



## تأثیرات انرژی پالس لیزر و موقعیت نقطه کانونی در سخت کاری سطحی لیزری فولاد زنگ‌نزن AISI 410

محمود مرادی<sup>1\*</sup>، مجتبی کریمی مقدم<sup>2</sup>، جلال زارعی<sup>3</sup>، بهنام گنجی<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

3- دانش‌آموخته کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

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

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 فروردین 1396

پذیرش: 04 خرداد 1396

ارائه در سایت: 02 تیر 1396

کلید واژگان:

سخت کاری سطحی لیزری

لیزر پالس Nd:YAG

میکروسختی

فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410

### چکیده

در این مقاله فرآیند عملیات سخت کاری سطحی لیزری بر فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی AISI 410 با استفاده از لیزر حالت جامد پالس Nd:YAG با توان بیشینه 700 وات مورد آزمایش قرار گرفته شد. موقعیت نقطه کانونی (22 تا 34 میلی‌متر) و انرژی پالس لیزر (14.7 تا 16.8 ژول) پارامترهای متغیر فرآیند در نظر گرفته شدند. میکروسختی در سطح و عمق لایه سخت شده، سختی سنجی گردید. متالوگرافی نمونه‌ها به منظور بررسی ریزساختار ناحیه سخت شده انجام شد. همچنین ابعاد هندسی منطقه سخت شده (پهنا و عمق نفوذ)، طیف میکروسختی در عمق و سطح لایه سخت شده مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش انرژی پالس لیزر و کاهش موقعیت نقطه کانونی، عمق و میزان سختی لایه سخت شده افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که در نتیجه استحاله حالت جامد و انحلال کاربیدها در زمینه فولاد در فرآیند سختکاری سطحی لیزری، بهبود در سختی سطحی به دست می‌آید. در ساختار مارتنزیتی تشکیل شده در ناحیه سخت کاری شده لیزری، فاز فریت دلتای کمتر منجر به افزایش میکروسختی ماده شده است. بیشترین عمق لایه سخت شده در بیشترین سطح انرژی پالس 16.8 ژول به میزان 350 میکرومتر، پهنای 2208 میکرومتر و بیشینه سختی سطحی معادل 747 ویکرز بدست آمد.

## The effects of laser pulse energy and focal point position on laser surface hardening of AISI 410 stainless steel

Mahmoud Moradi\*, Mojtaba Karami Moghadam, Jalal Zarei, Behnam Ganji

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 02 April 2017  
Accepted 25 May 2017  
Available Online 23 June 2017

### Keywords:

Laser surface hardening  
Nd:YAG pulsed laser  
Microhardness  
AISI 410 martensitic stainless steel

### ABSTRACT

In this paper the capability of laser surface hardening of martensitic stainless steel AISI 410 is conducted by using a Nd:YAG pulsed laser with a maximum power of 700 W. Focal point position (22mm to 34mm) and laser pulse energy (14.7J to 16.8J) were considered as process variable parameters. Microhardness was measured in depth and surface of the hardened layer. Metallography of samples was conducted in order to study the microstructure of hardened zone. Also, geometrical dimensions of hardened zone (width and depth), microhardness distributions in depth and width of hardened layer, microstructure of hardened layer were investigated. Results show that by increasing laser pulse energy and decreasing the laser focal point position, the hardness and depth of hardened layer increases. Observations indicated that solid state transformation and carbide solution in steel during laser surface hardening process, improved the surface hardness. Lower delta ferrite in martensitic structure in laser hardened layer led to higher microhardness. Maximum hardened layer of 350  $\mu\text{m}$  in depth and 2208  $\mu\text{m}$  in width and maximum surface hardness of 747 HV<sub>0.3</sub> is obtained at maximum pulse energy of 16.8J.

### 1- مقدمه

سوراخکاری لیزری [3]، برشکاری لیزری [4] مورد استفاده قرار می‌گیرد. از لیزرهای رایج شده در صنعت، می‌توان به لیزر حالت جامد پالس Nd:YAG اشاره کرد. این نوع از لیزر، با دقتی بسیار زیاد و به مراتب با بهره‌گیری از پرتوهای متمرکز ساطع شده از خود سطح ماده را مورد عملیات سطحی قرار می‌دهد [5]. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی در صنایع مختلفی همچون نفت و گاز و پتروشیمی، صنایع غذایی و دارویی مصارف گوناگونی دارند [6]. از این

در فرآیند بهبوددهی سطح یک ماده، به ویژه فولادها که در صنعت بسیار پرکاربرد هستند، می‌توان به روش‌های رایج عملیات حرارتی از جمله روش‌های عملیات حرارتی القایی و شعله‌ای اشاره نمود که می‌توان با روش‌های نوین از جمله لیزر، این فرآیند را با دقت بیشتری انجام داد [1]. فراوری لیزری مواد اخیراً برای کاربردهای مختلف صنعتی همانند جوشکاری لیزری [2]،

### Please cite this article using:

M. Moradi, M. Karami Moghadam, J. Zarei, B. Ganji, The effects of laser pulse energy and focal point position on laser surface hardening of AISI 410 stainless steel, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 6, pp. 311-318, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سخت کاری شده (عمق نفوذ و پهنای آن) طبق شکل 1 مورد بررسی قرار گرفت. همچنین روند تغییرات میکروسختی در عمق و سطح اندازه گیری گردید. به منظور بررسی های متالوگرافی میکروساختار ناحیه های لیزرکاری شده نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفتند.

## 2- آزمایش های تجربی

ماده مورد استفاده در این مقاله فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول 1 می باشد.

ترکیب شیمیایی فولاد مورد نظر با استفاده از دستگاه کوانتومتری در شرایط محیطی آزمایشگاه 28 درجه سانتی گراد و رطوبت 14 درصد اندازه گیری شد و سپس عملیات آماده سازی نمونه و بررسی ساختار میکروسکوپی بعمل آمد. ساختار میکروسکوپی نمونه شامل زمینه مارتنزیتی می باشد و توزیع ساختار یکنواخت است. نمونه های آزمایشگاهی از میلگرد با قطر 50 میلی متر به ضخامت 10 میلی متر با استفاده از ماشین کاری سنتی آماده سازی گردیدند. در شکل 2 شماتیک فرایند عملیات سخت کاری لیزری آورده شده است.

