



بررسی تغییرات مورفولوژی و سختی سطح آلیاژ استیل 316L در اثر تابش دهی لیزری

فرشته باقری^۱، سپهر رازی^۲، محمود ملا باشی^۳

^۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش اتمی مولکولی

^۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشجوی دکتری گرایش اتمی مولکولی

^۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، استاد گروه اتمی مولکولی

چکیده

در این تحقیق اصلاح خواص سطح استیل ضد زنگ ۳۱۶L با تابش لیزر نانوثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی راهکارهای دستیابی به یک مورفولوژی همگن همراه با افزایش سختی سطح، بصورت تک مرحله‌ای و تنها با تابش لیزر بوده است.

از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی تغییرات مورفولوژی سطح پرتو دیده استفاده گردیده است. از طرف دیگر تغییرات شیمی سطح توسط طیف سنج تفرق اشعه ایکس بررسی شده و برای مطالعه‌ی تغییرات ساختاری و فازی از پراش اشعه ایکس بهره گرفته شده است. در نهایت تغییرات سختی سطح توسط ریز سختی سنج اندازه گیری گردیده است.

نتایج مربوط به تابش دهی سطح با شاریدگی‌های بالای لیزر نشان می‌دهند که امکان دستیابی به مورفولوژی یکنواخت در این شرایط وجود ندارد. از طرف دیگر نواحی از سطح که پوشیده از میکروساختار می‌باشند، دارای سختی به مراتب بالاتری در مقایسه با نمونه‌ی اولیه و یا نواحی ذوب و باز منجمد شده هستند. به منظور فراهم سازی شرایط بهینه برای تشکیل و رشد میکروساختارهای القایی لیزری در بخش‌های بیشتری از ناحیه‌ی پرتو دیده، شاریدگی‌های پایین تر لیزر مورد مطالعه قرار گرفتند و در نهایت مقدار 0.93 J/cm^2 به عنوان حالت ایده آل تشخیص داده شد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح لیزری سطوح؛ استیل ضد زنگ ۳۱۶؛ مورفولوژی؛ سختی سطح؛ ریزساختار القایی لیزری

^۳. mollabashi@iust.ac.ir

مقدمه

خواص مکانیکی و فیزیکی سطح مواد نقش عمده ای در طول عمر قطعات مهندسی دارند. امروزه می توان با ایجاد تغییر در مورفولوژی سطح، بدون اعمال تغییر در خواص مکانیکی بالک ماده، امکان دستیابی به محصولی را داشت که مجموعه ای از خواص مورد نظر، در بالک و سطح آن بصورت همزمان در دسترس باشند.

از دیر باز با اعمال انواع روش ها، سعی در ارتقا خواص سطح شده است. از جمله این روشها می توان به لایه نشانی، آب کاری الکتریکی، عملیات حرارتی، فرایندهای رسوب بخار اشاره کرد [۱-۳]

امروزه پیرایش لیزری سطوح از جمله دیگر روش های قابل کنترل و انعطاف پذیر به شمار می رود. لیزر در آماده سازی سطوح مزایای منحصر به فردی دارد. از آن جمله می توان به دور بودن از آلودگی های شیمیایی، انتقال کنترل شده حرارت، بدون تماس بودن، قابلیت اتوماسیون، تکرارپذیری راحت، پیچیدگی کم و به صرفه بودن اشاره کرد. در سال های اخیر گزارش های متعددی در راستای موفقیت تکنیک پیرایش لیزری سطوح به منظور افزایش مقاومت در برابر خوردگی، سایش و همچنین سختی مواد منتشر شده است [۴-۷]

امروزه سختی سازی لیزری سطح با بسیاری از روش های معمول در حال رقابت است. به خصوص برای نواحی گسسته و کوچک که لازم نباشد تمام سطح تحت عملیات قرار گیرد و یا برای سطوح با اشکال هندسی پیچیده، می توان از تکنیک پیرایش لیزری استفاده کرد [۸]

لیزر تابیده شده با اعمال گرما و استرس، باعث تغییر مورفولوژی، شیمی سطح و ساختار بلوری آن گشته و از آن طریق مشخصه های سطح را تغییر می دهد.

علی رغم پیشرفت های جدی تحقق یافته در زمینه ی تکنیک پیرایش لیزری سطوح، با این حال هنوز برای بسیاری از نیازهای صنعتی حالت بهینه معرفی نگردیده است. از آن جمله می توان به شرایطی اشاره کرد که در آن نیاز به پوشش سطح بصورت یکنواخت با نانو یا میکروساختارها باشد. از آنجاییکه توزیع شدت باریکه اغلب لیزرها بصورت گوسی می باشد، یافتن شرایط بهینه ی تابش دهی برای تحقق این امر کار بسیار دشواری است.

