دقة الأبعاد وطبيعة الأسطح المثقبة بالتفريغ الكهربائي و شعاع الليزر

الدكتور مصطفى احمد رجب

قسم هندسة الإنتاج والمعادن
الجامعة التكنولوجية- العراق

الملخص

الغرض من البحث: إن الدقة العالية في الإنتاج والتقليل من نسبة الخطأ ، إضافة إلى تفادي التلـف ، جعل من استخدام طرق القطع اللاتقليدية في مجال الصناعة جدوى اقتصادية، حيث أصبح بالإمكـان الحصول على نوعية وإنهاء سطحي جديد للمنتج المشغل بهذه التقانة. من هنا جاءت فكرة البحث من خلال دراسة طبيعة السطوح ودقة الأبعاد المنتجة بعملية التثقيب باستخدام شعاع الليـزر ، ومقارنـة ذلك بطبيعة السطوح المنتجة بطريقة التثقيب بالتفريغ الكهربائي.

الخلاصة: أوضحت نتائج البحث أن زيادة قيمة التيار المستخدم بطريقة التثقيب بـالتفريغ الكهربـائي أدت إلى زيادة معدل الإزالة بالإضافة إلى مقدار الخشونة . كما أن زيادة عمق التثقيب يـؤدي إلـى زيادة في مخروطية الثقب، إضافة الى زيادة في معدل تآكل قطب التشغيل.

أما زيادة طاقة شعاع الليزر عن قيمة معينة فقد أدت إلى زيادة قطر الثقب المنـتج وعمقـه وتقليـل مخروطيته ، بالإضافة إلى زيادة معدل الإزالة ومقدار الخشونة.

المقـدمـــة Introduction

يعود استخدام شعاع الليزر في التطبيقات الصناعية إلى بعض الخصائص لهذه الأشعة التـي أصـبح بالإمكان الحصول من خلالها على إنجاز رائع للعمليات الصناعية المختلفة ، ومنها عملية التثقيـب (Drilling)، حيث تمـيزت عمليات التثقيب باستخدام شعاع الليزر بعدة مميزات منها: عدم الحاجـة إلى حصول أي تلامس مباشر مع المشغولة، إمكانية التثقيب الدقيق وبزوايا مائلة وبدقة عاليـة نتيجـة تركيز الأشعة بشكل مسيطر عليه ، إمكانية تثقيب المواد الصلدة والهشة والقابلة للكسـر دون نحاتـة (Chip) لأن المواد المزالة تكون على هيئة بخار ومواد منصهرة [2,1] . إلا أن من سلبيات هـذه التقانة:الكلفة العالية، محدودية أعماق التثقيب التي لا تتجاوز (13) ملم خشونة السطح المنتج وعـدم انتظام الشكل الهندسي له عند الإخفاق في استخدام الظروف المثلى للتثقيب ، مخروطية الثقب المنـتج عند الإخفاق باختيار نمط النبضة وشكلها [3] . يتسم شعاع الليزر بخصائص مهمة نتيجة تأثيره فـي المادة الممتصة له ، حيث تسبب تلك التأثيرات تحولات طورية في المادة ، وفي أحيان أخرى يحـدث تسخين للمادة دون أي تحول طوري لها . فعند سقوط أشعة الليزر على سطح المادة ، تتوزع شـدتها بعدة اتجاهات ينعكس جزء منها من سطح المادة، وجزء بسيط يمتص من قبل المواد المتبخـرة ، فـي حين ينتقل جزء آخر داخل المادة ، أما القسم المتبقي فيمتص من قبل المادة ويتحول الى حرارة لإنجاز العمل [5,4] .

