

افزایش سختی سطحی فولاد مارتنزیتی ۴۱۰ با استفاده از لیزر دیودی توان بالا

محمود مرادی، حسین عربی

مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر

مرکز تحقیقات فرآوری لیزری مواد دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۰۲/۱۹ - پذیرش مقاله: ۹۶/۱۰/۱۵)

چکیده

سختکاری سطحی لیزری، یکی از تکنولوژیهای امید بخش است که برای بهبود سطح فلزات بمنظور اصلاح خواص تریبولوژیکی سطح بدون تاثیر بر روی خواص حجمی ماده مورد استفاده قرار میگیرد. در این مقاله بطور تجربی به بررسی قابلیت سختکاری سطحی لیزری فولاد ضد زنگ مارتنزیتی ۴۱۰ با استفاده از لیزر دیودی توان بالای پیوسته با حداکثر توان ۱۶۰۰ وات پرداخته می شود. توان لیزری، سرعت روبش و فاصله از کانون پارامترهای متغیر در این تحقیق مورد بررسی است. تاثیر پارامترهای فرآیند روی عمق و پهنای لایه سخت شده و میکروسختی در منطقه مورد تاثیر لیزر مورد تحقیق قرار گرفته است. میکرو ساختار ناحیه تحت تاثیر لیزر، مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش، میزان سختی و عمق بیشتر سختی حاصل می گردد. همچنین دستاوردها حاکی از آن است که با کاهش موقعیت فاصله کانونی، عمق سختی بیشتر و پهنای سختی کمتر بدست می آید. مشاهدات نشان می دهد که در لایه سخت شده میزان سختی ۶۲۰ ویکرز با ۱.۸ میلیمتر عمق سختی بدست آمده است. سختکاری سطحی فولاد ۴۱۰ با لیزر دیودی حدودا ۱.۴۳ برابر سختی عملیات حرارتی کوره ای است. واژه های کلیدی: سختکاری لیزری، میکروسختی، فولاد مارتنزیتی ۴۱۰، میکروساختار.

Increasing the Surface Hardness of 410 Martensitic Stainless Steel Using High Power Diode Laser

Mahmoud Moradi, Hossein Arabi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Laser Materials Processing Research Center, Malayer University, Malayer, Iran

(Received 9 May 2017, accepted 5 January 2018)

Abstract

Laser surface hardening is a promising technology used for surface modification to improve the tribological properties without affecting on the bulk properties of materials. This paper surveys the capability of laser surface hardening of AISI 410 martensitic stainless steel by using continues high power diode laser with a maximum power of 1600 W, experimentally. Laser power, scanning speed and focal plane position were variable parameters in this research. The influence of process parameters on depth and width of hardened layer and microhardness profile of laser treated areas were investigated. Microstructure of the laser treated zone were studied and compared. Results show that by increasing laser power and decreasing scanning speed, higher hardness and depth achieved. Results also reveal that by decreasing in focal plane position higher depth and lower width achieved. Observations indicated that a hardened surface layer of about 1.8 mm depth and 620 HV hardness is obtained. The surface hardening of the 410 stainless steel by diode laser is about 1.43 times the hardness of the furnace heat treatment.

Key words: Laser Surface Hardening, AISI 410, High Power Diode Laser, Microhardness, Microstructure.

E-mail of Corresponding author: moradi.malayeru@gmail.com.

مقدمه

امروزه کاربردهای صنعتی پرتو لیزر یکی از منابعی است که با چگالی توان بالا برای فرآوری مواد بکار می‌رود. این ویژگی بدلیل تمرکز بسیار بالای انرژی آن است [۲۱]. فرآوری لیزری مواد بتازگی برای کارهای مختلف صنعتی نظیر: جوشکاری [۳]، سوراخکاری [۴] سختکاری لیزری، برشکاری و شکل‌دهی لیزری فلزات [۵-۱۰] مورد استفاده قرار می‌گیرد. مواد بعنوان یک رابط برای محیط اطراف عمل می‌کنند. تماس با محیط باعث ایجاد سایش، فرسایش و خوردگی می‌گردد [۱۱]. راه حل صنعتی برای به حداقل رساندن یا حذف این عیوب بر اساس تغییر در ماکرو ساختار سطح و یا ترکیب عناصری به سطح که این عناصر روی ماده اصلی بی‌اثرند، پایه گذاری می‌گردد [۱۲]. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی در صنایع مختلفی همچون نفت، گاز، پتروشیمی، صنایع غذایی و دارویی مصارف گوناگونی دارند [۱۳]. از این آلیاژها برای ساخت لوله‌ها و ورق‌های مقاوم در برابر خوردگی که معمولا در محیط‌های اسیدی استفاده می‌شود و قیمت آن نسبت به گریدهای مشابه ارزان‌تر است، استفاده می‌شود. یک مورد از انواع فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۰ از سری ۴۰۰ است. این نوع از فولادها که کاربردهای بسیار متنوعی در صنایع ذکر شده دارد. یکی از دست آوردهای عملیات سطحی با لیزر، سختکاری سطحی است، به این صورت که لیزر مورد استفاده با پارامترهایی از پیش تنظیم شده انتخاب می‌شود. این پارامترها بسته به نوع لیزر مورد استفاده و نیز نوع ماده مورد آزمایش قابل تغییر است. پس از انتخاب پارامترهای مناسب، فرآیند سختکاری لیزری انجام می‌شود و سختی سطح فولاد مورد نظر بهبود می‌یابد که می‌توان در این فرآیند با تبدیل کردن فاز فریتی و آستنیتی فولاد به مارتنزیت از سختی بیشتری بهره‌مند شد [۱۴]. غلامرضا زیره پور و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۴ به ارزیابی رفتار خوردگی الکتروشیمیایی فولاد AISI420 پس از سختکاری سطحی لیزری پرداختند.

