

تأثير الغازات المساعدة على عملية قطع مادة الفورميكا و مادة ورق التتعيم باستخدام ليزر ثنائي الوصلة ذا قدرة منخفضة (1.6W)

وليد خلف حمودي¹، عبدالمجيد عيادة ابراهيم²، اكرم عبدالله خلف²

¹ فرع الليزر، قسم العلوم التطبيقية، الجامعة التكنولوجية، بغداد، العراق

² قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة تكريت، تكريت، العراق

الملخص

تم استخدام ثنائي وصلة ليزر ذا قدرة منخفضة (1.6W) وبطول موجي (808nm) لأنتاج عمليات القطع لمادتي ورق التتعيم والفورميكا. تم بؤثرة شعاع الليزر باستخدام عدسة لامة وتجميعه في نقطة متناهية الصغر على اسطح نماذج المواد المستخدمة وجرت مقارنة نتائج عملية القطع من خلال دراسة تأثير ضخ غاز فعال وغاز حامل على نوعية القطع الناتج. اظهرت النتائج المستحصلة امكانية الحصول على نوعية قطع جيدة عند الاختيار الدقيق لمعلمات و ظروف عملية القطع. تأثرت نوعية القطع باختلاف نوع الغاز المستخدم فكان ورق التتعيم ذا السمك (0.36mm) هو المادة الامثل لتوضيح تأثر المادة بنوعية الغاز حيث كان عمق الاختراق في الهواء الاعتيادي وغازي (O₂) و (CO₂) هو (0.13, 0.36, 0.16) mm على التوالي وكان عرض القطع عند استخدام الغازات الثلاثة اعلاه هو (0.23, 0.33, 0.26)mm على التوالي ايضا. لقد ساعد استخدام غاز الاوكسجين في احداث اختراقاً كاملاً للمادة صاحبه تشوه حافتي القطع في حين حافظ غاز ثنائي غاز ثنائي اوكسيد الكربون على صغر كمية المادة المزالة لكن على حساب عمق الاختراق داخل المادة.

المقدمة

وفي عام 2009 قام عدي حمادي وزملائه بقطع البلاستيك المدعم بالالياف باستخدام ليزر ثنائي اوكسيد الكربون المستمر باستخدام قدرات ليزرية متوسطة [7]. في عام 2010 وجد الباحث (Abass) عند دراسته تأثير وتركيز شعاع الليزر في عملية القطع اعتماد عمق الاختراق (Penetration Depth) على سرعة القطع (cutting rate)، كذلك وجد ان اختيار البعد البؤري للعدسة يجب ان يكون مناسباً مع المسافة بين العدسة و سطح المادة المراد قطعها [8]. في عام 2012 قام الباحث (Taher) وزملاؤه بدراسة القطع لبعض المواد غير المعدنية باستخدام حزمة ليزر (Nd:YAG) وبناءً على التوقعات النظرية و النتائج العملية فقد استنتجوا إمكانية قطع المواد غير المعدنية بوساطة ليزر ذو قدرة واطئة، ولاحظوا بأن لكل مادة عمق اختراق لا يزداد خطياً مع زيادة القدرة الداخلة وللحصول على عمق اختراق اكبر تحتاج العملية الى قدرة ليزرية اكبر [9]. عندما يؤثر شعاع الليزر في مادة ما بهدف اجراء عملية القطع يمكننا ان نميز ثلاث مجموعات من المعاملات التي تحدد شروط التأثير المتبادل بين المادة والاشعاع والنتيجة النهائية لمعاملة المادة [10]:

A - مجموعة المعاملات التي تحدد كلاً من العناصر البصرية والطايقية والزمنية لشعاع الليزر مثل الطول الموجي والاستقطاب والقدرة والتردد.