أوضحت البحوث والدراسات أن طاقة الليزر غير كافية لتبخير كمية المادة المزالة،

وما يزال من المادة المنصهرة المتطايرة لا يشكل إلا نسبة (10 %) في أحسن الأحوال، بحيث تعتمـد المادة المنصهرة على كثافة قدرة الليزر، فهي تقل مع زيادة كثافة القدرة [6,5]. وقد وجد أن عمليـة التفاعل التي تحصل ما بين شعاع الليزر والمادة المراد تشغيلها تعتمد على عدة أمور، منهـا: زمـن نبضة الليزر، كثافة القدرة، قطر شعاع الليزر، امتصاصية المادة لأشعة الليزر، الانتشارية الحراريـة، بالإضافة إلى طبيعة سطح المادة[7]. أمـا طريقـة التشـغيل بـالتفريغ الكهربـائي (Electrical Discharge Machining) ، فهي الأخرى من أوسع الطرق انتشاراً في قطع المعادن وتشـغيلها، وتستخدم بصورة رئيسية في صناعـ ـة القوالب (Dies). ويعد التيار المتغير الأساسي فـي عمليـة التشغيل، حيث إن زيادته تؤدي إلى زيادة كمية المعدن المزال من الشغلة وفي الوقت نفسه زيادة فـي تأكل القطب، ولكن على حساب الخشونة السطحية، لذا فإن الخشونة السطحية تزداد مع زيـادة التيـار الكهربائي [8]. كما وتعد فولتية التشغيل أيضا" من العوامل الأساسية لتحديد عرض النجـوة (over cut)، حيث أن زيادة قيمة متوسط فولتية التشغيل يؤدي إلى زيادة معدل إزالة المعدن، وعادة ما يكون قطب التشغيل(الأداة) هو عبارة عن القطب السالب(Cathode)، بينما تكون الشـغلة هـي القطـب الموجب (Anode)، أي أن الربط عادة ما يكون بالقطبية الاعتيادية (Standard Polarity)، وهي

مناسبة عند استخدام نبضات ليزر قصيرة (short pulse duration) تتراوح قيمتها بحدود (0.1 sec) بحيث تعطي إنهاء سطحياً جيداً [9].

كما ويعد ضغط السائل الالكتروليتي من العوامل الأساسية الأخرى التي لها تأثير مباشر في الخشونة السطحية للمادة المشغلة ، حيث وجد إن زيادة ضغط السائل يقلل من مقدار الخشونة السطحية، نتيجة التخلص من مخلفات التشغيل خارج منطقة العمل وعدم التصاقها بالسطح المشغل بسبب الحرارة [11,10].

الإجراء العملي Experimental Procedure

أجريت عملية التثقيب بطريقتين من طرق القطع اللاتقليدية هما التثقيب بشعاع الليزر والتثقيب بالتفريغ الكهربائي على عينات من الصلب المنغنيزي الصلد ، والموضح تركيبه الكيمياوي بالجدول(1).

العنصر	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Fe
النسبة%	0.4	0.03	18	0.007	0.046	0.2	1.2	Rem

جدول (1) التركيب الكيمياوي للصلب المستخدم في البحث

وقد أجريت المقارنة بين الطرق السابقة من حيث خشونة السطح المنتج ، ودقة الأبعاد للعينات ، بالإضافة إلى معدل إزالة المعدن. في البداية تم تحضير العينات النهائية، والتي كانت بقياسين ، الأول (60×20×20) ملم والثاني (120×40×5) ملم، حيث استخدمت العينات الأولى لدراسة تأثير عمق التشغيل ، والثانية لدراسة باقي المتغيرات. أما منظومة الليزر المستخدمة فهي عبارة ليزر التيونديوم-ياك، زمن النبضة لها (300) مايكرو ثانية ، والطاقة المستخدمة (8) جول . تتضمن المنظومة على قضيب ليزر بطول (15.5) سم، وقطر (0.9) سم، و مصباح ومضي خطي (Linear Flash Lamp) عدد اثنان ، إضافة إلى مرآة خلفية مقعرة، انعكاساتها (100)%، ومرآة أمامية ، انعكاساتها (30)%. أما كثافة قدرة شعاع الليزر فقد تم حسابها من خلال المعادلة (1):

$$I = E/(\pi . f^2 . \theta^2 . J) \quad \text{----------(1)}$$

حيث أن :- E=طاقة الليزر

π=النسبة الثابتة = 3.14

f= البعد البؤري للعدسة (cm)

θ= انفراجية الشعاع (rad)

J= أمد نبضة الليزر (sec)

وقد أجريت عدة محاولات لمعرفة كثافة قدرة الليزر عند قيم مختلفة للبعد البؤري للعدسة كما هي موضحة بالجدول (2)

البعد البؤري للعدسة (سم)	5	8	10	20
كثافة قدرة الليزر (واط/سم)	10 *8-10*9.8	10 *3-10 *4	10 *3-10 *2	10 *6-10 *5