فولاد مارتنزیتی ۴۲۰ توسط این لیزر به بیشینه سختی ۷۰۰ ویکرز رسیده است. نتیجه اینکه مقاومت به خوردگی فولاد مارتنزیتی ۴۲۰ در اثر سختکاری لیزری نسبت به فلز پایه افزایش پیدا کرده است و پتانسیل میزان خوردگی آن به ۱۱۳ میلی‌ولت رسیده است. مرادی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۷ پژوهشی در رابطه با سختکاری سطحی فولاد مارتنزیتی ۴۱۰ با توان بیشینه ۷۰۰ وات با لیزر Nd:YAG انجام دادند. موقعیت نقطه کانونی و انرژی پالس لیزر پارامترهای متغیر لیزر در این تحقیق هستند. نتایج نشان داد که در نتیجه استحاله حالت جامد و انحلال کاربیدها در زمینه فولاد در فرآیند سختکاری سطحی لیزری، بهبود در سختی سطحی بدست می‌آید. بیشترین عمق لایه سخت شده ۳۵۰ میکرون و بیشینه سختی سطحی معادل ۷۴۷ ویکرز بدست آمد. محمودی و همکاران [۱۷] سختکاری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۲۰ توسط لیزر حالت جامد پالسی Nd:YAG را انجام دادند که در این مقاله مقدار سختی در عمق ناحیه سخت شده و نیز پهنای ناحیه سخت شده، مورد بررسی قرار گرفته شد و نیز مقدار روی هم افتادگی خطوط سختکاری شده با لیزر و مقاومت در برابر خوردگی این فولاد پس از عملیات سختکاری با لیزر مورد ارزیابی قرار گرفت. لو و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۰۳ پژوهشی در رابطه با سخت شدن سطح فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۴۰C با لیزر توان بالا Nd:YAG CW انجام دادند. یک لایه سخت به ضخامت چند صد میکرومتر، متشکل از مارتنزیت، آستنیت باقیمانده و کاربیدها تشکیل شده است. ریز ساختار و سختی لایه تحت سختی با لیزر، وابسته به پارامترهای پردازش لیزری، با رسیدن سختی به محدوده ۶۰۰-۸۰۰ ویکرز بدست آمد. در نمونه سختکاری شده مقادیر بیشتری از کاربیدها دیده شد. مقاومت به سایش فولاد ۴۴۰C پس از سختکاری با لیزر به مقدار قابل توجهی بهبود یافته و در مقایسه با روش عملیات حرارتی معمولی حدود سه برابر افزایش یافته است. لی لای [۱۹] در سال ۲۰۰۳ پژوهشی درخصوص

می‌دهد. فازهای مارتنزیت و آستنیت باقی مانده با سختی ۴۰۰ تا ۵۰۰ ویکرز است، منطقه متاثر از حرارت متشکل از فازهای مارتنزیت، آستنیت باقی مانده و کاربید بوده و دارای سختی ۸۰۰ ویکرز است. عمق نمونه سختکاری شده بین ۱ تا ۲ میلی‌متر است. بابو و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۲ پژوهشی با لیزر Nd:YAG در خصوص اثر پارامترهای فرآیند سختکاری لیزری روی میکرو ساختار و میزان سختی در طی سختکاری لیزری بر روی فلز EN25 انجام دادند. محدوده توان لیزری ۷۵۰-۱۲۵۰ وات و سرعت اسکن ۵۰۰-۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده گردید. با بررسی ریز ساختار از لایه سطحی فلز، فاز مارتنزیت صفحه‌ای مشاهده گردید. افزایش اساسی در سختی سطحی در حدود ۲ برابر سختی ماده پایه بدست آمد. در سال ۲۰۱۲ زیره‌پور و همکاران [۲۵] تحقیقی روی فولاد ۴۲۰ به کمک لیزر Nd:YAG انجام دادند. آنها پارامترهای بهینه سختکاری لیزری را مورد بررسی قرار دادند. سپس مقاومت به سایش نمونه‌های سختکاری شده لیزری را با پارامترهای مشابه نمونه‌های خام مورد مقایسه قرار دادند. سختی سطحی بدست آمده حدود ۷۰۰ ویکرز گزارش شد. در سال ۲۰۰۶ غلامرضا گردانی و همکاران [۲۶] تحقیقی در رابطه با تاثیر انرژی Nd:YAG و سرعت رویش آن روی سختی سطحی دو نوع فولاد کربنی ۱.۱۱۸۸ و فولاد آلیاژی ۱.۶۵۸۲ که هر دو میزان کربن مساوی ۰.۴ درصد و منگنز مساوی ۰.۸ درصد انجام دادند. فولاد کربنی تا ۵۰۰ ویکرز و فولاد آلیاژی تا ۹۰۰ ویکرز سختی رسید. بن یونس و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۶ پژوهشی در رابطه با پوشش نیترایدینگ گازی روی فلزات استنلس L ۳۱۶، ۳۰۴ بر اساس روش طراحی آزمایش‌ها انجام دادند. نتیجه اینکه فلز L ۳۱۶ نسبت به فلزات ۳۱۶ و ۳۰۴ در درجه حرارت بالاتر از ۴۵۰ درجه، سختی بهتری می‌دهد.

استفاده از لیزر دیودی برای بالا بردن عمق و پهنای سختی و همچنین بالا بردن یکنواختی سختی در منطقه سختکاری شده است که در لیزرهای دیگر یک چالش

کاربردهای مستقیم لیزرهای توان بالای دیودی برای انواع فرآوری‌های مواد از جمله سختکاری سطحی لیزری انجام داد و مزایای ویژه و معایب فرآوری‌های مواد با لیزر دیودی در مقایسه با لیزرهای Nd:YAG و CO₂ و لیزرهای اگزایمر را بیان نمود. تلاش شده است که اختلافات اساسی پرتوها و خصوصیات تعامل مواد و رفتار مواد شناسایی گردد. برسانا و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۰۸ تحقیقی مبنی بر تاثیر سختی روی مقاومت به سایش فولاد مارتنزیتی ۴۲۰ - ۱۷ را انجام دادند. آنان مقاومت به سایش نمونه‌های مورد استفاده از این ماده را با استفاده از دستگاه پین روی دیسک اندازه‌گیری کردند. بهزاد محمودی و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۰۹ پژوهشی در خصوص سختکاری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۲۰ توسط لیزر Nd:YAG مورد بررسی قرار دادند که در این آزمایش در شرایط بهینه با تغییر پارامترهای موثر توانستند سختی سطح را تا ۲.۵ برابر حالت آیل همین فولاد یا سختی ۹۰٪ حداکثر سختی کوره‌ای افزایش دهند. بادکار و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۰۹ سختکاری فولادی که دانه‌های نزدیک به ASTM درجه ۳ را دارد با لیزر Nd:YAG, 2Kw cw انجام دادند. در این پژوهش توان لیزر ۲۵۰-۷۵۰ وات و سرعت رویش لیزر ۰-۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و همچنین موقعیت نقطه کانونی (از ۱۰-۳۰ میلی‌متر) در نظر گرفته شد. در گرمای وارد شده به ماده مورد نظر توسط لیزر، هندسه پهنای دانه حاصل از جوش سخت شده (HBW)، عمق سخت شده (HD) و همچنین زاویه وارده از مشخصات منطقه سخت شده (AEHB) با استفاده از روش رویه پاسخ (RSM) را مورد بررسی قرار گرفت. جوئیا و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۰ پژوهشی در رابطه با سختی فلز کار سرد شده D6 با کمک لیزر فایبر انجام دادند. این تحقیق اثر متغیرهای لیزری بر روی سختی ناشی از سختکاری لیزری است. میزان جذب انرژی پرتو لیزر تقریباً برابر ۳۷ درصد اندازه‌گیری شد و عملیات حرارتی روی قطعه دو منطقه مختلف، ذوب شده و منطقه متاثر از حرارت را تشکیل

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی فولاد ضد زنگ ۴۱۰ مورد آزمایش و فولاد ۴۱۰ استاندارد (wt %).