در این شکل موقعیت نقطه کانونی لیزر که از پارامترهای مورد بررسی در مقاله است، نشان داده شده است. برای عملیات سخت کاری سطحی فولاد

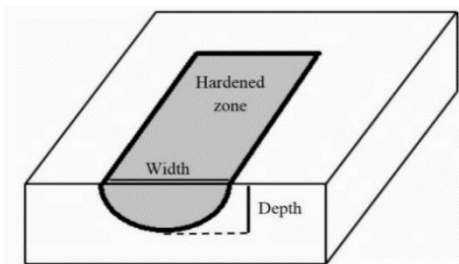


Fig. 1 Schematic of geometrical dimensions of hardened zone (width and depth)

شکل 1 شماتیک ابعاد هندسی ناحیه سخت شده (پهنای و عمق)

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 (درصد وزنی)

نام عنصر	Fe	S	P	Mn	Cr	C
درصد وزنی	باقی مانده	0.03	0.04	1	12.5	0.15

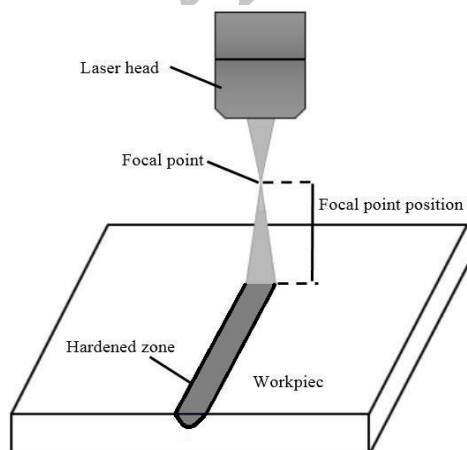


Fig. 2 Schematic of the laser surface hardening process

شکل 2 شماتیک فرایند سخت کاری سطحی با لیزر

آلیاژها برای ساخت لوله ها و ورق های مقاوم در برابر خوردگی مورد کاربری قرار می گیرند، که این فولادها معمولاً در محیط های اسیدی استفاده می شوند و قیمت آن نسبت به گریدهای مشابه ارزان تر است [6]. یک مورد از انواع فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 از سری 400 این نوع از فولادها می باشد که کاربردهای بسیار متنوعی در صنایع ذکر شده دارد.

یکی از دست آوردهای عملیات سطحی با لیزر، سخت کاری سطحی می باشد، به این صورت که لیزر مورد استفاده با پارامترهای از پیش تنظیم شده انتخاب می شود. این پارامترها بسته به نوع لیزر مورد استفاده و نیز نوع ماده ی مورد آزمایش قابل تغییر می باشد. پس از انتخاب پارامترهای مناسب فرایند سخت کاری لیزری، فرایند سخت کاری لیزری انجام می شود و سختی سطح فولاد مورد نظر بهبود می یابد که می توان در این فرایند با تبدیل کردن فاز فریتی و آستنیتی فولاد به مارتنزیت از سختی بیشتری بهره مند شد [7]. محمودی و همکاران [7] سخت کاری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 420 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 سخت کاری شده با لیزر و مقاومت در برابر خوردگی این فولاد پس از عملیات سخت کاری با لیزر مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی مقایسه ای بین دو لیزر دیودی قدرت بالا و نیز لیزر CO<sub>2</sub> بر روی سخت کاری فولاد AISI 1045 توسط لی و همکاران [8] مورد کندوکاو قرار گرفت که آنها توانستند اثر هر کدام از این لیزرها را بر روی کیفیت سخت کاری سطحی مورد بررسی قرار دهند. با توجه به داده های تجربی بدست آمده از سخت کاری لیزری هردو نوع لیزر، شبیه سازی این فرایند را مورد بررسی قرار دادند که نشان دادند به مراتب لیزر دیودی قدرت بالا از کیفیت بالاتری در سخت کاری لیزری نسبت به لیزر CO<sub>2</sub> بهره مند بود. کان و همکاران [9] تأثیرات دماهای بالا را بر روی ریزساختارهای فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L ارزیابی کردند. بوجونویچ و همکاران [10] شبیه سازی سخت کاری لیزری بر چگونگی توزیع دمایی انتشار یافته بر روی فولاد آستنیتی را مورد بررسی قرار دادند. بین و همکاران [11] اثرات جانبی لیزر CO<sub>2</sub> را بر روی فولاد C80U با تغییر پالس لیزر در مدت زمان های طراحی شده پرداختند. دومیتسکو و همکاران [12] اثر سخت کاری لیزر حالت جامد فیبر را بر روی فولاد ابزار AISI D2 بررسی کردند. در مورد ویژگی های سطوح سخت شده انواع مختلف مواد فلزی، بادکار و همکاران [13] تأثیرات تحول سخت کاری با استفاده از لیزر حالت جامد پالسی Nd:YAG بر روی تیتانیوم خالص انجام دادند. آنها در مطالعه خود ابعاد هندسی ناحیه سخت کاری شده توسط لیزر را مورد بررسی قرار دادند. فرانسیسکو کوردویلا و همکاران [14] با شبیه سازی فرایند سخت کاری لیزری و مقایسه نتایج بدست آمده از فرایند شبیه سازی سخت کاری لیزری با داده های تجربی سخت کاری لیزری فولاد کم آلیاژی AISI 4140، توانستند اثر روی هم افتادگی خطوط سخت کاری شده با لیزر را بررسی کنند. سایش و مقاومت در برابر خوردگی فولاد ابزار AISI H13 که تا 800 ویکرز سخت کاری لیزری شده بود، توسط تلسانگ و همکاران [15] مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، تاکنون بررسی سخت کاری لیزری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 توسط لیزر حالت جامد پالسی Nd:YAG توان بالا انجام نگرفته است. در این مقاله اثر پرتو لیزر با تغییر مقادیر مختلف موقعیت نقطه کانونی و انرژی پالس لیزر به منظور فرایند عملیات سخت کاری سطحی مورد بررسی قرار گرفته شد. ابعاد هندسی منطقه

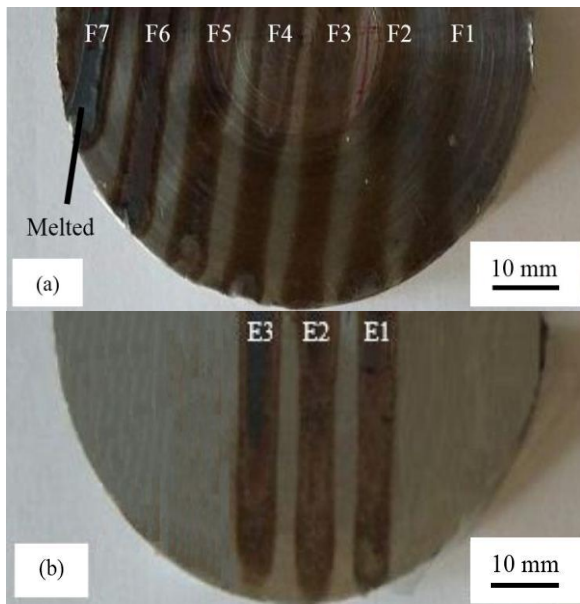


Fig. 3 Image of laser hardened samples a) focal point position tests b) laser pulse energy tests

شکل 3 تصویر نمونه‌های سخت کاری شده لیزری (a) آزمون‌های موقعیت نقطه کانونی لیزر (b) آزمون‌های انرژی پالس لیزر

30 ثانیه بود. جهت متالوگرافی نمونه‌ها در معرف با ترکیب شیمیایی 15 سی‌سی کلریدریک اسید، 10 سی‌سی استیک اسید و 10 سی‌سی نیتریک اسید، اچ<sup>2</sup> شده و آماده سازی گردیدند [16].

