مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1397، دوره 18، شماره 03، ص‌ص 179-188

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مدل‌سازی تجربی فرآیند سخت‌کاری سطحی لیزری فولاد AISI 410 به کمک روش رویه پاسخ

محمود مرادی[1*]، حسین عربی[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

2- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

* ملایر، صندوق پستی 95863-65719، moradi@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 دی 1396

پذیرش: 08 بهمن 1396

ارائه در سایت: 04 اسفند 1396

کلید واژگان:

سخت‌کاری لیزری

میکروسختی

فولاد مارتنزیتی 410

میکروساختار

طراحی آزمایش‌ها

چکیده

سخت‌کاری سطحی لیزری، یکی از تکنولوژی‌های نوین می‌باشد که برای بهبود سطح فلزات به‌منظور اصلاح خواص تریبولوژیکی سطح مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله بررسی قابلیت سخت‌کاری سطحی لیزری فولاد ضد زنگ مارتنزیتی 410 با استفاده از لیزر دیودی توان بالای پیوسته با حداکثر توان 1600 وات پرداخته می‌شود. توان لیزری، سرعت روبش و موقعیت فاصله کانونی پارامترهای متغیر در این تحقیق می‌باشند. تاثیر پارامترهای فرآیند روی عمق و پهنای لایه سخت شده و میکروسختی در منطقه مورد تاثیر لیزر مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش، میزان سختی و عمق بیشتر سختی حاصل می‌گردد. همچنین دستاوردها حاکی از آن است که با کاهش موقعیت فاصله کانونی، عمق سختی بیشتر و پهنای سختی کمتر به‌دست می‌آید. مدل‌سازی متغیرهای کنترل‌پذیر (توان لیزر، سرعت روبشی و موقعیت فاصله کانونی) با روش رویه پاسخ به‌منظور مطالعه تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند بر چگونگی تغییر پاسخ‌ها، و تجزیه و تحلیل جداول آنالیز واریانس، ارائه معادلات رگرسیون پارامترهای خروجی، تحلیل نمودارهای رویه پاسخ، نمودارهای تعامل اثر پارامترهای ورودی، مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان می‌دهد که در روش مدل‌سازی رویه پاسخ (RSM) تاثیر پارامتر توان لیزری در نتایج بیشینه سختی، عمق و پهنای سختی، بیشتر از پارامترهای موقعیت فاصله کانونی و سرعت روبشی می‌باشد. همچنین با توجه به درصد پوشش‌دهی پارامترها توسط معادله رگرسیون به‌دست آمده روش رویه پاسخ (RSM) مدلی مناسب برای بررسی اثرات پارامترهای فرآیند سخت‌کاری سطحی با لیزر دیودی می‌باشد.

Experimental modeling of laser surface hardening process of AISI 410 by Response Surface Methodology

Mahmoud Moradi*, Hossein Arabi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran
* P.O.B. 65719-95863, Malayer, Iran, moradi@malayeru.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 December 2017
Accepted 28 January 2018
Available Online 23 February 2018

Keywords:
Laser hardening
Micro hardness
Martensitic stainless Steel of 410
Microstructure
Design of experiments

ABSTRACT

Laser surface hardening is one of the modern technology used to improve the surface of materials in order to modification of tribological properties. This paper investigate the ability of laser surface hardening of AISI 410 martensitic stainless steel using a continuous high power diode laser with a maximum power of 1600w. Laser power, scanning speed and focal plane position are variable parameters in this research. The effect of the process parameters on the hardness, depth and width of the hardened layer has been investigated. The results show that with increasing laser power and reducing the scanning speed, higher hardness and hardening depth are obtained. Results also reveal that width of hardened layer increases by increasing in focal plane position and reduction the laser power. Modeling of controllable variables (laser power, scanning speed and focal plane position) by Response Surface Methodology method to study the effect of process input parameters on how to change responses, and analysis of ANOVA tables, providing regression equation for output parameters, analysis The Surface Plots, Interaction Plots of the input parameters, were investigated. The results show that in RSM modeling method, the effect of laser power parameter on the results of maximum hardness, depth and width of hardness is more than the parameters of the focal plane position and scanning speed. Due to percentage of coverage of the parameters by the regression equations the RSM method is a suitable model for investigating the effects of the surface hardening process by diode laser.

1- مقدمه

فرآوری لیزری مواد در مقایسه با فرآیندهای سنتی، چندین مزیت ویژه دارد: فرآیند بدون تماس، فرآیندی با قابلیت اتوماسیون و کنترل، تولید بالا، تولید اقتصادی، بهبود کیفیت تولید، حداقل کردن منطقه متاثر از حرارت می‌باشد.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Moradi, H. Arabi, Experimental modeling of laser surface hardening process of AISI 410 by Response Surface Methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 179-188, 2018 (in Persian)

عملیات سخت‌کاری سطحی لیزری که یکی از فرآوری‌های لیزری مواد می‌باشد با استفاده از منبع حرارتی لیزر، انرژی گرمایی سطح را بالا برده و مابقی قسمت‌های فلز (حجم فلز) به عنوان انتقال دهنده و پخش حرارت با نرخ سرمایش بالا عمل می‌کند. با توجه به انرژی ورودی محدود فقط سطح گرم می‌شود و حجم فلز سرد می‌ماند. خنک‌کاری خود به خودی در طی فرآیند در فلز ایجاد می‌گردد. عملیات سخت‌کاری لیزری یک فرآیند صرفه جویی در انرژی می‌باشد و حرارت فقط در بخش‌های محدود ماده منتقل می‌شود. کمترین پیچش حرارتی در قطعه بعد از عملیات حرارتی ایجاد می‌شود. بعد از مراحل پایانی کار هیچ‌گونه عملیات ماشین‌کاری، سنگ‌کاری و تمیزکاری مورد نیاز نمی‌باشد. "شکل 1" شماتیک فرآیند سخت‌کاری لیزری را نشان می‌دهد.

فرآوری لیزری مواد در کاربردهای مختلف صنعتی نظیر: سوراخ‌کاری [1]، برش‌کاری [3،2]، جوش‌کاری [4]، تغییرشکل فلزات [5] و سخت‌کاری لیزری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کاربردهای اولیه سخت‌کاری لیزری، لیزرهای توان بالای CO_2 به‌طور وسیع استفاده می‌شد. با توسعه لیزر Nd:YAG اخیرا لیزرهای توان بالای دیودی در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله به بحث و بررسی پژوهش‌های انجام گرفته شامل سخت‌کاری لیزری انواع فلزات از جمله فولادهای کربنی و فولادهای زنگ‌نزن پرداخته شده است. لی لای و همکاران [6] در سال 2003 پژوهشی در خصوص لیزرهای توان بالای دیودی برای سخت‌کاری سطحی لیزری انجام دادند. نتایجی که در این پژوهش به‌دست آمد این بود که در لیزر دیودی توان بالا، حداکثر سختی و همچنین ابعاد هندسی منطقه سخت‌کاری شده بالاتر از لیزرهای CO_2 و Nd:YAG به‌دست آمد و داشتن هزینه بالا از معایب لیزر دیودی توان بالا نسبت به لیزرهای CO_2 و Nd:YAG می‌باشد. غلامرضا گردانی و همکاران [7] در سال 2007 به سخت‌کاری سطحی لیزری فولاد متوسط کربن 1.1186 و 1.6582 با استفاده از لیزر Nd:YAG پرداختند، انرژی حرارتی لیزری تابیده شده در محدوده 200 تا 600 میلی ژول و با سرعتهای روبشی بین 10 تا 150 میلی متر بر دقیقه بر روی سطح فولاد اعمال شد. نتایج حاکی از این بود که سختی و عمق نفوذ منطقه سخت‌کاری شده بسته به انرژی و سرعت روبش، متفاوت می‌باشد و هر دو نوع فولاد بیشتر از0.7 میلی‌متر عمق نفوذ داشته‌اند. پاراشاتامان و همکاران [8] در سال 2012 پژوهشی به کمک لیزر Nd:YAG در خصوص اثر پارامترهای فرآیند سخت‌کاری لیزری روی میکرو ساختار و میزان سختی فولاد EN25 انجام دادند. محدوده توان لیزر استفاده شده 1250-750 وات و سرعت روبشی 1000-500 میلی‌متر بر دقیقه بود افزایش اساسی در سختی سطحی در حدود 2 برابر سختی فلزپایه از 370 ویکرز به 782 ویکرز به‌دست آمد. عمق