نام عنصر / درصد وزنی	فولاد ۴۱۰ استاندارد	فولاد ۴۱۰ مورد آزمایش
C	۰.۱۵	۰.۱۵
Si	ماکزیمم ۱	۰.۲۸
Ni	ماکزیمم ۰.۵	۰.۱۲
Mn	ماکزیمم ۱	۰.۵۱
P	ماکزیمم ۰.۰۴	۰.۰۱۸
S	ماکزیمم ۰.۰۳	۰.۰۲۴
Cr	۱۳.۵-۱۱.۵	۱۳.۵
Fe	مابقی	مابقی

چنانچه در جدول ۲ دیده می‌شود، محدوده پارامترهای آزمایشگاهی فرآیند لیزر به قرار زیر است: توان لیزر از (۱۲۰۰-۱۶۰۰) وات و سرعت روبشی از (۴-۷) میلی‌متر بر ثانیه و فاصله کلگی لیزر تا سطح قطعه (۶۵-۷۵) میلی‌متر است. شکل شماره ۱ تصویر دستگاه لیزر دیودی در حین فرآیند سختکاری لیزری را نشان می‌دهد. فاصله کانونی لیزر دیودی مورد استفاده ۴۰۰ میلی‌متر، فاصله کلگی لیزر تا لکه صفحه کانونی ۶۰ میلی‌متر است. طول موج لیزر ۸۰۸ نانومتر و رنگ آن نامرئی است. صفحه کانونی این لیزر دیودی به ابعاد ۸۰×۱.۵ میلی‌متر است.

جدول ۲. تنظیمات متغیرهای ورودی سختکاری لیزری.

شماره آزمایش	متغیرهای ورودی		
	توان لیزری (w)	فاصله کلگی لیزر تا سطح قطعه (mm)	سرعت روبشی (mm/s)
۱	۱۴۰۰	۶۵	۵
۲	۱۲۰۰	۷۰	۶
۳	۱۴۰۰	۶۵	۷
۴	۱۶۰۰	۷۰	۶
۵	۱۲۰۰	۷۰	۴
۶	۱۴۰۰	۷۵	۵

تاثیر گذار تلقی می‌گردد. در این مطالعه تاثیر پارامترهای توان لیزری، سرعت روبش و فاصله کلگی لیزر تا سطح قطعه^۱ (SOD) بر روی میزان سختی سطحی و ابعاد هندسی منطقه سختکاری شده (عمق نفوذ و پهنای آن) فلز ۴۱۰ با استفاده از لیزر دیودی توان بالا مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین روند تغییرات میکروسختی از سطح فولاد نیز اندازه‌گیری و بررسی گردیدند. میکروساختار ناحیه سختکاری شده مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین سیکل عملیات حرارتی کوره‌ای جهت بررسی سختی و میکروساختار آن در مقایسه با سختکاری لیزری مورد بررسی قرار گرفت.

تحقیقات آزمایشگاهی

ماده بکار رفته در این تحقیق فولاد مارتنزیتی ۴۱۰ با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۱ که با فولاد استاندارد نیز مقایسه شده است، می‌باشد. ترکیب شیمیایی فولاد مورد نظر با استفاده از دستگاه طیفسنجی نشر اتمی (مدل ARL-3460 ساخت کشور سوئیس در شرایط دمایی ۲۳ درجه سانتیگراد و رطوبت ۳۳٪) اندازه‌گیری گردید. نمونه‌های آزمایشگاهی از میل‌گردی با قطر ۶۵ میلی‌متر و به ضخامت ۱۰ میلی‌متر با استفاده از ماشین کاری آماده‌سازی گردیدند.

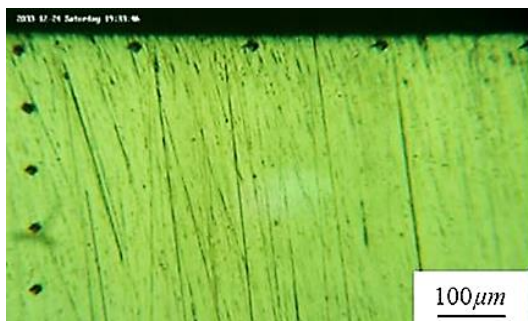
برای عملیات سختکاری سطحی فولاد مورد نظر از لیزر دیودی با بیشینه توان ۱۶۰۰ وات استفاده شد. جدول شماره ۲ تنظیمات متغیرهای ورودی سختکاری لیزری را نشان می‌دهد.

¹ Stand-off Distance (SOD)



شکل ۳. تصویر نمونه‌های سختکاری سطحی شده لیزری با لیزر دیودی (قطر نمونه 65 میلی‌متر).

ناحیه سخت شده جهت متالوگرافی نمونه‌ها، به کمک معرف ویلا که ترکیب شیمیایی آن شامل: (۵ سی سی اسید کلریدریک، ۱۰۰ سی سی اتیل الکل، ۲ گرم اسید پیکریک) است، آماده سازی گردیدند و ریزساختار نمونه‌های سخت شده مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۴ روند تغییرات میکروسختی برای فرورونده ویکرز دستگاه میکرو سختی که از سطح به سمت عمق نمونه و همچنین در پهنای مقطع زده شد را نشان می‌دهد. بمنظور برآورد کیفیت سختکاری، ابعاد هندسی منطقه سخت شده (عمق نفوذ سختی (h) و پهنای منطقه سختکاری (w) چنانچه در شکل ۵ نشان داده شده، اندازه گیری شدند. توزیع میکروسختی در عمق و سطح حاصله از سختی فلز پایه و ریز ساختار سطح سختکاری شده با میکروسکپ نوری مدل BUEHLER, MET-87 ساخت کشور آمریکا در شرکت ماشین سازی اراک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سیکل عملیات حرارتی کوره‌ای بعنوان مقایسه با سختکاری لیزری فولاد ۴۱۰ تحلیل ریز ساختاری آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