میکروسختی به منظور بدست آوردن میزان سختی و طیف توزیع سختی در عمق و پهنای ناحیه سخت کاری شده اندازه گیری شد. تصاویر نمونه‌ها متالوگرافی شده توسط دستگاه میکروسکوپ نوری لسیا ام-ای-اف 4 در بزرگنمایی 50 و 100 برابر تهیه و ابعاد هندسی به کمک نرم افزار آنالیز تصویری ایمپج جی بدست آمدند. متالوگرافی نمونه‌ها جهت تهیه تصاویر ریزساختار ناحیه سخت کاری شده صورت پذیرفت.

### 3- نتایج و بحث

در این مقاله اثر پرتو لیزر حالت جامد پالسی Nd:YAG بر فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 با تغییر مقادیر مختلف موقعیت نقطه کانونی و انرژی پالس لیزر در فرایند عملیات سخت کاری سطحی مورد بررسی قرار گرفته شد. به منظور بررسی خواص سطح، ابعاد هندسی منطقه سخت شده (پهنای و عمق نفوذ)، توزیع میکروسختی در عمق و پهنای سخت کاری لیزری و نیز ریزساختارها از سطح نمونه‌های سخت شده تجزیه و تحلیل گردیدند.

بیشترین شدت پرتو لیزر در ناحیه تمرکز یا کمر پرتو است و با دور شدن از این نقطه، شدت انرژی لیزر کم شده و در نتیجه عمق سختی کاهش می‌یابد. با نزدیک شدن لیزر به سطح نمونه علاوه بر عمق نفوذ، مقدار سختی افزایش یافت. در نمونه شماره F7 که در شکل 3-a مشخص است، اثر ذوب سطحی فولاد قابل مشاهده می‌باشد. این پدیده در اثر کاهش فاصله موقعیت نقطه کانونی اتفاق افتاد. چرا که با کاهش این فاصله، چگالی انرژی وارد شده‌ی لیزر به قطعه در واحد سطح افزایش می‌یابد که موجب می‌گردد ماده به دمای ذوب خود رسیده و در نهایت پدیده ذوب فولاد به وقوع بیانجامد. با افزایش مقدار انرژی پالس لیزر در نمونه E3 به میزان 16.8 ژول، اثر پرتو لیزر بر ماده بیشتر شد که منجر به افزایش سختی تا مقدار 747 ویکرز و عمق

زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 از لیزر حالت جامد پالسی Nd:YAG بیشینه توان 700 وات استفاده شد. تنظیمات آزمایشگاهی فرایند سخت کاری لیزری با لیزر Nd:YAG در جدول 2 نشان داده شده است. در این مقاله مقدار فرکانس پالس 15 هرتز، سرعت روبش 2 میلی‌متر بر ثانیه و قله توان 1.055 کیلو وات برای تمام نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد.

چنانچه دیده می‌شود در تنظیمات ارائه شده در جدول 2 در سری F موقعیت کانونی از 22 تا 34 میلی‌متر تغییر داده شده است و در سری E با تغییر توان متوسط و پهنای پالس، انرژی پالس از 14.7 تا 16.8 ژول تغییر داده شد. در آزمون‌های سری E هدف ثابت نگه داشتن قله توان به مقدار مساوی با مقدار آزمون‌های سری F و تغییر انرژی پالس می‌باشد که با تغییر همزمان توان متوسط و پهنای پالس طبق روابط (1) و (2) به دست می‌آید.

$$E = \frac{P_{Average}}{F_{Pulse}} \quad (1)$$

$$P_{Peak} = \frac{E}{W_{Pulse}} \quad (2)$$

که در روابط بالا E انرژی پالس (ژول)، P<sub>Average</sub> توان متوسط (وات)، F<sub>Pulse</sub> فرکانس پالس (هرتز)، P<sub>Peak</sub> قله توان (کیلووات) و W<sub>Pulse</sub> پهنای پالس (میلی ثانیه) می‌باشد.

در آزمون‌های سری E شدت انرژی به ازای هر پالس در طول مسیر ثابت است. در این آزمایش‌ها با کاهش پهنای پالس پرتو لیزر، پالس‌هایی تیزتر به ماده اثر می‌کنند که منجر به افزایش میزان جذب و کارایی لیزر می‌گردد. محدوده پارامترهای قابل دستیابی دستگاه لیزر شامل فرکانس پالس 1-1000 هرتز، عرض پالس 0.2-20 میلی ثانیه و انرژی پالس 0-40 ژول بود. باید توجه داشت که هر ترکیبی از پارامترهای دستگاه قابل حصول نیست، زیرا توان متوسط نمی‌تواند از 700 وات تجاوز کند.

در شکل 3 تصاویر نمونه‌های سخت کاری سطحی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 با لیزر حالت جامد پالسی Nd:YAG نشان داده شده است.

فولاد مذکور پس از عملیات سخت کاری سطحی لیزری برش خورده و نمونه‌ها توسط رزین مانت گردیدند، سپس با استفاده از دستگاه سنباده زنی، سطح مورد نظر تا سنباده 2500 سنباده زنی شدند. در مقطع عرضی میکروسختی‌ها از سطح تا عمق نفوذ لیزر و همچنین در پهنای عملیات سخت کاری سطحی شده برای هر مورد، با استفاده از دستگاه میکروسختی آنالوگ وی-تست بارپس اندازه گیری شد. تنظیمات دستگاه میکروسختی برای نیروی وارد شده به فرورونده ویکرز<sup>1</sup>، 300 گرم در مدت زمان اعمال نیروی