جدول (2) كثافة القدرة عند قيم مختلفة للبعد البؤري للعدسة

أما انفراجية شعاع الليزر فيمكن حسابها من خلال المعادلة (2)

$$\theta = (D_2 - D_1)/2L \quad \text{----------(2)}$$

حيث أن : D_1= قطر الحزمة عند المسافة X_1

D_2= قطر الحزمة عند المسافة X_2

L= الفرق بين المسافتين

حيث وجد أن انفراجية الأشعة للجهاز ($2*10^{-3}$) rad ، وأمد نبضة الليزر ($1.06*10^{-3}$) sec ، وقد تم قياس قطر الثقب باستخدام مجهر ضوئي (Optical Microscope) بحيث توضع العينة على قاعدة المجهر ويتغير ارتفاعها حتى يتم الحصول على أوضح صورة للسطح، ثم يوضع مؤشر العدسة العينية على حافة الثقب، ثم يحرك إلى الحافة المقابلة، ويحسب الفرق بين القراءتين وتعاد العملية ثلاث مرات ، ويؤخذ معدلها . أما عمق الثقب فقد تم قياسه بالجهاز نفسه وبالطريقة نفسها حيث يؤخذ الفرق بين القراءتين ، الأولى لأوضح صورة للسطح ، والثانية لأوضح صورة لقعر الثقب . في حين تقاس مخروطية الثقب (Hole Taper) عن طريق قياس قطري الثقب عند السطح والقعر والعمق داخل المادة.

$$\text{سلبة الثقب} = \frac{\text{(قطر الثقب عند السطح – قطر الثقب عند القعر)}}{\text{(عمق الثقب) x 2}} \quad \text{------(3)}$$

في أثناء تسليط شعاع الليزر على السطح المراد تثقيبه ، فإن المنطقة المتأثرة بشعاع الليزر هي عبارة عن قطر الثقب مضافا" إليه منطقة التأثير الحراري حول الثقب.

أما بالنسبة إلى طريقة التشغيل بالتفريغ الكهربائي ، فقد تم تصنيع الأقطاب اللازمة لتشغيل العينات من النحاس النقي cu% (99.9)، وأجريت عملية التثقيب بالتفريغ الكهربائي بعد تحضير العينات والأقطاب وإعداد الماكنة التي تعمل بمولد نبضي عالي التردد، وقد تم اختيار ماسك مغناطيسي لغرض عملية التثبيت باستخدام سائل عازل نوع (Bpdilectric 180) ، حيث تم ضبط القطب بوضع شاقولي ،والشغلة بصورة أفقية ، وكانت الفجوة بينهما بمقدار (0.03) ملم، وضغط المحلول (0.52)

كغم / سم2، وبقطبية اعتيادية . أما معدل إزالة المعدن فقد تم حسابه من المعادلة (4) في حين تم حساب معدل تآكل القطب من المعادلة (5)

$$\text{معدل إزالة المعدن} = \frac{\text{وزن العينة قبل التشغيل (غم)- وزن العينة بعد التشغيل (غم)}}{\text{الزمن (دقيقة)}} \quad (4)$$

$$\text{معدل تأكل القطب} = \frac{\text{وزن القطب قبل التشغيل (غم) – وزن القطب بعد التشغيل (غم)}}{\text{الزمن (دقيقة)}} \quad (5)$$

النتائج والمناقشة Results and Discussions

1- التثقيب بالتفريغ الكهربائي

1-1- تأثير التيار

يزداد معدل الإزالة مع زيادة قيمة التيار (شكل 1) ، نتيجة ارتفاع مقدار طاقة الشرارة ، حيث يزداد حجم الفجوات ، ومن ثم يزداد حجم المخلفات المعدنية المنفصلة من سطح الشغلة. كما يزداد معدل تأكل قطب التشغيل مع زيادة قيمة التيار(شكل2) وتؤدي زيادة التآكل إلى زيادة مقدار الخشونة السطحية لذا فإن زيادة مقدار التيار الكهربائي يزيد من مقدار الخشونة السطحية كما هو موضح بالشكل (3) نتيجة زيادة قدرة الشرارة الكهربائية، وحسب المعادلة (6):-

$$R_u = 75 + (0.43)^{Ip2/3} . (P)^{1/6} \quad ----------(6)$$

$$P = I_p . Va . T_1 \quad ----------(7)$$

حيث P= طاقة النبضة (mj)

I_p= تيار النبضة (Amp)

Va= فولتية الفجوة (volt)

R_u = الخشونة السطحية

T_1 = زمن أمد النبضة ($Sec* 10^{-3}$)

حيث أن زيادة التيار تؤدي الى زيادة حجم الفجوات المتكونة على سطح الشغلة ,ومن ثم زيادة مقدار الخشونة. أما تأثير التيار في مقدار السلبة (شكل 4) ,فقد وجد أن زيادة التيار تؤدي إلى زيادة مقدار السلبة، لأن زيادة التيار تؤدي إلى زيادة التآكل في القطب ومن ثم تؤثر على شكله و أبعاده ، ومع استمرار عملية التشغيل يزداد مقدار تآكل القطب ومن ثم يزداد مقدار السلبة (شكل 4).