به عنوان مثالی دیگر می توان به افزایش سختی استیل های آستنیتی کم کربن اشاره داشت که سخت سازی آن ها با روش های معمول حرارتی امکان پذیر نبوده [۹ و ۱۰] و معمولا روش های کربن دهی [۴] و آلیاژسازی سطحی برای آن ها توصیه می شود که پیچیدگی های خاص خود را دارند. راه حل دیگر روش های مکانیکی برای ایجاد فاز مارتنزیت که فاز سخت در فلزات است، می باشد [۱۱] که در اثر استرس ناشی از تابش لیزر، انتظار چنین تغییراتی نیز می رود. [۱۲]. این در حالی است که این فلزات از جمله ی کلیدی ترین مواد مورد استفاده

در صنایعی همچون پتروشیمی، هوافضا، خودروسازی و یا ساخت کاشتنی‌های زیستی (ایمپلنت‌ها) هستند که در آن‌ها نیاز به مقاومت بالا در برابر خوردگی و سختی سطح افزایش یافته می‌باشد.

در راستای این نیاز صنعتی، در این پژوهش بر روی بررسی امکان افزایش سختی سطح با کنترل مورفولوژی آن متمرکز شدیم. برای این منظور تلاش گردیده است تا با تغییر پارامترهای تابش دهی، شرایط بهینه برای ایجاد میکروساختارهای القایی لیزری را فراهم ساخته و از طریق پوشش ناحیه پرتو دیده با این ساختارها، میزان سختی آن را افزایش دهیم.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق تغییرات مشخصه‌های سطح استیل ضد زنگ 316L با تابش پالس‌های متوالی از لیزر فرسرخ نانو ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. جزئیات مربوط به عناصر تشکیل دهنده استیل مورد مطالعه در جدول ۱ خلاصه گردیده اند. نمونه‌ها با استفاده از گیوتین در اندازه‌های $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 1\text{mm}$ (به ترتیب از چپ به راست، طول، عرض و ضخامت) برش داده شدند. قبل از انجام هر گونه آزمایش و به منظور افزایش یکنواختی سطح، نمونه‌ها تا زبری میانگین $350 \pm 21 \text{ nm}$ بصورت مکانیکی مورد پولیش کاری قرار گرفتند. سپس به منظور پاک‌سازی سطح از براده‌ها و آلودگی‌های سطحی، به مدت ۲۰ دقیقه در استون و حمام اولتراسونیک شستشو داده شده و در نهایت در اتمسفر آزمایشگاه خشک شدند.

از لیزر پالسی نئودیمیموم-یاگ (Nd-YAG) با طول موج 1064 nm و پهنای پالس 12 ns برای پرتو دهی سطوح استفاده گردید. نرخ تکرار پالس لیزر بر روی 10 HZ تثبیت شد و اثر تابش 500 و 1500 پالس در هر نقطه برای شاریدگی‌های مختلف لیزر مورد مطالعه قرار گرفت. شایان ذکر است که کلیه‌ی آزمایش‌ها در اتمسفر هوا و در دمای حدود 25°C و رطوبت تقریباً 20% انجام گرفت.

مورفولوژی سطح پس از اصلاح آن توسط لیزر با استفاده از میکروسکوپ نوری (OM) مدل HUVITZ ساخت کشور کره و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA\\TESCAN مورد مطالعه قرار گرفت و به منظور مطالعه‌ی تغییرات حاصل در شیمی سطح از طیف سنج تفرق اشعه ایکس (EDX)، استفاده گردید.

اندازه‌گیری سختی سطح توسط ریزسختی سنج SCTMC Shanghai Testermachine انجام شد. عدد سختی سطح با بار 49 گرم با دندانگذار مربعی از جنس الماس و در زمان 15 ثاتیه اندازه‌گیری گردید. به منظور افزایش دقت حداقل 5 بار اندازه‌گیری برای هر ناحیه صورت گرفت.

به منظور مطالعه‌ی تغییرات ساختاری و فازی نمونه‌های پرتو دیده، از پراش اشعه ایکس استفاده شد. ثبت الگوی پراش اشعه ایکس توسط دستگاه تجاری PANalytical X-Ray diffraction محقق گردید که

طبق استانداردهای موجود، اندازه‌گیری‌ها با تنظیمات 40 kv و 40 mA و زاویه روبشی در محدوده ۸۰~۲۰ درجه و هدف فلزی مس صورت گرفتند.

