



مدل سازی تجربی فرآیند سخت کاری سطحی لیزری فولاد AISI 410 به کمک روش رویه پاسخ

محمود مرادی^{1*}، حسین عربی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 دی 1396

پذیرش: 08 بهمن 1396

ارائه در سایت: 04 اسفند 1396

کلید واژگان:

سخت کاری لیزری

میکروسختی

فولاد مارتنزیتی 410

میکروساختار

طراحی آزمایش‌ها

چکیده

سخت کاری سطحی لیزری، یکی از تکنولوژی‌های نوین می‌باشد که برای بهبود سطح فلزات به منظور اصلاح خواص تریبولوژیکی سطح مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله بررسی قابلیت سخت کاری 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 به دست می‌آید. مدل سازی متغیرهای کنترل پذیر (توان لیزر، سرعت روبشی و موقعیت فاصله کانونی) با روش رویه پاسخ به منظور مطالعه تاثیر 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 قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در روش مدل سازی رویه پاسخ (RSM) تاثیر پارامتر توان لیزر در نتایج بیشینه سختی، عمق و پهنای سختی، بیشتر از پارامترهای موقعیت فاصله کانونی و سرعت روبشی می‌باشد. همچنین با توجه به درصد پوشش دهی پارامترها توسط معادله رگرسیون به دست آمده روش رویه پاسخ (RSM) مدلی مناسب برای بررسی اثرات پارامترهای فرآیند سخت کاری 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

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

Please cite this article using:

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)

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)

سختی (550 تا 700) میکرون و پهنای سختی (2 تا 2.2) میلی متر رسیده است. ریفتنگ لی و همکاران [9] در سال 2014 پژوهشی در خصوص سخت کاری سطحی لیزری فولاد AISI 1045 با استفاده از دو نوع لیزر متفاوت: دیودی قدرت بالا با توان 3.5 کیلووات و نیز لیزر CO₂ با توان 15 کیلووات انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان و ابعاد هندسی منطقه سخت کاری شده با استفاده از لیزر دیودی توان بالا، بیشتر از لیزر CO₂ می باشد. از بیشینه سختی ماده مورد نظر، ابعاد هندسی (عمق و پهنای منطقه سخت کاری شده) و همچنین زاویه ناشی از انحنا ناحیه سخت کاری شده را با استفاده از روش رویه پاسخ مورد بررسی قرار دادند. فرانسیسکو کوردویلا و همکاران [10] در سال 2016 با شبیه سازی فرآیند سخت کاری لیزری و مقایسه نتایج به دست آمده از فرآیند شبیه سازی سخت کاری لیزری با داده های تجربی سخت کاری لیزری فولاد کم آلیاژ AISI 4140، توانستند اثر روی هم افتادگی خطوط سخت کاری شده با لیزر را بررسی کنند. جعفر هادی عبود و همکاران [11] در سال 2017 مطالعه ای 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 CO₂ 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 می توان به میزان سختی و عمق سختی بالا رسید به طوری که ذوب اتفاق نیفتد و دمای آستینیت برای تشکیل کامل دانه های آستینیت و ساختار یکنواخت بایستی به اندازه کافی افزایش یابد. فولادهای زنگ نزن مارتزیتی به طور همزمان با دارا بودن خواص مکانیکی بهینه، مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش بالایی دارند بنابراین به طور گسترده در صنایع هوافضا و صنایع پتروشیمی و دریایی مورد استفاده قرار می گیرند. از کاربردهای فولاد مارتزیتی AISI 410 استفاده در پره توربین بخار کم فشار در نیروگاه های کشور می باشد و استفاده رایج دیگر آن در تولید شیرآلات پتروشیمی، قطعات موتور جت، قطعات کمپرسور، سوپاپ و انواع پمپ ها و ... می باشد [12]. لو و همکاران [13] در سال 2003 پژوهشی در رابطه با سخت کاری سطحی فولاد زنگ نزن مارتزیتی AISI 440C با لیزر توان بالای Nd:YAG انجام دادند. لایه سخت شده به ضخامت چند صد میکرون، و متشکل از فازهای مارتزیت، آستینیت باقیمانده و کاربیدها ایجاد گردید. میکروساختار و لایه سخت شده با لیزر در اثر پارامترهای بهینه لیزری، به سختی 600-800 ویکرز رسید. برسان و همکاران [14] در سال 2008 تحقیقی مبنی بر تاثیر سختی بر مقاومت در برابر سایش فولاد مارتزیتی 4-17 ph انجام دادند. آنان مقاومت به سایش آن را اندازه گیری کردند. نتیجه این که فولاد مارتزیتی 4-17 ph بعد از سخت کار لیزری نسبت به فولاد پایه مقاومت به سایش خیلی خوبی نشان داد. محمودی و همکاران [15] در سال 2009 تحقیقی در خصوص فولاد زنگ نزن مارتزیتی AISI 420 توسط لیزر Nd:YAG انجام دادند. در شرایط بهینه که با تغییر پارامترهای موثر به دست آمد، توانستند سختی سطح را تا 2.5 برابر حالت آنیل همین فولاد و با سختی 90 درصد حداکثر سختی کوره ای افزایش دهند. بیشینه سختی 488 ویکرز با حداکثر عمق سختی 250 میکرون حاصل شد. محمودی و همکاران [16] در سال 2010 سخت کاری فولاد زنگ نزن مارتزیتی AISI 420 توسط لیزر حالت جامد پالسی Nd:YAG را انجام دادند. پارامترهای فرآیند (انرژی پرتو، مدت زمان و سرعت حرکت) می باشد، در این پژوهش مقدار سختی در عمق ناحیه سخت شده و نیز پهنای ناحیه سخت شده مورد بررسی قرار گرفت و نیز مقدار روی هم افتادگی خطوط سخت کاری