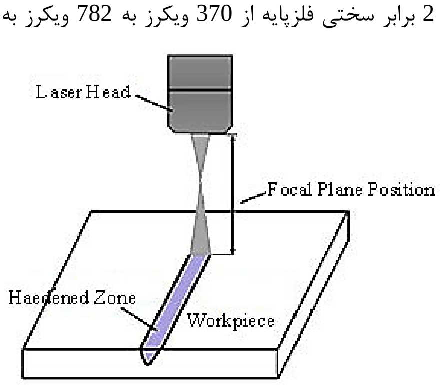

Fig.1 laser hardening schematic

شکل 1 شماتیک سخت‌کاری لیزری

سختی (550 تا 700) میکرون و پهنای سختی (2 تا 2.2) میلی‌متر رسیده است. ریفنگ لی و همکاران [9] در سال 2014 پژوهشی در خصوص سخت‌کاری سطحی لیزری فولاد AISI 1045 با استفاده از دو نوع لیزر متفاوت: دیودی قدرت بالا با توان 3.5 کیلووات و نیز لیزر CO_2 با توان 15 کیلووات انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان و ابعاد هندسی منطقه سخت‌کاری شده با استفاده از لیزر دیودی توان بالا، بیشتراز لیزر CO_2 می‌باشد. از بیشینه سختی ماده موردنظر ، ابعاد هندسی (عمق و پهنای منطقه سخت‌کاری شده) و همچنین زاویه ناشی از انحنای ناحیه سخت‌کاری شده را با استفاده از روش رویه پاسخ مورد بررسی قرار دادند. فرانسیسکو کوردویلا و همکاران [10] در سال 2016 با شبیه‌سازی فرآیند سخت‌کاری لیزری و مقایسه نتایج به‌دست آمده از فرآیند شبیه سازی سخت‌کاری لیزری با داده‌های تجربی سخت‌کاری لیزری فولاد کم آلیاژ AISI 4140، توانستند اثر روی هم‌افتادگی خطوط سخت‌کاری شده با لیزر را بررسی کنند. جعفر هادی عبود و همکاران [11] در سال 2017 مطالعه‌ای در رابطه با پاسخ فولادهای آلیاژی در اثر عملیات سطحی لیزری انجام دادند. پارامترهای دانسیته توان، سرعت روبشی، قطر لکه لیزر و جذب انرژی لیزر در اثر تابش لیزرهای CO_2 و Nd:YAG و لیزر دیودی مورد مطالعه قرار گرفت. تاثیر طول موج لیزر در انعکاس نور لیزر از روی سطح بررسی شد. نتیجه گرفته شد. در صورت بهینه شدن دقیق پارامترهای فوق می‌توان به میزان سختی و عمق سختی بالا رسید به‌طوری که ذوب اتفاق نیفتد و دمای آستینیته برای تشکیل کامل دانه‌های آستنیت و ساختار یکنواخت بایستی به اندازه کافی افزایش یابد. فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی به طور همزمان با دارا بودن خواص مکانیکی بهینه، مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش بالایی دارند بنابراین به‌طور گسترده در صنایع هوافضا و صنایع پتروشیمی و دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از کاربردهای فولاد مارتنزیتی AISI 410 استفاده در پره توربین بخار کم فشار در نیروگاه‌های کشور می‌باشد و استفاده رایج دیگر آن در تولید شیرآلات پتروشیمی، قطعات موتور جت، قطعات کمپرسور، سوپاپ و انواع پمپ‌ها و .... می‌باشد [12]. لو و همکاران [13] در سال 2003 پژوهشی در رابطه با سخت‌کاری سطحی فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی AISI 440C با لیزر توان بالای Nd:YAG انجام دادند. لایه سخت شده به ضخامت چند صد میکرون، و متشکل از فازهای مارتنزیت، آستنیت باقیمانده و کاربیدها ایجاد گردید. میکروساختار و لایه سخت شده با لیزر در اثر پارامترهای بهینه لیزری، به سختی 800-600 ویکرز رسید. برسان و همکاران [14] در سال 2008 تحقیقی مبنی بر تاثیر سختی بر مقاومت در برابر سایش فولاد مارتنزیتی 17-4 ph انجام دادند. آنان مقاومت به سایش آن را اندازه‌گیری کردند. نتیجه این‌که فولاد مارتنزیتی 17-4 ph بعد از سخت‌کار لیزری نسبت به فولاد پایه مقاومت به سایش خیلی خوبی نشان داد. محمودی و همکاران [15] در سال 2009 تحقیقی در خصوص فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی AISI 420 توسط لیزر Nd:YAG انجام دادند. در شرایط بهینه که با تغییر پارامترهای موثر به‌دست آمد، توانستند سختی سطح را تا 2.5 برابر حالت آنیل همین فولاد و با سختی 90 درصد حداکثر سختی کوره‌ای افزایش دهند. بیشینه سختی 488 ویکرز با حداکثر عمق سختی 250 میکرون حاصل شد. محمودی و همکاران [16] در سال 2010 سخت‌کاری فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی AISI 420 توسط لیزر حالت جامد پالسی Nd:YAG را انجام دادند پارامترهای فرآیند (انرژی پرتو، مدت زمان و سرعت حرکت) می‌باشد، در این پژوهش مقدار سختی در عمق ناحیه سخت شده و نیز پهنای ناحیه سخت شده مورد بررسی قرار گرفت و نیز مقدار روی هم‌افتادگی خطوط سخت‌کاری

شده با لیزر و مقاومت در برابر خوردگی این فولاد پس از عملیات سخت‌کاری با لیزر مورد ارزیابی قرار گرفت..بیشترین سختی حدود 500 ویکرز درعمق 200 میکرون گزارش شده است.غلامرضا زیره پور و همکاران [17] در سال 2016 به ارزیابی رفتار خوردگی الکترو شیمیایی فولاد AISI 420 پس از سخت‌کاری سطحی لیزری پرداختند .فولاد مارتنزیتی 420 توسط این لیزربه بیشینه سختی 700 ویکرز رسیده است. نتیجه این‌که مقاومت به خوردگی فولاد مارتنزیتی 420 در اثر سخت‌کاری لیزری نسبت به فلز پایه افزایش پیدا کرده است و پتانسیل میزان خوردگی آن به 113 میلی‌ولت رسیده است. بن یونس وهمکاران[18] در سال 2016 پژوهشی در رابطه با پوشش نیتروژن گازی روی فلزات زنگ‌نزن 316 L، 316 و 304 براساس روش طراحی آزمایش‌ها انجام دادند. نتیجه این‌که فولاد 316 L نسبت به فلزات 316 و 304 در درجه حرارت بالاتر از 450 درجه سانتی‌گراد سختی سطحی بهتری می‌دهد. سختی سطحی 316 L با روش نیتروژن گازی حدود 5 برابر فلز پایه شده است.روش رویه پاسخ یک روش موثر برای مطالعه نیتروژن گازی می‌باشد به‌طوری که تعداد آزمایشات را کم و در هزینه و زمان صرفه‌جویی می‌کند. مرادی و همکاران [19] در سال 2017 پژوهشی در رابطه با سخت‌کاری سطحی فولاد مارتنزیتی 410 با توان بیشینه 700 وات با لیزر Nd:YAG انجام دادند. موقعیت نقطه کانونی و انرژی پالس لیزر پارامترهای متغیر لیزر در این تحقیق می‌باشند. نتایج نشان داد که در نتیجه استحاله حالت جامد و انحلال کاربیدها در زمینه فولاد در فرآیند سخت‌کاری سطحی لیزری، بهبود در سختی سطحی به‌دست می‌آید. بیشترین عمق لایه سخت شده 350 میکرون و بیشینه سختی سطحی معادل 747 ویکرز به‌دست آمد.