نتایج و بحث

از آنجا که شاریدگی آستانه‌کنندگی برای فلزات اغلب مابین ۱ الی 10 J/cm^2 گزارش گردیده است [۱۳]، شاریدگی‌های لیزری ۴/۳، ۵/۵۷ و ۶/۰۶ (J/cm^2) و تعداد پالس ۵۰۰ و ۱۵۰۰ در مرحله‌ی اول به عنوان شرایط پرتو دهی انتخاب گردیدند.

تصاویر میکروسکوپ SEM مربوط به نمونه‌های تابش دیده در شکل ۱ نمایش داده شده است. بنا به نتایج، با افزایش شاریدگی لیزر، اندازه‌ی ناحیه‌ی تغییر فرم یافته افزایش چشم‌گیری می‌یابد. علاوه بر ابعاد، در شاریدگی $6/06 \text{ J/cm}^2$ کراتری نیز در سطح شکل می‌گیرد که در انرژی‌های پایین‌تر ملاحظه نمی‌گردد. از جمله‌ی دیگر تفاوت‌های قابل مشاهده در این شاریدگی در مقایسه با مقادیر کمتر، پاشش مواد مذاب به نواحی اطراف لکه مورد تابش می‌باشد. افزایش تعداد پالس تابشی نیز بی‌تاثیر نبوده و میزان بیشتری از میکروساختارها در تعداد پالس بیشتر در سطح تشکیل می‌گردند.

به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات مورفولوژی سطوح پرتو دیده، نمونه‌ی (ت) از شکل ۱ انتخاب گردید و بخش‌های مختلف لکه‌ی پرتو دیده با بزرگ‌نمایی بالاتر مورد مطالعه قرار گرفتند. همانگونه که در شکل ۲ نمایش داده شده است، در اصل مورفولوژی لکه‌ی تابش دیده را می‌توان به سه زیر بخش که با حروف A, B و C نمایش داده شده‌اند، تقسیم کرد. ناحیه‌ی A شامل میکروساختارهایی می‌باشد که در اثر تابش دهی در سطح شکل گرفته‌اند. ناحیه‌ی B بخشی از سطح را نمایش می‌دهد که در اثر جذب پرتو تابیده، ذوب را تجربه کرده و پس از باز منجمد شدن صاف گردیده است. در ناحیه‌ی C برخلاف دو ناحیه A و B سطح نمونه حالت موج-داری پیدا کرده است.

از آنجاییکه هر پالس لیزر مورد استفاده دارای دوام زمانی نانو ثانیه می‌باشد که در مقایسه با فرآیندهای آسایش الکترون - فونون که برای فلزات از مرتبه‌ی پیکوثانیه هستند [۱۳]، به مراتب بسیار بلندتر است، لذا مکانیسم اندرکنش آن‌ها با استیل را می‌توان نور-حرارتی در نظر گرفت. عدم یکنواختی مورفولوژی نهایی را می‌توان به وجود شرایط متلاطم در پلوم پلاسمایی و فرآیندهای هیدرودینامیکی آشوبناک مرتبط دانست [۱۴]. نتایج مربوط به تغییرات سختی سطح نمونه‌های پرتو دیده در شکل ۳ نمایش داده شده است. تنها ناحیه‌ای از لکه‌ی تابش دیده که در آن در مقایسه‌ی با حالت قبل از پرتو دهی افزایش سختی مشاهده می‌گردد، ناحیه‌ی A می‌باشد. به منظور بررسی دلیل این افزایش، تغییرات شیمی این ناحیه از سطح مورد بررسی قرار گرفت، شکل ۴. نتایج افزایش ۲۷ درصدی کربن و ۲۰ درصدی اکسیژن را برای این ناحیه نسبت به حالت اولیه نشان می‌دهند.

مشاهدات تجربی ارائه شده در بالا اثبات می‌کنند که اگر با تغییر پارامترهای لیزری بتوان شرایطی را فراهم ساخت که در ناحیه‌ی بیشتری از سطح ساختارهای میکروابعاد تشکیل گردند، آن سطح دارای میزان سختی

بیشتری نسبت به حالت اول خواهد بود. برای این منظور تاثیر تابش‌های با شاریدگی‌های پایین‌تر بر روی مشخصه‌های سطح مورد مطالعه قرار گرفت.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به نمونه‌های تابش دیده با ۱۵۰۰ پالس از باریکه‌های لیزری با شاریدگی - های $0/93 \text{ J/cm}^2$ تا $2/51 \text{ J/cm}^2$ در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش شاریدگی لیزر، ناحیه‌ی کمتری از سطح از میکروساختارهای القایی لیزری پوشیده می‌باشد. این درحالی است که در تابش دهی با شاریدگی $0/93 \text{ J/cm}^2$ بصورت شگفت‌انگیزی کل لکه‌ی پرتودیده بصورت یکنواخت پوشیده از میکروساختارهای سطحی است. این شرایط را می‌توان حالتی ایدآل برای بهینه‌سازی مورفولوژی دانست.