عملیات سخت کاری سطحی لیزری که یکی از فرآوری های لیزری مواد می باشد با استفاده از منبع حرارتی لیزر، انرژی گرمایی سطح را بالا برده و مابقی قسمت های فلز (حجم فلز) به عنوان انتقال دهنده و پخش حرارت با نرخ سرمایش بالا عمل می کند. با توجه به انرژی ورودی محدود فقط سطح گرم می شود و حجم فلز سرد می ماند. خنک کاری خود به خودی در طی فرآیند در فلز ایجاد می گردد. عملیات سخت کاری لیزری یک فرآیند صرفه جویی در انرژی می باشد و حرارت فقط در بخش های محدود ماده منتقل می شود. کمترین پیچش حرارتی در قطعه بعد از عملیات حرارتی ایجاد می شود. بعد از مراحل پایانی کار هیچ گونه عملیات ماشین کاری، سنگ کاری و تمیز کاری مورد نیاز نمی باشد. "شکل 1" شماتیک فرآیند سخت کاری لیزری را نشان می دهد.

فرآوری لیزری مواد در کاربردهای مختلف صنعتی نظیر: سوراخ کاری [1]، برش کاری [2،3]، جوش کاری [4]، تغییر شکل فلزات [5] و سخت کاری لیزری مورد استفاده قرار می گیرد. در کاربردهای اولیه سخت کاری لیزری، لیزرهای توان بالای CO₂ به طور وسیع استفاده می شد. با توسعه لیزر Nd:YAG اخیرا لیزرهای توان بالای دیودی در صنایع مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله به بحث و بررسی پژوهش های انجام گرفته شامل سخت کاری لیزری انواع فلزات از جمله فولادهای کربنی و فولادهای زنگ نزن پرداخته شده است. لی لای و همکاران [6] در سال 2003 پژوهشی در خصوص لیزرهای توان بالای دیودی برای سخت کاری سطحی لیزری انجام دادند. نتایجی که در این پژوهش به دست آمد این بود که در لیزر دیودی توان بالا، حداکثر سختی و همچنین ابعاد هندسی منطقه سخت کاری شده بالاتر از لیزرهای CO₂ و Nd:YAG به دست آمد و داشتن هزینه بالا از معایب لیزر دیودی توان بالا نسبت به لیزرهای CO₂ و Nd:YAG می باشد. غلامرضا گردانی و همکاران [7] در سال 2007 به سخت کاری 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 سرعت های 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 سخت کاری شده بسته به انرژی و سرعت روبش، متفاوت می باشد و هر دو نوع فولاد بیشتر از 0.7 میلی متر عمق نفوذ داشته اند. پاراشاتامان و همکاران [8] در سال 2012 پژوهشی به کمک لیزر Nd:YAG در خصوص اثر پارامترهای فرآیند سخت کاری لیزری روی میکرو ساختار و میزان سختی فولاد EN25 انجام دادند. محدوده توان لیزر استفاده شده 750-1250 وات و سرعت روبشی 500-1000 میلی متر بر دقیقه بود افزایش اساسی در سختی سطحی در حدود 2 برابر سختی فلز پایه از 370 ویکرز به 782 ویکرز به دست آمد. عمق

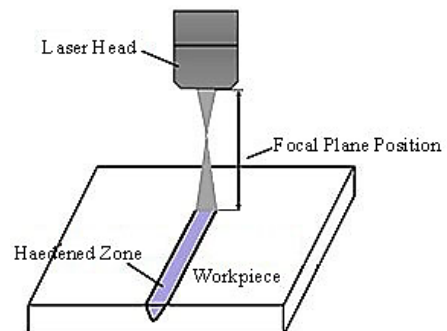


Fig.1 laser hardening schematic

شکل 1 شماتیک سخت کاری لیزری

و داده‌ها در هر رشته را جمع‌آوری می‌کند. به عبارت 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 بهینه‌سازی 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 به صورت رابطه (1) است [21].

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

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].