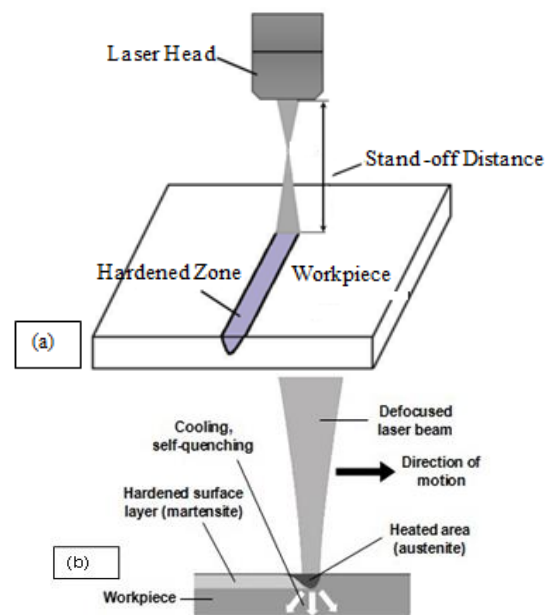


شکل ۴. مقطع عرضی ایندنتورها در عمق و سطح.



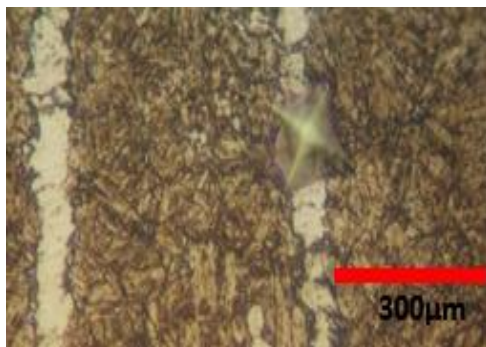
شکل ۱. تصویر دستگاه لیزر دیودی در حین فرآیند سختکاری.

در شکل شماره ۲ مکانیزم فرآیند عملیات سختکاری لیزری بر روی قطعه مورد نظر نشان داده شده است. شکل شماره ۳ تصویر نمونه‌های سختکاری شده فولاد مارتنزیتی ۴۱۰ 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 پهنای اندازه‌گیری شد (میکروسختی با دستگاه BUEHLER, MH-73-01 ساخت آمریکا انجام شد). برای دستگاه میکروسختی، مقدار نیرو ۱۰۰ گرم در مدت زمان ۳۰ ثانیه اعمال شده است.

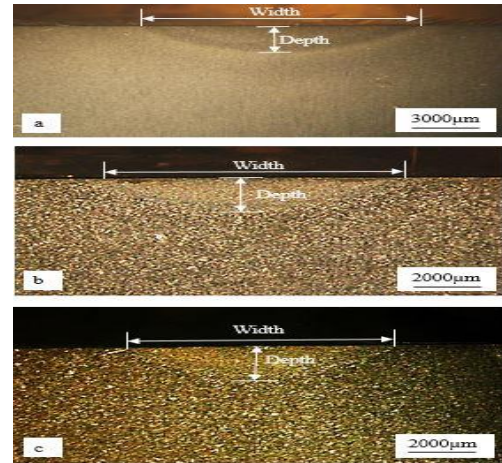


شکل ۲. شماتیک فرآیند عملیات سختکاری با لیزر (a) - مشخص کردن فاصله کلگی تا سطح قطعه کار (b) - مکانیزم سختکاری.

در نمودار شکل ۶ بخوبی قابل مشاهده است که سختی سطحی در اثر عملیات سطحی با لیزر افزایش یافته و با دور شدن از سطح قطعه به طرف فلز پایه سختی بتدریج کاهش می‌یابد تا به میزان سختی فلز پایه می‌رسد. این بدان معنی است که انرژی به سطح بیشتر وارد می‌شود و سطح مستعد سختی بیشتری است. روند تغییرات میکروسختی نمونه از سطح به سمت عمق ارزیابی گردیده است. جدول شماره ۳ نتایج حاصل از سختکاری لیزری را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴ مشخص است، با فاصله گرفتن از سطح به سمت عمق نمونه قطر لوزی‌های ایندنتورهای ویکرز افزایش می‌یابد. یعنی مقدار سختی، به سختی فلز پایه نزدیک می‌گردد. در ناحیه سخت شده، مارتنزیت‌های دانه ریز و فاز فریت بصورت پراکنده دیده می‌شود. دلیل این مساله بالا بودن سرعت مکانیزم سرد شدن و عدم زمان کافی برای حل ذرات فریت، انحلال فریت ناقص انجام شده و باقی ماندن در ساختار سخت شده است. این موضوع باعث پایین آمدن سختی در این نواحی شده است [۲۸]. در هنگام اندازه‌گیری میکروسختی از ساختار فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۰، در صورتی که فرو رونده‌های ویکرز دستگاه میکروسختی روی فاز فریت فرود بیاید میزان سختی کمتری را نشان می‌دهد (شکل ۷).



شکل ۷. فرو رفتن فرورونده‌ی ویکرز در فاز فریت.



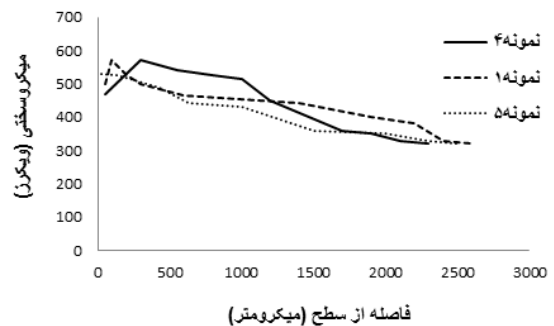
شکل ۵. مقطع عرضی نمونه‌های سختکاری شده لیزری، (a)- نمونه شماره ۱، (b)- نمونه شماره ۷، (c)- نمونه شماره ۷.

بحث و نتایج

در این مقاله اثر پارامترهای توان لیزر، سرعت روبش و فاصله کلگی تا سطح قطعه کار لیزر دیودی بر روی فولاد ۴۱۰ در سختکاری سطحی مورد بررسی قرار گرفت. بمنظور بررسی ابعاد هندسی منطقه سختکاری شده (عمق و پهنا)، توزیع میکروسختی در عمق و پهنای سختکاری شده و ریزساختار سطح سختکاری شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بررسی سیکل و ریز ساختار عملیات حرارتی کوره‌ای با سختکاری لیزری مورد مقایسه قرار گرفت.