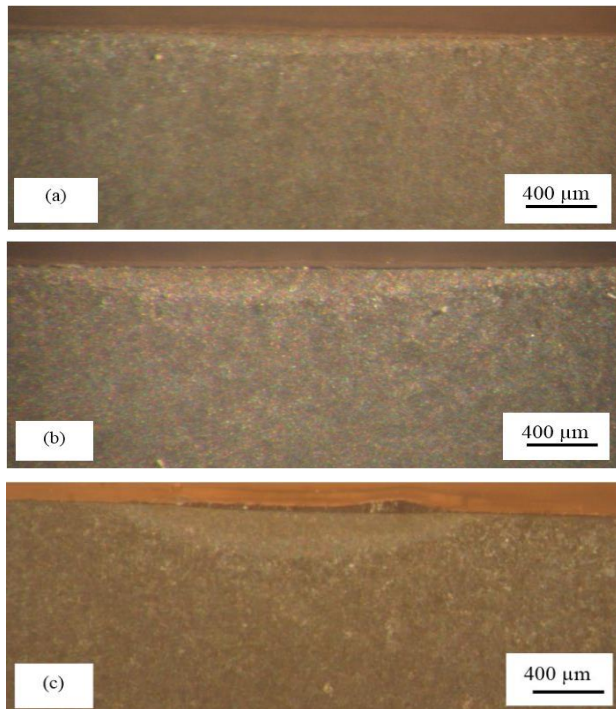
جدول 2 تنظیمات آزمایشگاهی فرایند سخت کاری لیزری با لیزر Nd:YAG  
Table 2 Experimental setting of laser surface hardening by Nd:YAG laser

شماره نمونه	موقعیت فاصله			توان متوسط (وات)
	کانونی (میلی‌متر)	پهنای پالس (میلی ثانیه)	انرژی پالس (ژول)	
F1	34	18	19	285
F2	32	18	19	285
F3	30	18	19	285
F4	28	18	19	285
F5	26	18	19	285
F6	24	18	19	285
F7	22	18	19	285
E1	24	14	14.7	220
E2	24	15	15.75	236
E3	24	16	16.8	252

<sup>2</sup> Etchant

<sup>1</sup> Vickers indenter

نفوذ 350 میکرومتر در فولاد ذکر شده گردید.



**Fig. 5** Cross section of laser hardened sample (samples #F2 and #F6) a) For sample #F2 b) For sample #F6 c) For sample #E3

شکل 5 مقطع عرضی نمونه سخت کاری شده لیزری (نمونه های F6 و F2) (a) نمونه (b) F2 نمونه (c) F6 نمونه E3

در شکل 5 عمق نفوذ و نیز پهنای سختی با توجه به مقادیر مختلف پارامترهای متغیر به خوبی نشان داده شده است. در این شکل اختلاف عمق و پهنای سختی نمونه های F2، F6 و E3 که تحت تأثیر پارامتر موقعیت نقطه کانونی و انرژی پالس مختلفی بوده اند، نشان داده شده است. پارامتر F2 که فاصله نقطه کانونی بیشتری برابر با 32 میلی متر را دارد، عمق نفوذ کمتری برابر با 90 میکرومتر را برخوردار بود در حالی که پهنای بیشتری برابر با 3198 میکرومتر، تحت تأثیر لیزر بوده است. این در حالی است که در نمونه F6 که از فاصله نقطه کانونی کمتری برابر با 24 میلی متر بهره مند بود، عمق بیشتر و پهنای کمتری را تحت تأثیر خود قرار داده بود و در نمونه E3 که انرژی پالس بیشتری برابر با 16.8 ژول و نیز فاصله موقعیت نقطه کانونی کمتری نسبت به نمونه F2 داشت، از عمق بیشتری برابر با 350 میکرومتر برخوردار بود.

### 2-3- بررسی توزیع میکروسختی ناحیه سخت کاری شده

پیدا است که تغییرات موقعیت کانونی لیزر تأثیرات آشکاری را بر روی میکروسختی دارد. شکل 6 روند تغییرات میکروسختی از سطح نمونه تا عمق تحت تأثیر لیزر را برای نمونه های F4 تا F6 را به تصویر کشیده است. در شکل 6 به خوبی قابل مشاهده است که سختی سطحی در اثر عملیات سطحی با لیزر افزایش یافته و تا مقدار 444 ویکرز برای نمونه F6 رسید.

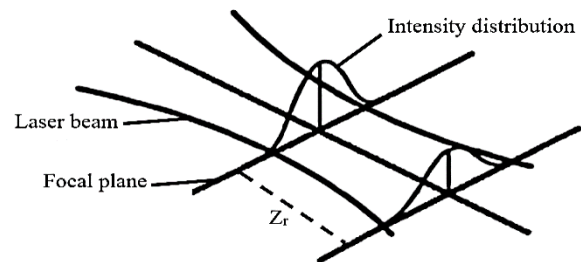
موقعیت فاصله کانونی تأثیر مستقیمی بر میزان عمق سخت کاری لیزری سطحی دارد. با افزایش موقعیت فاصله کانونی از سطح فولاد، مقدار عمق سختی کمتر می شود. در نمونه F4 که موقعیت فاصله کانونی این نمونه برابر با 28 میلی متر است مقدار عمق سختی این نمونه که از تصاویر ماکرومتالوگرافی اندازه گیری شده است، برابر با 130 میکرومتر و بیشینه سختی 355 ویکرز بود. این در حالی است که در نمونه F6 که موقعیت فاصله کانونی آن برابر با 24 میلی متر بود، مقدار عمق سختی برابر با 199 میکرومتر

### 1-3- بررسی ابعاد هندسی ناحیه سخت کاری شده

شکل 4 مدل توزیع گوسین<sup>1</sup> انرژی پرتو لیزر را نشان می دهد [8]. چنانچه در شکل 4 دیده می شود با توجه به اینکه لیزر مورد استفاده مد گوسین داشته و حرارت بیشتری در مرکز پرتو لیزر نسبت به گوشه های پرتو وارد می کند، حرارت بیشتری در مرکز پرتو وجود دارد که با فاصله گرفتن از مرکز شدت انرژی پرتو لیزر افت پیدا می کند. همچنین چنانچه در شکل 4 مشخص است، با دور شدن از صفحه کانونی پرتو لیزر، فاصله Zr، از شدت انرژی کاسته می شود و با واگرا شدن پرتو باعث افزایش قطر پرتو لیزر می گردد. در این مقاله افزایش فاصله کانونی به معنای فاصله گرفتن از صفحه کانونی می باشد که در شکل 2 نیز این مطلب به خوبی نمایش داده شده است.

این امر تأثیر مستقیمی بر عمق نفوذ پرتو لیزر در قطعه و همچنین میزان سختی ناحیه تحت تأثیر لیزر می شود. در جدول 3 عمق و پهنای ناحیه سخت شده برای نمونه ها نشان داده شده است. لازم به ذکر است در نمونه های F7 پدیده ذوب سطحی اتفاق افتاده است، که این امر به علت بالا بودن مقدار حرارت اعمالی پرتو لیزر بر سطح ماده به خاطر چگالی بالای لیزر در محل تعامل اثر می باشد. این اتفاق منجر به افزایش سختی و همچنین پهنای عمق سختی می شود. اما به علت ایجاد ذوب سطحی، نمونه F7 نمونه مطلوب مورد نظر در سخت کاری لیزری نمی باشد. لازم به ذکر است که در نمونه F1 به دلیل دور شدن بیش از حد لیزر از سطح، مقدار عمق نفوذ و نیز پهنای کاهش می یابد.