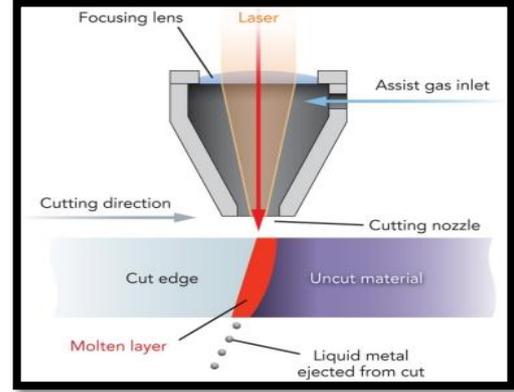
B - مجموعة المعاملات التي تميز الشروط التقنية في اجراء العملية مثل سرعة تحرك النموذج وقطر الحزمة المبؤرة و نوع الغاز المستخدم وسرعة تدفقه وشكل وقطر نفثات الغاز والمسافة الفاصلة بين النفثات والنموذج.

يعود توظيف شعاع الليزر في التطبيقات الصناعية الى بعض الخصائص الفريدة لهذه الاشعة التي اصبح بالإمكان الحصول من خلالها على انجاز رائع للعمليات الصناعية المختلفة خصوصاً القطع والتي توفر العديد من المزايا مثل سرعة انجاز العملية وصغر المنطقة المتأثرة حرارياً وسهولة قطع الاشكال المعقدة للعديد من المواد اضافة الى قلة الخسائر وعدم تآكل اداة القطع كونها تمثل بؤرة الشعاع الليزري [1,2]. بشكل عام تعتبر المواد غير المعدنية موصلات ضعيفة للحرارة وذات معامل انتشار حراري قليل [3]. لا يمكن الحصول على منصهر المواد اللا معدنية بسهولة وقسم منها لا يحتوي على طور الانصهار في تركيبها الفيزيائي مثل بعض أنواع المواد السيراميكية و المواد المركبة حيث يمكن ان تُقطع بميكانيكية التبخير بالليزر التي تتميز بكثافة قدرة عالية جداً تمتد بين- 10^6 (10^{12}W/mm^2) حسب نوع المادة وسمكها وسرعة القطع المطلوبة [4,5].

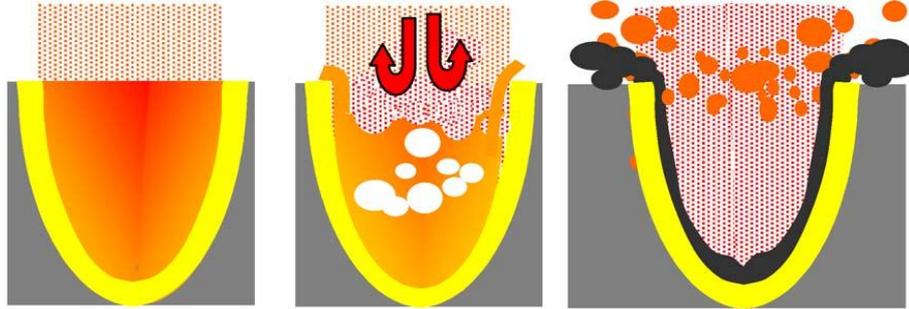
قادت الدراسات التي تناولت عملية القطع بالليزر خلال العقود التي تلت اكتشاف ليزر الياقوت في عام 1960 الى ازدياد استخدامه كمصدر حراري مهم في التطبيقات الصناعية المتنوعة و قد وجد ثيودور مايمان ان لشعاع ليزر الياقوت النبضي قدرة على تبخير وصهر كمية قليلة من المادة. في عام 1980 نجح (Olsen) بتوظيف حزمة الليزر المستقطبة في قطع المواد ذات الانعكاسية العالية وبنوعية قطع وسرعة جيدة [6]. في عام 2004 قام الباحثان (Zhou & Madavian) بدراسة عملية ونظرية لقطع المواد غير المعدنية بواسطة ليزر (CO₂) ذو الطاقة الواطئة وقد توصلوا الى انه يمكن ان يستخدم لقطع مختلف المواد غير المعدنية، واستنتج بأنه لأجل زيادة عمق القطع لا بد من زيادة في مقدار القدرة الليزرية المستخدمة [3]