نتایج مربوط به اندازه‌گیری میکروسختی، شکل ۶، بار دیگر نشان می‌دهند که سطوحی که درصد بیشتری از آن‌ها پوشیده از میکروساختارهای القایی لیزری است، سخت‌تر می‌باشند. به منظور بررسی دقیق‌تر عوامل افزایش سختی، تغییرات ساختاری و فازی نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به شکل ۷ فاز آستنیت تنها فاز موجود قبل از تابش می‌باشد ولی بعد از تابش فاز α' مارتنزیت هم در الگوهای پراشی ظاهر می‌گردد.

بنابراین یکی دیگر از دلایل افزایش میزان سختی در نمونه‌های تابش دیده، می‌تواند اعمال استرس و فشار و لذا تشکیل فاز مارتنزیت باشد. اچ کردن شیمیایی نمونه‌های تابش دیده با محلول $50\% \text{ HCl} + 25\% \text{ HNO}_3 + 25\% \text{ H}_2\text{O}$ به مدت ۴۰ ثانیه اطلاعات مضاعفی در این راستا بدست می‌دهد که همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، با افزایش شاریدگی لیزر تابشی اندازه‌ی دانه‌بندی‌های سطح افزایش می‌یابد. این رفتار را می‌توان به دریافت انرژی بیشتر توسط ماده در شاریدگی‌های تابشی بالاتر و افزایش میزان ذوب و عمق حوضچه‌ی مذاب ربط داد [۱۵] که در نتیجه زمان طولانی‌تری برای سرد شدن و باز انجماد مذاب نیاز خواهد بود. بنابراین در طول این زمان طولانی ریزدانه‌ها فرصت کافی برای بزرگ‌تر شدن را دارا می‌باشند.

به اختصار دلیل افزایش سختی نمونه‌های تابش دیده را می‌توان به این صورت دسته‌بندی کرد: (۱) تشکیل میکروساختارها و استحکام مکانیکی آن‌ها، (۲) اکسیداسون سطح، (۳) افزایش میزان کربن سطح، (۴) تشکیل فاز مارتنزیت و (۵) ریزتر شدن دانه‌بندی‌ها ربط داد.

نتیجه‌گیری

تاثیر تابش دهی لیزری بر روی مشخصه‌های استیل ضد زنگ ۳۱۶ L بویژه مورفولوژی سطح و سختی آن مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج به اختصار چنین ارائه می‌گردند:

۱. پرتودهی لیزری سطح استیل ۳۱۶ L با شاریدگی‌های بالا منجر به ماده برداری‌های جدی از سطح در اثر فرآیندهای حرارتی می‌شود که مورفولوژی کاملاً ناهمگن را برای محصول نهایی سبب می‌گردد.
۲. تغییرات مورفولوژی سطح وابسته‌ی به هر دوی شار لیزر و تعداد پالس تابشی می‌باشد.

۳. نواحی پوشیده از میکروساختارهای القایی لیزری به عنوان سخت ترین بخش‌های ناحیه‌ی پرتو دیده تشخیص داده شدند.
۴. افزایش کربن و اکسیژن در نواحی پوشیده از میکروساختارها به میزان تقریبی به ترتیب ۲۷٪ و ۲۰٪ نسبت به حالت اولیه نمونه‌ها و همچنین استحکام مکانیکی بالای خود این ساختارها، به عنوان دلیل افزایش سختی این نواحی شناسایی شدند.
۵. کاهش شاریدگی لیزر تابشی باعث افزایش شکل گیری و رشد میکروساختارهای القایی لیزری می‌گردد. بطوریکه در شاریدگی 0.93 J/cm^2 کل ناحیه‌ی پرتو دیده بصورت جالب توجهی پوشیده از میکروساختارها می‌شود.
۶. نتایج پراش اشعه ایکس از سطوح تابش دیده تشکیل فاز مارتنزیت که فاز سخت در فلزات است را تایید می‌کند.
۷. مطالعه‌ی سطوح پرتو دیده و سپس اچ شده بصورت شیمیایی، توسط میکروسکوپ نوری، ریزتر بودن دانه بندی‌ها را در مورد نمونه‌های تابش دیده با شاریدگی‌های پایین تر اثبات می‌کند.
۸. افزایش میزان کربن سطح، اکسیداسیون آن و تشکیل فاز مارتنزیت به همراه استحکام مکانیکی خود میکروساختارهای شکل گرفته و همچنین ریزتر شدن دانه‌بندی‌ها، به عنوان دلایل افزایش سختی پس از تابش دهی لیزری تشخیص داده شدند.
۹. پرتو دهی لیزری سطح با شاریدگی 0.93 J/cm^2 و تعداد ۱۵۰۰ پالس، به عنوان بهینه‌ترین شرایط شناسایی گردید که در نتیجه‌ی آن سطح بصورت همگن پوشیده از میکروساختارهای القایی لیزری گشته و سختی آن در مقایسه با قبل از تابش حدود ۳۵ درصد افزایش می‌یابد. این میزان افزایش را می‌توان موفقیت خوبی برای این نوع از استیل که بسیار کم کربن است، به حساب آورد.

