مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 253-259

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه ناحیه متأثر از حرارت در برش لیزری ورق نازک تیتانیوم خالص به وسیله لیزر پیوسته دی‌اکسیدکربن

محمد صادق‌امجدی[1]، احسان فروزمهر[2*]، محسن بدرسمای[3]

1- کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، eforoozmehr@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 02 اسفند 1395
پذیرش: 19 فروردین 1396
ارائه در سایت: 16 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:
برش لیزری
تیتانیوم
ناحیه متأثر از حرارت
دی‌اکسیدکربن
تاگوچی

چکیده

از روش‌های نوین برش ورق‌های فلزی، برش توسط لیزر است. در این روش میزان ناحیه متأثر از حرارت و در نتیجه تغییر ساختار ماده پایه و نیز اعوجاج نسبت به سایر روش‌های حرارتی بسیار کم بوده و کیفیت برش خوبی ارائه می‌دهد. کنترل ناحیه متأثر از حرارت هنگام برش لیزری ورق تیتانیوم به دلیل هدایت حرارتی پایین و تمایل بالا به واکنش شیمیایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله به کمک آرایه متعامد L16 تاگوچی اثرات تعدادی از مهم‌ترین پارامترها بر عرض این ناحیه هنگام برش ورق نازک تیتانیوم خالص تجاری به کمک لیزر پیوسته دی‌اکسیدکربن مورد ارزیابی قرار گرفت. این پارامترها شامل ترکیب گاز خنثی کمکی، فاصله نازل برش از ورق، سرعت برش و توان لیزر است. متالوگرافی نمونه‌ها، تأثیرات هر یک از پارامترها و شرایط بهینه بررسی شد. با استفاده از نتایج پیشنهاد شده است در برش ورق نازک تیتانیوم سرعت تا حد ممکن بالا انتخاب شود و انرژی جداسازی لازم از طریق تغییرات در توان لیزر تأمین شود. استفاده از گاز کمکی هلیوم به جای آرگون نیز تأثیر قابل توجهی بر کاهش عرض ناحیه متأثر از حرارت نشان داد. در پایان تغییرات ریزساختار و سختی ارائه شده است.

Study of heat-affected zone (HAZ) caused by cutting of Thin Ti-CP Sheet via CW CO_2 Laser

Mohammad Sadegh Amjadi, Ehsan Foroozmehr*, Mohsen Badrossamay

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
* P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran, eforoozmehr@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 February 2017
Accepted 08 April 2017
Available Online 06 May 2017

Keywords:
Laser cutting
Titanium
HAZ
CO_2
Taguchi

ABSTRACT

Laser cutting is one of the modern methods for cutting. In this method heat affected zone width and microstructure change as a result, also sheet deformation is very low in comparison to other thermal methods and a fine cut is the result. The control of heat-affected zone (HAZ) during laser cutting of titanium sheets due to low thermal conductivity and high tendency to chemical reaction is of great importance. In this paper, the effect of some of the most important laser cutting parameters, including the type of assistant inert gas, stand-off distance, cutting speed and power on HAZ width was assessed in CW CO_2 laser cutting of Ti-CP sheets, using Taguchi L16 orthogonal array. Metallography of the cut samples, effects of cutting parameters and optimal conditions of cutting were investigated. Taking into consideration the test results, it is suggested that the highest possible cutting speed for thin Ti-CP sheets be selected and the required severance energy be provided by controlling the laser power. The use of helium instead of argon also showed a significant impact on the reduction of HAZ width. Finally, microstructure and hardness changes are presented.

1- مقدمه

تیتانیوم و آلیاژهای آن با داشتن خواصی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی و زیست سازگاری با بدن انسان، کاربردهای وسیعی در صنایع هوافضا، پزشکی، شیمیایی، ورزشی و خودروسازی به‌خود اختصاص داده است [1]. تیتانیوم خالص تجاری[1] (Ti-CP) و آلیاژ معروف آن Ti-6Al-4V بیشترین کاربرد را در میان آلیاژهای تیتانیوم دارند تا جایی که بیش از 60% قطعات تولیدی حاوی تیتانیوم از این دو جنس است [2]. در کاربردهایی که نیاز به استحکام بالا نباشد و عمدتاً مقاومت به‌خوردگی مطرح باشد، تیتانیوم آلیاژ نشده خالص بیشترین کاربرد را دارد. از جمله مزایای آن می‌توان به قابلیت جوشکاری خوب و مقاومت به خوردگی عالی اشاره کرد که سبب کاربرد آن در ساخت مبدل‌های حرارتی، لوله‌ها و اتصالات انتقال‌دهنده مواد شیمیایی خورنده شده است.

از رایج‌ترین فرایندهای اولیه اعمالی بر ورق تیتانیوم فرایند برش لیزری

[1] Commercially Pure Titanium

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. S. Amjadi, E. Foroozmehr, M. Badrossamay, Study of heat-affected zone (HAZ) caused by cutting of Thin Ti-CP Sheet via CW CO_2 Laser, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 253-259, 2017 (in Persian)

است. در این روش با متمرکزشدن پرتوی لیزر در یک ناحیه بسیار باریک از گرم شدن اضافی دیگر مناطق قطعه جلوگیری شده و در نتیجه ناحیه متأثر از حرارت را بسیار کوچک می‌کند. در دیگر روش‌های برشکاری حرارتی (پلاسما، شعله) منطقه وسیعی از قطعه تحت تأثیر انرژی حرارتی قرار گرفته و در نتیجه مقادیر بیشتری از قطعه در هنگام برشکاری به عنوان شیار از بین می‌رود و پهنای ناحیه متأثر از حرارت بیشتر است. در نتیجه استفاده از برش لیزری در صنعت روبه افزایش است [3].

پارامترهای کنترلی بسیاری در فرایند لیزر برشکاری مانند نوع لیزر، جنس و ضخامت ورق، مد لیزر (پالسی یا پیوسته)، سرعت برش، توان، نوع و فشار گاز کمکی، مسیر برش و... دخیل است. در تحقیقات برای بررسی نتایج برش برخی از معیارهای کیفیت[1] مانند ویژگی‌های شکاف برش[2]، اندازه ناحیه متأثر از حرارت و شکل‌گیری پسماند مذاب[3] ارزیابی می‌شود. با توجه به فراوانی تعداد پارامترهای دخیل در برش لیزری و تنوع معیارهای کیفیت، تحقیقات در این زمینه همچنان نیز ادامه دارد.