بررسی توزیع میکروسختی ناحیه سختکاری شده

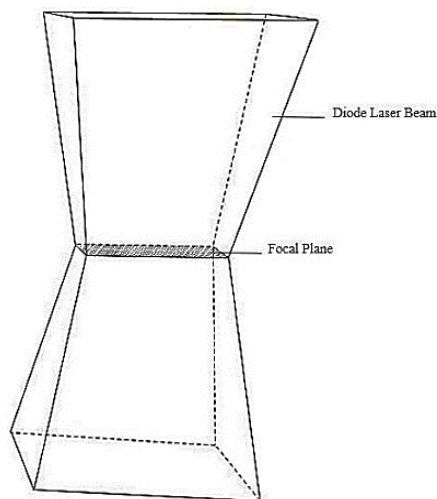
شکل ۶ روند تغییرات میکروسختی از سطح نمونه تا عمق تحت تاثیر لیزر را برای نمونه‌های مورد آزمایش به تصویر کشیده است.



شکل ۶. پروفیل میکروسختی در عمق لایه سختکاری شده لیزری.

شکل ۳. نتایج خروجی حاصل از سختکاری لیزر دیودی فولاد ۴۱۰.

شماره نمونه ها	پارامترهای ورودی			نتایج خروجی		
	سرعت روبش (mm/s)	فاصله کلگی تا سطح قطعه (mm)	توان لیزر (W)	ماکزیمم سختی (h v)	عمق سختی (mm)	پهنای سختی (mm)
۱	۵	۶۵	۱۴۰۰	۶۰۰	۲.۲	۸.۱
۲	۶	۷۰	۱۲۰۰	۴۹۰	۱.۴	۸.۴
۳	۷	۶۵	۱۴۰۰	۵۴۰	۲.۲	۸.۱
۴	۶	۷۰	۱۶۰۰	۶۲۰	۱.۸	۸.۳
۵	۴	۷۰	۱۲۰۰	۵۳۰	۲.۳	۸.۰۱
۶	۵	۷۵	۱۴۰۰	۵۳۰	۱.۸	۸.۳



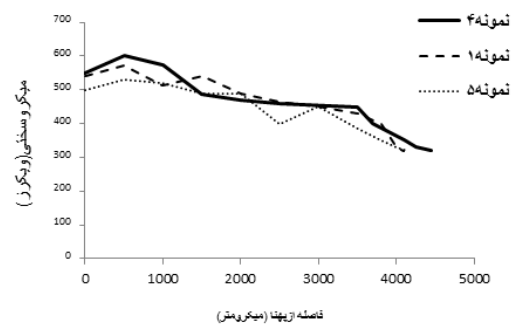
شکل ۹. شماتیک توزیع پرتو لیزر دیودی [۲۰].

بررسی ابعاد هندسی ناحیه سختکاری شده

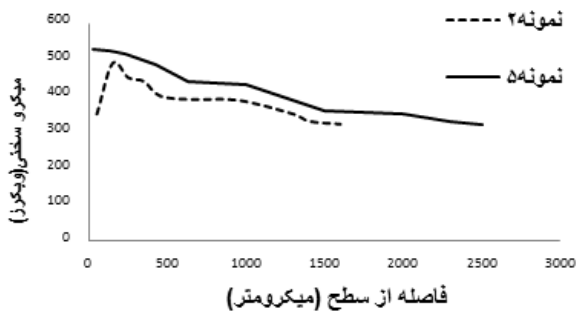
شکل ۹ توزیع انرژی پرتو لیزر را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل ۹ دیده می‌شود با توجه به اینکه حرارت بیشتری در مرکز پرتو لیزر نسبت به گوشه‌های پرتو وارد می‌کند، بنابراین حرارت بیشتری در مرکز پرتو وجود داشته و با فاصله گرفتن از مرکز، شدت انرژی پرتو لیزر کمی افت پیدا می‌کند. همچنین چنانچه در شکل ۸ مشخص است، با دور شدن از صفحه کانونی پرتو لیزر با واگرا شدن آن، از شدت انرژی لیزر کاسته می‌شود و قطر پرتو لیزر افزایش می‌گردد. در این مقاله افزایش موقعیت قطعه کار

شکل ۸ توزیع میکروسختی در ناحیه سخت شده را به صورت عرضی نشان می‌دهد. در این شکل حداکثر سختی در نمونه شماره ۴ بدست آمد که معادل ۶۲۰ ویکرز است. سختی فلز پایه ۳۳۰ ویکرز است که این بدان معناست که فرآیند سختکاری لیزری منجر به افزایش ۸۸٪ سختی سطحی شده است.

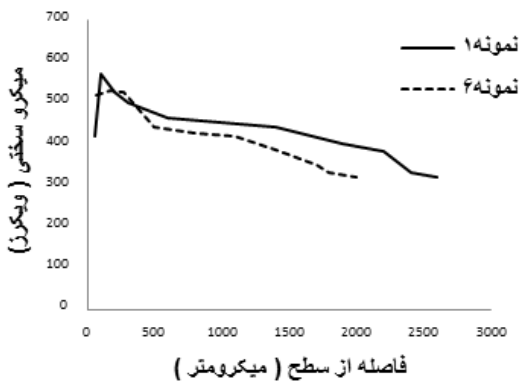
روند تغییرات میکرو سختی نمونه‌ها در نیمی از پهنای نشان داده شده است. چنانچه دیده می‌شود، توزیع به صورت تقریباً یکنواخت بدست آمده است. توزیع تقریباً یکنواخت میکرو سختی در سطح به صورت عرضی، به علت توزیع انرژی چهار گوش در پرتو لیزر بوده که در شکل ۹ نمایش داده شده است. چنانچه از شکل ۹ دیده می‌شود بیشترین انرژی لیزر در مرکز پرتو متمرکز شده است و با فاصله گرفتن از آن انرژی کاهش می‌یابد. بنابراین توزیع سختی رابطه مستقیم با شکل پرتو دارد.



شکل ۸. پروفیل میکروسختی در پهنای لایه سختکاری شده با لیزر.



شکل ۱۱. نمودار توزیع میکروسختی در سرتهای روبشی مختلف (نمونه شماره ۲ سرعت ۶ میلی متر بر ثانیه و نمونه شماره ۵ سرعت ۴ میلی متر بر ثانیه).