تزداد كمية المادة المزالة من النموذج مع حركة الليزر نسبة الى المادة وبذلك سوف يتكون القطع (Kerf) [12]. يتسم شعاع الليزر بخصائص مهمة نتيجة تأثيره عند سقوطه على المادة حيث تسبب تلك التأثيرات تحولات طورية في المادة، و في احيان اخرى قد يحدث تسخين للمادة دون حدوث اي تحول طوري لها. عند سقوط اشعة الليزر على سطح المادة تتوزع شدتها بعدة اتجاهات [13]، ويتحدد تفاعل اشعة الليزر مع اي مادة من خلال ظاهرتي الانعكاس و الامتصاص بالإضافة الى النفاذية إذ تعاني اشعة الليزر عند سقوطها على اي مادة من انعكاس جزء منها اي خسارته من سطح تلك المادة اما الجزء الآخر فيمتص من قبل ذرات المادة. هنالك ايضا خسارة اخرى في الطاقة الممتصة بسبب التوصيل الحراري الذي تمتلكه المادة واستطارة شعاع الليزر الساقط من قبل ذرات المادة المتطايرة اثناء عملية القطع [14].

C - مجموعة المعاملات التي تتعلق بالخواص الفيزيائية للمادة مثل الانتشارية الحرارية و السعة الحرارية ودرجة حرارة الانصهار و درجة حرارة التبخر و التحولات الطورية والكثافة و الانعكاسية والامتصاصية. وتبعاً لقيم هذه المعاملات فأن عملية القطع بالليزر تهدف الى تبخير المادة بسرعة عالية واحداث تأثير حراري في اضييق حيز ممكن لضمان اقل تشويه في العينة وان اغلب منظومات القطع بالليزر تستخدم احد الغازات ليساعد في عملية القطع. يبين الشكل (1) آلية القطع بالليزر [11].



شكل (1): ميكانيكية القطع بالليزر [11]



الشكل (2): العمليات الفيزيائية للمادة خلال عملية القطع بالليزر [15]

مع شعاع الليزر وقطعة العمل [16,17]. يلعب جريان الغاز المستخدم في انجاز عملية القطع بالليزر دوراً مهماً في تسهيل اخراج المادة المزالة من النموذج [16]، لكنه يتسبب في احداث [Striations] اخاديد على حافتي القطع بسبب عدم التوافق بين سرعة نفث الغاز وسرعة حركة منضدة القطع [18].

ان الهدف من البحث هو دراسة تأثير ثنائي وصلة الليزر ذو القدرة (1.6W) على قطع مادتي الفورميكا و مادة ورق التتعيم باختلاف تأثير نوع الغاز المساعد في عملية القطع.

الجانب العملي

في بحثنا هذا تم استخدام ثنائي وصلة ليزر (laser diode) بطول موجي (808nm) وبقدرة (1.6W) تعد ضمن الحدود الدنيا لتلك المستخدمة في عمليات القطع. يوضح الشكل (3) منظومة القطع التي تم تصنيعها.

يوضح الشكل (2) المراحل الرئيسية لقطع المواد بالليزر. يمثل الشكل الايسر تسخين المادة عند بداية سقوط الاشعة وفي الشكل الاوسط انصهارها نتيجة امتصاصها لطاقة الشعاع وفي الشكل الايمن تكون الشق داخل المادة نتيجة لأزالة جزء من المادة على شكل بخار وجسيمات مقذوفة.