بهینه‌سازی فرایند برش سوپرآلیاژ نیکل به وسیله لیزر پالسی Nd:YAG جهت کنترل عرض شکاف برش، انحراف برش و عمودی‌بودن شکاف توسط دوبی و یاوادا انجام شد [4]. آن‌ها فشار گاز، عرض پالس، فرکانس پالس و سرعت برش را به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفتند. در مطالعه‌ای دیگر، برش ورق 1.5 میلی‌متری فولاد زنگ‌نزن 304 به وسیله لیزر CO_2 در دو حالت عمودی و مورب جهت بررسی کیفیت برش و تأثیر توان بر ارتفاع پسماند و ناصافی بررسی شد [5]. شرما و همکاران پهنای شکاف برش و عمودی بودن و انحراف آن را در برش ورق نازک سوپرآلیاژ نیکل به وسیله لیزر پالسی Nd:YAG بهینه سازی کردند [6]. آن‌ها فشار اکسیژن، عرض پالس، فرکانس پالس و سرعت برش را به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفتند. حداقل‌کردن هم‌زمان پهنا و انحراف شکاف در برش ورق یک میلی‌متری دورالومین به وسیله لیزر پالسی Nd:YAG توسط پاندی و دوبی بررسی شد [7]. ایشان فشار گاز کمکی، عرض پالس، فرکانس و سرعت برش را به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب کردند. مدل‌سازی و بهینه‌سازی انحراف شکاف و عمودی‌بودن شکاف هنگام برش لیزری ورق نازک آلیاژ آلومینیوم در مرجع [8] ارائه شده است. پارامترهای ورودی شامل شعاع کمان مسیر، فشار اکسیژن، عرض پالس، فرکانس پالس و سرعت برش انتخاب شدند. در تحقیقی دیگر تلاش شد تا رفتار سرعت مؤثر برش، ابعاد شکاف و ناحیه متأثر از حرارت با تغییرات سرعت حرکت پرتو و توان پالس تعیین شود [9]. به تازگی مقاله‌ای برش کامپوزیت cBN-WC-10Co به وسیله لیزر پالسی Nd:YAG را مطالعه کرد [10]. تأثیر توان، سرعت برش و فشار گاز بر عرض HAZ، زبری سطح، تغییرات ریزساختار و خواص مکانیکی بررسی شد. در تحقیقی جدید مرادی و همکاران به بررسی تأثیر فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی بر کیفیت هندسی و صافی سطح شیار برش در برشکاری لیزری قطعات تزریقی پلی کربنات به وسیله لیزر دی‌اکسیدکربن پرداختند [11].

با وجود مطالعات بالا مطالعات اندکی برای برش لیزری ورق تیتانیوم و آلیاژهای آن مشاهده شد. به طور کلی انجام عملیات صنعتی بر ورق تیتانیوم به دلیل هدایت حرارتی پایین، مدول الاستیک پایین و نیز واکنش‌پذیری شیمیایی بالا با مشکلات جدی روبه‌رو است [12]. کنترل HAZ یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در برش ورق تیتانیوم است. ماده در HAZ به دلیل تأثیرات گرمایی مستعد عیوبی چون ترک و لایه‌لایه‌شدن است. این ناحیه که به دلیل اکسیداسیون از دیگر مناطق قطعه قابل تشخیص است، به موجب تغییرات در اندازه دانه‌ها و ریز ساختار آن از خواص مکانیکی متفاوت نسبت به دیگر مناطق قطعه برخوردار است. به این دلیل با کنترل پارامترهای دخیل در برشکاری همواره سعی می‌شود این منطقه کوچک‌تر شود [3]. به دلیل واکنش‌پذیری شیمیایی بالا این فلز در فرایندهای حرارتی به‌راحتی با گازهای هوا چون اکسیژن و نیتروژن واکنش می‌دهد و خواص ورق را تغییر می‌دهد. همچنین هدایت حرارتی پایین مانع از سرد شدن سریع ورق می‌شود. حبس گرما در ورق موجب ایجاد سوختگی و HAZ کنترل نشده می‌شود.

در یک تحقیق که توسط آلمیدا و همکارانش بر تیتانیوم خالص تجاری (Ti-CP) و آلیاژ Ti-6Al-4V انجام شد، تأثیر انرژی پالس و نرخ تداخل پالس بر پسماند و زبری بررسی شد [2]. نتایج نشان داد که افزایش نرخ تداخل پالس منجر به کاهش زبری و افزایش مقدار پسماند می‌شود، همچنین افزایش انرژی لیزر سبب زبری بیشتر می‌شود.

رفتار دینامیکی خروج مذاب در برش لیزری ورق یک میلی‌متری تیتانیوم در مرجع [13] مطالعه شده است. آن‌ها از لیزر پالسی CO_2 برای بررسی تأثیر نوع گاز، فرکانس پالس و دوره کاری پالس بر پسماند و عرض HAZ استفاده کردند. تغییرات حداکثر سرعت برش برای مد لیزر پالسی و پیوسته در برش لیزری تیتانیوم برای گازهای آرگون و هلیوم ارائه شد. آن‌ها نشان دادند که استفاده از اکسیژن حتی در فشار پایین منجر به سوختگی کنترل نشده و ایجاد پهنای شکاف بسیار بزرگ شد، در حالی که نیتروژن سطح برش زرد رنگی ایجاد کرد که نشان‌دهنده تشکیل تیتانیوم نیتراید است. گروه تحقیقاتی دیگر یک مطالعه آزمایشگاهی جهت توصیف HAZ ایجاد شده هنگام برش ورق 6.5 میلی‌متری آلیاژ Ti-6Al-4V انجام داد [14]. آن‌ها یک شبیه‌سازی برای پیش‌بینی عمق و عرض HAZ ایجاد کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که عمق و عرض HAZ با افزایش توان لیزر، افزایش و با افزایش قطر پرتو و سرعت حرکت پرتو کاهش یافت. شانجین و یانگ در برش ورق یک میلی‌متری آلیاژ تیتانیوم، TC1، از لیزر پالسی به منظور مطالعه تأثیر انرژی پالس، نرخ پالس، سرعت برش، نوع گاز و فشار گاز بر ضخامت HAZ، مورفولوژی سطح[4] و مقاومت‌خوردگی استفاده کردند [15]. همچنین نشان داده شد که انرژی پالس متوسط، نرخ پالس بالا، سرعت برش بالا و گاز آرگون در فشار بالا، به نازک شدن لایه HAZ کمک می‌کند. بهینه‌سازی هم‌زمان عمودی بودن لبه و زبری سطح در برش آلیاژ Ti-6Al-4V توسط پاندی و دوبی بررسی شد [16]. نتایج نشان داد که مقادیر پایین عرض پالس و فرکانس پالس، مقادیر بالای سرعت برش و حد وسط فشار گاز نیتروژن مناسب خواهد بود. تمرکز اصلی مقالات بالا بر استفاده از لیزر پالسی است و مطالعه‌ای در ارتباط با کنترل HAZ در برش تیتانیوم به وسیله لیزر پیوسته یافت نشد.