با توجه به بررسی پژوهش‌های انجام شده، تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای در رابطه با سخت‌کاری سطحی فولاد مارتنزیتی 410 با لیزر دیودی انجام نشده است. در این مقاله اثر پرتو لیزر دیودی بر فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 به منظور فرآیند عملیات سخت‌کاری سطحی با تغییر مقادیر مختلف پارامترهای لیزر مورد بررسی قرارگرفته شد. شماتیک منطقه سخت‌کاری شده لیزری (از سطح قطعه تا منطقه فلز پایه) طبق "شکل 1" مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق تصمیم برآن شد که به بررسی و تحقیق تجربی ومدل آماری (معادله رگرسیون) چگونگی تاثیر سه متغیر کنترل‌پذیر: سرعت روبشی لیزر، توان لیزر و موقعیت فاصله کانونی لیزر به‌منظور بررسی تاثیر آن‌ها بر سختی سطحی، عمق سختی و پهنای سختی، در فرآیند سخت‌کاری سطحی لیزری با استفاده از روش رویه پاسخ پرداخته شود. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های فولاد مارتنزیتی 410 با ضخامت 10 میلی‌متر توسط لیزر دیودی 1600 وات مورد بررسی قرار گرفته است.

2- روش و آزمایش‌ها

2-1- روش رویه پاسخ (RSM)

طراحی آزمایش، یک روش بررسی کننده اثرات متغیرهای چندگانه روی یک متغیر خارجی (پاسخ) است. این آزمون‌ها شامل یکسری رشته یا آزمایش‌ها است که به‌صورت هدف‌مند و معنی‌داری در متغیرهای ورودی یا پاسخ ساخته و داده‌ها در هر رشته را جمع‌آوری می‌کند. به‌عبارت دیگر طراحی آزمایش‌ها شامل یک آزمایش یا یکسری از آزمایش‌هایی می‌شود که به‌طور آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند تغییراتی ایجاد می‌کند تا از طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و شناسایی شود. رویه پاسخ، مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ موردنظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، مفید است و هدف آن بهینه سازی این پاسخ است [20]. در اکثر مسائل مربوط به روش رویه پاسخ، ارتباط بین پاسخ و متغیرهای مستقل نامعلوم است. پس اولین قدم در رویه پاسخ، یافتن تقریبی مناسب برای ارتباط واقعی موجود بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است. معمولاً از چند جمله‌ای‌های مرتبه پایین در ناحیه‌ای از مقادیر متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. اگر پاسخ به خوبی توسط یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل‌بندی شده باشد، آن‌گاه تابع تقریب کننده برای مدل مرتبه اول به‌صورت رابطه (1) است [21].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

اگر در سیستم، خمیدگی وجود داشته باشد، آن‌گاه باید از چند جمله‌ای‌های مرتبه بالاتر، مانند مدل مرتبه دوم استفاده کرد رابطه (2) این معادله را نمایش می‌دهد [22].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i} \sum_{j} \beta_{ij} x_i \quad (2)$$

تقریباً در تمام مسائل رویه پاسخ از یک یا هر دوی این چند جمله‌ای‌های تقریب‌کننده استفاده می‌شود برای برآورد پارامترها در تقریب چند جمله‌ای‌ها، از روش کمترین مربعات استفاده می‌شود . پس از آن، تحلیل رویه پاسخ را براساس رویه برازنده شده انجام می‌گیرد. اگر رویه برازنده شده تقریباً هم‌ارز تحلیل، تقریبی کافی برای تابع واقعی پاسخ باشد، آنگاه تحلیل رویه برازنده شده سیستم واقعی است.

جدول 1 سه متغیر ورودی آزمایش، مقادیر کد شده و واقعی سطوح آن‌ها را نشان می‌دهد.

چنانچه در جدول 1 دیده می‌شود، محدوده پارامترهای آزمایشگاهی فرآیند لیزر به قرار زیر است: توان لیزر از (1600-800) وات و سرعت روبشی از (8-4) میلی‌متر بر ثانیه و موقعیت فاصله کانونی از (80-60) میلی‌متر می‌باشد جدول 2 تنظیمات و نتایج آزمایش‌های سخت‌کاری لیزری را نشان می‌دهد.

2-2- تحقیقات تجربی

ترکیب شیمیایی فولاد مارتنزیتی 410 مورد استفاده در پژوهش در جدول 3 نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی فولاد با استفاده از دستگاه کوانتومتری اندازه‌گیری گردید. نمونه‌های آزمایشگاهی از میلگردی با قطر 65 میلی‌متر به ضخامت 10 میلی‌متر با استفاده از ماشین‌کاری آماده‌سازی گردیدند. عملیات سخت‌کاری سطحی فولاد موردنظر از لیزر دیودی با بیشینه توان 1600 وات استفاده شد. ابعاد هندسی منطقه سخت‌کاری شده (عمق نفوذ و پهنای آن) طبق "شکل 2" مورد بررسی قرار گرفت.

جدول 1 پارامترهای مستقل فرآیند با سطوح طراحی

Table 1 Independent process parameters with design levels

متغیر	نماد	واحد	-2	-1	0	1	2
سرعت روبشی	*S*	[mm/s]	4	5	6	7	8
توان لیزری	*P*	[W]	800	1000	1200	1400	1600
موقعیت فاصله کانونی	*FPP*	[mm]	60	65	70	75	80

جدول 2 تنظیمات آزمایشگاهی پارامترهای ورودی و خروجی سخت‌کاری لیزری دیودی

Table 2 Experimental setting of laser surface hardening by diode laser

	پارامترهای ورودی			پارامترهای خروجی		
شماره نمونه	توان (W)	سرعت روبشی (mm/s)	موقعیت فاصله کانونی (mm)	ماکزیمم سختی (hv)	عمق نفوذ (mm)	پهنای سختی (mm)
1	1400	5	65	600	2.2	1.8
2	1200	8	70	478	0.5	9.2
3	1200	6	70	488	1.3	8.5
4	1200	6	70	490	1.4	8.4
5	1200	6	60	520	2.2	8.1
6	1200	6	80	470	0.6	9.1
7	1000	7	75	500	0.8	8.9
8	1000	7	65	508	0.9	8.85
9	1000	5	75	510	1	8.75
10	1000	5	65	515	1.1	8.6
11	1400	7	65	540	2.2	8.1
12	1200	6	70	500	1.5	8.65
13	1600	6	70	620	1.8	8.3
14	1400	7	75	512	1.3	8.5
15	1200	4	70	530	2.3	8.01
16	800	5	70	478	0.7	9
17	1400	6	75	530	1.8	8.3

جدول 3 ترکیبات شیمیایی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 (درصد وزنی)

Table 3 Chemical composition of AISI 410 stainless steel (Wt. %)

عنصر	C	Cr	P	Mn	S	Fe
درصد وزنی	0.15	12.5	0.04	1	0.03	باقیمانده

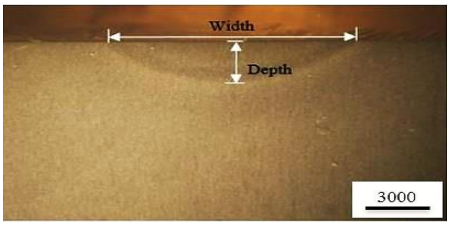

Fig. 2 geometrical dimensions of hardened zone (width and depth)

شکل 2 ابعاد هندسی منطقه سخت شده(عمق وپهنا)

"شکل 3" تصویر 17 نمونه‌های سخت‌کاری شده از فولاد مارتنزیتی 410 توسط لیزر دیودی را نشان می‌دهد. نمونه‌ها پس از عملیات سخت‌کاری سطحی لیزری برش خورده و مانت گردیدند. در مقطع عرضی نمونه‌ها برای هر نمونه، میکروسختی‌ها از سطح تا عمق نفوذ لیزر و همچنین در پهنا اندازه‌گیری شد. برای دستگاه میکروسختی، مقدار نیرو 100 گرم در مدت زمان 30 ثانیه اعمال شده است. ناحیه سخت شده جهت متالوگرافی نمونه‌ها، به کمک معرف ویللا که ترکیب شیمیایی آن شامل: (5 سی‌سی اسید کلریدریک، 100 سی‌سی اتیل الکل، 2 گرم اسدپیکریک) می‌باشد، آماده‌سازی گردیدند و ریزساختار نمونه‌های سخت شده مورد بررسی قرار گرفتند.