1-2 –تأثير عمق التشغيل:

تزداد الخشونة السطحية مع زيادة عمق التشغيل (شكل 5). وذلك نتيجة تعرض المناطق القريبة من فوهة الثقب العليا إلى تأثير التفريغ الكهربائي عدة مرات بينما يقل تأثير ذلك كلما اقترب القطب من القوهة، لذا فإن المناطق المعرضة للتشغيل المتكرر تكتسب خشونة منخفضة بالمقارنة مع المناطق المشغلة بأشواط محددة. أما تأثير عمق التثقيب فهو يزيد من مقدار السلبة كما هو موضح بالشكل (6)، وقد يرجع السبب في ذلك إلى أن تآكل القطب يزداد مع زيادة العمق بحيث يصبح مخروطياً باتجاه نهايتيه، لذا يكون شكل القطب الناتج مخروطياً لكون عملية التشغيل بالتفريغ الكهربائي هي عملية استنساخ لشكل القطب على الشغلة.

2-التثقيب بأشعة الليزر.

2-1- تأثير طاقة الليزر :

تؤثر طاقة أشعة الليزر في كل من عمق الثقب,قطر الثقب,مخروطية الثقب ،حيث يزداد عمق الثقب مع زيادة طاقة الليزر، لأن زيادة الطاقة الممتصة من قبل المادة يعني زيادة درجة حرارتها ومن ثم زيادة كمية المواد المنصهرة والمزالة بفعل ضغط البخار المتولد .لأن تفاعل أشعة الليزر مع المادة يعني امتصاص المادة لتلك الأشعة، ويحدث أعلى امتصاص للطاقة عند السطح ويتناقص مع زيادة البعد عنه(شكل 7).

كما يزداد قطر الثقب مع زيادة طاقة الليزر نتيجة زيادة قطر حزمة الأشعة مع زيادة الطاقة بسبب زيادة الطاقة الممتصة والتي تؤدي إلى زيادة في الحرارة المتولدة وتوزيعها بالاتجاه العرضي (شكل 7).

بينما تقل مخروطية الثقب مع زيادة طاقة الليزر بسبب الطاقة العالية التي يمكنها توليد ضغط عالٍ يمكن من خلاله إزالة المادة بشكل أكبر وفي الوقت نفسه تمنع من التصاق القطرات المنصهرة على جدران الثقب ومن ثم تدفعها إلى الخارج (شكل 8).

2-2 تأثير كثافة قدرة الليزر:

يزداد عمق الثقب مع زيادة كثافة قدرة الليزر بسبب زيادة ضغط البخار المتولد في الثقب، حيث أن ذلك يؤدي إلى زيادة كمية المواد المزالة على هيئة قطرات سائلة, لكن عمق الثقب يبدأ بالنقصان عند زيادة كثافة القدرة عن قيمة (108) واط/سم2، والسبب في ذلك هو أن كمية المواد المتبخرة سوف تكون كبيرة بحيث تعمل على أشعة الليزر وامتصاصها من الوصول إلى المادة ومن ثم تقل الطاقة التي تصل إلى المادة، وهذا يؤدي إلى نقصان في الطاقة الواصلة إلى المادة ومن ثم النقصان في عمق الثقب (شكل 9).

3-2 تأثير انفراجية أشعة الليزر على أبعاد الثقب:

يزداد عمق الثقب مع نقصان انفراجية أشعة الليزر ولكن على حساب نقصان قطر الثقب، والسبب في ذلك يعود إلى نقصان مساحة منطقة التبلور مع نقصان انفراجية الأشعة حسب العلاقة(8):

$$S=f.\theta \quad \text{----------(8)}$$

حيث إن : S=مساحة منطقة التبلور.

f=البعد البؤري للعدسة.

θ= انفراجية أشعة الليزر.