در شکل 5 تصویر ماکرومتالوگرافی برای نمونه F6 و F2 که تحت تأثیر موقعیت نقطه کانونی لیزر بوده اند و همچنین نمونه منتخب E3 آورده شده است.



**Fig. 4** Schematic of laser beam gaussian distribution

شکل 4 شماتیک توزیع گوسین پرتو لیزر

جدول 3 عمق و پهنای ناحیه سخت شده نمونه ها

**Table 3** Depth and width of hardened layer of samples

شماره نمونه	عمق سخت کاری (میکرومتر)	پهنای سخت کاری (میکرومتر)
F1	45	1980
F2	90	3198
F3	112	3106
F4	130	3047
F5	140	3035
F6	199	3011
F7	270	3312
E1	142	2107
E2	211	2188
E3	350	2208

<sup>1</sup> Gaussian-distributed model

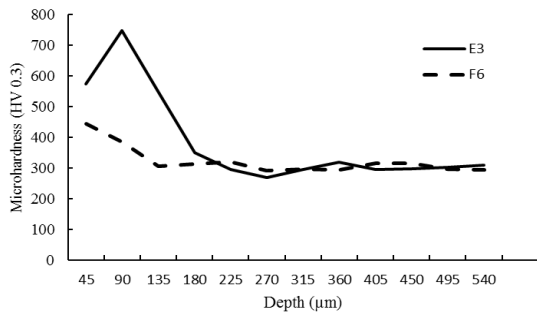


Fig. 8 Microhardness profile in depth of the laser hardened layer for E3 and F6 samples

شکل 8 پروفیل میکروسختی در عمق لایه سخت کاری شده با لیزر برای نمونه‌های F6 و E3



Fig. 9 The Vickers indenter in delta-ferrite phase

شکل 9 فرو رفتن فرورونده‌ی ویکرز در فاز فریت دلتا

در شکل 8 مشخص است که با افزایش انرژی لیزر در نمونه E3 مقدار سختی به 747 ویکرز رسیده است. عمق نفوذ سختی از سطح، 350 میکرومتر بدست آمد. این در حالی است که با کاهش انرژی، مقدار سختی و نیز عمق نفوذ کاسته شد. در نمونه E2 که از انرژی پالس کمتری برابر با 15.75 ژول برخوردار بود، مقدار بیشینه سختی برابر با 698 ویکرز و تا عمق 180 میکرومتر از سطح نمونه سخت شده است.

با دور شدن از سطح قطعه به طرف عمق نمونه، سختی به تدریج کاهش می‌یابد تا به میزان سختی فلز پایه می‌رسد. این بدان معنی است که انرژی به سطح بیشتر وارد شده است. شکل 10 روند تغییرات میکروسختی نمونه F6 برای فرورونده ویکرز دستگاه میکروسختی که از سطح به سمت عمق نمونه و همچنین در پهنای مقطع زده شد را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 10 مشخص شده است، با فاصله گرفتن از سطح به سمت عمق نمونه مقدار قطر لوزی‌های فرورونده ویکرز افزایش می‌یابد. یعنی مقدار سختی کاسته شده و به سختی فلز پایه نزدیک می‌گردد.

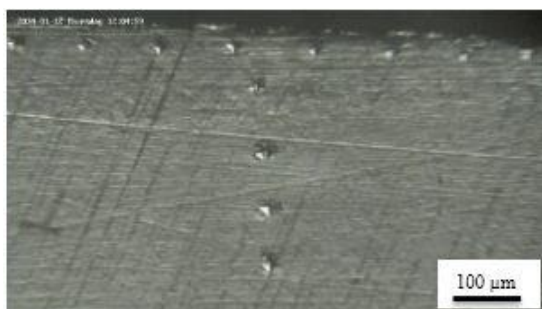


Fig. 10 Cross-sectional view of Vickers indenters in depth and surface of hardened zone

شکل 10 مقطع عرضی فرورونده‌های ویکرز در عمق و سطح ناحیه سخت شده

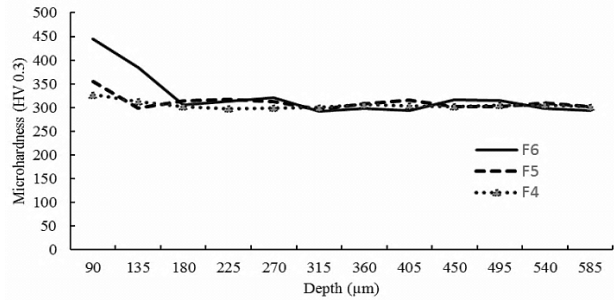


Fig. 6 Microhardness profile in depth of the laser hardened layer in focal point position tests

شکل 6 پروفیل میکروسختی در عمق لایه سخت کاری شده با لیزر در آزمون‌های موقعیت نقطه کانونی لیزر

و بیشینه سختی 444 ویکرز اندازه‌گیری شد.

از طرفی با افزایش انرژی پالس لیزر مقدار اثر پرتو لیزر بیشتر شد، که در نهایت موجب افزایش مقدار سختی سطحی و نیز عمق نفوذ بیشتر گردید. با کاهش مقدار انرژی پالس لیزر، عمق نفوذ و مقدار سختی کمتر شد. شکل 7 تأثیر پارامتر انرژی لیزر برای نمونه‌های E1 تا E3 آورده شده است.

در نمونه‌ی E1 که انرژی پالس 14.7 ژول است، که میزان عمق سختی برابر با 142 میکرومتر بود، در مقایسه با نمونه‌ی E3 که انرژی پالس بیشتری را نسبت به E1 یعنی برابر با 16.8 ژول برخوردار است، عمق بیشتری برابر با 350 میکرومتر را مورد سختی فولاد قرار داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار انرژی پالس لیزر میزان عمق سختی در فولاد بیشتر خواهد شد.

در شکل 8 نمودار مقایسه بین نمونه‌های منتخب در هر یک از آزمون‌های سری‌های E و F، آورده شده است که چنانچه دیده می‌شود نمونه E3 عمق بیشتری و سختی بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارد. این امر به علت پهنای پالس کمتر در قله توان ثابت است که می‌تواند پالس‌هایی تیزتر را ایجاد نماید و اثر پرتو لیزر افزایش یابد.

این نکته قابل ذکر است که برای نمونه E3 چنانچه در شکل 9 دیده می‌شود اولین فرورونده ویکرز در داخل فاز فریت دلتا<sup>1</sup> فرو رفته است که سختی به مراتب کمتری نسبت به فاز مارتزیت مجاور داشته است که خود باعث کاهش سختی در این ناحیه شده است.