"شکل 4" روند تغییرات میکروسختی برای فرورونده ویکرز دستگاه میکروسختی که از سطح به سمت عمق نمونه و همچنین در پهنای مقطع

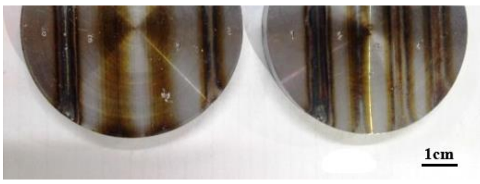

Fig. 3 Image of diode laser surface hardened samples

شکل 3 تصویر نمونه‌های سخت‌کاری سطحی شده لیزری دیودی

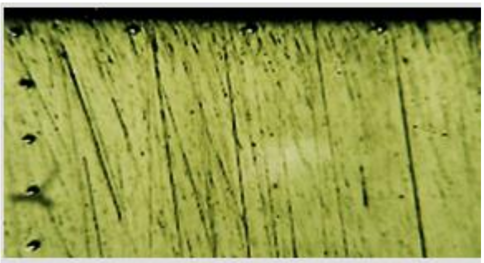

Fig. 4 Cross-sectional view of Vickers indenters in depth and surface of hardened zone

شکل 4 مقطع عرضی فرورونده‌های ویکرز در میکرو سختی‌سنجی در عمق و سطح

زده شد را نشان می‌دهد.

"شکل 5" توزیع انرژی پرتو لیزر را نشان می‌دهد. چنانچه در "شکل 5" دیده می‌شود با توجه به این‌که حرارت بیشتری در مرکز پرتو لیزر نسبت به گوشه‌های پرتو وارد می‌کند، بنابراین حرارت بیشتری درمرکز پرتو وجود داشته و با فاصله گرفتن از مرکز، شدت انرژی پرتو لیزر کمی افت پیدا می‌کند.

در این مقاله افزایش موقعیت قطعه کار تا کلگی لیزر (موقعیت فاصله کانونی) به معنای فاصله گرفتن از کلگی لیزر می‌باشد که این امر تاثیر مستقیمی بر عمق نفوذ پرتو لیزر در قطعه و همچنین میزان سختی ناحیه تحت تاثیر لیزر دارد. "شکل 1" موقعیت فاصله کانونی لیزر دیودی مورد

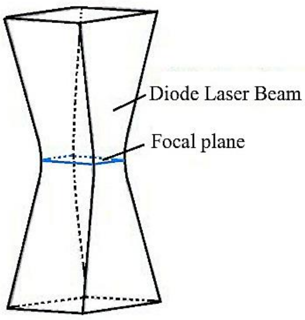

Fig. 5 Schematic of diode laser beam distribution

شکل 5 شماتیک توزیع پرتو لیزر دیودی

استفاده را به تصویر کشده است. لیزر مورد استفاده از نوع لیزر دیودی نیمه‌رسانا با موج پیوسته ساخت مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران می‌باشد. فاصله کانونی لیزر 400 میلی‌متر، فاصله کلگی لیزر تا لکه کانونی 60 میلی‌متر می‌باشد. طول موج لیزر 8.8 نانومتر و رنگ آن نامرئی می‌باشد. صفحه کانونی آن به ابعاد 8×1.5 میلی‌متر می‌باشد.

3- نتایج و بحث

در این بخش بطورکلی اثر پارامترهای توان لیزر، سرعت روبشی و موقعیت فاصله کانونی لیزر دیودی بر روی سخت‌کاری سطحی فولاد 410 مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور بررسی توزیع میکروسختی در عمق و پهنای حاصل از سخت‌کاری فولاد پایه و ابعاد هندسی منطقه سخت شده (پهنا و عمق نفوذ)، میکروساختار ناحیه سخت‌کاری شده مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفت .سپس مدل‌سازی پارامترهای فرآیند سخت‌کاری سطحی لیزردیودی با کمک روش رویه پاسخ مورد تحقیق قرارگرفت. سرعت‌روبشی از (8-4) میلی‌متر بر ثانیه، موقعیت فاصله کانونی از (80-60) میلی‌متر توان لیزری از (-800 1600) وات به‌عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند.

3-1- سختی سطحی بیشینه

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته مقدار P[1]، مشخص‌کننده پارامترهای موثر در فرآیند می‌باشد بطوری‌که هر گاه مقدار آن کمتر از 0.05 باشد. آن پارامتر موثر می‌باشد [23]. طبق جدول 4 آنالیز واریانس برای سختی بیشینه مشاهده می‌گردد که همه پارامترهای اصلی (توان لیزری، موقعیت فاصله کانونی لیزر وسرعت روبشی) موثر می باشند. از میان جملات اثرهای مرتبه دو، جمله مرتبه دو توان لیزری پارامتر موثر، سرعت روبشی و موقعیت فاصله کانونی پارامترهای غیرمؤثر می‌باشند. در میان جملات تعامل اثر، تعامل اثرهای سرعت روبشی– موقعیت فاصله کانونی، سرعت روبشی- توان لیزری و موقعیت فاصله کانونی- توان لیزری مؤثر شناخته شدند. مدل اصلاح شده براساس پارامترهای مؤثر بیان می‌گردد. در گام بعدی تحلیل، پارامترهای غیرموثر از مدل حذف شده و تحلیل براساس پارامترهای موثر انجام گرفته است. مشاهده می‌شود که معادله رگرسیون حاصله، موثر و عدم برازش، به عنوان پارامتر غیرموثر بیان شده است. با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده براساس مدل اصلاح شده، معادله رگرسیون نهایی براساس مقادیر کد شده از پارامترهای مؤثر به‌صورت رابطه (3) معرفی گردیده است.

$$\text{بیشینه سختی} = 500.06 - 13.06\,S$$
$$-12.56\,FPP + 24.69\,P + 18.00\,P^2$$
$$+9.36\,S \times FPP - 6.37\,S \times P - 11.88\,FPP \times P \quad (3)$$

R-sq میزان پوشش‌دهی پارامترها توسط معادله رگرسیون به‌دست آمده، می‌باشد، همان‌طور که مشاهده می‌شود در این تحلیل مقدار 96.36 درصد که توسط معادله رگرسیون پوشش‌دهی شده است مقدار قابل توجهی می‌باشد. نمودارهای تأثیر پارامترهای اصلی، میانگین پاسخی است که برای بررسی تأثیر هر فاکتور بر روی پاسخ به کار می‌رود. در این نمودارها محور افقی مربوط به یک پارامتر ورودی فرآیند و محور عمودی به خروجی آزمایش‌ها، اختصاص می‌یابد. اگر در نمودار تأثیر پارامترهای اصلی، شیب خط ترسیم شده زیاد باشد (در شیب‌های مثبت یا منفی) نشان از مؤثر بودن پارامتر در نظر گرفته شده، می‌باشد و اگر شیب خط ترسیم شده کم و ملایم باشد، نشان از بی‌تأثیر بودن یا تأثیر کم پارامتر مربوطه دارد.