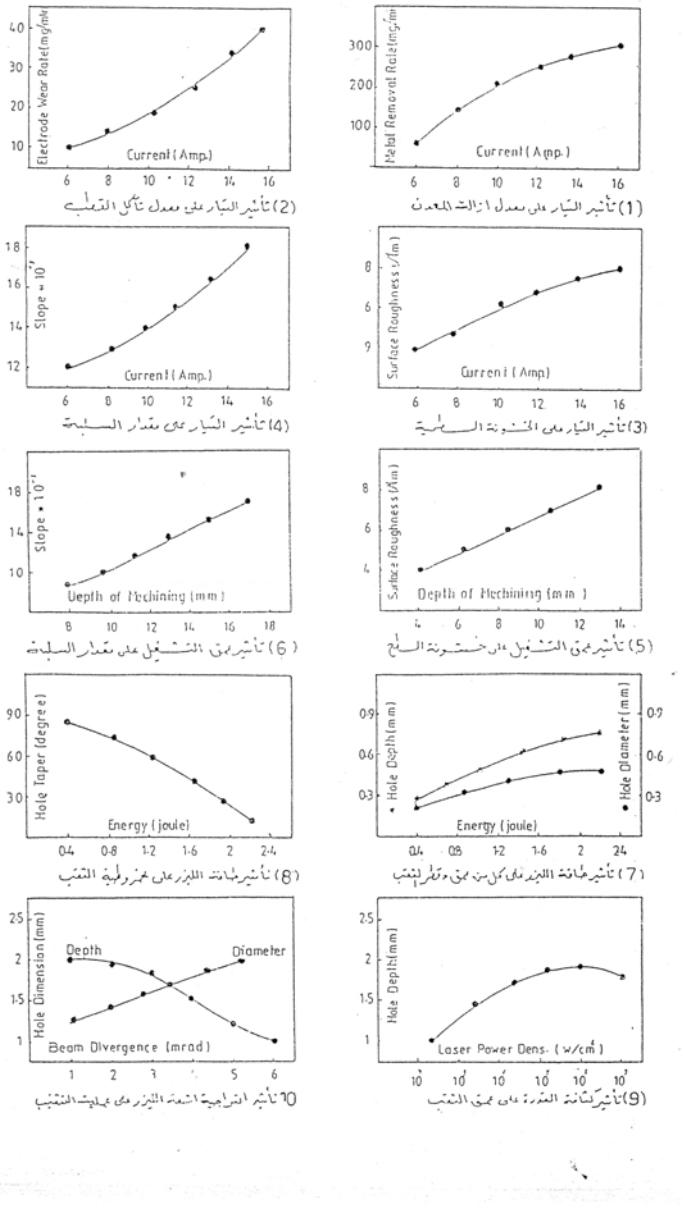
وهذا ينتج عنه نقصان في قطر الثقب مع زيادة العمق لأن كثافة قدرة الليزر تكون عالية في هذه الحالة (شكل 10).

3-مقارنة بين طريقتي التثقيب بالليزر و التفريغ الكهربائي:

تستخدم طريق التثقيب بالليزر وبشكل عام للثقوب الدقيقة والتي يصعب تثقيبها بالطرق التقليدية، في حين يصلح التثقيب بالتفريغ الكهربائي لإنتـاج الثقـوب الكبيـرة، لأن الصغير منها يحتاج إلى وقت طويل. كما يلاحظ في أثناء التثقيب بالليزر ظهور دوائر متحدة المركز حول الثقب بسبب اختلاف معدل وسرعة التبريد لتلك المناطق , لكـن هذه الحالة غير موجودة عند التثقيب بالتفريغ الكهربائي.

يلاحظ أيضاً ضعف مقاومة التآكل للسطوح المثقبة بالليزر بسبب التحول الطوري للمعدن في الهواء، وهذه الحالة يمكن ملاحظتها أيضاً عند التثقيب بالتفريغ الكهربائي، نتيجة الحرارة العالية المتولدة على السطح التي تؤدي إلى تكون طبقة معاد سبكها (Recost Layer) ينتج عنها تولد الشقوق الدقيقة(Micro Cracks) التي تسبب الفشل في أثناء تعرض الجزء للأحمال الدورية.

ومن الجدير بالذكر أن أشعة الليزر عندما تكون بشدة عالية, فإن المواد المزالة تتطاير من الثقب مكونة بلازما تعمل على تشتت أشعة الليزر عن المعدن, ومن ثم يتولد ضغط على السطح بهيئة صدمة موجية (Shock Wave) تحدث بعض التشققات (Cracks). في حين عند التثقيـب بـالتفريغ الكهربـائي وخصوصاً عند الثقوب الدقيقة فإن الإنهاء السطحي الناتج لا يفي بالغرض كما وأنه لا يمكن الحصول على حافات دقيقة بهذه الطريقة, نتيجة تآكل زوايا القطب في أثناء الاستخدام.