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

تقریباً در تمام مسائل رویه پاسخ از یک یا هر دوی این چند جمله‌ای‌های تقریب کننده استفاده می‌شود برای برآورد پارامترها در تقریب چند جمله‌ای‌ها، از روش کمترین مربعات استفاده می‌شود. پس از آن، تحلیل رویه پاسخ را براساس رویه برازشده شده انجام می‌گیرد. اگر رویه برازشده شده تقریباً هم‌ارز تحلیل، تقریبی کافی برای تابع واقعی پاسخ باشد، آنگاه تحلیل رویه برازشده 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 (800-1600) وات و سرعت روبشی از (4-8) میلی‌متر بر ثانیه و موقعیت فاصله کانونی از (60-80) میلی‌متر می‌باشد جدول 2 تنظیمات و نتایج آزمایش‌های سخت کاری 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 ماشین کاری آماده‌سازی گردیدند. عملیات سخت کاری سطحی فولاد موردنظر از لیزر دیودی با بیشینه توان 1600 وات استفاده شد. ابعاد هندسی منطقه سخت کاری شده (عمق نفوذ و پهنای آن) طبق "شکل 2" مورد بررسی قرار گرفت.

شده با لیزر و مقاومت در برابر خوردگی این فولاد پس از عملیات سخت کاری با لیزر مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین سختی حدود 500 ویکرز در عمق 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 سخت کاری سطحی لیزری پرداختند. فولاد مارتنزیتی 420 توسط این لیزر به بیشینه سختی 700 ویکرز رسیده است. نتیجه این که مقاومت به خوردگی فولاد مارتنزیتی 420 در اثر سخت کاری لیزری نسبت به فلز پایه افزایش پیدا کرده است و پتانسیل میزان خوردگی آن به 113 میلی‌ولت رسیده است. بن یونس و همکاران [18] در سال 2016 پژوهشی در رابطه با پوشش نیتروژن گازی روی فلزات زنگ‌زن 316 L و 304 براساس روش طراحی آزمایش‌ها انجام دادند. نتیجه این که فولاد 316 L نسبت به فلزات 304 و 316 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 سخت کاری 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 سخت کاری سطحی لیزری، بهبود در سختی سطحی به دست می‌آید. بیشترین عمق لایه سخت شده 350 میکرون و بیشینه سختی سطحی معادل 747 ویکرز به دست آمد.

با توجه به بررسی پژوهش‌های انجام شده، تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای در رابطه با سخت کاری سطحی فولاد مارتنزیتی 410 با لیزر دیودی انجام نشده است. در این مقاله اثر پرتو لیزر دیودی بر فولاد زنگ‌زن مارتنزیتی AISI 410 به منظور فرآیند عملیات سخت کاری سطحی با تغییر مقادیر مختلف پارامترهای لیزر مورد بررسی قرار گرفته شد. شمایک منطقه سخت کاری شده لیزری (از سطح قطعه تا منطقه فلز پایه) طبق "شکل 1" مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق تصمیم بر آن شد که به بررسی و تحقیق تجربی و مدل آماری (معادله رگرسیون) چگونگی تأثیر سه متغیر کنترل‌پذیر: سرعت روبشی لیزر، توان لیزر و موقعیت فاصله کانونی لیزر به منظور بررسی تأثیر آن‌ها بر سختی سطحی، عمق سختی و پهنای سختی، در فرآیند سخت کاری 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 به صورت هدفمند و معنی‌داری در متغیرهای ورودی یا پاسخ ساخته

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 سخت کاری لیزری دیودی

Table 2 Experimental setting of laser surface hardening by diode laser

پارامترهای خروجی			پارامترهای ورودی			
شماره نمونه	توان	سرعت روبشی	موقعیت فاصله کانونی	ماکزیمم سختی	عمق نفوذ	پهنای سختی
	(W)	(mm/s)	(mm)	(hv)	(mm)	(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

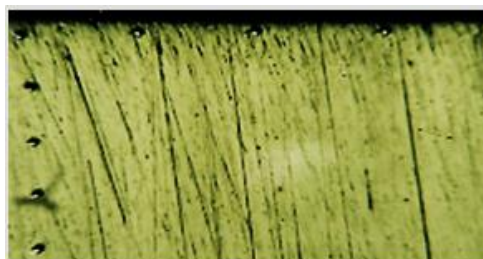


Fig. 4 Cross-sectional view of Vickers indenters in depth and surface of hardened zone

شکل 4 مقطع عرضی فرورونده های ویکرز در میکرو سختی سنجی در عمق و سطح

زده شد را نشان می دهد.

"شکل 5" توزیع انرژی پرتو لیزر را نشان می دهد. چنانچه در "شکل 5" دیده می شود با توجه به این که حرارت بیشتری در مرکز پرتو لیزر نسبت به گوشه های پرتو وارد می کند، بنابراین حرارت بیشتری در مرکز پرتو وجود داشته و با فاصله گرفتن از مرکز، شدت انرژی پرتو لیزر کمی افت پیدا می کند.