عند قطع المواد باستخدام غاز فعال مثل الاوكسجين فأن احد اهم ميزات الغاز هي اضافة طاقة حرارية الى عملية القطع و بالتالي زيادة سرعة القطع. يلعب الغاز الفعال المستخدم في عملية القطع دوراً اساسياً في تفاعله مع المادة المنصهرة تفاعل اكزوثيرمي (Exothermic Reaction) ينتج عنه اضافة طاقة حرارية و كذلك في اخراج المادة المنصهرة من الشق [16]. ان المبدأ الأساسي من استخدام الغازات الخاملة كالنيتروجين و ثنائي اوكسيد الكربون هو تعجيل طرد المادة المنصهرة المتكونة داخل الشق والحصول على قطع دقيق و نظيف بدون اكسدة و ذلك لأن هذه الغازات لا تتفاعل



شكل (3): منظومة القطع بالليزر

بوئرة شعاع الليزر ضمن مساحة صغيرة جداً و زيادة كثافة القدرة الساقطة لشعاع الليزر تم استخدام عدسة لامة ذات بعد بؤري قصير مقداره (5cm) وتم حساب نصف قطر الحزمة في منطقة التيوبتر (s) بنطبق العلاقة الآتية:

$$S = f \Theta \dots\dots(2-2)$$

حيث ان (f) هو البعد البؤري للعدسة مقاساً ب (cm). لاحظ الجدول (1). تم حساب كثافة القدرة (الشدة Intensity) مقاسة بوحدات (Watt/cm²) من العلاقة :

$$I = P / A \dots\dots(2-3)$$

حيث ان (P) هي قدرة الليزر و (A) هي مساحة بقعة الليزر عند نقطة التيوبتر.

جدول (1): قياسات معلمات حزمة الليزر لثنائي وصلة الليزر المستخدم

القدرة (Watt)	الطول الموجي (nm)	انفراجية الحزمة (rad)	مساحة بقعة التيوبتر (cm ²)	كثافة القدرة (KW/cm ²)
1.6	808	1.2 x 10 ⁻³	113.04 x 10 ⁻⁶	14.154

تم اجراء اختبارات عملية القطع على نوعين من مواد غير معدنية هي ورق التتعيم ذو سمك (0.35mm) والفورميكا ذات سمك (2mm) وقد تم اعداد العينات لاجراء الاختبارات عليها بابعاد (10cm x 2cm). يوضح الجدول (2) بعض الخواص الحرارية لهذه المواد.

جدول (2): الخواص الحرارية لمادتي كاربيد السليكون والفورميكا

ت	المادة	التوصيلية الحرارية (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	السعة الحرارية النوعية (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	الانتشارية الحرارية (m ² .sec ⁻¹)
1	كربيد السيليكون	12	750	0.39 x 10 ⁻⁶
2	فورميكا	0.25	1300	0.1 x 10 ⁻⁶

تم استخدام مجهر ضوئي نوع (Super Eyes B003) عند قوة تكبير (30X) مصنع من قبل شركة (Shenzen-Toomly Electronic Technology) الصينية.

تتكون هذه المنظومة من اربعة اجزاء رئيسية هي الجزء الميكانيكي والذي يتمثل بمنظومة الحركة التي تتحرك في بعد واحد (X – axis) ذهاباً واياباً بواسطة محرك يعمل على التيار المستمر (DC Motor) بسرعة (1-4.2cm/min). كذلك هناك ايضا المصدر الضوئي وهو ثنائي وصلة الليزر المستخدم والموضح بالشكل (3). أما الجزء البصري فيتمثل في وحدة تجمع شعاع الليزر وهو عبارة عن عدسة لامة ذات بعد بؤري مقداره (5cm) مثبتة في حامل على جانب المنضدة المتحركة بهدف زيادة شدة الشعاع (power density or intensity) من خلال جعل مساحة البقعة الليزرية أصغر ما يمكن. وأخيرا الجزء الالكتروني الذي يضم الدائرة الالكترونية التي تعمل على تحويل شعاع الليزر المستمر الى نبضات بترددات مختلفة و هي عبارة عن دائرة مذبذب ودائرة مجهز قدرة (Power Supply) مستمر (5V.DC). يضم الجزء الالكتروني ايضا الدائرة الالكترونية التي تعمل على سيطرة حركة المنضدة المتحركة من حيث الاتجاه والسرعة والتي تم تصنيعها لهذا الغرض. تم توظيف غازين مساعدين: الاول هو غاز الاوكسجين الفعال (O₂) والثاني هو غاز ثنائي اوكسيد الكربون (CO₂) الخامل. يعد نفث الغاز (Gas Nozzle) جزءاً مهماً في المساعدة على التخلص من المواد المتبخرة أو المتطايرة من سطح المادة لضمان عدم توهين الشعاع الليزري بها وكذلك يعمل على توجيه وتسريع نفث الغاز. تم نفث الغاز باتجاه غير محوري (Off Axial Gas Nozzle) بزواية 70° تقريباً مع العمود على العينة بعكس اتجاه حركة العينة. تم قياس انفراجية حزمة الليزر عملياً من حساب قطر بقعة الليزر عند موضعين مختلفين (X₁ X₂) يمثل كل منهما المسافة بين المصدر الليزري والموضع الذي سقطت عليه حزمة الليزر فإذا كانت المسافة بين الموضعين هي (L) وقطرالبقعة عند الموضع الاول (D₁) وعند الموضع الثاني (D₂)ستكون الانفراجية:

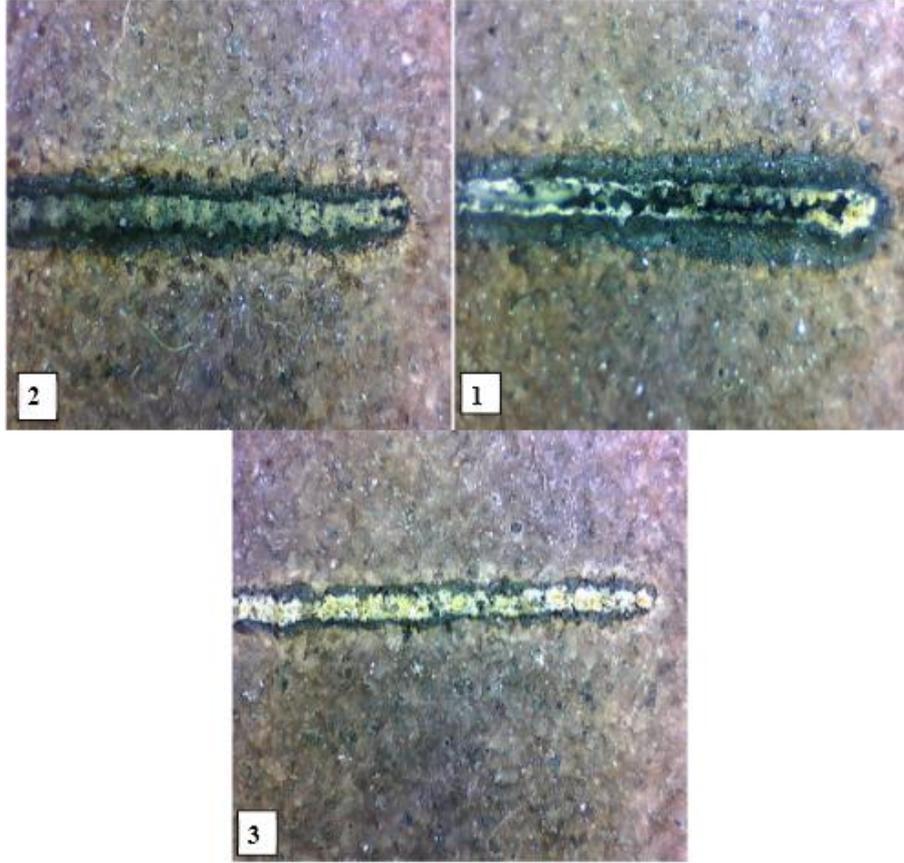
$$\Theta = (D_2 - D_1) / 2 L \dots\dots(2-1)$$

نقاس الانفراجية بوحدات (rad). يوضح الجدول (1) القيمة العملية لقياس الانفراجية لثنائي وصلة الليزر المستخدم في هذا البحث. لأجل

النتائج والمناقشة

ثبوت السمك وثبوت سرعة القطع عند (4cm/min) وبمعدل جريان للغاز (1.2L/min). يبين الشكل تفوق غاز الاوكسجين في اتمام عملية قطع نافذ لكن بنوعية قطع رديئة وتفوق غاز ثنائي أوكسيد الكربون في الحصول على نوعية قطع جيدة لكن غير نافذ.