استین و مازومدر [17] نشان دادند که برای برش یک جنس معین به وسیله یک پرتوی معین در شرایط مختلف، عبارت P/Vt باید ثابت باشد. این عبارت تحت عنوان انرژی جداسازی لازم بر واحد سطح یا به اختصار انرژی جداسازی[5] نامیده می‌شود و با E_s به صورت رابطه (1) نشان داده می‌شود.

$$E_s = \frac{P}{Vt} \tag{1}$$

در رابطه (1) P، V و t به ترتیب توان لیزر، سرعت برش و ضخامت ورق است.

پرسشی که مطرح می‌شود این است که هنگام برش ورق با ضخامت

[1] Quality Criteria
[2] Kerf Characteristics
[3] Dross Formation
[4] Surface Morphology
[5] Severance Energy

معین، به منظور تأمین انرژی جداسازی لازم، انتخاب توان و سرعت برش براساس چه ایده‌ای باید انجام شود. به منظور تأمین انرژی جداسازی معین، توان بیشتر و سرعت بیشتر کیفیت بهتری ارائه می‌دهد و یا توان کمتر و سرعت کمتر و یا شرایط میانی. در ایـن تحقیق این پرسش برای برش ورق نـازک Ti-CP با توجه به تغییرات HAZ پاسخ داده شد، همچنین مروری بر تحقیقات گذشته [16,14] نشان داد که هنگام برش تیتانیوم باید از استفاده از گازهای کمکی اکسیژن، نیتروژن و هوا اجتناب کرد و از گازهای کمکی خنثی هلیوم و آرگون استفاده شود. در این مقاله تأثیر این دو گاز خنثی بر HAZ جهت کسب شناخت بیشتر مقایسه شد.

در این مقاله تأثیر تعدادی از مهم‌ترین پارامترها بر HAZ هنگام برش ورق نازک 0.3 میلی‌متری Ti-CP به وسیله لیزر پیوسته CO_2 مطالعه شد. پارامترهای کنترلی شامل ترکیب گاز کمکی، فاصله نازل برش از ورق، سرعت برش و توان لیزر است. برای هدفمندی بیشتر آزمایش‌ها از آرایه L16 تاگوچی استفاده شد. همچنین آنالیز واریانس بر مبنای میانگین داده‌ها به منظور تخمین کمی سهم نسبی هر پارامتر بر پاسخ اندازه‌گیری شده و مقایسه میزان اثرگذاری پارامترها استفاده شد. در پایان مطالعه‌ای تکمیلی در مورد ریزساختار و تغییرات سختی جهت شناخت بهتر اهمیت ناحیه متأثر از حرارت نیز انجام گرفت.

2- مواد و روش تحقیق

ورق مورد آزمایش از جنس تیتانیوم خالص انتخاب شد که درصد عناصر آلیاژی آن در جدول 1 آورده شده است. این جنس با عنوان تیتانیوم خالص تجاری (Ti-CP) شناخته می‌شود. ضخامت ورق 0.3 میلی‌متر است.

آزمایش به وسیله یک دستگاه لیزر پیوسته CO_2 با توان اسمی 2800 وات (Bystronic Bystar-Btl2800W) انجام شد. فاصله کانونی لیزر 190.5 میلی‌متر، قطر نازل 1.4 میلی‌متر و قطر پرتوی متمرکز شده 0.2 میلی‌متر بود. مسیر برش یک خط مستقیم به طول 100 میلی‌متر انتخاب شد که کلگی لیزر حرکت کرده و ورق ثابت بود. با توجه به نازک بودن ورق محل تمرکز پرتو بر سطح قطعه کار تنظیم شد. با توجه به امکان تغییر اتوماتیک محل استقرار عدسی نسبت به لبه نازل تغییر فاصله نازل برش از ورق موجب جابه‌جایی نقطه تمرکز تنظیم‌شده نسبت به سطح قطعه کار نمی‌شود، بلکه می‌تواند موجب تغییر جریان گاز کمکی شود. با توجه به تحقیقات گذشته [7,4] با افزایش فشار گاز به دلیل خروج بهتر مذاب و خنک‌کنندگی بیشتر کیفیت بهتری ایجاد خواهد شد. در این پژوهش تلاش شد تا با فشار گاز کمکی پایین (یک بار) بهترین کیفیت حاصل شود.

در این پژوهش تأثیر چهار پارامتر در چهار سطح مورد بررسی قرار گرفت تا رفتار ناحیه متأثر از حرارت در اثر آن‌ها مطالعه شود. برای بررسی تأثیر چهار پارامتر منتخب از آرایه L16 تاگوچی استفاده شد. تاگوچی با طراحی تعدادی آرایه متعامد به عنوان آرایه‌های استاندارد طراحی آزمایش را ساده کرده است. در آرایه متعامد هر ستون به تنهایی متعادل است و همچنین هر دو ستونی از آرایه نیز با هم در تعادل هستند [18] و این یعنی در هر ستون تعداد مساوی از همه سطوح وجود دارد و برای هر دو ستون تمام ترکیبات سطوح وجود دارد و تعداد تکرار آن‌ها یکسان است. انجام آزمایش در این روش بهینه بوده و از تعداد بالای آزمایش جلوگیری می‌کند. تحلیل داده‌های حاصل از این طراحی در مقایسه با روش‌های عادی طراحی آزمایش ساده‌تر است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص تجاری

Table 1 Chemical composition of commercially pure titanium

عنصر	O	N	H	Fe	C
درصد	0.150	0.020	0.007	0.180	0.080

تحقیق رآو و همکارانش [13] نشان‌دهنده لزوم استفاده از گازهای کمکی هلیوم یا آرگون در برش ورق‌های تیتانیوم است؛ بنابراین در این آزمایش تأثیر ترکیب گاز کمکی هلیوم و آرگون در چهار سطح مورد بررسی قرار گرفت. آرگون و هلیوم مورد استفاده به ترتیب گرید 5 و 6 انتخاب شد. فاصله نازل برش از ورق موجب تأثیر بر جریان گاز کمکی و در نتیجه موجب تغییر کیفیت برش می‌شود. این فاصله مطابق با عموم تحقیقات در زمینه برش لیزری [20,19] در محدوده 0.5-1.5 میلی‌متر انتخاب شد.