در این مقاله افزایش موقعیت قطعه کار تا کلگی لیزر (موقعیت فاصله کانونی) به معنای فاصله گرفتن از کلگی لیزر می باشد 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

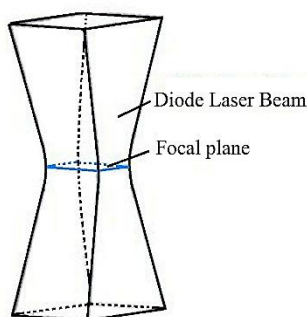


Fig. 5 Schematic of diode laser beam distribution

شکل 5 شماتیک توزیع پرتو لیزر دیودی

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

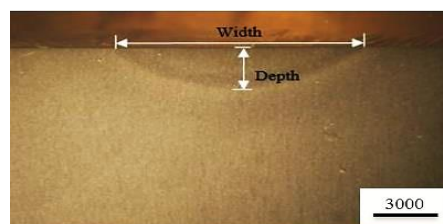


Fig. 2 geometrical dimensions of hardened zone (width and depth)

شکل 2 ابعاد هندسی منطقه سخت شده (عمق و پهنای)

"شکل 3" تصویر 17 نمونه های سخت کاری شده از فولاد مارتنزیتی 410 توسط لیزر دیودی را نشان می دهد. نمونه ها پس از عملیات سخت کاری سطحی لیزری برش خورده و مانع گردیدند. در مقطع عرضی نمونه ها برای هر نمونه، میکروسختی ها از سطح تا عمق نفوذ لیزر و همچنین در پهنای اندازه گیری شد. برای دستگاه میکروسختی، مقدار نیرو 100 گرم در مدت زمان 30 ثانیه اعمال شده است. ناحیه سخت شده جهت متالوگرافی نمونه ها، به کمک معرف ویللا که ترکیب شیمیایی آن شامل: (5 سی سی اسید کلریدریک، 100 سی سی اتیل الکل، 2 گرم اسدپیکریک) می باشد، آماده سازی گردیدند و ریزساختار نمونه های 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 نمونه های سخت کاری سطحی شده لیزری دیودی

با افزایش درصد کربن در فولاد، سختی پذیری و ماکزیمم سختی بالاتر می رود. علت این افزایش، بالاتر بودن سختی پذیری می باشد. برای بررسی عوامل موثر بر سختی پذیری باید به عوامل موثر بر دگرگونی پرلیت توجه داشت. به طور کلی هر عاملی که خطوط تشکیل پرلیت در نمودار CCT را به سمت راست منتقل کند امکان تشکیل مارتنزیت را در آهنگ های سرد شدن کمتر فراهم می کند. بنابراین، انتقال دماغه نمودار CCT به سمت راست همراه با افزایش سختی پذیری است. به بیان دیگر می توان گفت، هر عاملی که باعث کاهش آهنگ جوانه زنی و رشد پرلیت شود (زمان لازم برای جوانه زنی و رشد پرلیت را افزایش دهد) سختی پذیری را در فولادها افزایش می دهد. این عوامل عبارتند از: اندازه دانه های آستنیت، درصد کربن، عناصر آلیاژی، آخال و ناخالصی های غیرفلزی، همگن بودن ریز ساختار. از عوامل مهم و تاثیرگذار افزایش درصد کربن فولاد می باشد. "شکل های 6 و 7" روند تغییرات میکروسختی نمونه های 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 می توانیم 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 می باشد و اگر خطوط ترسیم شده با یکدیگر موازی باشند، نشان از بی تاثیر بودن تعامل بین پارامترهای مربوطه دارد. همان طور که در "شکل 8" مشاهده می گردد پارامترهای سرعت روبشی لیزر- موقعیت فاصله کانونی و موقعیت فاصله کانونی- توان لیزری و سرعت

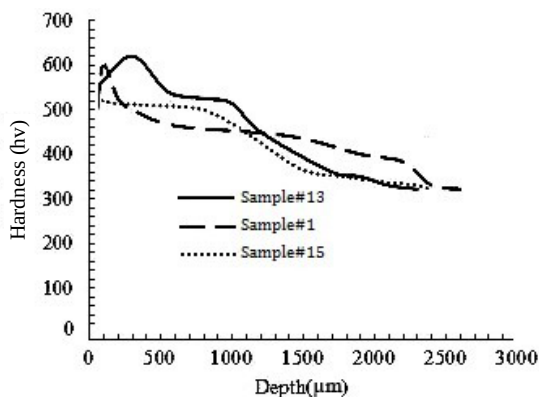


Fig. 6 Microhardness profile at Depth of laser hardened area of AISI410 steel

شکل 6 پروفیل میکروسختی در عمق ناحیه سخت کاری شده لیزری فولاد AISI410

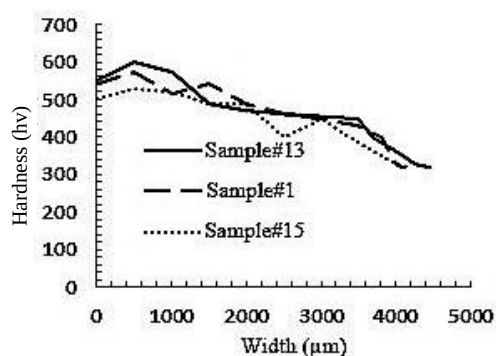


Fig. 7

Microhardness profile at Width of laser hardened area of AISI410 steel

شکل 7 پروفیل میکروسختی در پهنا ناحیه سخت کاری شده لیزری فولاد AISI410

استفاده را به تصویر کشیده است. لیزر مورد استفاده از نوع لیزر دیودی نیمه رسانا با موج پیوسته ساخت مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران می باشد. فاصله کانونی لیزر 400 میلی متر، فاصله کلگی لیزر تا لکه کانونی 60 میلی متر می باشد. طول موج لیزر 8.8 نانومتر و رنگ آن نامرئی می باشد. صفحه کانونی آن به ابعاد 8×1.5 میلی متر می باشد.