تم توظيف نفث غاز غير محوري ينفث الغاز بعكس اتجاه حركة العينة لأجل ضمان خروج كفوء لمخلفات المادة المتطايرة وعدم تسببها في حجب شعاع الليزر عن المادة. يوضح الشكل (4) تأثير نوع الغاز المستخدم في عملية القطع لمادة ورق التتعيم ذو السطح الخشن عند



الشكل(4): القطع بالليزر لمادة ورق تنعيم 1-قطع نافذ باستخدام غاز(O₂)، 2-قطع غير نافذ (بدون غاز) 3-قطع غير نافذ باستخدام غاز(CO₂) . قوة التكبير (30X)

القطع من حيث العرض والعمق والمساحة وكذلك في زيادة حجم المنطقة المتأثرة حرارياً.

• حدوث تشوه في حافات منطقة القطع بسبب ارتفاع درجة حرارة المنطقة وكذلك ظهور الاخاديد اسفل حافة القطع بسبب عدم انتظام عملية الاحتراق الداخلي. تظهر هذه التشوهات اذا لم يكن هناك توافقاً صائباً بين سرعة جريان الغاز وسرعة القطع لقيمة معينة من قدرة شعاع الليزر المستخدم.

- عند استخدام غاز ثنائي اوكسيد الكربون

• ينتج نقصان في مساحة منطقة القطع بسبب قيام الغاز بطرد جزيئات الهواء التي تحوي الاوكسجين أي نقصان في مقدار الطاقة الحرارية المضافة الى طاقة الشعاع و بالتالي نقصان في كمية الطاقة الممتصة.

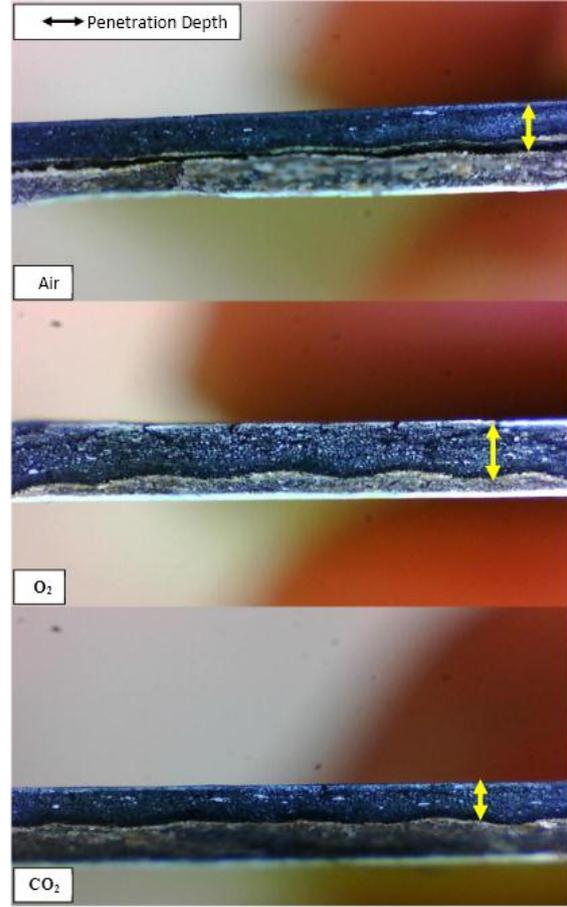
• يساهم الغاز في تقليل التشوه الحاصل في حافات القطع الناتجة من ارتفاع درجة الحرارة للمنطقة كونه غازاً غير فعالاً لا يتفاعل مع طاقة الشعاع الليزري ويقوم هذا الغاز بتبريد سطح منطقة القطع فينتج عن ذلك تحسناً نوعياً في شكل القطع. تظهر الاخاديد على حافة منطقة القطع لكن بتموج اقل عما هي في حالة استخدام غاز الاوكسجين أو الهواء الاعتيادي ولنفس السبب الموضح في اعلاه.