با افزایش درصد کربن در فولاد، سختی‌پذیری و ماکزیمم سختی بالاتر می‌رود. علت این افزایش، بالاتربودن سختی‌پذیری می‌باشد. برای بررسی عوامل موثر بر سختی‌پذیری باید به عوامل موثر بر دگرگونی پرلیت توجه داشت. به‌طور کلی هر عاملی که خطوط تشکیل پرلیت در نمودار CCT را به سمت راست منتقل کند امکان تشکیل مارتنزیت را در آهنگ‌های سرد شدن کمتر فراهم می‌کند. بنابراین، انتقال دماغه نمودار CCT به سمت راست همراه با افزایش سختی‌پذیری است. به بیان دیگر می‌توان گفت، هر عاملی که باعث کاهش آهنگ جوانه‌زنی و رشد پرلیت شود (زمان لازم برای جوانه‌زنی و رشد پرلیت را افزایش دهد) سختی‌پذیری را در فولادها افزایش می‌دهد. این عوامل عبارت‌اند از: اندازه دانه‌های آستنیت، درصد کربن، عناصر آلیاژی، آخال و ناخالصی‌های غیرفلزی، همگن بودن ریز ساختار. از عوامل مهم و تاثیرگذار افزایش درصد کربن فولاد می‌باشد. "شکل‌های 6 و 7" روند تغییرات میکروسختی نمونه‌های 13,1,15 مورد آزمایش فولاد 410 تحت تاثیر لیزر در عمق و پهنا را به تصویر کشیده است.

هنگامی که اثر یکی از فاکتورها به سطح عامل دیگر بستگی داشته باشد می‌توانیم از نمودارهای تعاملات بین پارامتری برای نمایش تعامل اثرهای ممکن، استفاده کنیم. اگر خطوط ترسیم شده با یکدیگر تلاقی داشته باشند نشان از مؤثر بودن تعامل بین پارامترها می‌باشد و اگر خطوط ترسیم شده با یکدیگر موازی باشند، نشان از بی تأثیر بودن تعامل بین پارامترهای مربوطه دارد. همان‌طور که در "شکل 8" مشاهده می‌گردد پارامترهای سرعت روبشی لیزر- موقعیت فاصله کانونی و موقعیت فاصله کانونی- توان لیزری و سرعت

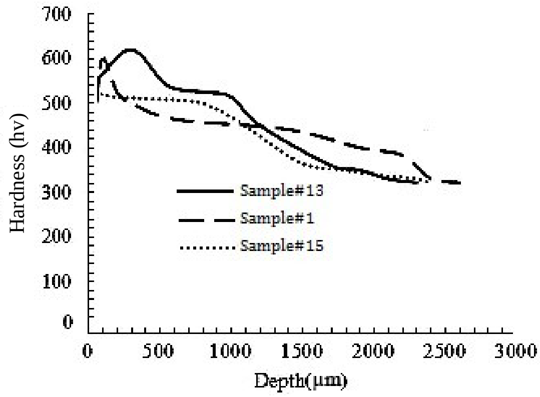

Fig. 6 Microhardness profile at Depth of laser hardened erea of AISI410 steel

شکل 6 پروفیل میکروسختی در عمق ناحیه سخت‌کاری شده لیزری فولاد AISI410

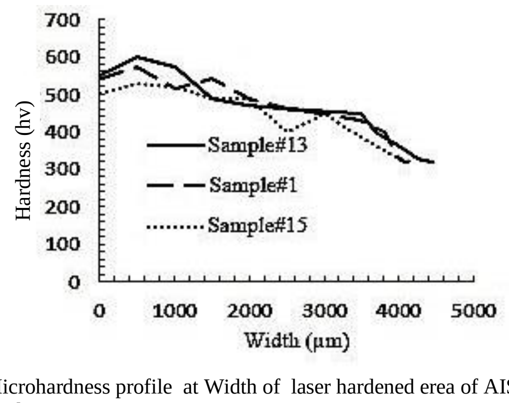

Fig. 7 Microhardness profile at Width of laser hardened erea of AISI410 steel

شکل 7 پروفیل میکروسختی در پهنا ناحیه سخت‌کاری شده لیزری فولاد AISI410

[1] P-Value

جدول 4 آنالیز واریانس تحلیل مدل اصلاح شده برای سختی بیشینه

Table 4 Modified variance analysis for maximum hardness

عبارت‌ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار T	مقدار P
مدل	7	25284.1	3612.02	61.58		0.000
عبارت‌های‌خطی	3	15006.7	5002.23	85.28		0.000
سرعت روبشی (S)	1	2730.1	2730.06	46.55	-6.82	0.000
موقعیت فاصله کانونی(FPP)	1	2525.1	2525.06	43.05	-6.56	0.000
توان لیزری (P)	1	9751.6	9751.56	166.26	12.89	0.000
عبارت‌های توان‌دو	1	8083.1	8083.06	137.81		0.000
$P\times P$	1	8083.1	8083.06	137.81	11.74	0.000
اثر متقابل دو عبارتی	3	2194.4	731.46	12.47		0.001
$S\times FPP$	1	741.1	741.12	64.12	3.55	0.006
$S\times P$	1	325.1	325.12	5.54	-2.35	0.043
$FPP\times P$	1	1128.1	1128.13	19.23	-4.39	0.002
خطا	9	527.9	58.65			
عدم تطابق	7	445.2	63.60	1.54		0.449
خطای خالص	2	82.7	41.33			
کل	16	25812.0				
R –s q(a d j) = 96.36%					R -s q =97.95%	

روبشی- توان لیزری دارای تعامل اثر می‌باشند.

با توجه به شکل "8-a"، تعامل اثر ($S\times FPP$) در موقعیت فاصله کانونی کمینه با افزایش سرعت، بیشینه سختی کاهش می‌یابد و در موقعیت فاصله کانونی بیشینه با افزایش سرعت، بیشینه سختی بالا می‌رود. در شکل "8-b"، تعامل اثر ($S\times P$) در موقعیت فاصله کانونی بیشینه با افزایش سرعت روبشی،بیشینه سختی کاهش می‌یابد. در شکل "8- c"، تعامل اثر ($FPP\times P$) در توان لیزری بیشینه با افزایش موقعیت فاصله کانونی، بیشینه سختی کاهش می‌یابد و در توان لیزری کمینه با افزایش موقعیت فاصله کانونی، بیشینه سختی افزایش می‌یابد. نمودار باقیمانده به‌منظور بررسی میزان انطباق معادله رگرسیون و آنالیز واریانس مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر در نمودار باقیمانده چند نقطه خارج از محدوده خط راست قرار بگیرد، نشان از غیرعادی یا غیرنرمال بودن آن نقاط داشته و باید آن‌ها را از نمودار حذف و با سایر نقاط مجدداً نمودار احتمال نرمال را رسم نمود.

"شکل 9" نمودارهای باقیمانده‌ها برای پاسخ بیشینه سختی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که باقیمانده در اطراف خط مورب پراکنده و یک توزیع نرمال را نمایش می‌دهد؛ بنابراین، مدل رگرسیون استخراج نهایی، مدلی مناسب برای پیش‌بینی و بررسی اثرات پارامتر نیز می‌باشد.

نمودارهای رویه پاسخ نشان می‌دهد که چگونه پاسخ برازش (خط رگرسیونی) مربوط به دو متغیر، پیوسته می‌باشد. "شکل 10" نمودارهای رویه پاسخ را نمایش می‌دهند. چنانچه از نمودار "شکل a- 10" مشخص است کاهش موقعیت فاصله کانونی باعث نزدیک شدن سطح قطعه‌کار به مرکز تمرکز انرژی می‌گردد پس انرژی تابیده شده به سطح فولاد افزایش می‌یابد. با نزدیک شدن قطعه‌کار به مرکز تمرکز انرژی لیزر، انرژی ورودی به سطح قطعه‌کار افزایش می‌یابد بنابراین سختی بیشینه افزایش می‌یابد افزایش توان نیز همان‌طور که توضیح داده شد باعث افزایش سختی می‌گردد.

چنانچه از نمودار "شکل b- 10" استنباط می‌گردد با کاهش موقعیت فاصله کانونی و همچنین کاهش سرعت روبشی میزان انرژی ورودی به سطح قطعه‌کار افزایش می‌یابد بنابراین بیشینه سختی افزایش می‌یابد همان‌طور که از نمودار "شکلc- 10" دیده می‌شود با کاهش سرعت‌روبشی لیزر وافزایش توان لیزری سختی بیشینه افزایش می‌یابد.