3- نتایج و بحث

در این بخش بطور کلی اثر پارامترهای توان لیزر، سرعت روبشی و موقعیت فاصله کانونی لیزر دیودی بر روی سخت کاری سطحی فولاد 410 مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی توزیع میکروسختی در عمق و پهنا حاصل از سخت کاری فولاد پایه و ابعاد هندسی منطقه سخت شده (پهنا و عمق نفوذ)، میکروساختار ناحیه سخت کاری شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس مدل سازی پارامترهای فرآیند سخت کاری سطحی لیزر دیودی با کمک روش رویه پاسخ مورد تحقیق قرار گرفت. سرعت روبشی از (4-8) میلی متر بر ثانیه، موقعیت فاصله کانونی از (60-80) میلی متر توان لیزری از (-800 1600) وات به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند.

3-1- سختی سطحی بیشینه

با توجه به تحلیل های صورت گرفته مقدار P^1 ، مشخص کننده پارامترهای موثر در فرآیند می باشد بطوری که هر گاه مقدار آن کمتر از 0.05 باشد. آن پارامتر موثر می باشد [23]. طبق جدول 4 آنالیز واریانس برای سختی بیشینه مشاهده می گردد که همه پارامترهای اصلی (توان لیزری، موقعیت فاصله کانونی لیزر و سرعت 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 می باشند. 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 می گردد. در گام بعدی تحلیل، پارامترهای غیرمؤثر از مدل حذف شده و تحلیل براساس پارامترهای مؤثر انجام گرفته است. مشاهده می شود که معادله رگرسیون حاصله، مؤثر و عدم برازش، به عنوان پارامتر غیرمؤثر بیان شده است. با توجه به تحلیل های انجام شده براساس مدل اصلاح شده، معادله رگرسیون نهایی براساس مقادیر کد شده از پارامترهای مؤثر به صورت رابطه (3) معرفی گردیده است.

$$S = 500.06 - 13.06 P - 12.56 FPP + 24.69 P + 18.00 P^2 + 9.36 S \times FPP - 6.37 S \times P - 11.88 FPP \times P \quad (3)$$

R-sq میزان پوشش دهی پارامترها توسط معادله رگرسیون به دست آمده، می باشد، همان طور که مشاهده می شود در این تحلیل مقدار 96.36 درصد که توسط معادله رگرسیون پوشش دهی شده است مقدار قابل توجهی می باشد. نمودارهای تأثیر پارامترهای اصلی، میانگین پاسخی است که برای بررسی تأثیر هر فاکتور بر روی پاسخ به کار می رود. در این نمودارها محور افقی مربوط به یک پارامتر ورودی فرآیند و محور عمودی به خروجی آزمایش ها، اختصاص می یابد. اگر در نمودار تأثیر پارامترهای اصلی، شیب خط ترسیم شده زیاد باشد (در شیب های مثبت یا منفی) نشان از مؤثر بودن پارامتر در نظر گرفته شده، می باشد و اگر شیب خط ترسیم شده کم و ملایم باشد، نشان از بی تأثیر بودن یا تأثیر کم پارامتر مربوطه دارد.

¹ P-Value

جدول 4 آنالیز واریانس تحلیل مدل اصلاح شده برای سختی بیشینه

عبارت‌ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار T	مقدار P
مدل	7	25284.1	3612.02	61.58		0.000
عبارت‌های خطی	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 توان دو	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				
$R-s q = 97.95\%$						
$R-s q(a d j) = 96.36\%$						

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

رویشی- 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 به منظور 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 10-a" مشخص است کاهش موقعیت فاصله کانونی باعث نزدیک شدن سطح قطعه کار به مرکز تمرکز انرژی می‌گردد پس انرژی تابیده شده به سطح فولاد افزایش می‌یابد. با نزدیک شدن قطعه کار به مرکز تمرکز انرژی لیزر، انرژی ورودی به سطح قطعه کار افزایش می‌یابد بنابراین سختی بیشینه سختی می‌یابد افزایش توان نیز همان طور که توضیح داده شد باعث افزایش سختی می‌گردد. چنانچه از نمودار "شکل 10-b" استنباط می‌گردد با کاهش موقعیت فاصله کانونی و همچنین کاهش سرعت روبشی میزان انرژی ورودی به سطح قطعه کار افزایش می‌یابد بنابراین بیشینه سختی افزایش می‌یابد همان طور که از نمودار "شکل 10-c" دیده می‌شود با کاهش سرعت روبشی لیزر و افزایش توان لیزری سختی بیشینه افزایش می‌یابد.

