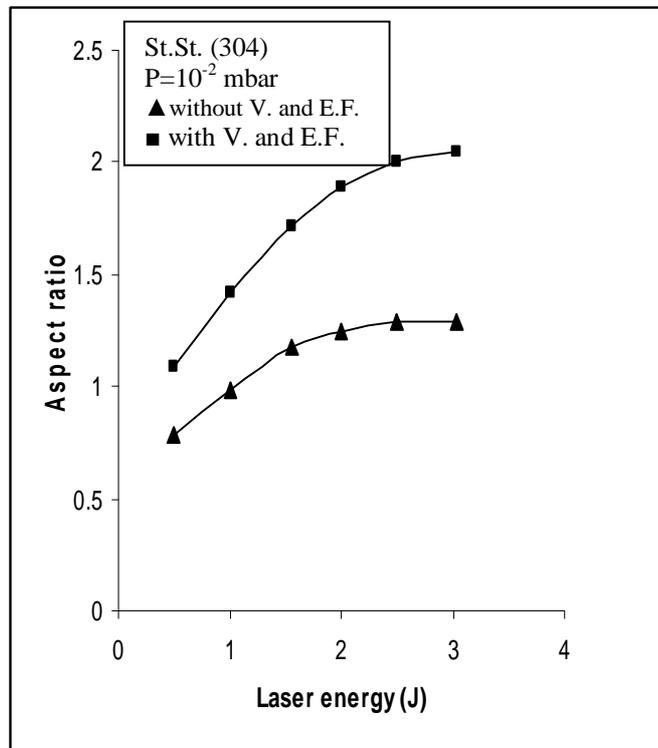
الشكل (8) يبين تغير النسبة الباعية مع طاقة الليزر عند التنقيب باستخدام المجال الكهربائي لمادة البراص



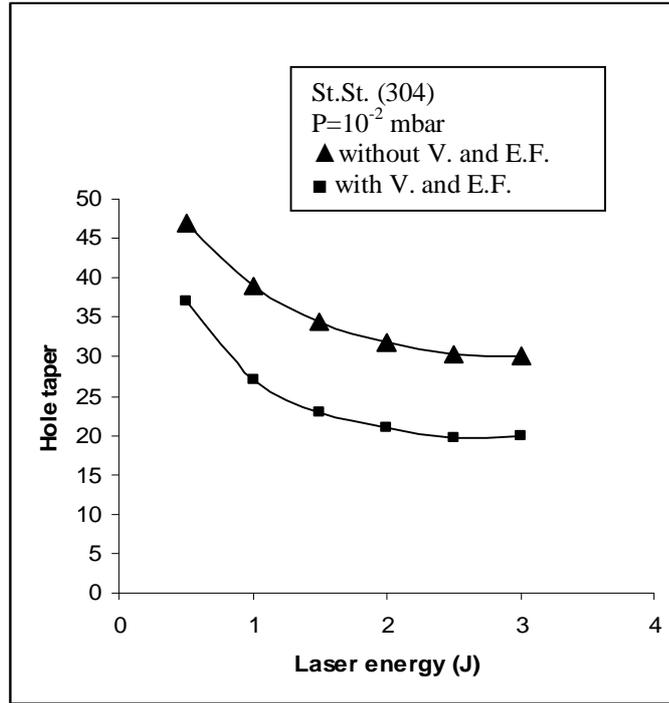
الشكل (9) يبين التغير في مخروطية الثقب مع طاقة الليزر عند التنقيب باستخدام مجال كهربائي للبراص



الشكل (10) يبين التغير في عمق الثقب مع الجهد المسلط على الفولاذ المقاوم للصدأ والبراص



الشكل (11) يبين تغير النسبة الباعية مع طاقة الليزر عند التنقيب تحت ضغط منخفض وباستخدام مجال كهربائي للفولاذ المقاوم للصدأ



الشكل (12) يبين التغير في مخروطية الثقب مع طاقة الليزر عند التنقيب تحت ضغط منخفض وباستخدام المجال الكهربائي للفلوآذ المقاوم للصدأ