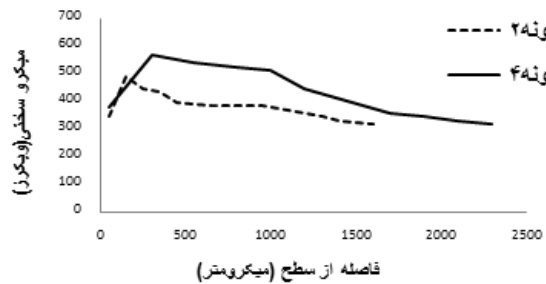


شکل ۱۲. نمودار توزیع میکروسختی با توجه به فاصله کلگی تا سطح قطعه کار مختلف (نمونه ۱ این فاصله به اندازه ۶۵ میلی متر و نمونه ۶ برابر ۷۵ میلی متر).

بررسی ریزساختار ناحیه سختکاری شده

در فرآیند سختکاری لیزری فولاد مارتنزیتی ۴۱۰ بر ماده مورد آزمایش، زمان کافی برای حل شدن کامل فریت‌ها وجود ندارد و فقط بخشی از آنها وارد دانه می‌شوند و باعث انجام فرآیند به طور ناقص می‌شود. کنترل میزان انرژی ورودی لیزر از طریق افزایش توان لیزر و کاهش موقعیت نقطه کانونی می‌تواند به حل شدن کامل آنها و ایجاد مارتنزیت کامل در ساختار کمک کند. در شکل ۱۳ میکرو ساختار فولاد ۴۱۰ خام نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که این فولاد در حالت خام متشکل از دانه‌های فریت است که در زمینه فاز مارتنزیت پخش

تا کلگی لیزر به معنای فاصله گرفتن از کلگی لیزر است که این امر تاثیر مستقیمی بر عمق نفوذ پرتو لیزر در قطعه و همچنین میزان سختی ناحیه تحت تاثیر لیزر دارد. با افزایش توان ورودی لیزر دیودی با توجه به افزایش میزان انرژی لیزر، حرارت ورودی به سطح قطعه کار افزایش می‌یابد. با افزایش حرارت ورودی به نمونه، دمای آستنیت به بالاتر رفته، بنابراین مقدار سختی و همچنین عمق نمونه سختکاری شده افزایش می‌یابد. در نمودار شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که نمونه شماره ۴ با توان ۱۶۰۰ وات نسبت به نمونه شماره ۴ با توان ۱۲۰۰ وات مقدار سختی و عمق بیشتری دارد.



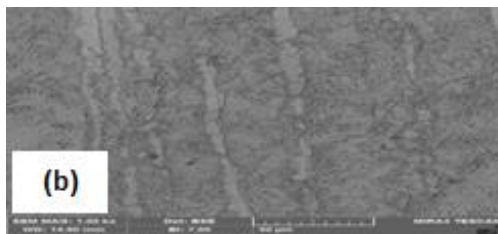
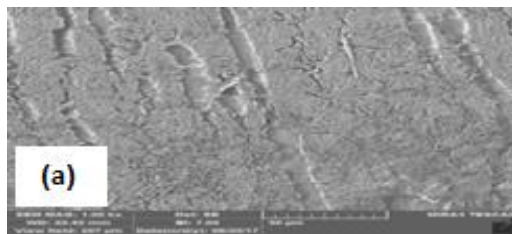
شکل ۱۰. نمودار توزیع میکروسختی در توانهای لیزری مختلف (نمونه شماره ۲ توان ۱۲۰۰ وات و نمونه شماره ۴ توان ۱۶۰۰ وات).

با کاهش سرعت روبشی به دلیل اینکه پرتو لیزر در مدت زمان بیشتری به سطح قطعه کار می‌تابد و زمان تعامل اثر لیزر با ماده بیشتر می‌شود، بنابراین انرژی ورودی به قطعه کار افزایش می‌یابد. این موضوع باعث بالا رفتن مقدار سختی و عمق نمونه سختکاری شده می‌شود. در نمودار شکل ۱۱ این ویژگی برای مقایسه دو نمونه شماره ۲ و ۵ در سرعت‌های متفاوت بخوبی قابل مشاهده است.

با کاهش فاصله کلگی لیزر تا سطح قطعه، با توجه به نزدیک شدن به صفحه کانونی که انرژی بالاتری نسبت به نقاط دیگر دارد، سختی و عمق نمونه سختکاری شده افزایش می‌یابد. در نمودار شکل ۱۲ توزیع میکروسختی برای دو نمونه سختکاری شده در فاصله کلگی تا سطح قطعه به اندازه ۶۵ میلی متر و ۷۵ میلی متر مقایسه شده است.



شکل ۱۴. تصویر ریزساختار نمونه سختکاری شده لیزری (a) نمونه شماره ۱ (b) نمونه شماره ۲.

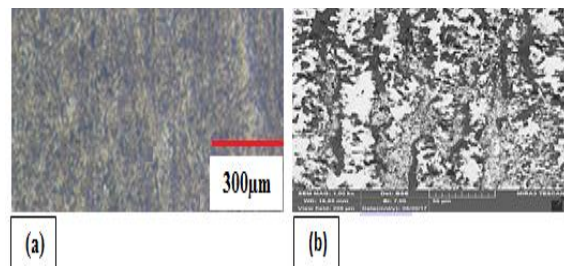


شکل ۱۵. تصویر ریز ساختار نمونه سختکاری شده لیزری با میکروسکپ الکترونی نشر میدان (FESEM) (a)- نمونه شماره ۱ (b)- نمونه شماره ۴.

بررسی عملیات حرارتی کوره‌ای فولاد ۴۱۰ در مقایسه با سختکاری لیزری

از سیکل حرارتی سختکاری کوره‌ای (شکل شماره ۱۶) بعنوان مقایسه با عملیات سختکاری لیزری استفاده شد. فولاد ۴۱۰ در دمای ۵۴۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت در کوره پیش‌گرم شد، سپس با شیب ۷۰ درجه بر ساعت تا دمای ۹۸۰ درجه سانتیگراد بالا برده شد. در پایان در این دما به مدت ۲ ساعت نگه داشته شد. سپس با ۳ روش (خنک کاری در هوا، روغن و آب) فولاد

شده‌اند. با توجه به اینکه فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۰ مورد آزمایش، با ساختار گرم کار^۲، در هوا سرد شده است، مقادیر قابل توجهی ذرات فریت در زمینه مارتنزیت وجود دارد. فاز فریت در مرحله خنک‌کاری در هوا برای فولادهایی که به صورت کوئنچ تمپر^۳ بعد از پروسه ساخت وارد سرویس می‌شوند، تشکیل می‌شود. در صورتی که بعد از مرحله تولید فولاد در هوا با سرعت زیاد و یا در آب کوئنچ شود، فاز فریت تشکیل نمی‌شود [۲۹]. همان‌طور که در (شکل ۱۴) مشاهده می‌شود، در نمونه‌های سختکاری شده به کمک لیزر فاز فریت دیده می‌شود. در نمونه‌هایی که توان لیزری بالاتر است دمای آستنیت برای استحاله فاز بالاتر رفته و دانه‌های آستنیت ریزتر می‌گردد.