دلیل این امر این می‌باشد که با افزایش توان لیزری، انرژی لیزر افزایش می‌یابد. بنابراین انرژی تابیده شده به ناحیه سخت‌کاری شده افزایش یافته و

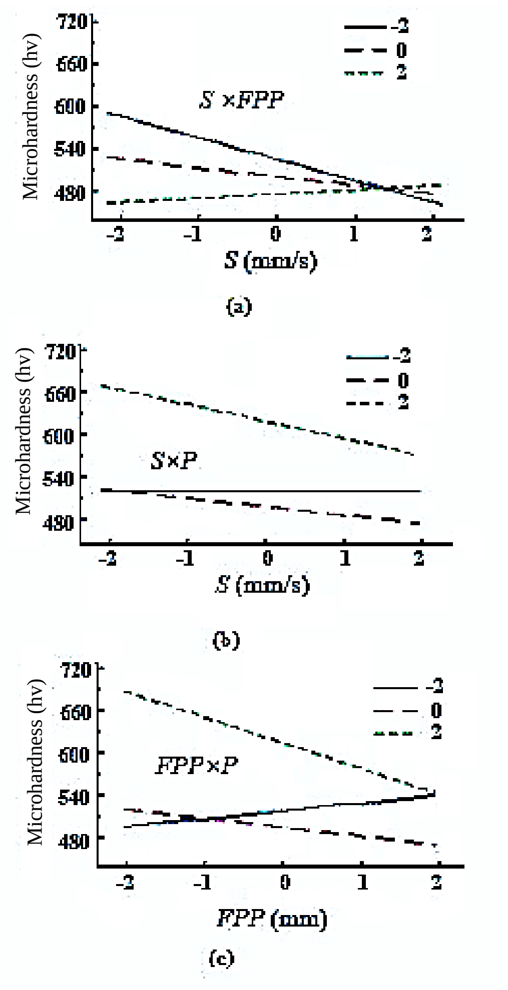

Fig. 8 Interaction Plot for Maximum Hardness

شکل 8 نمودارهای تعاملات بین پارامتری برای بیشینه سختی

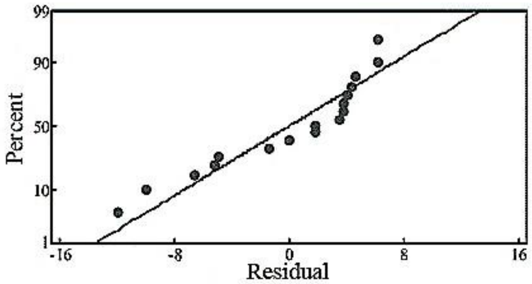

Fig. 9 The residual plot for maximum hardness

شکل9 نمودار باقیمانده (نرمال) برای سختی بیشینه

در نتیجه سختی بیشینه افزایش می‌یابد. کاهش سرعت روبشی باعث می‌گردد که زمان تعامل پرتو تابیده شده به سطح قطعه‌کار افزایش یافته بنابراین سختی بیشینه افزایش می‌یابد.

3-2- عمق ناحیه سخت‌کاری شده

جدول 5 آنالیز واریانس مدل اصلاحی برای عمق سختی را نمایش می‌دهد. در بین جملات اصلی، توان لیزری، سرعت روبش لیزر و موقعیت فاصله کانونی،پارامترهای موثر و بقیه جملات غیرموثر می‌باشند.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده معادله رگرسیون اصلاح شده با توجه به پارامترهای موثر به‌صورت رابطه (4) بیان می‌گردد.

$$\text{عمق سختی} = 1.3882 - 0.2813\,S - 0.2937\,FPP + 0.3688\,P \qquad (4)$$

آنچه از نمودار "شکل 11-a,b,c" مشاهده می‌گردد با افزایش سرعت روبشی لیزر، (شکل a) عمق سختی کاهش می‌یابد ولی با کاهش سرعت روبشی لیزر، زمان تعامل لیزر با سطح ناحیه سخت‌کاری شده بیشتر شده و این سطح در معرض حرارت بیشتری قرار می‌گیرد بنابراین عمق سختی افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش موقعیت فاصله کانونی (شکل b) عمق سختی افزایش پیدا می‌کند. آنچه از نمودارها مشخص می‌باشد با افزایش توان لیزر (شکل c) عمق سختی افزایش پیدا می‌کند این امر بدیهی است که با افزایش توان لیزر سطح قطعه در معرض حرارت بیشتری قرار می‌گیرد و انرژی بیشتری جذب سطح می‌شود، بنابراین عمق سختی افزایش پیدا

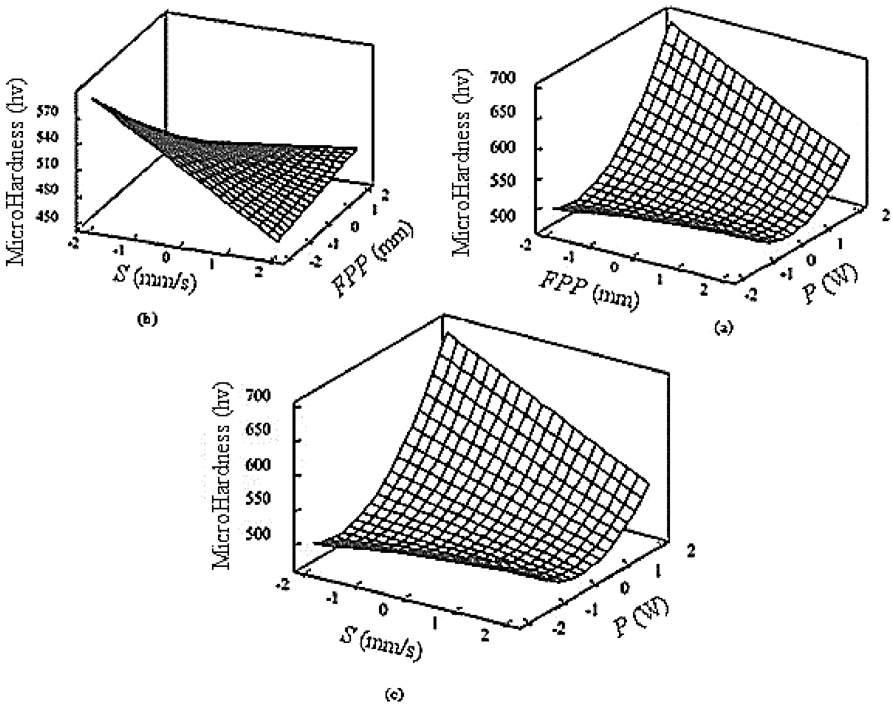

Fig. 10 Surface Plot of Maximum of Hardness,a:*FPP-P* diagram, b: *FPP-S* diagram, c:S-P diagram

شکل 10 منحنی‌های رویه پاسخ مربوطه به سختی بیشینه، a: نمودار*FPP-P*، b: نمودار*FPP-S*، c: نمودار*S-P*

جدول 5 آنالیز واریانس مدل اصلاح شده برای عمق سختی

Table 5 Modified variance analysis for Depth of hardened area

عبارت‌ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار T	مقدار P
مدل	3	4.82188	1.60729	19.79		0.000
عبارت درجه یک	3	4.82188	1.60729	19.79		0.000
سرعت روبشی (S)	1	1.26563	1.26563	15.58	-3.93	0.002
موقعیت فاصله کانونی (FPP)	1	1.38062	1.38062	17.00	-4.12	0.001
توان لیزری (P)	1	2.17563	2.17563	26.79	5.18	0.000
خطا	13	1.05577	0.08121			
عدم تطابق	11	1.03577	0.09416	9.42		0.100
خطای خالص	2	0.02000	0.01000			
کل	16	5.87765				
R-s q(a d j) = 77.89%					R- s q= 82.04%	

می‌کند.