بالاترین توان ممکن در انتخاب سطح بالای توان از دستگاه گرفته شد (2500 وات) تا در صورت امکان به حداکثر میزان سرعت برش که بیانگر حداکثر نرخ تولید است دست یابیم. برای این‌که بتوان تغییرات گسترده‌ای از پارامتر را پوشش داد فاصله سطوح توان یکسان و برابر 500 وات در نظر گرفته و درنتیجه کمترین توان 1000 وات انتخاب شد.

برای تعیین سطوح سرعت از نتایج مطالعه رآو و همکاران [13] استفاده شد. ایشان از لیزر پیوسته CO_2 با توان 600 وات و گازهای کمکی آرگون و هلیوم برای برش ورق یک میلی‌متری استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده حداکثر سرعت در حدود 750 میلی‌متر بر دقیقه برای کیفیت قابل قبول برش بود. با توجه به این‌که نوع و مد پرتو لیزر و جنس ورق تحقیق حاضر با تحقیق اشاره شده کاملا یکسان است، انتظار می‌رود انرژی جداسازی لازم (P/Vt) نیز برابر باشد [17]. سطح پایین توان در آزمایش‌های حاضر (1000 وات) محدودکننده است. در برابر قراردادن عبارت P/Vt باید از توان 1000 وات و ضخامت 0.3 میلی‌متر برای این تحقیق و توان 600 وات، ضخامت یک میلی‌متر و سرعت 750 میلی‌متر بر دقیقه برای تحقیق اشاره شده استفاده شود. سرعت حداکثر 4166.6 میلی‌متر بر دقیقه به‌دست می‌آید؛ بنابراین حداکثر سرعت 4000 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد.

سطوح پارامترهای منتخب در جدول 2 ارائه شده است. نمونه‌ها پس از سنباده‌زنی و پولیش با استفاده از محلول اسیدی حاوی 2% اسید فلوریدریک و 2% اسید نیتریک به مدت 60 ثانیه اچ شدند. با استفاده از میکروسکوپ مجهز به سیستم حرکتی دارای ورنیه، میانگین مقادیر عرض ناحیه متأثر از حرارت در 10 مقطع و در هر مقطع از دو طرف خط برش (مجموع 20 عدد برای هر آزمایش) به‌دست آمد.

به منظور شناخت بهتر روند تغییرات ناحیه متأثر از حرارت از فلز پایه تا شکاف برش و نیز برای بررسی ارتباط ناحیه متأثر از حرارت با تغییرات سختی به عنوان نمونه روند تغییرات سختی در مورد یکی از آزمایش‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. اندازه‌گیری سختی در ناحیه متأثر از حرارت از فلز پایه تا لبه برش در سه مقطع به وسیله دستگاه ریزسختی‌سنج بوهلر با نیروی اعمالی 100 گرم در مدت زمان 15 ثانیه انجام شد. با توجه به کم بودن پهنای ناحیه متأثر از حرارت و لزوم رعایت حداقل فاصله مناسب در محل‌های اندازه‌گیری،

جدول 2 پارامترهای منتخب و مقادیر سطوح آن‌ها

Table 2 Selected parameters and their levels

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
سرعت (mm/min)	1000	2000	3000	4000
توان (W)	1000	1500	2000	2500
فاصله نازل (mm)	0.6	0.9	1.2	1.5
گاز (%)	100Ar	65Ar-35He	35Ar-65He	100He

آزمون سختی‌سنجی به صورت مورب نسبت به لبه برش انجام شد. برای حرکت از یک نقطه اندازه‌گیری سختی تا نقطه بعدی، 25 میکرومتر در راستای عمود بر خط برش و 25 میکرومتر موازی آن جابه‌جایی انجام شد و بنابراین فاصله هر دو نقطه اثر برابر با قطر مربعی با اضلاع 25 میکرومتر است.

3- نتایج و بحث

در جدول 3 طراحی آزمایش به همراه نتایج خروجی آورده شده است. شکل 1 که با بـزرگ‌نمایی 50 بـرابر از خط بـرش تهیه شده است، قسمتی از یک مورد از نمونه‌های برش را نشان می‌دهد. در ناحیه متأثر از حرارت اندازه دانه‌ها تغییر کرده و درشت‌تر می‌شوند. در شکل 2 که با بزرگ‌نمایی 500 برابر از همان نمونه تهیه شده، مرز ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه با وضوح بیشتری قابل مشاهده است.

در شکل 3 ریز ساختار نواحی متأثر از حرارت و فلز پایه مربوط به شرایط مختلف برش در بزرگ‌نمایی 500 نمایش داده شده است که خط‌چین مشکی نشان‌دهنده مرز نواحی، ناحیه متأثر از حرارت در بالای شکل و فلز پایه پایین است.

جدول 3 طراحی آزمایش و خروجی‌ها

Table 3 Design of experiment and test outputs

شماره آزمایش	سرعت	توان	فاصله نازل	گاز	عرض HAZ (میکرومتر) میانگین	انحراف معیار
1	1	4	1	1	426	5
2	1	3	2	2	391	3
3	1	2	3	3	468	7
4	1	1	4	4	272	9
5	2	4	2	4	235	8
6	2	3	1	2	265	9
7	2	2	4	3	247	6
8	2	1	3	1	370	9
9	3	4	3	3	210	5
10	3	3	4	1	257	8
11	3	2	1	4	189	9
12	3	1	2	2	290	9
13	4	4	4	2	300	3
14	4	3	3	4	138	6
15	4	2	2	1	263	9
16	4	1	1	3	133	4