شکل ۱۳. تصویر ریز ساختار فولاد خام ۴۱۰ (a) تصویر میکروسکپ نوری (OM) (b) تصویر میکروسکپ الکترونی نشر میدان (FESEM).

بنابراین در این نمونه‌ها درصد فاز فریت کمتر می‌شود. هنگامی که در این دما فاکتور زمان را کنترل کنیم یعنی سرعت رویش لیزری را کمتر نماییم، دانه‌های آستنیت یکنواخت‌تر شده و درصد فریت‌ها باز هم کمتر می‌گردد. پس با افزایش توان، دمای آستنیت به بالاتر می‌رود و با کاهش سرعت رویشی لیزر فاکتور زمان برای یکنواخت کردن دانه‌های آستنیت مهیا می‌گردد. شکل شماره ۱۵ تصاویر نمونه‌های سختکاری شده با میکروسکپ الکترونی نشر میدان (FESEM) را نشان می‌دهد.

^۲ Warm worked

^۳ Quench- temperature

باعث نرم شدن فولاد و کاهش سختی می‌گردد. بدلیل زمان تعامل اثر کوتاه لیزر و سرعت عملکرد بالا، ذرات فریت در زمینه مارتنزیت مشاهده می‌شوند. برای کم کردن یا از بین بردن آنها بایستی توان ورودی لیزر بالا و سرعت روبشی پایین را انتخاب نماییم. در سختکاری کوره‌ای به دلیل نگهداشتن نمونه در زمان مشخص در حین سیکل گرمایش، ذرات فریت ریزتر شده یا ناپدید می‌گردند. بنابراین در سیکل حرارتی سختکاری کوره‌ای بدلیل داشتن ساختار یکنواخت‌تر مارتنزیت مقدار سختی بالا می‌رود ولی این ساختار شکننده‌تر است. در سختکاری لیزری به دلیل داشتن ذرات فریت، سختی پایین است ولی با کنترل پارامترهای فرآیند می‌توان سختی بالا به همراه مقاومت به ضربه مناسب را بدست آورد.

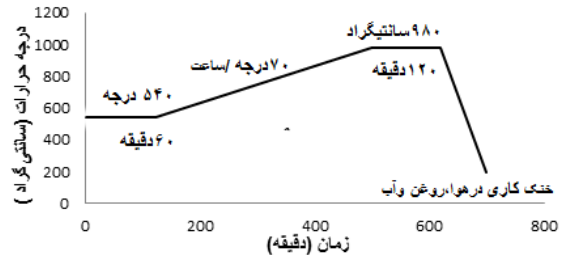
نتیجه گیری

۱- در این مقاله اثر پارامترهای توان لیزر، سرعت روبش و موقعیت فاصله کانونی لیزر دیودی بر سختکاری سطحی فولاد ۴۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر این پارامتر بر ابعاد هندسی منطقه سخت شده (پهنا و عمق نفوذ)، توزیع میکروسختی در عمق و سطح حاصله از سختی فلز پایه و ریز ساختار سطح سخت شده فولاد مورد نظر بررسی گردید. با توجه به آزمایش‌های انجام شده می‌توان به نتایج زیر استناد کرد: سختکاری استحاله‌ای لیزری فولاد ۴۱۰ باعث ایجاد ساختاری متشکل از فاز فریت در زمینه مارتنزیت شد که در نتیجه استحاله حالت جامد و انحلال یا توزیع مجدد فریت‌ها بود.

۲- با افزایش توان و کاهش سرعت روبشی لیزری، به دلیل افزایش انرژی لیزر میزان حرارت ورودی به سطح قطعه کار افزایش می‌یابد، بنابراین مقدار سختی و عمق ناحیه سخت شده افزایش می‌یابد.

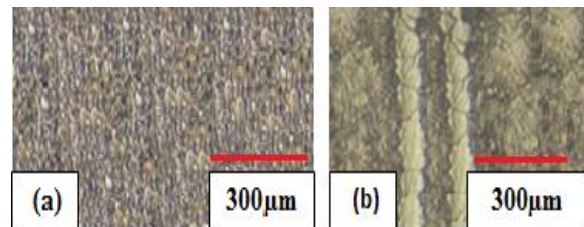
۳- با کاهش فاصله کلگی تا سطح قطعه کار، به دلیل نزدیک شدن قطعه کار به صفحه تمرکز انرژی پرتو لیزر،

کوئنج گردید. در هوا سختی ۴۱۲ ویکرز، در روغن سختی ۴۳۴ ویکرز و در آب سختی ۴۴۶ ویکرز گزارش شد.



شکل ۱۶. نمودار سیکل حرارتی سختکاری کوره‌ای فولاد ۴۱۰ [۲۹].

با توجه به اینکه در محیط آب میکروترک تشکیل شده و در هوا نیز میزان سختی پایین‌تر است، بنابراین روغن بعنوان محیط خنک کننده ایده آل و مناسب با سختی ۴۳۴ ویکرز ملاک مقایسه قرار می‌گیرد. پس مقدار سختی با روش سختکاری لیزر دیودی به میزان ۱.۴۳ برابر سختی عملیات حرارتی کوره‌ای است. شکل ۱۷ ریزساختار نمونه عملیات حرارتی کوره‌ای و سختکاری لیزری را نشان داده است.



شکل ۱۷. تصویر ریزساختار (a) - نمونه عملیات حرارتی کوره‌ای (b) نمونه سختکاری لیزری.

نمونه عملیات حرارتی شده به علت نگهداری به مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای ۹۸۰ درجه همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد، ذرات ریز فریت در زمینه مارتنزیت بصورت پراکنده پخش می‌شوند. ولی در سختکاری لیزری این ذرات به یکدیگر پیوسته هستند. در سختکاری لیزری به دلیل تمرکز انرژی بالا، سختکاری بصورت موضعی اتفاق می‌افتد ولی سختکاری کوره‌ای، سختکاری به صورت حجمی است. وجود فریت در زمینه مارتنزیت

8. M. safari, H. mostaan, *Experimental and numerical investigation of laser forming of cylindrical surfaces with arbitrary radius of curvature*, Alexandria engineering journal 55, (2016) 1941-1949.