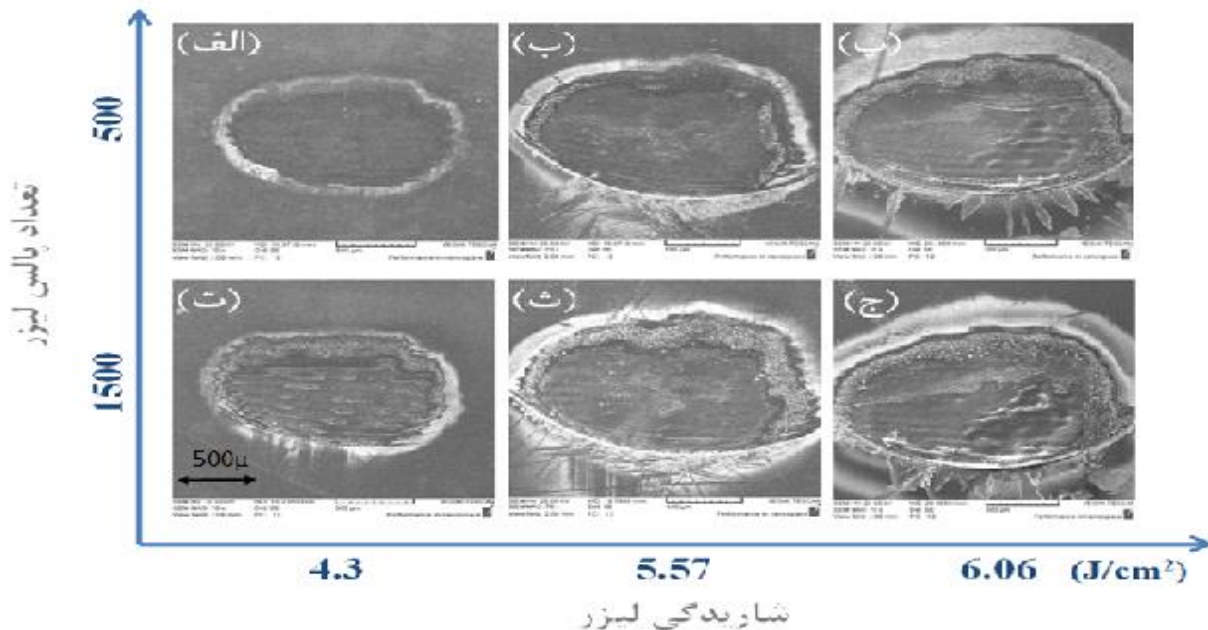
مراجع

1. S. Habibzadeh, L. Li, D. Shum-Tim, E. C. Davis, and S. Omanovic, "Electrochemical polishing as a 316L stainless steel surface treatment method: Towards the improvement of biocompatibility," *Corrosion Science*, 87, 2014, 89–100.
2. Y. Li, Z. Wang, and L. Wang, "Surface properties of nitrated layer on AISI 316L austenitic stainless steel produced by high temperature plasma nitriding in short time," *Appl. Surf. Sci.*, 298, 2014, 243-250.
3. M. Nezakat, H. Akhiani, M. Hoseini, and J. Szpunar, "Effect of thermo-mechanical processing on texture evolution in austenitic stainless steel 316L," *Mater. Characteriz.*, 98, 2014, 10-17.
4. I.Y. Khalfallah, M.N. Rahoma, J.H. Abboud, and K.Y. Benyounis, "Microstructure and corrosion behavior of austenitic stainless steel treated with laser", *Opt. Laser Technol.*, 43, 2011, 806-813.
5. M.E. Khosroshahi, M. Mahmoodi and J. Tavakoli, " Characterization of Ti6Al4V implant surface treated by Nd:YAG laser and emery paper for orthopaedic applications", *Applied Surface Science*, 253, 2007, 8772–8781.