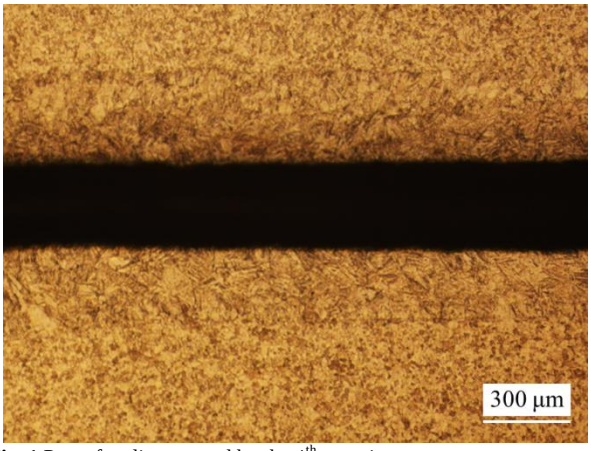

Fig. 1 Part of cutline created by the 4th experiment

شکل 1 قسمتی از خط برش ایجاد شده توسط آزمایش شماره چهار

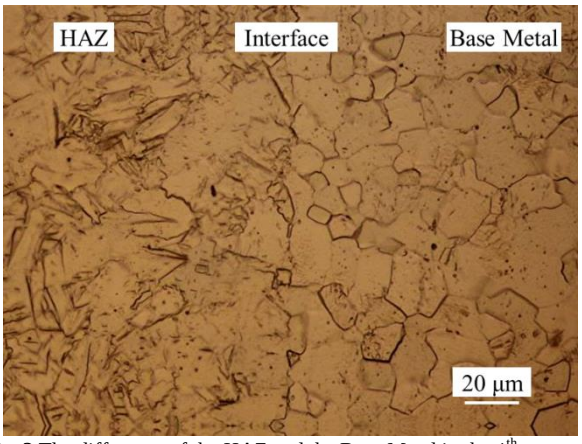

Fig. 2 The difference of the HAZ and the Base Metal in the 4th experiment

شکل 2 نمایش تفاوت ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه در آزمایش شماره چهار

با توجه به متعامد بودن طراحی آزمایش و با استفاده از میانگین ناحیه متأثر از حرارت در هر سطح از پارامترهای ورودی و تعمیم آن به کل آن سطح، نمودار اثرات پارامترها بر خروجی را در شکل 4 ترسیم شد.

جهت تخمین کمی چگونگی مشارکت نسبی هر پارامتر بر پاسخ کلی از آنالیز واریانس استفاده شد. نتایج آنالیز واریانس برای ناحیه متأثر از حرارت در جدول 4 نشان داده شده است. اهمیت نسبی پارامترها در قالب مقادیر F بیان شده به صـورتی کـه هرچه مقدار F بیشتر باشد اهمیت پارامتر فرایند نیز بیشتر است.

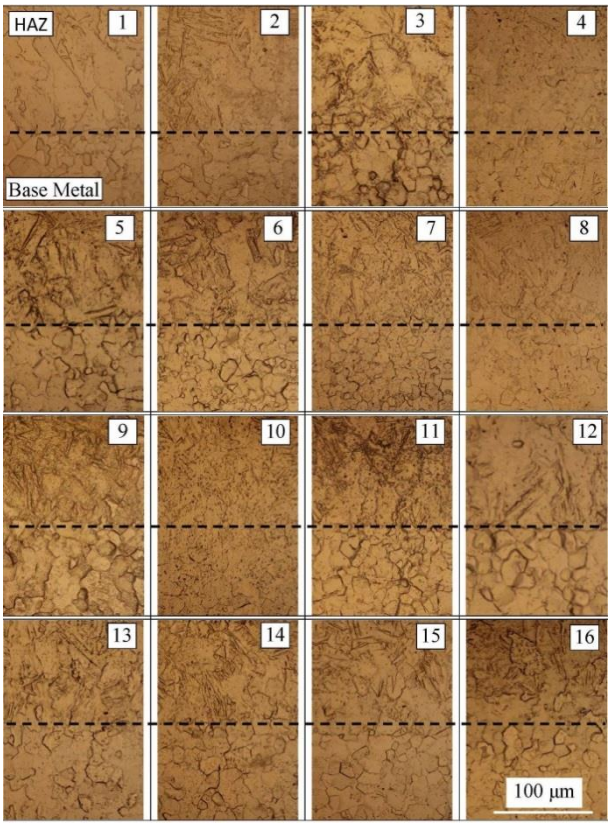

Fig. 3 Metallography images and the difference between the microstructure of the base metal and HAZ in each test

شکل 3 تصاویر متالوگرافی و تفاوت ریز ساختار فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت در هر یک از آزمایش‌ها

نتایج نشان داد که سرعت برش تأثیر اصلی را بر ناحیه متأثر از حرارت دارد. نوع گاز کمکی نیز با تأثیر کمتر بر میزان ناحیه متأثر از حرارت متأثر است. تأثیر توان دستگاه و فاصله نازل برش نیز قابل چشم‌پوشی است.

نمودار ناحیه کانتور برای بررسی تأثیر دو پارامتر سرعت و نوع گاز کمکی که بیشترین تأثیر را بر عرض ناحیه متأثر از حرارت دارند در شکل 5 ارائه شده است.

نتایج آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای فرایند عبارت است از:

تغییرات توان تأثیر قابل توجهی بر عرض ناحیه متأثر از حرارت ندارد. آنالیز واریانس در جدول 4 مقدار P را برای توان 0.75 ارائه کرده است و به دلیل اختلاف بسیار زیاد با عدد 0.05 (بیشترین مقدار در نظر گرفته شده توسط نویسندگان برای معنی‌داری) نشانگر تأثیر بسیار کم توان بر عرض ناحیه متأثر از حرارت است. اگرچه افزایش توان موجب افزایش انرژی جداسازی اعمالی می‌شود، میزان ناحیه متأثر از حرارت را افزایش نداد، همچنین ذوب ورق به دلیل نازک بودن ورق تحت آزمایش سریع‌تر از ورق‌های با ضخامت بیشتر و در نتیجه پرتو زمان کمتری با ورق در تماس بوده و انتقال حرارت به فلز پایه از طریق تابش کمتر بوده است. همچنین مذاب نیز سریع‌تر از ورق خارج شده و بر دیواره برش جاری نشده است. زمان کمتری برای انتقال حرارت مذاب به فلز پایه از طریق هدایت حرارتی وجود داشته است. انتظار این است که با زیاد شدن ضخامت به دلیل ایجاد زمان کافی برای انتقال حرارت بین مذاب و فلز پایه و نیز تماس طولانی‌تر پرتوی لیزر با ورق، اثرگذاری توان بر میزان ناحیه متأثر از حرارت بیشتر شود. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش یانگ و همکاران [14] در برش تیتانیوم آلیاژی با ضخامت 6.5 میلی‌متر که بیش از 20 برابر ضخامت تحقیق حاضر است، این ادعا را تأیید کرد.