"شکل 12" نمودارهای رویه پاسخ مربوط به عمق سختی را نشان می‌دهد. "شکل 12-a" مشخص می‌باشد که بیشترین مقدار عمق سختی در پائین‌ترین سرعت روبشی لیزر و بالاترین توان لیزر اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش سرعت روبشی لیزر و کاهش توان لیزر عمق سختی کاهش پیدا می‌کند. دلیل این امر این می‌باشد که وقتی سرعت روبشی لیزر افزایش پیدا می‌کند سطح قطعه کار در معرض حرارت کمتری قرار می‌گیرد و زمان تعامل لیزر با قطعه‌کار کاهش می‌یابد و در پی آن انرژی کمتری توسط سطح فولاد جذب می‌شود وهمچنین با کاهش توان لیزر انرژی حرارتی کمتری به سطح می‌رسد.

آن‌چه از "شکل 12-b" مشخص است با کاهش سرعت روبشی لیزر و کاهش موقعیت فاصله کانونی، عمق ناحیه سخت‌کاری شده افزایش پیدا می‌کند. این امر به این علت است که با کاهش موقعیت فاصله کانونی، فاصله قطعه‌کار به ناحیه تمرکز انرژی کاهش می‌یابد و انرژی تابیده شده لیزر به سطح فولاد افزایش پیدا می‌کند. این عامل باعث بیشتر شدن عمق سختی می‌شود و همچنین با کاهش سرعت روبشی لیزر، زمان تعامل لیزر با قطعه‌کار افزایش می‌یابد و در پی آن انرژی بیشتری توسط سطح فولاد جذب می‌شود و این باعث افزایش عمق سختی می‌شود

3-3- پهنای منطقه سخت‌کاری شده

جدول 6 آنالیز واریانس مدل اصلاح شده برای پهنای سختی را نشان می‌دهد. پارامترهای توان لیزر، سرعت روبشی لیزر، موقعیت فاصله کانونی لیزر به عنوان پارامترهای موثر شناخته شده‌اند. اثر مرتبه دو و همچنین تعامل اثرها جملاتی، غیرموثر می‌باشند. رابطه (5) معادله رگرسیون نهایی را برای پهنای سختی نشان می‌دهد.

$$\text{پهنای سختی} = 8.5506 + 0.1862\,S + 0.1750\,FPP - 0.2188\,P \qquad (5)$$

در "شکل 13" نمودارهای رویه پاسخ مربوطه نمایش داده شده است. آن‌چه از "شکل 13-a" استنباط می‌گردد این است که بیشترین پهنای سختی در بیش‌ترین مقدار موقعیت فاصله کانونی لیزری و بیش‌ترین مقدار سرعت روبشی لیزر به‌دست می‌آید. طبق نمودار "شکل 13-b" بیش‌ترین پهنای سختی در کمترین مقدار توان لیزری و بیش‌ترین مقدار موقعیت فاصله کانونی لیزر به‌دست می‌آید.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر پارامترهای لیزری بر سخت‌کاری سطحی فولاد 410 مورد بررسی قرار گرفت. لذا با توجه به آزمایش‌های انجام شده می‌توان به نتایج زیر

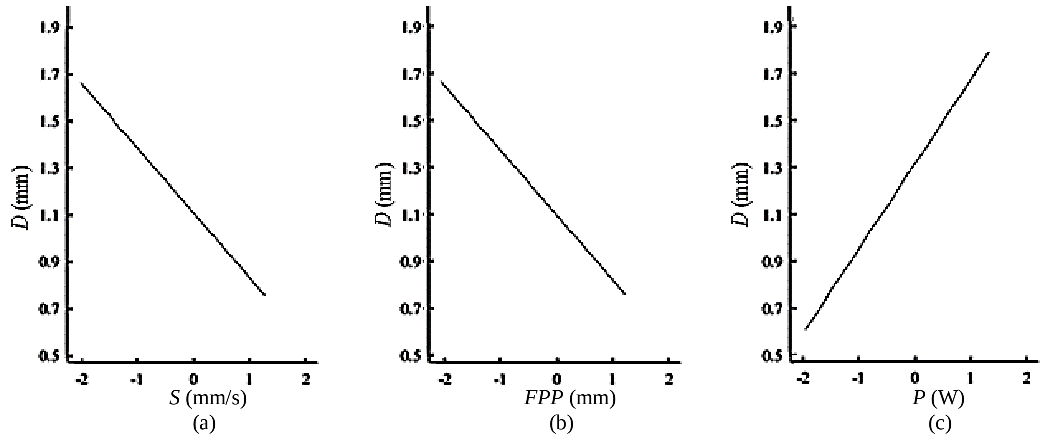

Fig. 11 Main Effects Plot for Depth of Hardness

شکل 11 نمودار تأثیر پارامترهای اصلی بر عمق سختی

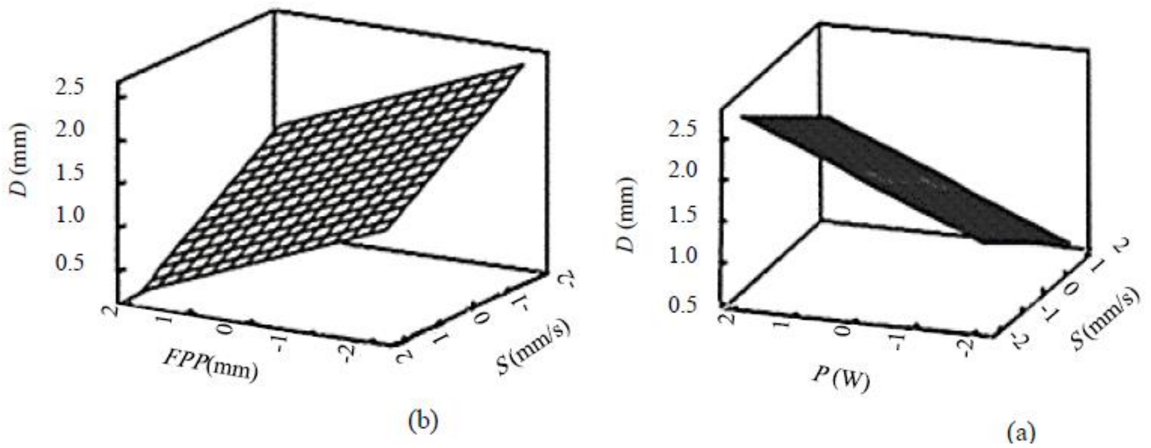

Fig. 12 Surface Plot of Depth of Hardness ,a: *S-P* diagram, b: *FPP-S* diagram

شکل 12 نمودارهای رویه پاسخ برای عمق سختی، a: نمودار *S -P*، b: نمودار *FPP-S*

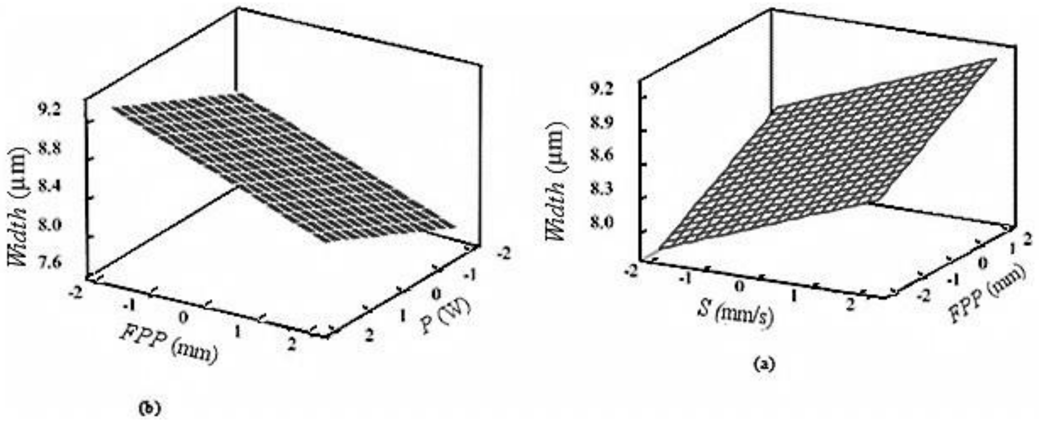

Fig. 13 Surface Plot of Width of Hardness a: *FPP-S* diagram, b:*FPP-P* diagram

شکل 13 نمودارهای رویه‌پاسخ پهنای‌سختی، a: نمودار*FPP-S*، b: نمودار*FPP-P*

جدول 6 آنالیز واریانس مدل اصلاح شده برای پهنای سختی

Table 6 Modified variance analysis for Width of hardened area

عبارت‌ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار T	مقدار P
مدل	3	1.81065	0.60355	18.10		0.000
عبارت درجه یک	3	1.81065	0.60355	18.10		0.000
سرعت روبشی (S)	1	0.55502	0.55502	16.65	4.08	0.001
موقعیت فاصله کانونی (FPP)	1	0.49000	0.49000	14.70	3.83	0.002
توان لیزری (P)	1	0.76562	0.03334	22.96	-4.79	0.000
خطا	13	0.43344	0.03653			
عدم تطابق	11	0.40178	0.01583	2.31		0.341
خطای خالص	2	0.03167				
کل	16	2.24409				
	R-s q(a d j) = 76.23%				R-s q= 80.69%	