6. B. Mahmoudi, M.J. Torkamany, A.R. Sabour Rouh Aghdam and J. Sabbaghzade, " Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd:YAG laser ", *Materials and Design*, 31 ,2010, 2553–2560.
7. L.J. Yang, J. Tang, M.L. Wang, Y. Wang, Y.B. Chen, "Surface characteristic of stainless steel sheet after pulsed laser forming", *Applied Surface Science*,256, 2010,7018-7026.
8. J.C. Ion, "Laser transformation hardening", *Surf. Eng.* 18, 2002, 14–31.
9. Evans Chikarakara, Sumsun Naher and Dermot Brabazon, " Spinodal decomposition in AISI 316L stainless steel via high-speed laser remelting ", *Applied Surface Science*, 302, 2014, 318–321.
10. Evans Chikarakara, PhD Thesis: Laser Surface Modification Of Biomedical Alloys, Dublin City University, 2012.
11. T.W. Shyr, J.W. Shie, Sh.J. Huang, Sh.T. Yang and W.S. Hwang, " Phase transformation of 316L stainless steel from wire to fiber", *Materials Chemistry and Physics*, 122, 2010, 273–277.
12. H.G.Wang, Y.H.Guan, T.L.Chen, IT.Zhang, " Astudy of thermal stresses during laser quenching", *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 1997, 550-553.
13. K. Sugioka, Laser Precision Microfabrication, 2010, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
14. S. Razi, Kh. Madanipour, and M. Mollabashi, " Improving the hydrophilicity of metallic surfaces by nanosecond pulsed laser surface modification", *Journal Of Laser Application*, 27, 2015, 042006 1-9 .
15. Zh. Zhang, P.Lin, D. Cong, Sh. Kong, H.Zhou, L.Ren , " The characteristics of treated zone processed by pulsed Nd-YAG lasers surface remelting on hot work steel", *Optics & Laser Technology* , 64, 2014, 227–234

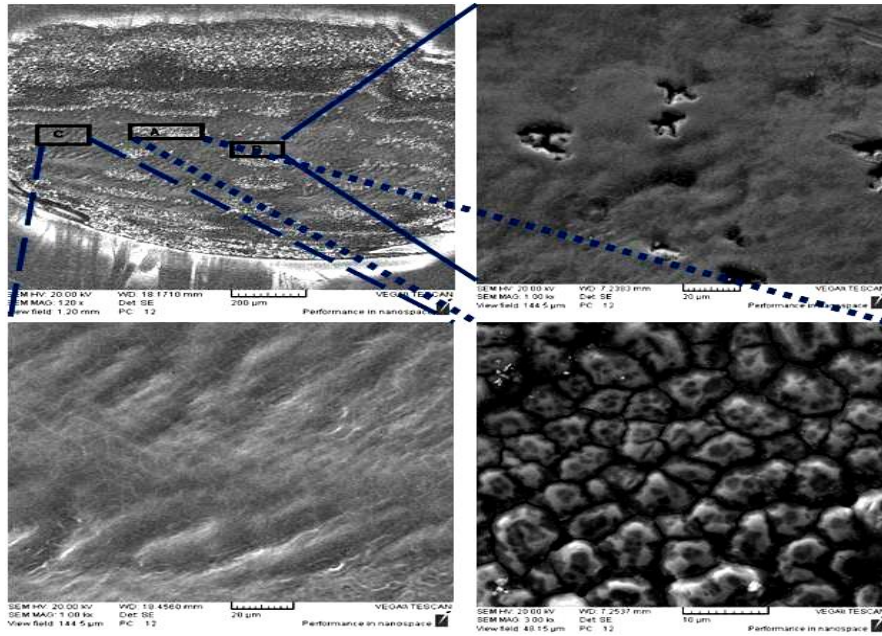
جدول ۱: عناصر تشکیل دهنده استیل AISI 316L

Element	Cr	Ni	Mo	Si	Co	S	P	C	N	Mn	Fe
Wt%	16.82	10.14	2.03	0.55	0.08	0.03	0.03	0.02	0.061	1.51	68.72



شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به سطح استیل تابش دیده با تعداد پالس و شاریدگی های