افزایش سرعت موجب کاهش معنی‌دار ناحیه متأثر از حرارت شد. مقدار P برای نشان دادن تأثیر سرعت بر ناحیه متأثر از حرارت، 0.045 (کمتر از 0.05) به‌دست آمد که نشان از اثرگذاری زیاد این پارامتر بر ناحیه متأثر از حرارت دارد. پس همان‌گونه که در قسمت پیشین اشاره شد افزایش توان با وجود افزایش انرژی جداسازی اعمالی تأثیر قابل توجهی بر میزان ناحیه متأثر از حرارت نداشت و به دلایل این موضوع نیز پرداخته شد. کاهش سرعت مانند افزایش توان موجب افزایش انرژی جداسازی اعمالی شده است، ولی انرژی جداسازی برخلاف توان بیشتر ناشی از کاهش سرعت و موجب تأثیرات معنی‌دار بر میزان ناحیه متأثر از حرارت شده است. در توجیه این پدیده می‌توان چنین گفت که با کاهش سرعت، زمان تابش بر واحد سطح افزایش یافته و انتقال حرارت به ورق از طریق تابش بیشتر شده است. همچنین این زمان بیشتر، فرصت بیشتری به حرارت حاصل از تابش پرتو داده است تا از طریق هدایت حرارتی به فلز پایه منتقل شود و موجب افزایش عرض ناحیه متأثر از حرارت شده است. به همین دلیل است که برخلاف افزایش انرژی حاصل از افزایش توان، افزایش انرژی حاصل از کاهش سرعت، تأثیری معنی‌دار در افزایش عرض ناحیه متأثر از حرارت داشته است.

مقدار P نشان از تأثیر بسیار کم فاصله نازل بر میزان ناحیه متأثر از حرارت دارد.

مقدار P برای تعیین تأثیر نوع گاز کمکی بر ناحیه متأثر از حرارت، 0.088 به‌دست آمد که نشان می‌دهد گاز کمکی تأثیر کمتری نسبت به سرعت بر میزان ناحیه متأثر از حرارت دارد. با افزایش درصد هلیوم در ترکیب گازی هلیوم- آرگون عرض ناحیه متأثر از حرارت کاهش پیدا کرد. تحقیقات

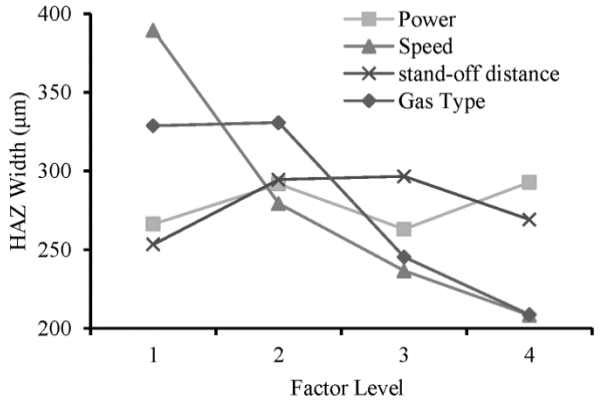

Fig. 4 The graph of the main effects- the effects of input parameters on the HAZ width

شکل 4 نمودار اثرات اصلی- تأثیر پارامترهای ورودی بر عرض ناحیه متأثر از حرارت

جدول 4 آنالیز واریانس برای میانگین مقادیر عرض ناحیه متأثر از حرارت

Table 4 ANOVA for the average values of the HAZ width

پارامتر	درجات آزادی	مجموع مربعات متوالی	مجموع مربعات تنظیم شده	میانگین مربعات تنظیم شده	F	P
سرعت	3	75860	75860	25287	10.07	0.045
توان	3	3080	3080	1027	0.41	0.759
فاصله نازل	3	5231	5231	1744	0.69	0.614
گاز	3	45042	45042	15014	5.98	0.088
خطا	3	7532	7532	2511		
مجموع	15	136745				

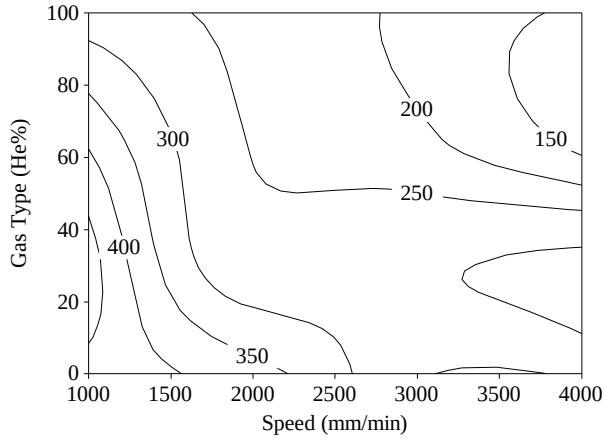

Fig. 5 The effect of cutting speed and type of gas on the HAZ width

شکل 5 نمودار کانتور برای نمایش تأثیر دو پارامتر سرعت و نوع گاز بر عرض ناحیه متأثر از حرارت

گذشته [13] نشان می‌دهد ضریب همرفت حرارتی هلیوم، تا بیش از 5 برابر ضریب همرفت حرارتی آرگون و تنش برشی ایجاد شده توسط گاز هلیوم بیشتر از آرگون است. اختلاف در همرفت حرارتی موجب خنک‌کاری بیشتر ورق توسط هلیوم و در نتیجه کاهش ناحیه متأثر از حرارت شده است. ایجاد تنش برشی کمتر توسط گاز آرگون موجب تشکیل فیلم ضخیم‌تر مذاب و خروج دشوارتر آن از محل برش شده و در نتیجه انتقال حرارت هدایتی

گرمای مذاب به ماده پایه و میزان ناحیه متأثر از حرارت افزایش یافته است.

شکل‌های 6 و 7 به ترتیب روند به‌دست‌آمده برای تغییرات ریزساختار و تغییرات سختی از فلز پایه تا شکاف برش در یک مورد از آزمایش‌های پژوهش حاضر را نشان داده است. نتایج نشان داد ریزساختار از لبه برش به سمت فلز پایه با دو پدیده پدیده تغییر ساختار از فاز α به مارتنزیت و پدیده دوم رشد دانه‌ها مواجه است.