عليه وفي مثل هذه الظروف يفضل عدم استخدام الغاز مالم يكن هناك دراية مسبقة بطبيعة تأثيره و بما ينسجم مع النتيجة المطلوبة و المواصفات الفنية التي ينبغي الحصول عليها للقطع المراد انجازه.

الاستنتاجات

توضح النتائج المستحصلة من البحث الحالي فعالية استخدام ثنائي وصلة الليزر ذو القدرة الواطئة (1.6W) في قطع مادتي ورق التتعيم والفورميكا من خلال التحكم في قدرة الشعاع و سرعة القطع واختيار الغاز المساعد المناسب. تختلف استجابة المواد غير المعدنية لشعاع الليزر بسبب الاختلاف في خواصها التركيبية و الحرارية. لقد كان لاستخدام الغازات المساعدة في عمليات القطع تأثيراً واضحاً في النتائج المستحصلة إذ أدى استخدام غاز الاوكسجين الى توليد طاقة حرارية اضافية بعد احتراقه بطاقة الشعاع المستخدم نتج عنه زيادة في ابعاد القطع الناتج من حيث العرض والعمق ولكنه سبب تشوهاً في شكل القطع بسبب الطاقة الحرارية المفرطة. من ناحية أخرى فقد نتج عن استخدام غاز ثنائي اوكسيد الكربون الخامل قطع أكثر انتظاماً من حالة استخدام غاز الاوكسجين أو من استخدام الهواء الاعتيادي لكن بعمق أقل.

كما يوضح الشكل (5) الصور الجانبية للقطع لمادة الفورميكا باستخدام الغازات وتأثيرها على جوانب منطقة القطع عند سرعة (1.2 cm/min) وبمعدل جريان للغاز (1.2 L/min).



الشكل (5): تأثير نوع غاز النفث على نوعية حافة منطقة القطع قوة التكبير (30X)

إن استخدام غاز الاوكسجين يتسبب في تكوين تشققات عند حافة القطع ويعزى هذا الى كمية الطاقة الحرارية الكبيرة التي ساهم هذا الغاز في توليدها على عكس سلوك غاز ثنائي اوكسيد الكربون، كذلك نلاحظ تموج السطح الداخلي لحافات منطقة القطع بسبب الاحتراق الداخلي غير المنتظم والناتج من عدم التوافق بين حركة العينة وجريان الغاز. ان نوع غاز النفث تأثير دقيق على نوعية القطع بحيث:

- عند استخدام غاز الاوكسجين

• تنتج زيادة كبيرة نسبياً في مساحة منطقة القطع و ذلك لان غاز الاوكسجين يساعد على الاشتعال ويساهم في زيادة الاجهاد الحراري المتولد ينتج عند استخدامه تفاعل اكزوثيرمي يساهم في زيادة ابعاد

المصادر

1- Ready J. F., "Industrial Applications of Lasers", Academic Press, Inc, United Kingdom, 1978.
2- Bieas R., et al., "Artificial Neural Network Modeling of ND:YAG Laser Microdrilling on Titanium Nitride-Alumina Composite", Proceedings

of the Institute of Mechanical Engineers, part B, J. Eng. Manuf., 2010, pp. 473-482.
3 - Zhou H. B., Madavian S. M., "Experimental and Theoretical Analyses of Cutting Non Metallic Materials by Lower CO₂ Laser", Journal of Materials Processing Technology, No.146, 2004, pp. 188-192.