استنادکرد:

1. سخت‌کاری استحاله‌ای لیزری فولاد 410 باعث ایجاد ساختاری متشکل از فاز فریت در زمینه مارتنزیت شد که در نتیجه استحاله حالت جامد و انحلال و یا توزیع مجدد فریت‌ها بود.
2. بررسی ها نشان می دهد که با افزایش توان لیزروکاهش سرعت روبشی و موقعیت فاصله کانونی به‌دلیل افزایش انرژی لیزری، میزان حرارت ورودی به سطح قطعه‌کار افزایش می‌یابد، بنابراین مقدار سختی وعمق ناحیه سخت‌کاری شده افزایش می‌یابد.
3. با کاهش توان لیزری و افزایش موقعیت فاصله کانونی وسرعت روبشی، پهنای ناحیه سخت‌کاری شده افزایش می‌یابد.
4. در حالت ایده‌آل در تست‌های انجام شده آزمایشگاهی، میکروسختی فولاد 410 بعد از عملیات سخت‌کاری لیزری، باتوان 1600 وات، ثانیه، حدوداً 620 ویکرز و عمق سختی 1.8 میلی‌متر می‌گردد.
5. در مدل‌سازی تجربی، با روش رویه پاسخ، تاثیر پارامتر توان لیزری در نتایج بیشینه سختی، عمق و پهنای سختی، بیشتر از پارامترهای موقعیت فاصله کانونی و سرعت روبشی می‌باشد.
6. با توجه به درصد پوشش‌دهی پارامترها توسط معادله رگرسیون به‌دست آمده، و انطباق معادله رگرسیون و آنالیز واریانس با نمودارهای باقیمانده، مدل‌سازی تجربی با روش رویه پاسخ مدلی مناسب برای بررسی اثرات پارامترهای فرآیند سخت‌کاری سطحی با لیزر دیودی می‌باشد.

5- مراجع

[1] M. Moradi, E. Golchin, Investigation on the effects of process parameters on laser ercussion drilling using finite element methodology, statistical modelling and optimization, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 14, No. 03, pp. 464 – 484, 2017.

[2] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K. Y. Benyounis, Enhancement of low power CO2 laser cutting process for injection molded polycarbonate, *Optics & Laser Technology*, Vol. 96, No. 11, pp. 208-218, 2017.

[3] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K. Y. Benyounis, The effect of low power CO2 laser cutting process parameters on polycarbonate cut quality produced by injection molding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 02, pp. 93-100, 2017. (in persian فارسی)

[4] A. H. Faraji, M. Moradi, M. Goodarzi, P. Coluccid, C. Maletta, An investigation on capability of hybrid Nd:YAG laser-TIG welding technology for AA2198 Al-Li alloy, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 96, pp. 1-6, 2017.

[5] M. Safari, M. farzin, Experimental investigation of laser forming of a saddle shape with spiral irradiating scheme, *Optic and Laser Technology*, Vol. 66, pp. 146-150, 2015.

[6] L. Li, Gh-power diode laser materials processing, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 34, No. 21, pp. 231-253. 2000.

[7] G. H. R. Gordani, R. Shoja Razavi, laser surface hardening of 1.1186 and 1.6582 steel, *Quarterly Journal of Materials Engineering, Ma iaumajlesi*, Vol, 1, No. 2, pp. 35-39, 2007. (in persian فارسی)

[8] D. Babu, G .Buvanashekaran, K.R. Balasubramanian Experimental studies on the microstructure and hardness of laser transformation hardening of low alloy steel, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 36, No. 3, pp. 1883–1897, 2012.

[9] R. Li, Y. Jin, Z. Li, K. Qi, A comparative study of high-power diode laser and CO2 laser surface hardening of AISI 1045 steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 9, pp. 3085-3091, 2014.

[10] F. Cordovilla, A. G. Beltra, P. Sancho, J. Dom´ınguez, L. R. de Lara, J. Oca˜na, Numerical/experimental analysis of the laser surface hardening with overlapped tracks to design the configuration of the process for Cr-Mo steels, *Materials & Design*, Accepted Manuscript, 2016.

[11] J. H. Abboud, K. Y. Benyounis, H. Julifkar, M. S. J. Hashmi, Material

response with high power laser in surface treatment of ferrous alloys, *Elsevier*, pp. 1-12, 2017.

[12] M. A .Golozar, Principles and Applications of Heat Treatment of Steels, pp.95-100, Isfahan, *Isfahan University of technology*, 1999.

[13] K. H. Lo, F. T. Cheng, H. C. Man, Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 173, No. 1, pp. 96–104, 2003.

[14] J. D. Bressan, D. P. Daros, A. Sokolowski, R. A. Mesquita, C. A. Barbosa, Influence of hardness on the wear resistance of 17-4ph stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 205, pp. 353–359, 2008.

[15] B. Mahmoudi, A. R sabour Rouh Aghdam, M. Turkamani, The effect of laser parameters on surface hardening martensitic stainless steel 420 by laser pulse Nd: YAG, *Fifteenth Conference on Iran Optics and Photonics, along with the first Iran Photonics,* Isfahan University, Vol. 01, No. 02, pp. 8-10, 2009. (In persian فارسی)

[16] B. Mahmoudi, A. R. Sabour Rouh.Aghdam, M. J. Torkamany, Controlled laser transformation hardening of martensitic stainless steel by pulsed Nd:YAG laser, *Journal of Electronic Science and Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 87-90, 2010.

[17] Gh. Zirehpour, R. Shoja Razavi, E. Moayerifar, Evaluating wear properties of AISI 420 martensitic stainless steel after laser transformation hardening, *International Journal of ISSI*, Vol. 9, No. 2, pp. 5-8, 2012.

[18] K. Benyounis, F. M. Shuaeib, An indepth investigation of gas nitriding of stainless steel: New DOE parametric studies and optimization, *Engineering. Oxford: Elsevier*, pp. 1-12, 2016.

[19] M. Moradi, M. Karami Moghadam, J. Zarei, B. Ganji, The effects of gha laser pulse energy and focal point position on laser surface hardening of AISI 410 stainless steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 311-318, 2017. (in persian فارسی)

[20] S. A. Fetisov, Laser beam hardening of carbon and low alloyed steels: discussion of increased quantity of retained austenite, *Journal of materials Science*, Vol. 34, pp. 4259-4264, 1999.

[21] M. Moradi, A. Mohazabpak, Statistical modelling and optimization of laser percussion micro-drilling on Inconel 718 sheet using response surface methodology, *Journal of Lasers in Engineering*, Vol. 39, pp. 4-6, 2018.

[22] *M*. Azadi, S. Azadi, F. Zahedi, M. Moradi. Multidisciplinary optimization of a car component under NVH and weight constraints using RSM. *ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition,* Vol 15, No. 03, pp 315 – 319, 2009.

[23] K. Pandey, S. Panda, Optimization of bone drilling parameters using grey-based fuzzy algorithm, *Measurement*, Vol. 47, No. 3, pp. 386-392, 2014.