مطابق شکل 6 در ناحیه متأثر از حرارت اندازه دانه‌ها تغییر کرده و شکل آن‌ها نیز در نواحی نزدیک‌تر به لبه برش به صورت سوزنی شکل تغییر یافته است، همچنین مطابق نمودار سختی در شکل 7 از فلز پایه تا لبه برش شرایطی دارد که با شروع ناحیه متأثر از حرارت ابتدا سختی ورق کاهش می‌یابد که معادل ناحیه 2 در شکل 6 است، سپس با دور شدن از فلز پایه سختی در شکل 7 افزایش یافته و از سختی فلز پایه نیز بیشتر شده که معادل ناحیه شماره 3 در شکل 6 است. در نزدیکی لبه برش نیز مجدداً سختی فلز کاهش یافته است. در این نمونه سختی ورق از فاصله حدود 262 میکرون از لبه ورق شروع به تغییر کرده که این عدد با مقدار به‌دست‌آمده برای عرض ناحیه متأثر از حرارت در نمونه مورد نظر برابر است. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات سختی به صورت مستقیم با ناحیه متأثر از حرارت در ارتباط است؛ بنابراین برای اندازه‌گیری ناحیه متأثر از حرارت به جای متالوگرافی می‌توان از نمودار سختی و ناحیه شروع تغییرات سختی نیز استفاده کرد. برای کنترل محدوده تغییرات سختی می‌توان به صورت غیرمستقیم ناحیه متأثر از حرارت را مطالعه و کنترل کرد. دلیل روند تغییرات سختی را می‌توان در تغییر ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت جستجو کرد. ریزساختار مطابق شکل 6 از لبه برش به سمت فلز پایه با دو پدیده مواجه شده است. پدیده اول تغییر ریزساختار از فاز α به مارتنزیت و پدیده دوم رشد دانه‌هاست. با توجه به پایین بودن ضریب نفوذ حرارتی و هدایت حرارتی تیتانیوم و آلیاژهای آن [1] پس از اعمال حرارت به منطقه برش به دلیل محبوس‌شدن حرارت در ناحیه مجاور خط‌برش به ویژه در نواحی نزدیک‌تر به فلز پایه رشد دانه‌ها اتفاق افتاده است (ناحیه شماره 2 در شکل 6). رابطه (2) موسوم به رابطه هال- پچ[1] ارتباط بین سختی و اندازه دانه را بیان می‌کند.

$$H = H_0 + \frac{K}{\sqrt{d}} \qquad (2)$$

در رابطه (2)، H، H_0، d و K به ترتیب سختی، سختی نمونه تک‌کریستال، اندازه دانه و عدد ثابت است.

با توجه به رابطه (2) به دلیل رشد دانه‌ها در مناطقی از HAZ که نزدیک‌تر به فلز پایه است کاهش سختی منطقی به نظر می‌رسد که در شکل 7 مشاهده می‌شود. با این وجود حضور مقدار کمی فاز مارتنزیت در این نواحی مانع از کاهش بیش از حد سختی شده است. با توجه به دانسیته حرارتی بالای فرایند لیزر برشکاری، انتقال حرارت توسط قطرات مذاب به خارج از ورق، امکان دفع گرما از لبه برش به صورت همرفت حرارتی و نیز حضور گاز خنک کار امکان ایجاد کوئنچ برای نواحی اطراف لبه برش وجود دارد. در نتیجه فاز مارتنزیت با ساختار سوزنی شکل تشکیل می‌شود و با توجه به سختی بالای فاز مارتنزیت، سختی این مناطق افزایش می‌یابد. با توجه به توضیح بالا با نزدیک شدن به لبه ورق تراکم فاز مارتنزیت افزایش یافته است. از سوی دیگر با توجه به خنک‌کاری بهتر در لبه ورق از رشد دانه‌ها و در نتیجه کاهش سختی ورق مقداری جلوگیری شده است (ناحیه شماره 3 در شکل 6). این شرایط موجب افزایش سختی در ناحیه نزدیک به لبه برش در شکل 7 شده است. در حقیقت توزیع تغییرات سختی در حد فاصل لبه برش و فلز پایه، برآیند کاهش سختی ناشی از پدیده رشد دانه و افزایش سختی ناشی از تشکیل فاز مارتنزیت است. در لبه ورق که بسیار نزدیک به شکاف برش، پیوندها از یک سو گسسته و میزان سختی دوباره کاهش نشان داده است.

4- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی تأثیر تعدادی از پارامترهای مهم برش لیزر پیوسته CO_2 بر عرض ناحیه متأثر از حرارت در برش ورق 0.3 میلی‌متری تیتانیوم خالص از طریق طراحی آزمایش تاگوچی و آنالیز واریانس و نیز به مطالعه تغییرات عمومی سختی و ریزساختار در ناحیه متأثر از حرارت پرداخته است. نتایج را خلاصه به شرح زیر می‌توان بیان کرد.

مهم‌ترین عامل کاهش‌دهنده عرض ناحیه متأثر از حرارت در برش ورق نازک تیتانیوم خالص افزایش سرعت برش که دارای مقدار P برابر با 0.045

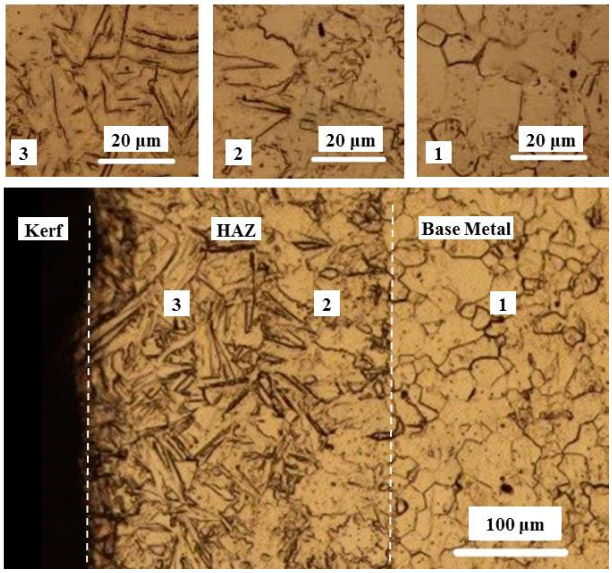

Fig. 6 The Procedure of microstructure changes in the HAZ for the test #15

شکل 6 روند تغییرات ریزساختار در ناحیه متأثر از حرارت در آزمایش شماره 15

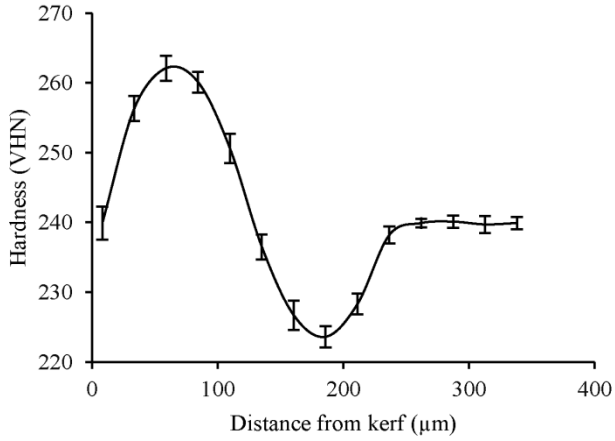

Fig. 7 The graph of hardness changes from the kerf to the base metal in test #15

شکل 7 تغییرات سختی ورق از لبه ورق تا فلز پایه در آزمایش شماره 15

[1] Hall-Petch Equation

است. استفاده از گاز کمکی هلیوم به جای گاز کمکی آرگون کمتر از تغییر سرعت کاهش‌دهنده این ناحیه و دارای مقدار P برابر با 0.088 است. توان و فاصله نازل تأثیر ناچیزی بر ناحیه متأثر از حرارت ورق بسیار نازک تیتانیوم خالص دارند.