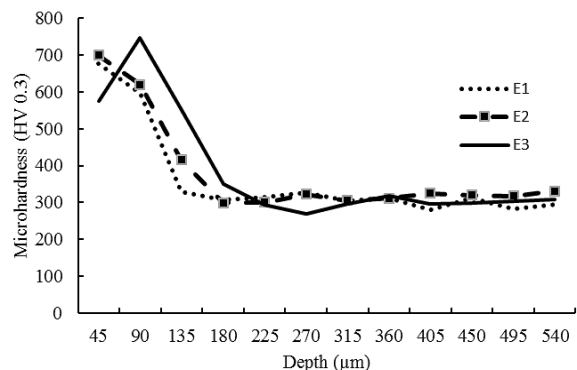


Fig. 7 Microhardness profile in depth of the laser hardened layer in laser pulse energy tests

شکل 7 پروفیل میکروسختی در عمق لایه سخت کاری شده با لیزر در آزمون‌های انرژی پالس لیزر

<sup>1</sup> Delta-ferrite

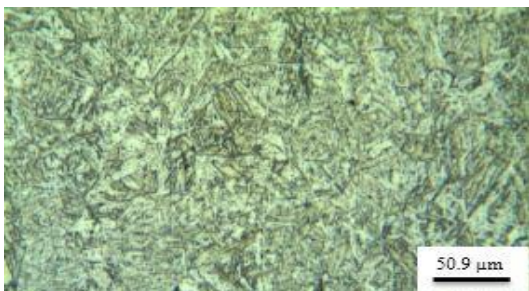
برابر با 747 ویکرز شد. با توجه به اینکه در نمونه ی E3 به علت بالاتر بودن انرژی لیزر در تعامل با سطح فولاد نسبت به نمونه های E1 و E2، مقدار فاز فریت کمتری وجود دارد که منجر می شود فرورونده ی ویکرز در نمونه E3 به درون فاز مارتنزیت فرو رفته و مقدار سختی بالاتر حاصل می شود که این مهم به علت وجود فاز مارتنزیت یکنواخت تری است که در این نمونه وجود دارد.

**3-3- بررسی ریزساختار ناحیه سخت کاری شده**

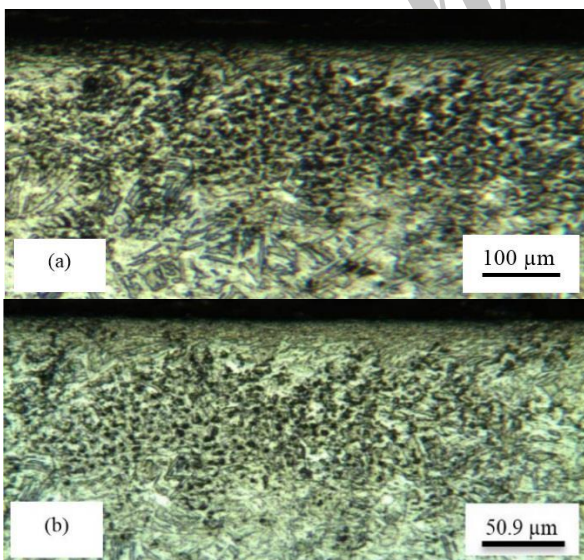
ساختار فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 مورد آزمایش، در آزمایش متالوگرافی، ساختاری یکنواخت مارتنزیتی بود که در شکل 13 به وضوح این ساختار نشان داده شده است.

با توجه به اینکه فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 مورد آزمایش با ساختار گرم کار<sup>1</sup>، در هوا سرد شده است، مقادیر قابل توجهی فاز فریت دلتا در زمینه مارتنزیت دیده می شود. فاز فریت دلتا در مرحله خنک کاری در هوا و برای فولادهایی که به صورت کوئنچ تمپر<sup>2</sup> به کار می روند، تشکیل می شود. در صورتی که بعد از مرحله تولید فولاد در هوا با سرعت زیاد و یا در آب کوئنچ شود فاز فریت دلتا تشکیل نمی شود [17].

در این قسمت ریزساختار نمونه ای که بهترین شرایط (بیشینه سختی و بیشینه عمق نفوذ) را برای هر یک از پارامترهای متغیر، یعنی انرژی پالس لیزر و موقعیت نقطه کانونی را دارد، مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل 14



**Fig. 13** Microstructure of base martensitic stainless steel AISI 410  
شکل 13 میکروساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410



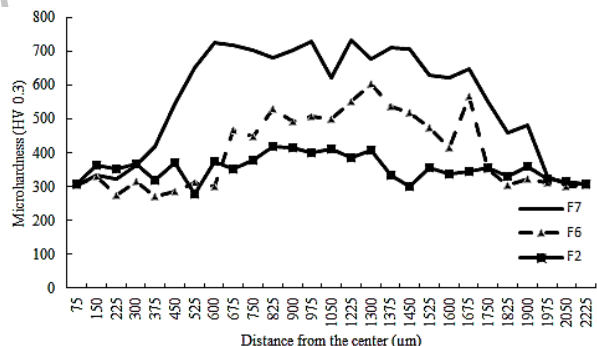
**Fig. 14** Microstructure of laser hardened zone of martensitic steel AISI 410 (sample #F6)

شکل 14 میکروساختار ناحیه سخت کاری شده فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 برای نمونه F6

همانطور که در شکل 11 مشخص است، با افزایش فاصله لیزر از سطح قطعه، مقایسه نمونه های F2 و F7، مقدار سختی سطحی کاهش می یابد. این بدان خاطر است که شدت انرژی وارد شده به سطح قطعه کار کمتر شده و سطح به مقدار کمتری تحت تأثیر عملیات سخت کاری لیزری قرار می گیرد و همچنین اگر فاصله لیزر از سطح نمونه کمتر باشد انرژی بیشتری به سطح قطعه وارد می شود. در نمونه F7 این فاصله به قدری کم بوده که منجر به ذوب سطحی فولاد می شود.