- 4- Ion J. C., "Laser Processing of Engineering Materials", Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2005.
- 5- رؤوف، اسماء محمد، "استخدام ليزر CO₂ في قطع المواد اللامعدنية"، مجلة كلية التربية، الجامعة المستنصرية، المجلد الثاني، العدد الاول، 2012.
- 6- Olsen F. O., "Cutting with Polarized Laser Beam", DVS 63, 1980, pp. 197-201.
- 7- حمادي، عدي عطا، سيمون، جيهان ادمون، "قطع البلاستيك المدعم بالالياف باستخدام ليزر ثنائي اوكسيد الكربون المستمر"، المجلة العراقية للفيزياء، 2009.
- 8- Abass A. K., "Calculating the Focusing Effect of Laser Beam on The Penetrating and Cutting Speed", Eng. And Tech. Journal, No.3, Iraq, 2010.
- 9 – Taher B. A., Ahmed R., "Cutting of Nonmetallic Materials Using ND:YAG Laser Beam", Chinese Physical Society, 2012 .
- 10- حمودي، وليد خلف، الخطيب، خالد عبد الحميد، "ضوئيات الكم والليزر"، الجامعة التكنولوجية، مطبعة التعليم العالي، 1989.
- 11- Emmelman C., "Introduction to Industrial Laser Materials Processing", Rofin-Sinar, Hamburg, Germany, 2000.
- 12- Huber J., Marx W., "Production Laser Cutting", German Aerospace Corporation, Bethpage, New York, 1980, pp. 273-296.
- 13- رجب، مصطفى احمد، "دقة الابعاد و طبيعة الاسطح المنقبة بالتفريغ الكهربائي وشعاع الليزر"، مجلة جامعة دمشق، المجلد التاسع عشر، العدد الاول، 2003.
- 14- Hwang D. J., Choi T. Y., Grigoro C. P., "Liquid-Assisted "Femtosecond Laser Drilling of Srtight and Three-Dimensional Micro Channels in Glass", Appl. Phys., No.79, 2004, pp. 605-612.
- 15- Fishburn et al., "Study of The Fluence Dependent Interplay between Laser Induced Material Removal Mechanisms in Metals: Vaporization, melt, Displacement and Melt Ejection", Applied Surface Science, No.262, 2006, pp. 5128-5188.
- 16 – Wandera C., "Performance Of High Power Fibre Laser Cutting Of Thick-Section Steel And Medium Section Aluminium", Thesis of Doctor Degree, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2010.
- 17- Hehn J., "Cutting with Oxygen, Nitrogen and Shop Air", Article Cnadian Industrial Machinery, 2011.
- 18- Al-Mashikhi S. O., Powel J., "An Experimental of Striation Free Cutting of Mild Steel by Fiber Laser", Proceeding of Fifth International WLT, Munich, 2009.

Assisting gas effect on cutting process of Formica and Emery paper using low power (1.6 Watt) laser diode

Walid K. Hamoudi¹, Abdul-Majeed E. Ibrahim², Akram A. Khalaf²

¹ Physics Branch , Applied Sciences Department-Laser, University of Technology, Baghdad , Iraq

² Physics Department , College of Education for Pure Sciences , University of Tikrit , Tikrit , Iraq

Abstract

1.6 W diode laser operating at 808nm was used to cut Formica and Emery paper. The laser light was concentrated on the samples' surfaces by using a positive lens. Comparison was made between the results of cutting quality obtained when using active and non-active assisting gasses. The results obtained revealed the possibility of obtaining optimum cuts when selecting carefully the cutting parameters and environment. 0.36 mm Emery paper was the best example for showing the effect of processing gas on cutting quality. The penetration depths for this material when employing ordinary air, O₂ and CO₂ were: 0.13, 0.36 and 0.16 mm with cutting kerfs of 0.23, 0.33 and 0.26 mm respectively. The use of O₂ helped achieving a full penetration cutting of this material but with deformed cutting edges whereas the use of CO₂ gas helped maintaining minimum material removal but on the expenses of the cutting depth.