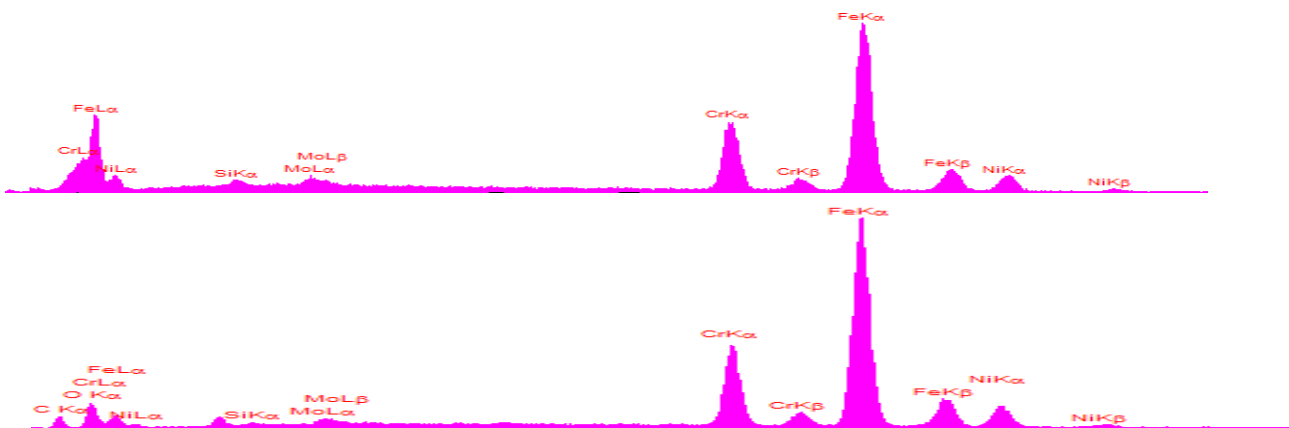
لیزری متفاوت



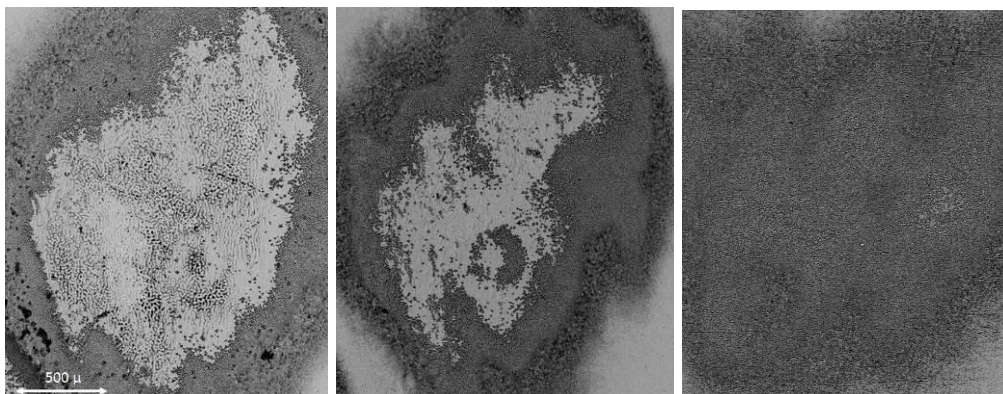
شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به تابش با شاریدگی $4/3 \text{ J/cm}^2$ و تعداد پالس ۱۵۰۰



شکل ۳: نتایج سختی سنجی قبل (زیر لایه) و پس از تابش در نواحی C, B, A نمایش داده شده در شکل ۲



شکل ۴: نتایج EDX سطح استیل، قبل (نمودار بالا) و بعد (نمودار پایین) از تابش لیزر با شاریدگی $4/3 \text{ J/cm}^2$



(الف) (ب) (ج)

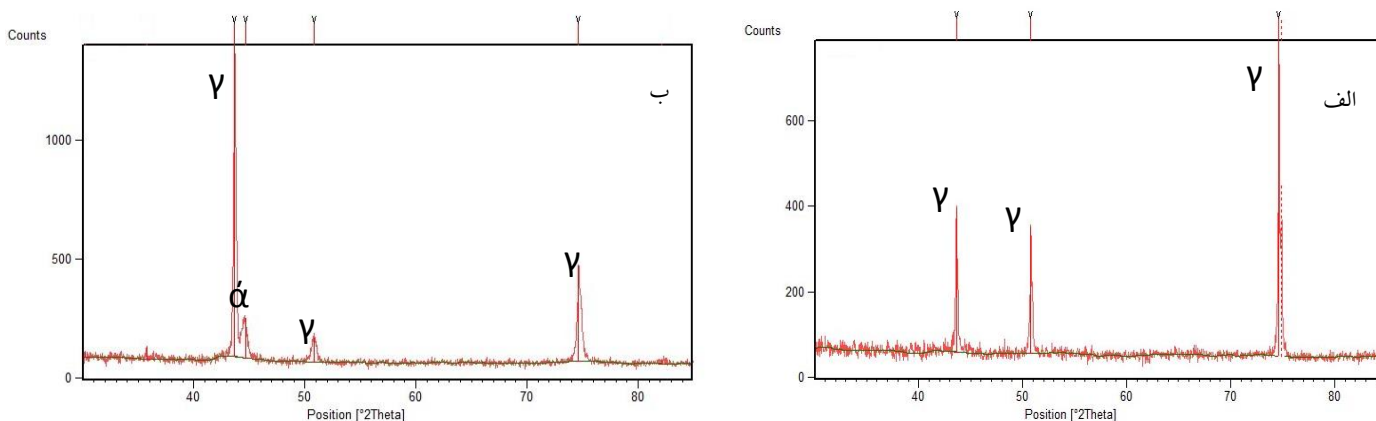
شکل ۵: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح استیل پس از تابش ۱۵۰۰ پالس لیزر با شاریدگی های