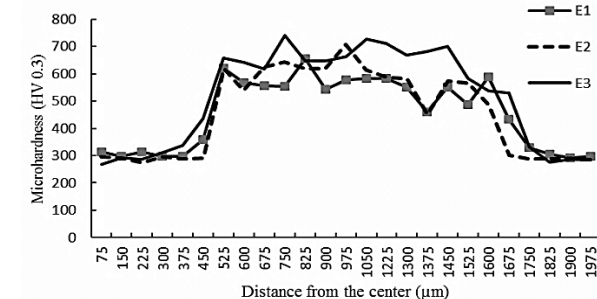
با مقایسه شکل های 4 و 11 و با توجه به توضیحات ارائه شده در شکل 4، شباهت توزیع میکروسختی در سطح نمونه و توزیع گوسین لیزر مشهود می گردد. می توان مقادیر میکروسختی در پهنای سطح سخت کاری شده را به این توزیع گوسین ربط داد، که نشان دهنده چگونگی نفوذ پرتو لیزر در ماده و توزیع گوسین پرتو در سطح نمونه است. در نمونه F7 که لیزر فاصله کمتری را با سطح قطعه داشته است سختی بیشتری نیز حاصل شده است و در مرکز پرتو انرژی بالاتری وجود دارد که با میزان سختی و توزیع آن ارتباطی مستقیم دارد، که در نهایت این نمونه ذوب شده است. از جهتی در نمونه F2 که لیزر به نسبت دیگر نمونه ها از سطح فاصله گرفته است، مقدار سختی کمتری را دارد. این امر به خاطر تأثیر موقعیت نقطه کانونی لیزر از سطح نمونه می باشد که با فاصله گرفتن از سطح مقدار انرژی کمتری به قطعه مورد نظر وارد می شود. از طرفی با تغییر پارامتر انرژی پالس لیزر اثرات قابل ملاحظه ای در مقدار سختی و البته مقدار عمق نفوذ دریافت شد. در شکل 12 اثر تغییرات انرژی پالس لیزر بر مقدار سختی پهنای ناحیه های سخت شده برای نمونه های E1 تا E3 نشان داده شد.

مقدار سختی در نمونه E3 انرژی پالس لیزر برابر با 16.8 ژول را دارد که نسبت به دیگر پارامترها انرژی پالس بیشتر بوده است که منجر به سختی



**Fig. 11** Microhardness profile in width of the laser hardened layer

شکل 11 پروفیل میکروسختی در پهنای لایه سخت کاری شده با لیزر

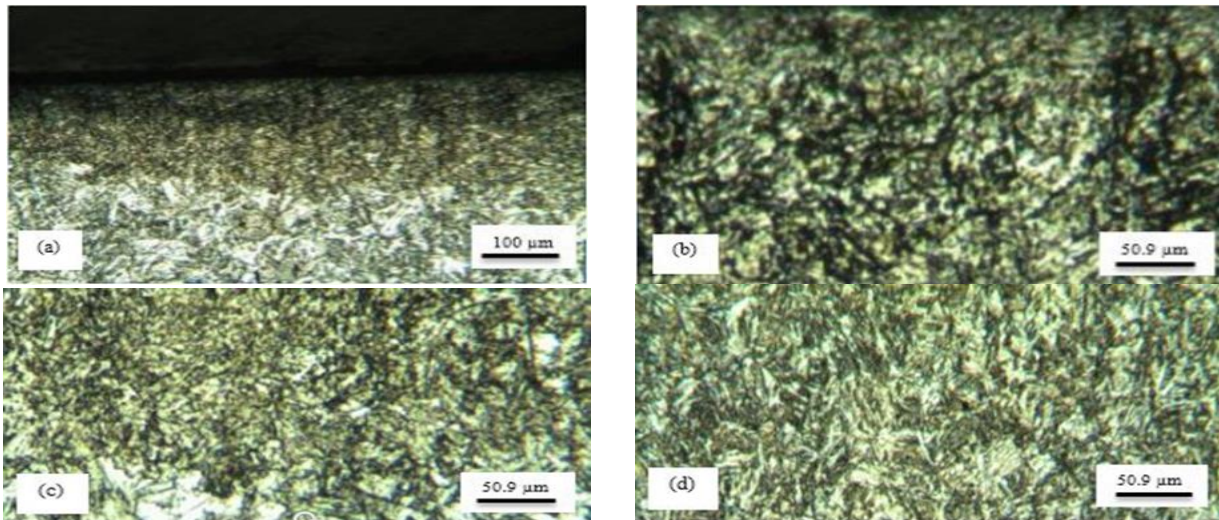


**Fig. 12** Microhardness profile in width of the laser hardened layer in E series Tests

شکل 12 پروفیل میکروسختی در پهنای لایه سخت کاری شده با لیزر در آزمون های

سری E

<sup>1</sup> Warm worked  
<sup>2</sup> Quench- temperature



**Fig. 15** Microstructure of laser hardened zone of martensitic steel AISI 410 (sample #E3) a) microstructure of the all hardened zone b) microstructure of the top surface of hardened layer c) microstructure of the middle zone of hardened layer d) microstructure of the base metal under hardened zone

شکل 15 میکروساختار ناحیه سخت کاری شده فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 برای نمونه E3 (a) میکروساختار کل ناحیه سخت شده (b) میکروساختار سطح بالایی لایه سخت شده (c) میکروساختار ناحیه میانی لایه سخت شده (d) میکروساختار فلز پایه در زیر ناحیه لایه سخت شده

جدا شده است. در شکل 15-d قسمت زیرین سطح سخت کاری را مشخص می کند که تحت تأثیر پرتو نمی باشد

با مقایسه این شکل با شکل 13 که فلز پایه فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 را نشان می دهد، مشخص است که تحول و استحاله آفازی در این قسمت رخ نداده است و در نتیجه این ناحیه تحت تأثیر عملیات حرارتی سطحی با لیزر نبوده است.

سختی در طول خط لیزری نسبتاً یکنواخت می باشد ولی در عرض لیزر با توجه به وجود فاز فریت دلنا که در زمینه مارتنزیت می باشد مقادیر سختی نوسان می کند. بطور معمول بدون لحاظ فریت دلنا در نواحی مرکزی سختی بیشتر است و به تدریج تارسیدن به فلز پایه میزان سختی کاهش می یابد.

#### 4- نتیجه گیری

در این مقاله عملیات سخت کاری لیزری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 با ضخامت 10 میلی متر به کمک لیزر حالت جامد پالسی Nd:YAG انجام گرفت. پارامتر متغیر در این مقاله فاصله موقعیت نقطه کانونی لیزر و انرژی پالس لیزر بود که دستاوردهای آن نتایج زیر را به همراه داشت:

- موقعیت نقطه کانونی لیزر پارامتر تأثیرگذاری بر میزان انرژی وارد شده به نمونه است، به طوری که با نزدیک شدن این فاصله به سطح مورد نظر، سطح دچار استحاله آفازی گشته و موجب دگرگونی فاز می شود.
- در نمونه E3 که سختی بالاتری را نسبت به دیگر نمونه ها به همراه داشت، در ساختار مارتنزیتی تشکیل شده فاز فریت دلتای کمتری مشاهده شده که منجر به افزایش سختی این نمونه نسبت به دیگر نمونه ها شده است.
- با فاصله گرفتن موقعیت نقطه کانونی لیزر از سطح فولاد، با توجه به واگرایی پرتو لیزر منطقه بیشتری تحت تأثیر عملیات حرارتی سطحی قرار می گیرد، اما این امر منجر به کاهش میزان انرژی پرتو لیزر شده و مقدار سختی و نیز عمق نفوذ کاهش می یابد تا جایی که پهنا و عمق سخت کاری هر دو کم می شوند تا اینکه دیگر پرتو لیزر بر روی