شرایط بهینه در این تحقیق که موجب حداقل‌شدن عرض ناحیه متأثر از حرارت می‌شود، در تنظیمات سرعت 4000 میلی‌متر بر دقیقه، گاز کمکی خالص هلیوم، فاصله نازل 1.2 میلی‌متر و توان 1500 وات به‌دست می‌آید.

با توجه به تأثیر افزایش سرعت بر کاهش ناحیه متأثر از حرارت و عدم تأثیر افزایش توان بر افزایش این ناحیه برای تأمین مقدار مشخص انرژی جداسازی (P/Vt) در برش ورق نازک تیتانیوم خالص، استفاده از تنظیم توان بالا و سرعت بالا نسبت به تنظیم توان پایین و سرعت پایین ارجحیت دارد. بنابراین توصیه می‌شود از بیشترین سرعت دستگاه و توان متناسب استفاده شود. در صورتی که بیشترین سرعت و بیشترین توان دستگاه برای تأمین انرژی جداسازی لازم کافی نباشد، آن‌گاه توصیه می‌شود که از بیشترین توان دستگاه و سرعت برش متناسب استفاده شود.

مقایسه نتایج تحقیق کنونی با نتایج سایر تحقیقات نشان داد که با افزایش ضخامت میزان تأثیر توان بر ناحیه متأثر از حرارت افزایش خواهد یافت؛ بنابراین با افزایش ضخامت پیشنهاد پیشین کم‌رنگ شده و توان نیز نقش مهمی بر عرض ناحیه متأثر از حرارت خواهد داشت.

تغییرات سختی در حد فاصل لبه برش و فلز پایه رفتار سینوسی دارد که برآیند کاهش سختی ناشی از پدیده رشد دانه و افزایش سختی ناشی از تشکیل فاز مارتنزیت است. با حرکت از فلز پایه به سمت لبه برش، ابتدا سختی کمتر از فلز پایه و سپس بیشتر از فلز پایه می‌شود و در نزدیکی لبه برش دوباره کاهش می‌یابد.

5- مراجع

[1] E. W. Collings, *The physical Metallurgy of Titanium Alloys*, Ohio: American Society for Metals, pp. 1-9, 1984.

[2] I. A. lmeida, W. Rossi, M. S. F. Lima, J. R. Berretta, G. E. C. Nogueira, N. U. Wetter, J. N. D. Vieira, Optimization of titanium cutting by factorial analysis of the pulsed Nd: YAG laser parameters, *Materials Processing Technology*, Vol. 179, No. 1, pp. 105-110, 2006.

[3] J. D. Majumdar, I. Manna, Laser processing of materials, *Sadhana Academy Proceedings in Engineering Science*, Vol. 28, No. 3-4, pp. 495-562, 2003.

[4] A. K. Dubey, V. Yadava, Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of nickel-based superalloy sheet using orthogonal array with principal component analysis, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46, No. 1, pp. 124-132, 2008.

[5] B. S. Yilbas, C. Karatas, I. Uslan, O. Keles, Y. Usta, Z. Yilbas, M. Ahsan, Wedge cutting of mild steel by CO_2 laser and cut-quality assessment in relation to normal cutting, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46, No. 10, pp. 777-784, 2008.

[6] A. Sharma, V. Yadava, P. Rao, Optimization of kerf quality characteristics during Nd: YAG laser cutting of nickel based superalloy sheet for straight and curved cut profiles, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 48, No. 9, pp. 915-925, 2008.

[7] A. K. Pandey, A. K. Dubey, Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of Duralumin sheet, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 50, No. 3, pp. 328-335, 2012.

[8] A. Sharma, V. Yadava, Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd: YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for curved profile, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, No. 51, pp. 77-88, 2012.

[9] C. Leone, S. Genna, V. Tagliaferri, Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 53, pp. 43-50, 2014.

[10] C. Mao, X. Sun, H. Huang, Ch. Kang, M. Zhang, Y. Wu, Characteristics and removal mechanism in laser cutting of cBN–WC–10Co composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 230, pp. 42-49, 2016.

[11] M. Moradi, O. Mehrabi, T Azdast, K. Y. Benyounis, The effect of low power CO_2 laser cutting process parameters on polycarbonate cut quality produced by injection molding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 93-100, 2017. (in Persian فارسی)

[12] S. Lei, W. Liu, High speed machining of titanium alloys using the driven rotary tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 6, pp. 653-656, 2012.

[13] B. T. Rao, R. Kaul, P. Tiwari, A. K. Nath, Inert gas cutting of titanium sheet with pulsed mode CO_2 laser, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 43, No. 12, pp. 1330-1348, 2005.

[14] J. Yang, S. H. Sun, M. Brandt, W. Yan, Experimental investigation and 3D finite element prediction of the heat affected zone during laser assisted machining of Ti6Al4V alloy, *Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 15, pp. 2215-2222, 2010.

[15] L. V. Shanjin, W. Yang, An investigation of pulsed laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, No. 10, pp.1067–1077, 2006.

[16] A. K. Pandey, A. K. Dubey, Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics and Laser Technology*, Vol. 44, No. 6, pp. 1858–1865, 2012.

[17] W. M. Steen, J. Mazumder, *Laser material processing*, London: Springer-Verlag, Vol. 3, pp. 156-157, 2010.

[18] R. K. Roy, *Design of Experiments using the Taguchi Approach*, New York: Wiley, pp. 100-102, 2001.

[19] J. Powell, *CO_2 Laser Cutting*, Berlin: Springer-Verlag, Vol. 214, pp. 131-143, 1993.

[20] S. L. Chen, The effects of gas composition on the CO_2 laser cutting of mild steel, *Materials Processing Technology*, Vol. 73, No. 1, pp. 147-159, 1998.