(1) تأثير التيار على معدل ازالة المعدن
(2) تأثير التيار على معدل تآكل القطب
(3) تأثير التيار على الخشونة السطحية
(4) تأثير التيار على مقدار السلبطة
(5) تأثير عمق التشغيل على خشونة السطح
(6) تأثير عمق التشغيل على مقدار السلبطة
(7) تأثير طاقة الليزر على كل من عمق وقطر الثقب
(8) تأثير طاقة الليزر على مخروطية الثقب
(9) تأثير كثافة القدرة على عمق الثقب
(10) تأثير التباعدية لاشعة الليزر على عملية التثقيب

الاستنتاجات:

1-يزداد معدل الإزالة للصلب المنغيزي الصلد (X40MnCr182) عند التشغيل بالتفريغ الكهربائي مع زيادة مقدار التيار, نتيجة زيادة حجم الفجوات المتكونة على سطح الشغلة، ومن ثم زيادة في حجم المخلفات المعدنية المنفصلة عنه, مما ينتج عنه زيادة في مقدار الخشونة السطحية.

2-تتأثر دقة الثقب (مخروطيته) المنتج بطريقة التفريغ الكهربائي بكل من مخروطية القطب و سمك القطعة المشغلة, حيث تزداد مخروطية الثقب المنتج مع زيادة سمك القطعة المشغلة.

3-يزداد عمق الثقب المشغل بأشعة الليزر مع زيادة طاقة الأشعة بسبب الحرارة العالية نتيجة الطاقة الممتصة, مما يؤدي إلى زيادة في كمية المواد المنصهرة و المزالة بفعل ضغط البخار المتولد.

4-زيادة قطر الثقب المشغل بأشعة الليزر مع زيادة طاقة الأشعة نتيجة كبر قطر حزمة الليزر ومن ثم ارتفاع كمية الحرارة المتولدة وانتشارها بالاتجاه العرضي.

5-نقصان مخروطية الثقب المشغل بأشعة الليزر مع زيادة طاقة الأشعة نتيجة الزيادة في معدل المواد المزالة من الجدران.

6-في بعض الأحيان قد تعاق عملية التثقيب بالليزر عندما يحصل امتصاص لأشعة الليزر من قبل المادة المراد تثقيبها بسبب البلازما التي تحجب أشعة الليزر عن المعدن, لكن هذا الشيء لا يحصل عند التثقيب بالتفريغ الكهربائي بسبب ضغط السائل الالكتروليتي الذي يدفع المخلفات المعدنية إلى الخارج.

References المراجع

*1- M.V. Allmen and etal "Influence of (LSD) on Metal Drilling with pulsed Co_2 Laser" , J.appl. Phys. ,Vol. 29 , No. 11, 1978.
2- M. V. Allmen and Etal, "Absorption phenomena in Metal Drilling with Nd: Lasers" IEEE Journal Quant eect. Vol. QE-14, No. P.85, 1978.
3- E.G. Yoif, "Effects of Elctrophilic Gases at Sub. Atmospiric pressure an Laser Induced plasma in Machining of Metals", Ph. D. thesis Brmingham University

* تاريخ ورود البحث إلى جامعة دمشق :1200/5/23

P.15,1980.
4- J.Ready, “Material processing” ,Proc. Of the IEEE , Vol.70 No.6 , P.556,1982.
5- C.M. Banas and Etal., “Macro processing”, proc. Of IEEE,Vol.70 No.6 p.556, 1982.
6- SPIE Conf.,”Appl. Of High Power Laser”, Vol 527, P.18, (1985).
7-G. Herziger,” Fundamentials of laser processing of Materials”, SPIE, Vol. 668, P.2 , 1989.
8- B.S.Yilbas ,”A study of Effecting parameters in the Drilling sheet Metals”, Journal
of Mechanical Working Technology, vol.13, P.303, 1986.
9- J. Fieret and etal, “Aerodynamic interactions during laser cutting, SPIE Conf. Vol. 668, P.53, 1986.
10- Journal of soviet laser research (USA) , Vol.3, No.3 ,P.194, May, 1987.