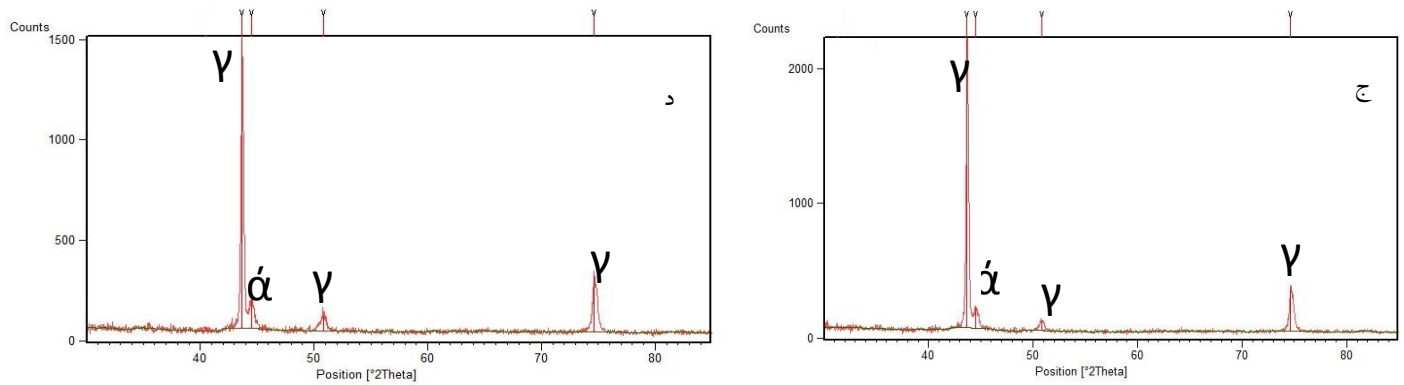
(الف) $0/93 \text{ J/cm}^2$ (ب) $1/77 \text{ J/cm}^2$ (ج) $2/51 \text{ J/cm}^2$



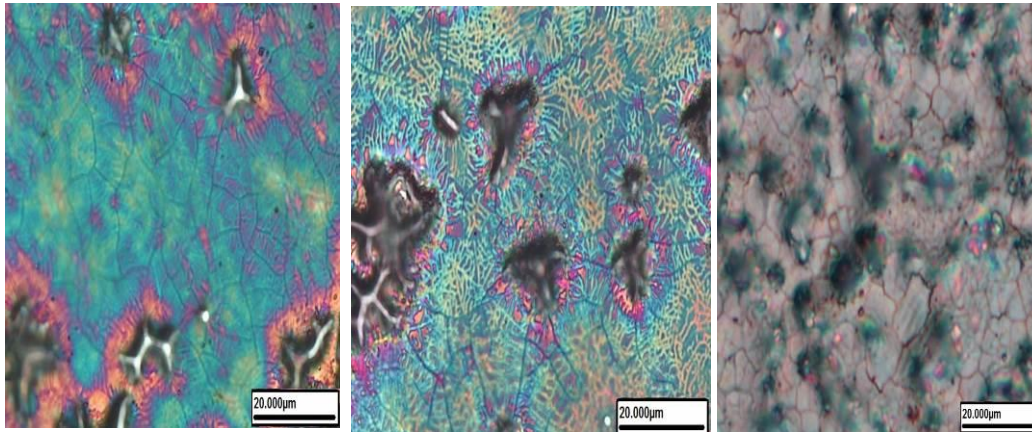
شکل ۶: نتایج سختی سنجی قبل (الف) و بعد از تابش ۱۵۰۰ پالس لیزر با شاریدگی های (ب) $0/93 \text{ J/cm}^2$

(ج) $1/77 \text{ J/cm}^2$ (د) $2/51 \text{ J/cm}^2$





شکل ۷: الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) قبل (الف) و بعد از تابش ۱۵۰۰ پالس لیزر و شاریدگی های (ب) $۰/۹۳ \text{ J/cm}^2$ (ج) $۱/۷۷ \text{ J/cm}^2$ (د) $۲/۵۱ \text{ J/cm}^2$



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپ نوری سطح نمونه های تابش دیده با تعداد ۱۵۰۰ پالس و شاریدگی های (الف) $۰/۹۳ \text{ J/cm}^2$ (ب) $۱/۷۷ \text{ J/cm}^2$ (ج) $۲/۵۱ \text{ J/cm}^2$