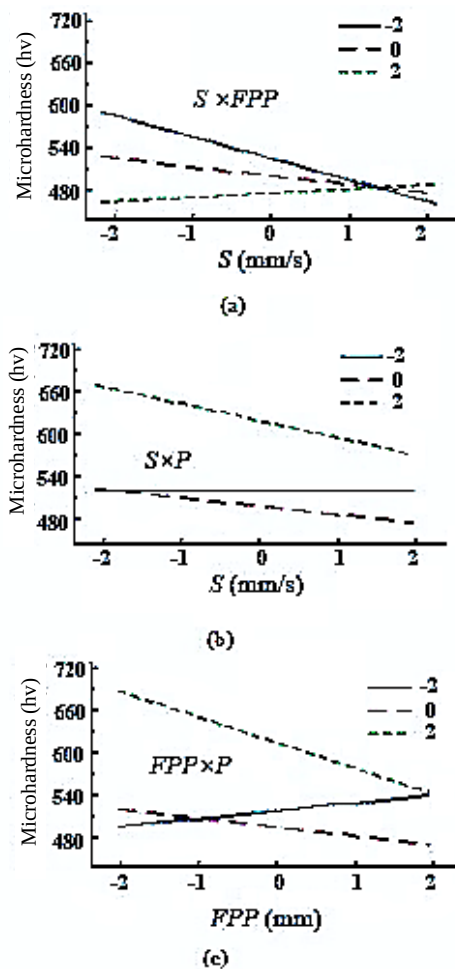


Fig. 8 Interaction Plot for Maximum Hardness

شکل 8 نمودارهای تعاملات بین پارامترهای سختی

بین جملات اصلی، توان لیزری، سرعت روبشی لیزر و موقعیت فاصله کانونی، پارامترهای موثر و بقیه جملات غیرموثر می باشند. با توجه به تحلیل های انجام شده معادله رگرسیون اصلاح شده با توجه به پارامترهای موثر به صورت رابطه (4) بیان می گردد.

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

آنچه از نمودار "شکل 11-a,b,c" مشاهده می گردد با افزایش سرعت روبشی لیزر، (شکل a) عمق سختی کاهش می یابد ولی با کاهش سرعت روبشی لیزر، زمان تعامل لیزر با سطح ناحیه سخت کاری شده بیشتر شده و این سطح در معرض حرارت بیشتری قرار می گیرد بنابراین عمق سختی افزایش می یابد. همچنین با کاهش موقعیت فاصله کانونی (شکل b) عمق سختی افزایش پیدا می کند. آنچه از نمودارها مشخص می باشد با افزایش توان لیزر (شکل c) عمق سختی افزایش پیدا می کند این امر بدیهی است که با افزایش توان لیزر سطح قطعه در معرض حرارت بیشتری قرار می گیرد و انرژی بیشتری جذب سطح می شود، بنابراین عمق سختی افزایش پیدا

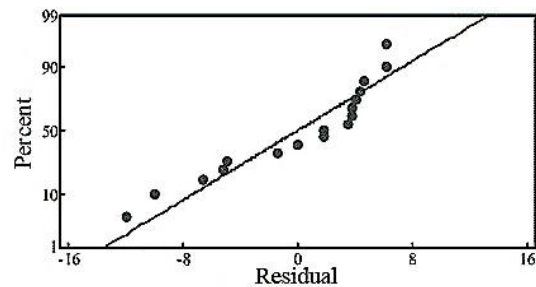


Fig. 9 The residual plot for maximum hardness

شکل 9 نمودار باقیمانده (نرمال) برای سختی بیشینه

در نتیجه سختی بیشینه افزایش می یابد. کاهش سرعت روبشی باعث می گردد که زمان تعامل پرتو تابیده شده به سطح قطعه کار افزایش یافته بنابراین سختی بیشینه افزایش می یابد.