۹. صفری مهدی، یک روش نوین و جامع برای شکل‌دهی به کمک لیزر سطوح استوانه‌ای با شعاع انحنای دلخواه، مجله مکانیک مدرس، سال پانزدهم مجله ۱۲، سال ۱۳۹۴، ص ۹-۱۶

10. M. safari, *Experimental and numerical investigation of laser forming of a doubly curved saddle shape with spiral irradiating scheme*, journal of advanced manufacturing technology, 9(2015) 2.

11. P. Molian, *Surface modification technologies-An engineering guide* TS Sudarshan (New York: Marcel 18(1989) 14-31.

12. J.M.F. Vollertsen, K. Partes., *State of the art of laser hardening and cladding*, Proceeding of The Third International WLT, (2005).

13. J.C. Ion, *Laser transformation hardening*, Surface Engineering, (2002).

14 R. Puli, G.D. Janaki Ram, *Wear and corrosion performance of AISI 410 martensitic stainless steel coatings produced using friction surfacing and manual metal arc welding*, Surface & Coatings Technology, 209(2012)1-7.

۱۵. زیره پورغلامرضا، شجاع رضوی رضا، ارزیابی رفتار خوردگی الکتروشیمیایی فولاد AISI ۴۲۰ پس از سختکاری سطحی لیزری، مجله علوم و مهندسی سطح، ۲۲(۲۰۱۴) ص ۷۱-۷۹.

۱۶. مرادی محمود، کرمی مقدم مجتبی، زارعی جلال، گنجی بهزاد، (۱۳۹۶) تاثیرات انرژی پالس لیزر و موقعیت نقطه کانونی در سختکاری سطحی لیزری فولاد زنگ‌نزن AISI 410، مجله مهندسی مکانیک مدرس، سال هفدهم مجله ۶، سال ۱۳۹۶، ص ۳۱۱-۳۱۸.

۱۷. محمودی بهزاد، صبور روح مقدم علی رضا، ترکمنی محمدجواد، بررسی تاثیر پارامترهای لیزر بر سختکاری سطحی فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۲۰ توسط لیزر تپی Nd:YAG پانزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران همراه با نخستین کنفرانس فوتونیک ایران، دانشگاه اصفهان ۸-۱۰ بهمن ماه ۱۳۸۷

18. Lo. KH, C. FT and M. HC, *Laser transformation hardening of AISI 440C*

مقدار سختی و عمق ناحیه سخت شده دارای افزایش ولی پهنای ناحیه سخت شده کاهش می‌یابد.

۴- در حالت مطلوب در این تحقیق، میکرو سختی فولاد ۴۱۰ بعد از عملیات سختکاری لیزری، باتوان ۱۶۰۰ وات، فاصله کلگی تا سطح قطعه کار ۷۰ میلی‌متر و سرعت رویش ۶ میلی‌متر بر ثانیه، در حدود ۶۲۰ ویکرز و عمق سختی ۱.۸ میلی‌متر است.

۵- سختکاری سطحی فولاد ۴۱۰ با لیزر دیودی در حدود ۱.۴۳ برابر سختی عملیات حرارتی کوره‌ای است.

۶- ساختار ذرات فریت در ریز ساختار حاصل از سختکاری لیزری بصورت پیوسته ولی در سختکاری عملیات حرارتی کوره‌ای پراکنده‌تر هستند.

مراجع

1. J C. Ion, (2005), *Laser processing of engineering materials*, 15-16.

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, 96(2017) 208-218.

3. 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, September, 1-6(2017).

4. M. Moradi, E. Golchin. *Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization*. Latin American Journal of Solids and Structures. 14(2017) 464 – 484.

5. M. safari, M. farzin, *Experimental investigation of laser forming of a saddle shape with spiral irradiating scheme*, Optic and laser technology, 66(2015) 146-150.

6. M. safari, M. farzin, H. mostaan, *A novel method for laser forming of two-step bending of a dome shaped part*, Iranian journal of materials forming, 4(2017) 1-14.

7. H. mostaan, M. shamanian, S. hasani, j. A. szpunar, *Nd:YAG Laser Micro-Welding of Ultra-Thin FeCo-V Magnetic Alloy Optimization of Weld Strength*, researchgate, (2017).

of Materials Processing Technology, 217(2015) 114–121.

29. H. chandler, *Heat Treater's Guide , Practices and procedures for nonferrous alloys*, the materials information company, (1996).

martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance, Surface and Coatings Technology. 173(2003) 96–104.

19. Lin Li, *The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing*, Optics and Lasers in Engineering 34 (2000) 231-253.

20. 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 205 (2008) 353–359

21. B. Mahmoudi, A. R. Sabour Aghdam, M. J. Torkamany, *Controlled laser transformation hardening of martensitic stainless steel by pulsed Nd:YAG laser*, Journal of electronic science and technology, 8(2010) 87-90.

22. D. S. Badkar, K. S. Pandey, G. Buvanashakaran, *Effects of laser phase transformation hardening parameters on heat input and hardened-bead profile quality of unalloyed titanium*, Transactions of nonferrous Metals Society of China: china 20(2010), 1078-1091.

23. F. A. Goia and M. S. Fernandes de Lima, *Surface Hardening of an AISI D6 Cold Work Steel Using a Fiber Laser*, Journal of ASTM International, Journal of materials Science 34, 4259-4264.

24. P. D. Babu, G. Buvanashakaran, K. R. Balasubramanian, *Experimental Studies On The Microstructure And Hardness Of Laser Transformation Hardening Of Lowalloy Steel*, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 36(2012).

25. Gh. Zirehpour, R. shoja Razavi and E. Moayerifar, *Evaluating Wear Properties of AISI 420 Martensitic Stainless Steel after Laser Transformation Hardening*, International journal of ISSII, 9 (2012) 5-8.

۲۶. گردانی غلامرضا، شجاع رضوی رضا، سختکاری سطحی لیزری فولاد متوسط کربن ۱.۱۱۸۶ و ۱.۶۵۱۲، فصلنامه علمی تخصص مهندسی مواد، مجلسی سال اول شماره دوم پائیز ۱۳۸۶.

27. K. Benyounis. F. Shuaeib. *An Indepth Investigation of Gas Nitriding of Stainless Steel: New DOE Parametric Studies and Optimization*. engineering. Oxford: Elsevier; (2016) 1-12.

28. A. Bień, M. Szkodo, *Surface treatment of C80U steel by long CO2 laser pulses*, Journal