تصویر میکروساختار سطح سخت شده نمونه F6 می باشد. در نمونه F6 نسبت به نمونه E3 مقدار بیشتری از فاز فریت مشاهده شد. این فاز باعث شد که مقدار سختی در نمونه F6 نسبت به نمونه E3 کاهش یابد. در مواقعی که فرورونده ی ویکرز به داخل فاز فریت دلتا وارد می شد، مقدار سختی نشان داده شده کمتر از سختی های مجاور منطقه سخت شده بود. در نمونه E3 بخاطر تعامل اثر بیشتر لیزر با سطح فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 مقدار سختی بیشتر از نمونه های دیگر بود. زیرا با افزایش توان و کاهش موقعیت نقطه کانونی لیزر، مقدار فاز مارتنزیت بیشتری ظاهر گشت که خود باعث افزایش سختی سطحی فولاد مورد بررسی شد.

شکل 15، تصاویر متالوگرافی ریزساختار نمونه E3 فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 پس از سخت کاری سطحی لیزری را برای مناطق سطح سخت شده، منطقه میانی سخت شده (مرز بین ناحیه سخت شده و فلز پایه) و نیز ناحیه فلز پایه در زیر منطقه سخت شده را نشان می دهد. در ناحیه سخت شده، مارتنزیت های دانه ریز و فاز فریت دلتا بصورت پراکنده دیده می شود (شکل 15-a). بدلیل سرعت بالای سرد شدن و عدم زمان کافی برای انحلال فریت دلتا که ناقص انجام شده و در ساختار سخت شده باقی می ماند. این موضوع باعث پایین آمدن سختی در این نواحی شده است [17]. در هنگام اندازه گیری میکروسختی از ساختار فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410، در صورتی که فرورونده های ویکرز دستگاه میکروسختی روی فاز فریت دلتا فرود بیاید میزان سختی کاهش می یابد (شکل 9). همانطور که در شکل 15-a مشخص است، لیزر ناحیه ای را مورد عملیات سخت کاری سطحی قرار داده است. در این ناحیه مقدار فاز فریت دلتا مشاهده شد، که البته به نسبت دیگر نمونه ها، فاز فریت دلتای کمتری تشکیل شد.

در شکل 15-b سطح سخت شده فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 نشان داده شده است که از جهتی فاز مارتنزیت و فاز فریت دلتا را نشان می دهد. در شکل 15-c، قسمت میانی سطح سخت شده با فلز پایه نشان داده شد. همانطور که در شکل مشخص است، قسمت سخت شده به صورت منحنی مانند از قسمت فلز پایه که تحت تأثیر پرتو لیزر نبوده است، تفکیک و

<sup>2</sup> Transformation

<sup>1</sup> Dissolution

manual metal arc welding, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 209, No. 24, pp. 1-7, 2012.

[7] B. Mahmoudi, A. R. Sabour Aghdam, M. J. Torkamany, Controlled laser transformation hardening of martensitic stainless steel by pulsed Nd: YAG laser, *Electronic Science and Technology*, Vol. 8, No. 01, pp. 87-90, 2010.

[8] R. Li, Y. Jin, Zh. Li, K. Qi, A comparative study of high-power diode laser and CO2 laser surface hardening of AISI 1045 steel, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 09, pp. 3085-3091, 2014.

[9] Y. Kan, S. Zhang, L. Zhang, M. Cheng, H. Song, H. Lu, Healing behavior of micropores in powder metallurgy 316L stainless steel during hot forging and heat treatment, *Iron and Steel Research*, Vol. 21, No. 09, pp. 862-868, 2014.

[10] M. Bojinovic, N. Mole, B. Stok, A computer simulation study of the effects of temperature change rate on austenite kinetics in laser hardening, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 273, No. 02, pp. 60-76, 2015.

[11] A. Bien, M. Szkodo, Surface treatment of C80U steel by long CO2 laser pulses, *Materials Processing Technology*, Vol. 217, No. 03, pp. 114-121, 2015.

[12] P. Dumitrescu, P. Koshy, J. Stenekes, M. A. Elbestawi, High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 15, pp. 2009-2016, 2006.

[13] D. S. Badkar, K. S. Pandey, G. Buvanashkaran, 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*, Vol. 20, No. 06, pp. 1078-1091, 2010.

[14] F. Cordovilla, A. Garcia-Beltran, P. Sancho, J. Dominguez, L. Ruiz de-Lara, J. L. Ocana, Numerical and experimental analysis of the laser surface hardening with overlapped tracks to design the configuration of the process for Cr-Mo steels, *Materials and Design*, Vol. 102, No. 02, pp. 225-237, 2016.

[15] G. Telasang, J. D. Majumdar, G. Padmanabham, I. Manna, Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 261, No. 01, pp. 69-78, 2015.

[16] E. L. Langer, *Metallography and microstructures*, Ninth Edition, pp. 534-543, Ohio: ASM International, 1992.

[17] H. Chandler, *Heat Treater's Guide*, Third Edition, pp. 11-17, Ohio: ASM International, 1996.

سخت شدن فولاد بی تأثیر می‌شود.

- بیشینه سختی و بیشینه عمق سخت کاری مربوط به نمونه E3 بود که این سختی برابر با 747 ویکرز و عمق سختی از سطح برابر با 350 میکرومتر حاصل شد. تنظیمات این نمونه به قرار فرکانس پالس 15 هرتز، توان 236 وات، فاصله موقعیت کانونی 24 میلی‌متر، سرعت 2 میلی‌متر بر ثانیه، پهنای پالس 18 میلی‌ثانیه، انرژی پالس 15.75 ژول و توان پیک 1/055 وات می‌باشد.

### 5- مراجع

[1] E. Kannatey, Jr. Asibu, *Principles of Laser Materials Processing*, Second Edition, pp. 568-581, New Jersey: John Wiley and Sons, 2009.

[2] M. Moradi, M. Ghoreishi, M. Torkamany, J. Sabbaghzadeh, M. J. Hamed, An investigation on the effect of pulsed Nd: YAG laser welding parameters of stainless steel 1.4418, *Advanced Materials Research*, Vol. 383, No. 24, pp. 6247-6251, 2012.

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

[4] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, Kh. 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)

[5] S. A. A. Akbari Mousavi, A. R. Sufizadeh, Metallurgical investigations of pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 321 and AISI 630 stainless steels, *Materials and Design*, Vol. 30, No. 08, pp. 3150-3157, 2009.

[6] R. Puli, G. D. Janaki Ram, Wear and corrosion performance of AISI 410 martensitic stainless steel coatings produced using friction surfacing and