2-3- عمق ناحیه سخت کاری شده

جدول 5 آنالیز واریانس مدل اصلاحی برای عمق سختی را نمایش می دهد. در

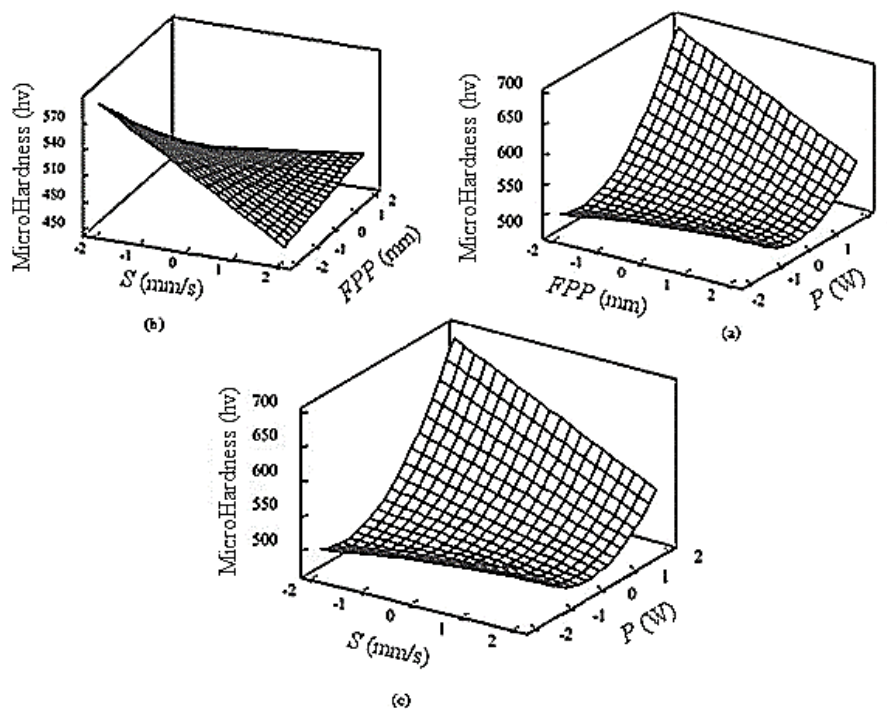


Fig. 10 Surface Plot of Maximum of Hardness, a: FPP-P diagram, b: FPP-S diagram, c: S-P diagram

شکل 10 منحنی های 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					
مقدار P	مقدار T	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی
0.000		19.79	1.60729	4.82188	3
0.000		19.79	1.60729	4.82188	3
0.002	-3.93	15.58	1.26563	1.26563	1
0.001	-4.12	17.00	1.38062	1.38062	1
0.000	5.18	26.79	2.17563	2.17563	1
			0.08121	1.05577	13
0.100		9.42	0.09416	1.03577	11
			0.01000	0.02000	2
				5.87765	16
R- s q= 82.04%				R- s q(a d j) = 77.89%	

می کند.

3-3- پهنای منطقه سخت کاری شده

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

$$D = 8.5506 + 0.1862 S + 0.1750 FPP - 0.2188 P \quad (5)$$

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

4- نتیجه گیری

در این مقاله اثر پارامترهای لیزری بر سخت کاری سطحی فولاد 410 مورد بررسی قرار گرفت. لذا با توجه به آزمایش های انجام شده می توان به نتایج زیر

"شکل 12" نمودارهای رویه پاسخ مربوط به عمق سختی را نشان می دهد. "شکل 12-a" مشخص می باشد که بیشترین مقدار عمق سختی در پائین ترین سرعت روبشی لیزر و بالاترین توان لیزر اتفاق می افتد. همچنین با افزایش سرعت روبشی لیزر و کاهش توان لیزر عمق سختی کاهش پیدا می کند. دلیل این امر این می باشد که وقتی سرعت روبشی لیزر افزایش پیدا می کند سطح قطعه کار در معرض حرارت کمتری قرار می گیرد و زمان تعامل لیزر با قطعه کار کاهش می یابد و در پی آن انرژی کمتری توسط سطح فولاد جذب می شود و همچنین با کاهش توان لیزر انرژی حرارتی کمتری به سطح می رسد.

آنچه از "شکل 12-b" مشخص است با کاهش سرعت روبشی لیزر و کاهش موقعیت فاصله کانونی، عمق ناحیه سخت کاری شده افزایش پیدا می کند. این امر به این علت است که با کاهش موقعیت فاصله کانونی، فاصله قطعه کار به ناحیه تمرکز انرژی کاهش می یابد و انرژی تابیده شده لیزر به سطح فولاد افزایش پیدا می کند. این عامل باعث بیشتر شدن عمق سختی می شود و همچنین با کاهش سرعت روبشی لیزر، زمان تعامل لیزر با قطعه کار افزایش می یابد و در پی آن انرژی بیشتری توسط سطح فولاد جذب می شود و این باعث افزایش عمق سختی می شود.

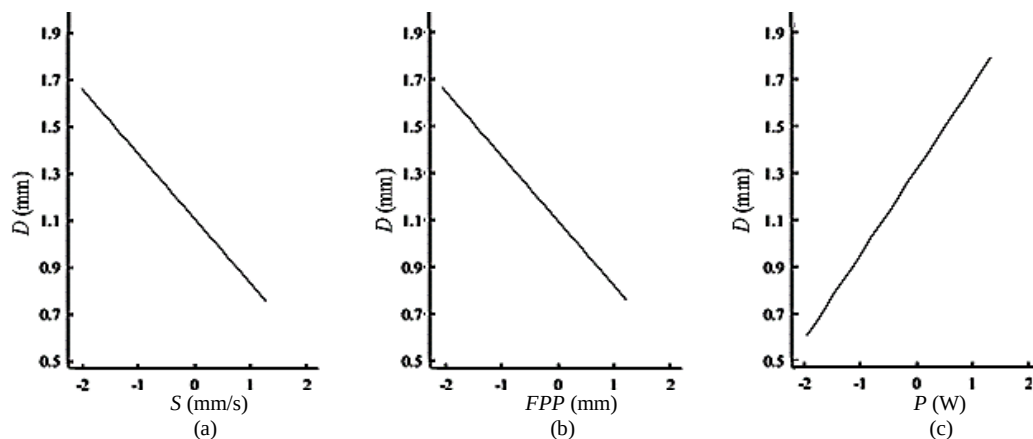


Fig. 11 Main Effects Plot for Depth of Hardness

شکل 11 نمودار تأثیر پارامترهای اصلی بر عمق سختی

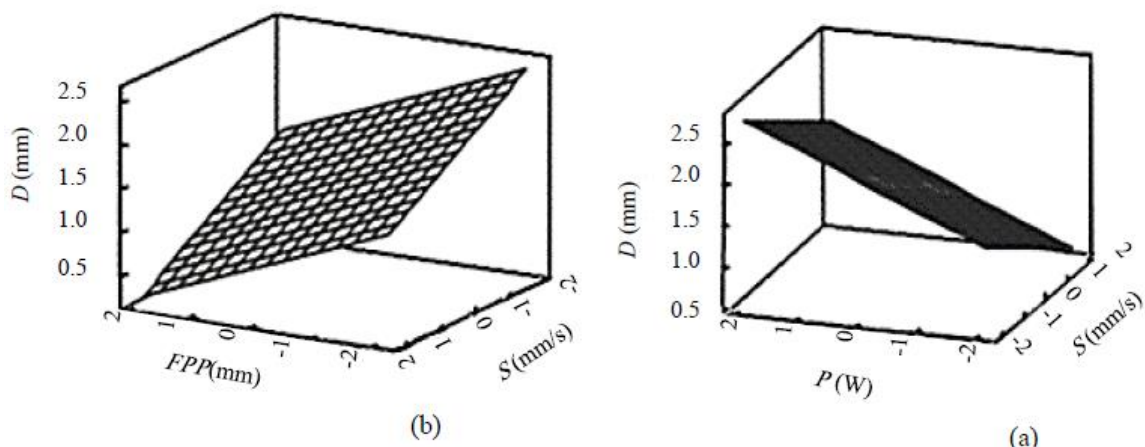


Fig. 12 Surface Plot of Depth of Hardness ,a: S-P diagram, b: FPP-S diagram

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

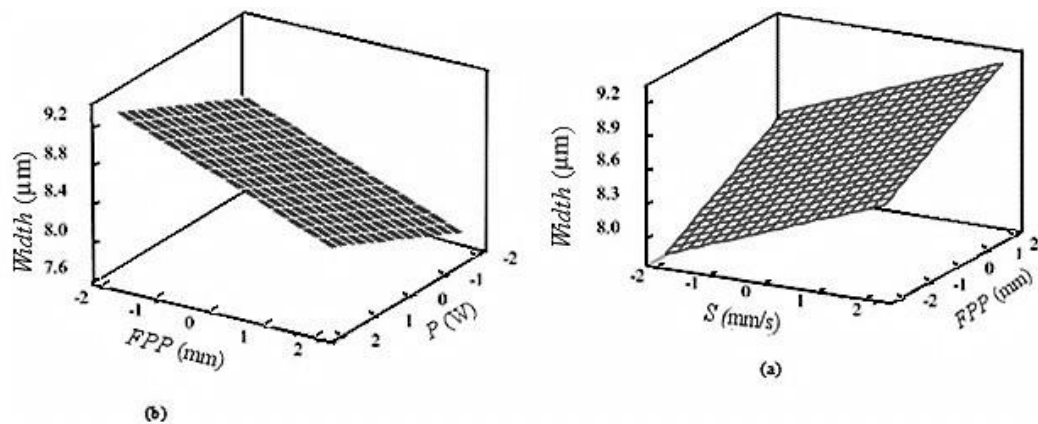


Fig. 13 Surface Plot of Width of Hardness a: FPP-S diagram, b: FPP-P diagram

شکل 13 نمودارهای رویه پاسخ پهنای سختی، 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%		

5- مراجع

استناد کرد:

1. سخت کاری استحاله ای لیزری فولاد 410 باعث ایجاد ساختاری متشکل از فاز فریت در زمینه مارتنیزیت شد که در نتیجه استحاله حالت جامد و انحلال و یا توزیع مجدد فریت ها بود.
2. بررسی ها نشان می دهد که با افزایش توان لیزر کاهش سرعت روبشی و موقعیت فاصله کانونی به دلیل افزایش انرژی لیزری، میزان حرارت ورودی به سطح قطعه کار افزایش می یابد، بنابراین مقدار سختی و عمق ناحیه سخت کاری شده افزایش می یابد.
3. با کاهش توان لیزری و افزایش موقعیت فاصله کانونی و سرعت روبشی، پهنای ناحیه سخت کاری شده افزایش می یابد.
4. در حالت ایده آل در تست های انجام شده آزمایشگاهی، میکروسختی فولاد 410 بعد از عملیات سخت کاری لیزری، باتوان 1600 وات، ثانیه، حدوداً 620 ویکرز و عمق سختی 1.8 میلی متر می گردد.
5. در مدل سازی 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 می باشد.
6. با توجه به درصد پوشش دهی پارامترها توسط معادله رگرسیون به دست آمده، و انطباق معادله رگرسیون و آنالیز واریانس با نمودارهای باقیمانده، مدل سازی تجربی با روش رویه پاسخ مدلی مناسب برای بررسی اثرات پارامترهای فرآیند سخت کاری سطحی با لیزر دیودی می باشد.

- 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. Shuaib, 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.
- 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